

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

БОРСУК Олена Валентинівна

УДК 614.841.45

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ
ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ
МІНЕРАЛОВАТНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ**

21.06.02 – пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент **Нуянзін Олександр Михайлович**, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, начальник науково-дослідної лабораторії інновацій у сфері цивільної безпеки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Ніжник Вадим Васильович**, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, начальник науково-дослідного центру протипожежного захисту;

кандидат технічних наук **Пазен Олег Юрійович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки.

Захист відбудеться «22» квітня 2021 р. об 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79000, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79000, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

Автореферат розісланий «18» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук



Роман ЯКОВЧУК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз даних щодо статистики пожеж в Україні показує, що за останні 5 років у кількість пожеж у будівлях із сталевими каркасами складає одну третину від загальної кількості. Більш як половина елементів сталевих каркасів будівель даного типу потребує улаштування вогнезахисних систем. Як відомо, одну з найбільш відповідальних функцій відіграють сталеві балки.

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, у силу невеликої міцності мінераловатних панелей існує велика імовірність відшарування мінераловатного облицювання по її шарах і як слідство, втрати вогнезахисної здатності протягом часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, що встановлюється відповідним класом вогнестійкості. Тож установа відповідності тому чи іншому класу вогнестійкості має бути піддана корекції з огляду на таку обставину.

Аналіз наукових робіт, виконаних у галузі вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисними системами таких дослідників як: Ройтман М. Я., Беліков А. С., Фомін С. Л., Круковський П. Г., Шмуклер В. С., Демчина Б. Г., Ватуля Г. Л., Поздєєв С. В., Семерак М. М., Ніжник В. В., Некора О. В., Шналь Т. М., Нуянзін О. М., Пазен О. Ю., Barder D., Bartelemy B., Nordheim E., Janssens M. L., White R. та інших, показав, що методи оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням з огляду на можливість відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання. Це є стримуючою обставиною для застосування сталевих балок із мінераловатним вогнезахистом або є причиною помилок при проєктуванні вогнестійких сталевих конструкцій будівель та споруд з точки зору їхньої пожежної безпеки.

Розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих балок на умови відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання є актуальною науковою задачею, розв'язання якої буде науковим підґрунтям удосконалення розрахункових методів прогнозування вогнестійкості даних конструкцій, що у свою чергу є частиною передумов забезпечення їх відповідності нормованим класам вогнестійкості вищевказаних будівельних конструкцій та підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд, зведених на їх основі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилось на виконання «Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої» від 27.06.2014, розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 N 844-р "Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року", під час виконання науково-дослідної роботи в ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України: «Розробка методу оцінки ефективності вогнезахисту несучих дерев'яних будівельних конструкцій» (№ держреєстрації 0114U002707), в якій здобувач була виконавцем.

Ідея роботи вбачається у створенні передумов гарантування нормованої вогнестійкості сталевих балок з мінераловатним вогнезахисним облицюванням шляхом удосконалення методів прогнозування часових меж відшарування вогнезахисного облицювання і відповідно розвиток на їх основі коректних методів

розрахункової оцінки вогнестійкості даних конструкцій, що враховують закономірності впливу конструктивних параметрів подібних сталевих балок за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Мета роботи полягає у розкритті закономірностей настання втрати вогнезахисної здатності внаслідок відшарування мінераловатного вогнезахисту сталевих балок від часу теплового впливу пожежі як наукового підґрунтя удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості балок такого типу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналітичні дослідження статистичних даних щодо пожеж в Україні за останні роки, а також проаналізувати нормативну базу, яка регламентує вимоги щодо нормування забезпечення вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахистом;
- розробити методику експериментальних досліджень з вогневих випробувань сталевих балок з мінераловатним вогнезахисним облицюванням для вивчення температури їх нагрівання під впливом стандартного температурного режиму пожежі;
- розробити методику та визначити на її основі температурні залежності теплофізичних характеристик мінераловатного облицювання на основі проведених експериментальних досліджень сталевих балок, також виявити закономірності досягнення критичних температур при використанні даних характеристик у залежності від конструктивних параметрів даного типу балок;
- розробити методику математичного моделювання поведінки мінераловатного вогнезахисного облицювання із можливістю його відшарування під тепловим впливом стандартного температурного режиму пожежі;
- із використанням розроблених методик виявити закономірності залежності часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання у залежності від конструктивних параметрів сталевих балок із даним типом вогнезахисту;
- розробити методику розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості його відшарування під час теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Об'єкт дослідження – вогнестійкість сталевих балок з мінераловатним вогнезахисним облицюванням та процес прогнозування його відшарування під впливом пожежі.

Предмет дослідження – вплив конструктивних параметрів сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням та рівня механічного навантаження за умов стандартного температурного впливу пожежі на прогнозовані значення часу відшарування вогнезахисного облицювання.

Методи досліджень. При статистичному аналізі пожеж та огляду досліджень у даній галузі застосовувався аналітичний метод. Для дослідження температурних даних та теплофізичних параметрів мінераловати проводилися вогневі випробування, результати яких були інтерпретовані стандартизованими математичними методами. Під час моделювання поведінки сталевої балки із мінераловатним вогнезахисним облицюванням застосовані математичні методи, засновані на використанні загальних рівнянь динаміки, а також метод кінцевих елементів для апроксимації даних рівнянь. Для розробки математичної моделі прогнозування часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання був проведений повний факторний експеримент.

Вивчення достовірності та адекватності температурних результатів вогневих випробувань сталевих балок з мінераловатним вогнезахистом при впливі стандартного температурного режиму пожежі застосовані методи математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розкритті закономірностей залежності часу настання моменту відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання від конструктивних параметрів сталевих балок із таким типом вогнезахисту як наукове підґрунтя для удосконалення методів розрахункової оцінки вогнестійкості даних конструкцій. При цьому *уперше*:

– встановлено, що залежність часу досягнення критичної температури у вигляді регресійної залежності від значення критичної температури $\theta_{кр}$ та товщини d_p вогнезахисного мінераловатного облицювання $U = 33,938 + 1,397 \cdot d_p - 0,081 \cdot \theta_{кр} + 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot d_p \cdot \theta_{кр}$ і на її основі побудована відповідна номограма;

– встановлена залежність часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок під впливом стандартного температурного режиму пожежі від їх коефіцієнту перерізу A/V_m , товщини мінераловатного облицювання d_p та рівня навантаження μ_f , що має вигляд $t_c = 44,4 - 0,0599 \cdot A/V_m + 0,725 \cdot d - 4,813 \mu_f - 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot A/V_m \cdot d - 0,0314 \cdot A/V_m \mu_f - 0,178 \cdot d \cdot \mu_f + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \mu_f$;

– з урахуванням виявлених закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження сталевих балок на час відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання під час впливу стандартного температурного режиму пожежі обґрунтовано та запропоновано удосконалений метод розрахункової оцінки вогнестійкості елементів конструкцій даного типу.

Набуло подальшого розвитку застосування розрахункових стандартних методів розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним облицюванням для визначення відповідних вихідних даних для проектування споруд з їх застосуванням.

Удосконалено науково-методичну базу забезпечення нормованої вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій із вогнезахистом.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується результатами аналізу літературних джерел; відповідністю методів дослідження поставленим в роботі меті і задачам; застосуванням аналітичних методів досліджень; необхідним об'ємом даних, отриманих під час проведення експериментальних досліджень з використанням методів випробувань, що регламентуються чинними національними стандартами, метрологічно атестованого обладнання та повірених засобів вимірювання; задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також апробацією та практичним впровадженням результатів проведених досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці удосконаленого розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним мінераловатним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі, що дозволяє встановити відповідність даних конструкцій відповідному класу вогнестійкості. Це дозволяє підвищити точність розрахунків. Розроблена номограма для визначення часу відшарування мінераловатного облицювання дає змогу більш точно оцінити вогнестійкість при

використанні звичайних стандартних методів розрахунку і є підґрунтям щодо удосконалення та доповнення відповідних нормативних документів.

Розроблений метод розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням впроваджено в діяльність дослідно-випробувальної лабораторії аварійно-рятувального загону спеціального призначення Управління ДСНС України у Черкаській області, в освітній процес Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України під час викладання навчальних дисциплін «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій» та «Стійкість будівель та споруд при пожежі» та в наукову діяльність науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту під час виконання науково-дослідної роботи під шифром – «Висотні громадські будинки».

Особистий внесок здобувачки полягає в проведенні літературного огляду щодо стану питання вогнестійкості сталевих балок двотаврового перерізу із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, формулюванні ідеї роботи, визначенні мети і завдань досліджень, об'єкту та предмету досліджень; розробці методики експериментальних досліджень та їх проведення; обробці отриманих даних, розробці методики розрахунку теплофізичних характеристик мінераловатного облицювання та методики математичного моделювання поведінки даної балки в умовах пожежі, проведення повного факторного експерименту щодо визначення часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання під впливом стандартного температурного режиму пожежі. Участь здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, який наведено в списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на всеукраїнських, міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях, а саме:

- V Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2013 р.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Иновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций» (г. Минск, 2013 г.);
- 16 Всеукраїнській конференції рятувальників (м. Київ, 2014 р.);
- VI Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2014 р.);
- VII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2016 р.);
- VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2017 р.);
- X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2020 р.);
- Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність на транспорті» (м. Харків: УкрДУЗТ, 2020 р.).

Публікації. Основний зміст роботи викладено у 8 наукових працях, з них: 1 стаття у закордонному виданні з міжнародною індексацією Scopus, 7 статей у фахових виданнях України. Результати досліджень представлено у тезах 8 доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 117 найменувань, містить 170 сторінок друкованого тексту, 29 таблиць, 64 рисунки, 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і завдання дослідження, показані наукова новизна і практичне значення роботи, та наведено відомості про апробацію та публікацію результатів досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану нормування вогнестійкості сталевих балок та розрахункових методів її оцінки, а також показані статистичні дані щодо пожеж у будівлях і спорудах із сталевими конструкціями.



Рис. 1 Вигляд навантажень балок до початку випробувань

При виникненні пожежі велике значення для безпеки людей, які перебувають у будівлі та проводять роботи по її ліквідації, має ступінь вогнестійкості несучих конструкцій. Особливо це важливо для несучих металевих конструкцій, які мають високу теплопровідність і для яких критичною температурою настання граничного стану з втрати несучої здатності, з подальшим руйнуванням, вважається 400–620 °С.

Експериментальні методи випробувань передбачають визначення часового проміжку піддавання високотемпературним впливам зразків сталевих конструкцій до настання втрати несучої здатності. Головним обладнанням для проведення експериментальних досліджень на вогнестійкість є випробувальна піч, в якій мають створюватися умови стандартного температурного режиму та надлишкового тиску, а конструктивні складові містити обладнання для спирання зразка та його навантаження, що імітує реальну роботу конструкції. Приклад шарнірного кріплення навантажених балок зображений на рис.1.

У результаті проведеного в розділі аналізу літературних джерел з'ясовано, що застосування мінераловатного вогнезахисту є дуже перспективним для підвищення вогнестійкості сталевих балок, проте істотними перешкодами для його повсюдного впровадження є обмеженість даних щодо теплофізичних характеристик даного вогнезахисного облицювання. Крім цього важливою обставиною є необхідність врахування раптового відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання і як наслідок – втрата вогнезахисної здатності. За таких умов вивчення поведінки сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням є актуальною задачею. У зв'язку із викладеним, були поставлені мета та завдання досліджень.

На основі проведеного огляду літератури сформульовано завдання, вирішення яких дозволило досягти поставленої в роботі мети.

У другому розділі описано методи та засоби випробувань на вогнестійкість з визначення температурних меж вогнестійкості металевих зразків з вогнезахисним облицюванням мінераловатними плитами. Також було описано хід експериментальних досліджень та умови, за яких вони проводились.

Проведення експериментальних вогневого випробування для встановлення меж вогнестійкості сталевих колон з вогнезахисним облицюванням мінераловатним

покриттям здійснювалось відповідно до чинних нормативних документів. Для експерименту використано вогневу піч, що пройшла атестацію відповідно ГОСТ 24555-81 (атестат № 24-2/1918) та необхідне вимірювальне обладнання.

Температуру у вогневій камері печі фіксують зварними термопарами з діаметром дроту не більше ніж 1,5 мм типу ТХА з неізольованими проводами та покритими захисним кожухом, що відповідають ГОСТ 3044-84. Висока чутливість термопар забезпечується спаєм, що розміщений на кінці дроту, завдяки якому зміни температури передаються на вимірювально-реєструючий прилад.

Для проведення випробувань було передбачено виконання двох однакових зразків сталевих стержнів

з вогнезахисним покриттям однієї товщини висотою не менше 1000 мм. Було виготовлено 4 пари зразків сталевих колон, що виготовлені з двотаврового перерізу профілю № 20 за ГОСТ 8239-89, зі зведеної товщини металу 3,4 мм, шириною полки 100 мм та відстанню між зовнішніми поверхнями полочок 200 мм, висотою 2000 мм (рис. 2, 3).

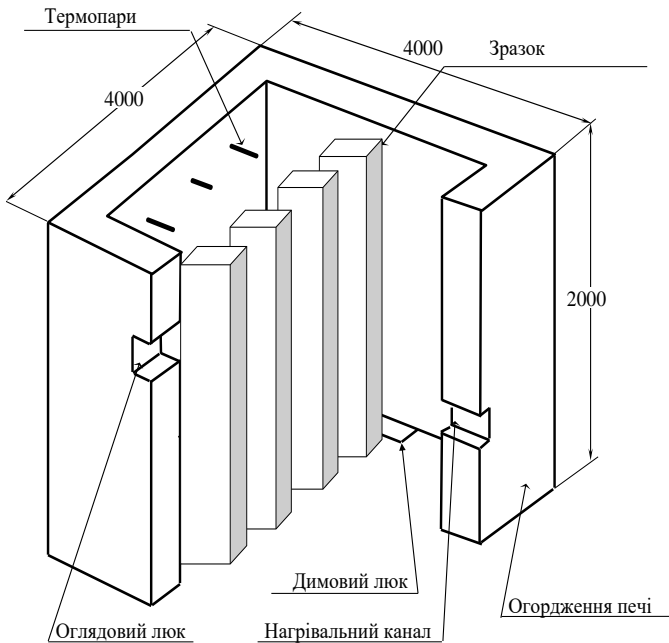


Рис. 2 Схема установки випробувальної вогневої печі



№ 1 – № 4



№ 5 – № 8

Рис. 3 Вигляд зразків до початку випробувань

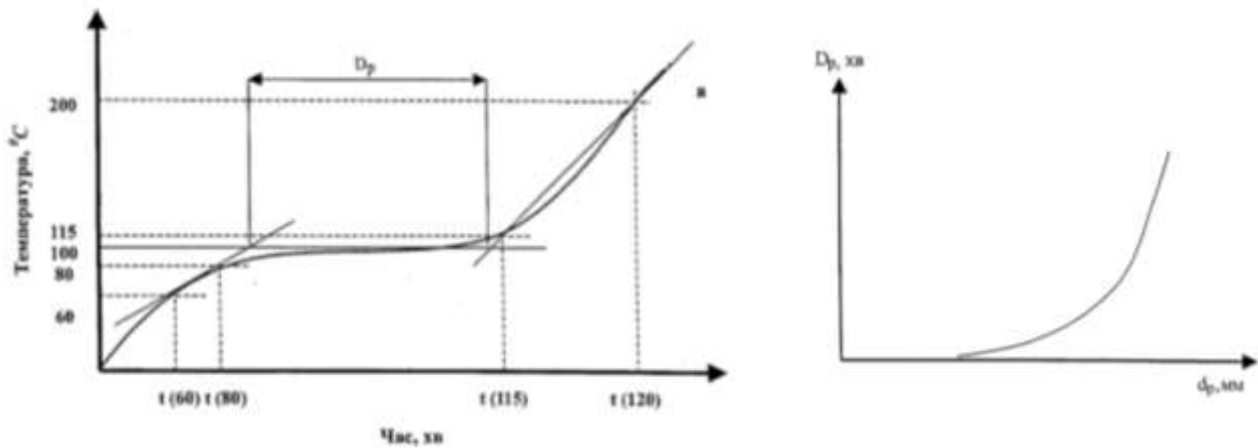
Виготовлення зразків для випробування відбувалось поетапно. Першочергово були зняті розміри та відповідно до них підготований (нарізаний) теплоізолюючий матеріал.

Готові до випробування зразки із облаштуванням теплоізоляцією верхньої частини колон встановлено до камери вогневої печі. Закріплення зразків здійснено фіксацією нижнього краю колони за допомогою металевих кутників, що показано на рис. 3.

На момент початку випробування встановлено температуру оточуючого середовища та відносну вологість повітря. Для перших 4-х зразків значення температури повітря складало $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ з вологістю 48% , а для зразків №5–№8 – $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вологістю 56% .

При визначенні температурного розподілу по товщині вогнезахисного покриття враховують та проводять розрахунок функції втрати вологи покриття в його товщині, що здійснюється за проміжок часу (та враховується як згладжена крива залежність тривалості ділянки зменшення вологості від товщини вогнезахисного покриття).

Остаточними діями за методами є побудова таблиць та кривих рис. 4.



а

б

Рис. 4 Криві тривалості ізотермічної ділянки, на якій зменшується вологість покриття: а – оцінювання тривалості ізотермічної ділянки, на якій зменшується вологість покриття під час випробування; б – залежність тривалості ізотермічної ділянки, на якій зменшується вологість покриття від його товщини

Отримавши результати експериментальних досліджень, стало можливим провести аналогічне за умовами комп'ютерне моделювання засобами розрахункових програм.

У **третьому розділі** описані результати експериментальних досліджень фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням. Математична модель залежності часу досягнення критичної температури сталевією балкою залежно від товщини вогнезахисного облицювання. Було проведено дослідження коефіцієнту теплопровідності мінераловатного облицювання фрагментів стержнів із сталевією прокату та дослідження точності та достовірності результатів розрахунку сталевих елементів із вогнезахисним мінераловатним облицюванням, отриманих для його визначених теплофізичних характеристик. Згідно із результатами візуального огляду виявлено, що на стиках теплоізоляційних плит, з'єднаних клеєвою сумішшю та цвяхами, у результаті дії високої температури відбулась дегідратація клеєвої суміші та поява тріщин. Це означає, що під час перебігу пожежі висока температура негативно

впливає на цілісність вогнезахисного облицювання, що у свою чергу може привести до передчасного настання граничного стану втрати несучої здатності. Тож контроль за ознакою збереження цілісності вогнезахисту є важливим для гарантування нормальної роботи вогнезахисної системи при забезпеченні відповідного класу вогнестійкості, на який вона розрахована. Однак, в цілому, при проведенні обстеження зовнішнього огляду випробовуваних зразків значних руйнувань вогнезахисного облицювання не було встановлено і цим пояснюється висока вогнезахисна здатність облицювання (рис. 5).

Відповідно до даних, щодо часу досягнення критичної температури ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$) у випробовуваних зразках, найшвидше була досягнута на 63 хвилині у зразку із

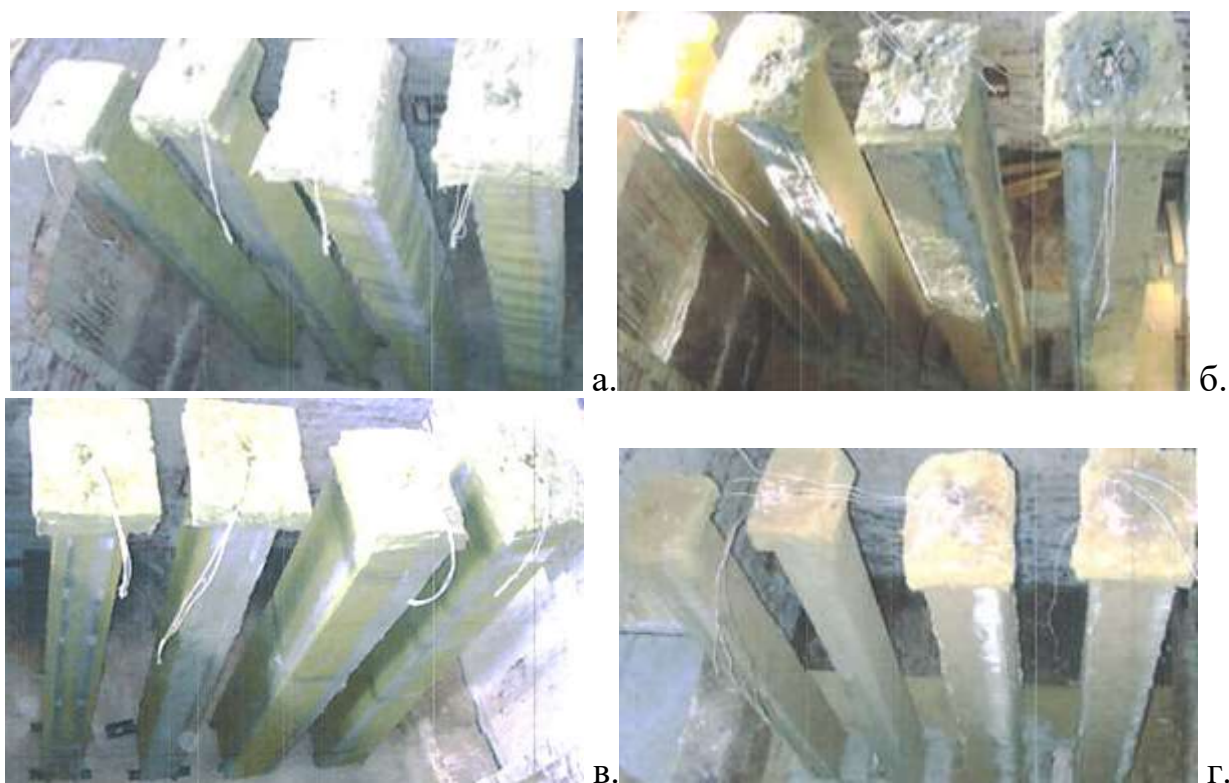


Рис. 5 Вигляд зразків № 1 – № 8: а, в – до початку випробувань; б, г – після проведення випробувань

найтоншим вогнезахисним облицюванням 36 мм і найпізніше у зразку із найтовщим вогнезахисним облицюванням 73 мм на 192 хв. Такий стан свідчить про високу вогнезахисну здатність вогнезахисного облицювання, оскільки при відповідній товщині облицювання можна досягти забезпечення найвищого класу вогнестійкості R 180.

На рис. 6. подані графіки показників середньої температури для кожного зразка за показниками з трьох термопар, встановлених на металевій поверхні у залежності від часу проведення випробувань. На даних графіках також наведені відхилення показників виміряної температури від математично очікуваного значення, тобто середньої за показниками трьох термопар температури.

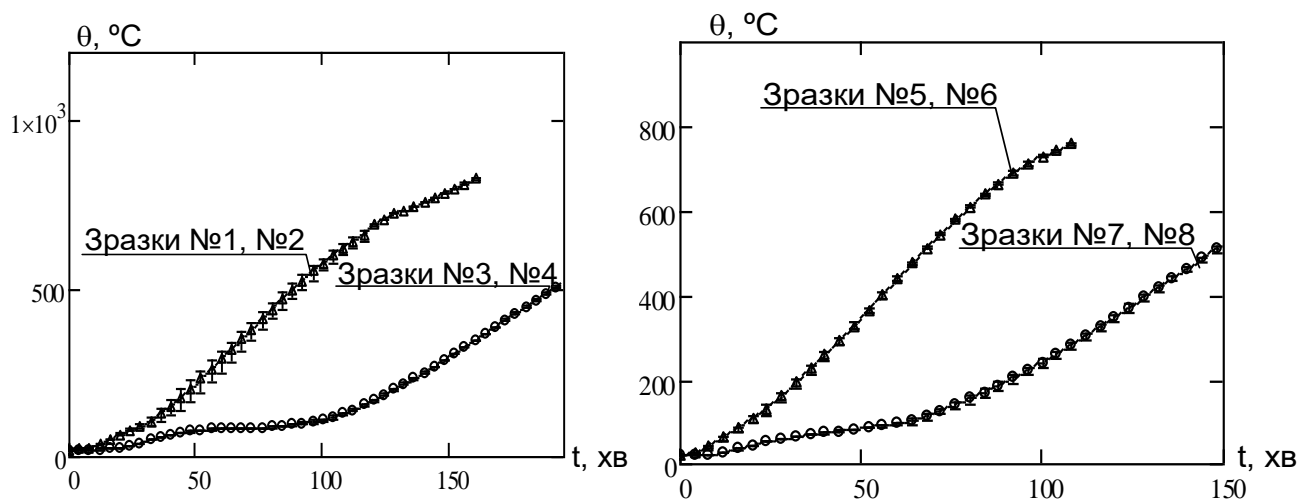


Рис. 6 Графіки показників середньої температури для кожного зразка за показниками з трьох термопар, встановлених на металевій поверхні у залежності від часу проведення випробувань

Був проведений розрахунок коефіцієнту теплопровідності мінераловатного облицювання. Отримані результати подані у вигляді графіків залежностей коефіцієнту теплопровідності у залежності від часу випробування на рис. 7.

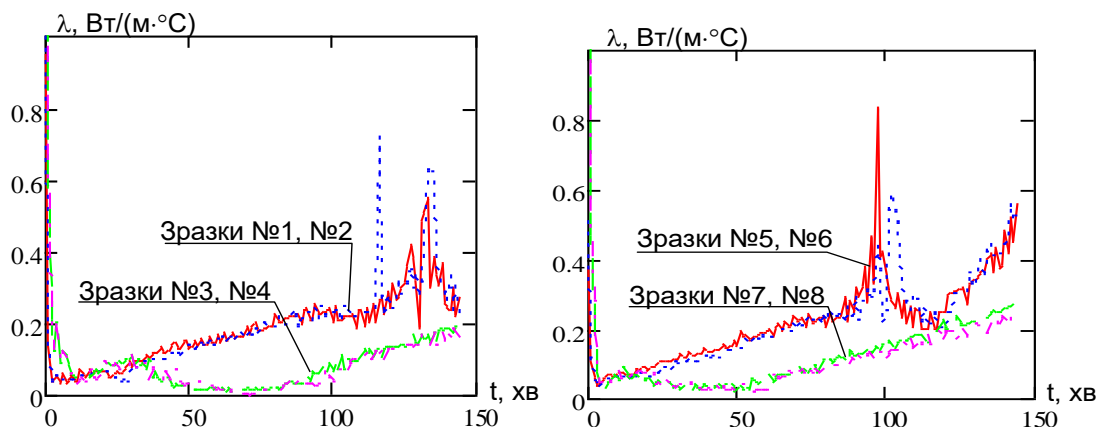


Рис. 7 Графіки залежностей коефіцієнту теплопровідності мінераловатного облицювання зразків фрагментів сталевих стержнів у залежності від часу випробування

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

де A_p/V – коефіцієнт перерізу сталевій балки із вогнезахисною системою на основі мінеральної вати; c_a – температурна залежність питомої теплоємності сталі, (Дж/(кг·°C)) ; $c_p = 1000$ – питома теплоємність мінераловатного вогнезахисного облицювання, що не є температурозалежною (Дж/(кг · К)); d_p – товщина мінераловатної плити вогнезахисної системи (м); $\Delta t = 30$ – проміжок часу (с); $\theta_{a,t}$ –

поточне значення температури сталі в певний момент часу t ($^{\circ}\text{C}$); $\theta_{g,t}$ – температура

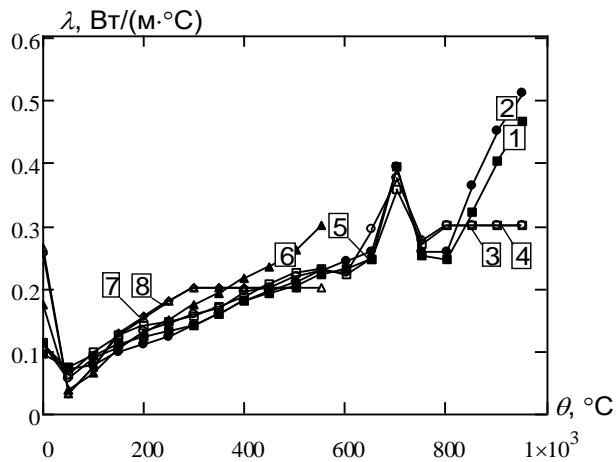


Рис. 8 Залежність усередненого значення коефіцієнта теплопровідності від температури зразків фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням (1, 2, 3, ... – номери зразків)

залежності є подібними і це означає, що для аналізу теплової задачі нагрівання сталевих конструкцій із вогнезахисним покриттям можна використовувати загальну спільну залежність.

Визначений коефіцієнт теплопровідності мінераловатного вогнезахисного облицювання та виявлені особливості його залежності від температури, що полягає у наявності близько 750°C , пояснюється термічним розкладанням із виділенням теплової енергії включень між волокнами мінеральної вати і волокон самої мінеральної вати. Наявний мінімум коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного мінераловатного облицювання товщиною більше як 50 мм приходить на температуру близько 100°C , оскільки саме при цій температурі відбувається випаровування вільної води, яка міститься між волокнами мінеральної вати.

Похибка, при порівнянні розрахункових та експериментальних показників температур у зразках-фрагментах сталевих стержнів із вогнезахисним мінераловатним облицюванням істотного впливу на точність обчислення температури не має, оскільки величина відносна похибка не перевищує 10,7 %, а величина середньоквадратичного відхилення не перевищує $10,6^{\circ}\text{C}$. Це означає, що за виконаним аналізом статистичних показників розрахункових значень температури отримана залежність коефіцієнта теплопровідності може бути використана як загальна для прогнозування нагрівання у сталевих конструкціях із вогнезахисним мінераловатним облицюванням.

Розраховані критерії адекватності не перевищують допустимих значень, чим було підтверджено адекватність моделей теплових процесів для подальшого удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням.

газового середовища у приміщенні із пожежею у момент часу t ($^{\circ}\text{C}$); $\Delta\theta_{g,t}$ – зростання поточної температури газового середовища у приміщенні із пожежею за проміжок, рівний кроку за часом Δt ($^{\circ}\text{C}$); λ_p – температурна залежність коефіцієнту теплопровідності мінераловатного облицювання вогнезахисної системи ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$); $\rho_a = 7850$ – густина сталі, ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Використовуючи дані, що отримані у результаті розрахунків за формулою (1) були побудовані графіки залежностей усередненого значення коефіцієнта теплопровідності від температури. Отримані графіки наведені на рис. 8.

З даних графіків можна побачити, що коефіцієнт теплопровідності суттєво залежить від товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання, але всі

У четвертому розділі описано алгоритм, особливості розрахунку та результати математичного моделювання поведінки сталеві балки із вогнезахисним мінераловатним облицюванням.

Для розв'язку теплової задачі прийняті основні геометричні параметри, що наведені на схемі, поданій на рис. 9 а. Схема тристороннього теплового впливу пожежі на досліджувану балку наведена на рис. 9 б.

На схемі рис. 10 також наведено умови закріплення балки, що полягають у

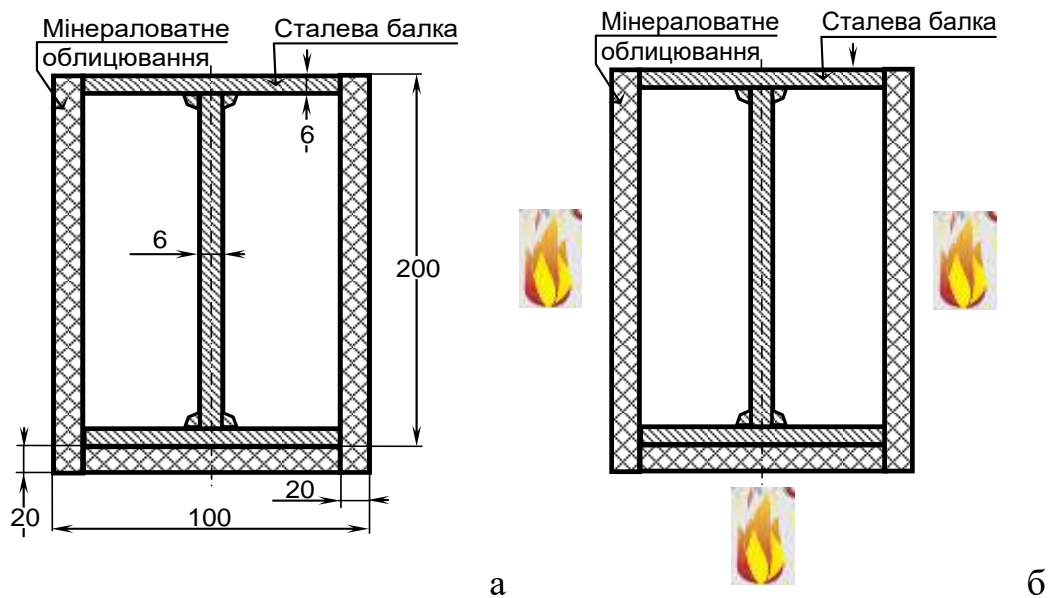


Рис. 9 Геометрична схема перерізу сталеві балки із мінераловатним вогнезахисним облицюванням (а) та схема теплового впливу пожежі на переріз балки

обмеженні всіх ступенів вільності кожного вузла по обох торцях кінців балки.

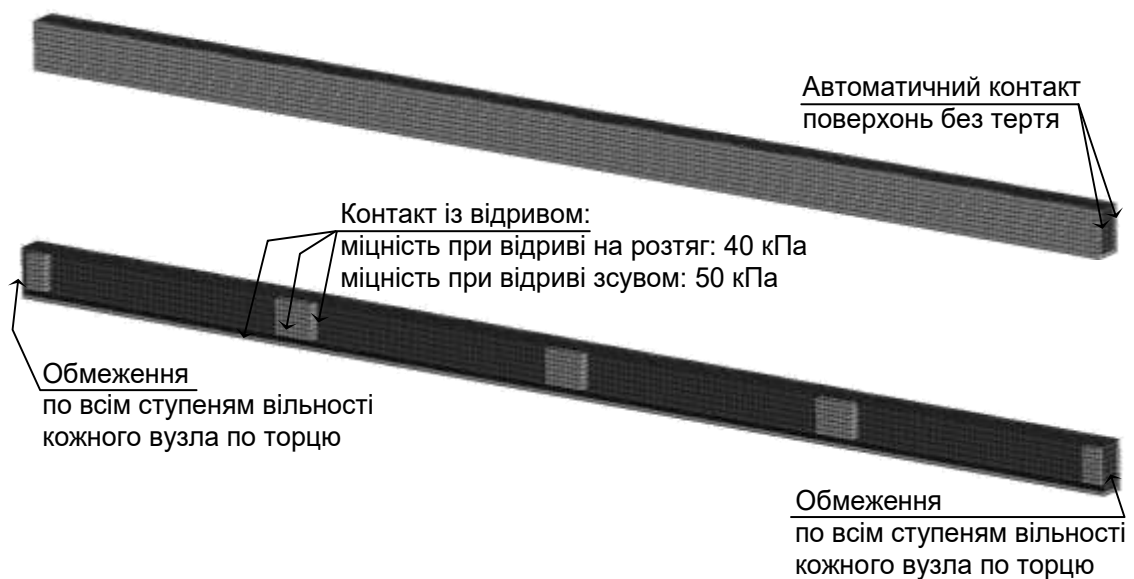


Рис. 10 Схема контактної взаємодії між елементами сталеві балки із вогнезахисним облицюванням з мінеральної вати

Таблиця 1 – Основні компоненти математичної моделі сталеві балки із вогнезахистом

Особливості механічних процесів при обваленні конструкцій	Математична модель або метод
Динамічна взаємодія твердих тіл	Система диференціальних рівнянь, законів замикання або балансу згідно із роботами Belytchko, Flangan
Напружено-деформований стан твердого тіла	Диференціальні рівняння типу рівнянь Ляме
Числова апроксимація диференціальних рівнянь динаміки	Явний метод інтегрування у вузлах кінцевих елементів
Числова апроксимація диференціальних рівнянь напруженого стану твердого тіла	Метод кінцевих елементів (FEM)
Контактна взаємодія (КВ) між тілами: - критерії початку КВ; - тертя; - контроль проникнення тіл	Умова Геца – Синьоріні – Мора; Узагальнений закон кулона; Метод штрафних функцій
Розділення твердих тіл на частини	Алгоритм подвоювання вузлів розділених кінцевих елементів
Математична модель механічних властивостей матеріалу конструкцій	Пружно-пластична модель сталі із кінематичним зміщенням (сталь)
Математична модель матеріалу мінеральної вати	Математична модель Блатц – Ко

В табл. 1 зведено математичні моделі та методи, що використовувались для опису основних механічних процесів при розрахунку вогнестійкості сталеві балки з вогнезахистом.

Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС) у сталеві балки із вогнезахисним облицюванням з мінеральної вати, нами був використаний узагальнений інженерний підхід, який базується на наступних положеннях.

1. Для розрахунку НДС деформованого тіла використовується загальний теоретичний підхід, який базується на ініціації переміщень точок системи деформованих тіл з використанням системи узагальнених рівнянь динаміки та рівнянь НДС як відклик на дані переміщення, що апроксимується за допомогою метода кінцевих елементів (МКЕ).

2. Для моделювання сталеві балки використовуються двовимірні оболонкові кінцеві елементи (КЕ) прямокутної форми типу Беличка – Цая із чотирма вузловими точками та п'ятьма точками інтегрування по товщині.

3. Для моделювання мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання використовуються тривимірні масивні КЕ гексаедричної форми із вісьма вузловими точками.

4. У якості моделі матеріалу сталеві балки використовується термопружний матеріал із можливістю пластичних деформацій, діаграми деформування якого відповідають рекомендаціям другої частини Eurocode 3, форма яких включає тільки ділянку зростання та горизонтальну ділянку. Спадна гілка не враховується, оскільки її

наявність суттєво не впливає на характер деформування сталевий балки, унаслідок переважання поперечних переміщень за умов втрати стійкості перерізу.

5. Для описання нелінійної поведінки матеріалу мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання застосовується модель матеріалу Блатц – Ко.

6. Припускається, що порушення щільності з'єднання між пластинами мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання та поверхнею балки відбувається за умови розшарування мінеральної вати, оскільки за технічними умовами виробника клей має добру адгезію та є стійким до впливу високих температур, тоді як міцність на розшарування при відриві та зсуві самої мінеральної вати набагато менша.

7. Для описання роботи з'єднання між пластинами мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання та поверхнею використовується модель контактної взаємодії із його порушенням за умови досягнення міцності на зсув та відрив між контактуючими поверхнями, що дорівнюють відповідній міцності самої мінеральної вати як найменш міцного матеріалу.

8. Прикладання навантаження має динамічну історію та відбувається поступово із початковим прикладанням власної ваги, діючого навантаження та прикладанням температурного навантаження згідно із обчисленим на останній стадії.

При проведенні розрахунку було прийнято припущення, що імовірний відрив вогнезахисного облицювання відбувається не по клейовому шву, а по прилеглим шарам мінераловати, тобто руйнування є когезійним. Таке припущення зроблене при врахуванні того факту, що міцність клейового шва значно перевищує міцність на відрив та на зсування самої мінераловати. Таке припущення враховано засобами середовища застосованого прикладного програмного комплексу при описанні контактної взаємодії між елементами моделі.

Особливістю розрахунку є те, що при динамічному розрахунку навантаження прикладається у період часу 17,5 с, що відповідає пришвидшеному процесу дії пожежі 150 хв., згідно із рис. 11 для компенсації динамічних ефектів, що полягають у наявності зайвих коливальних рухів, була використана опція демпфування, як це описано вище. На рис. 11 подано співставлення шкал розрахункового часу та часу реального впливу пожежі.

На етапі прикладання температурного навантаження можна побачити, що найбільшого рівня близько 280 МПа напруження досягають біля 30 хв. при температурі нагрівання балки 240 °С.

Після цього вони починають локалізуватися у вузьких зонах, що свідчить про нарощування у наступному етапі пластичних деформацій, які концентруються поблизу закріплених кінців балки. У час впливу пожежі 60 хв. спостерігаються відшарування закріплювальних мінераловатних елементів. Тобто при температурі 433 °С спостерігається активна деструкція вогнезахисного

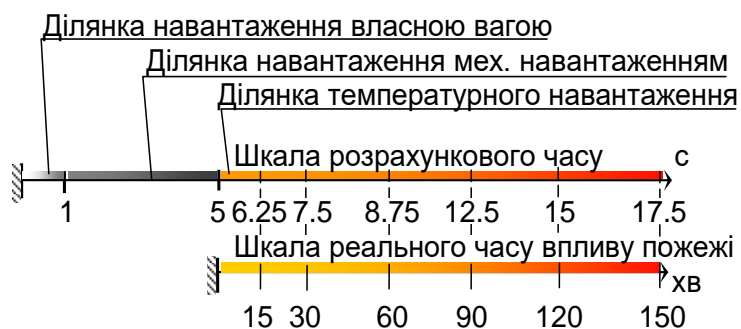


Рис. 11 Співставлення шкал розрахункового часу та реального часу впливу пожежі

облицювання. При температурі $967\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігаються ознаки місцевої втрати стійкості у вигляді складок у полках та стінці двотаврової балки посередині та по її закріплених кінцях. При цьому також спостерігається подальше відшарування закріплювальних елементів мінераловатного вогнезахисного облицювання.

На рис. 12 наведені графіки зміни максимального прогину балки та швидкості нарощування максимального прогину у залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі.

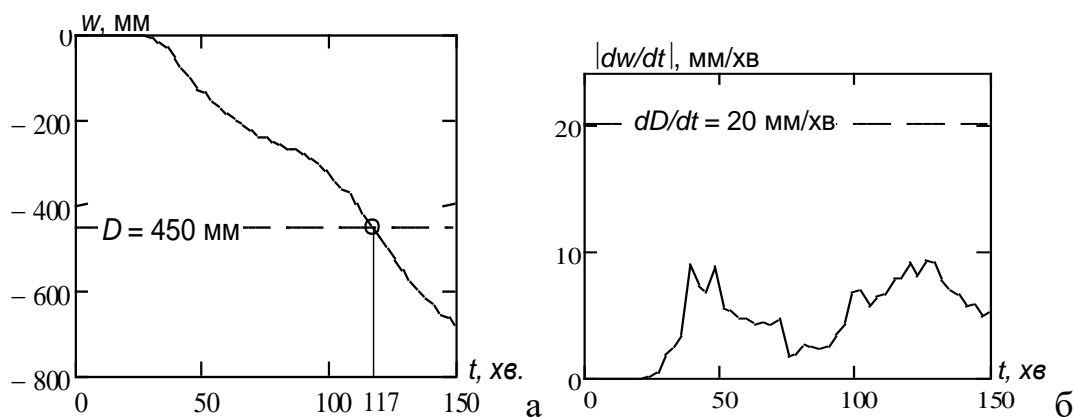


Рис. 12 Графіки зміни максимального прогину балки (а) та швидкості нарощування максимального прогину (б) у залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі

На рис. 12 відмічені критичні значення максимального прогину D балки та швидкості нарощування максимального прогину балки, при перевищенні яких фіксується настання стану втрати несучої здатності.

Графіки зазору у залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі та температури нагріву наведені також на рис. 13.

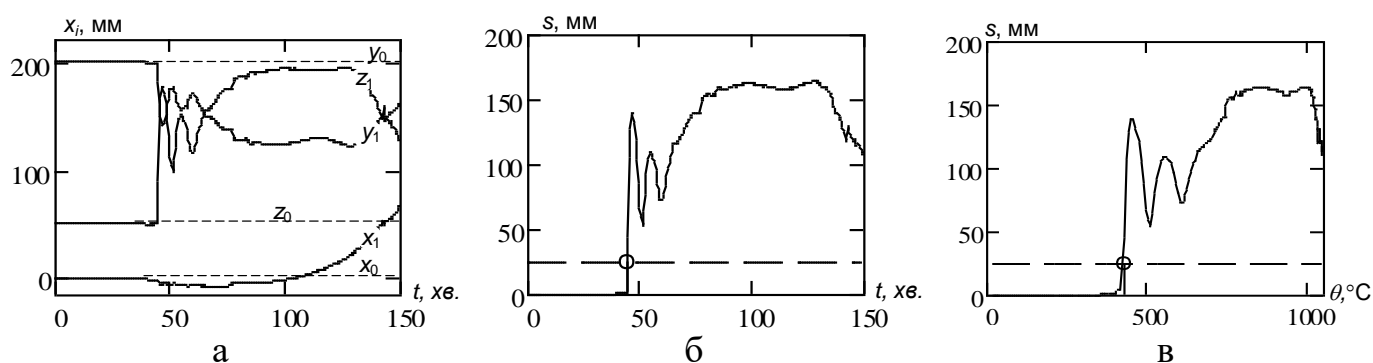


Рис. 13 Графіки зміни величини максимального зазору за координатами (а), графік нарощування максимального зазору в залежності від часу пожежі (б), графік нарощування максимального зазору в залежності від температури нагріву балки (в)

З метою вивчення цілісності вогнезахисного мінераловатного облицювання досліджуваної сталеві балки були досліджені положення та геометрична форма

облицювання у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, що наведені на рис. 14.

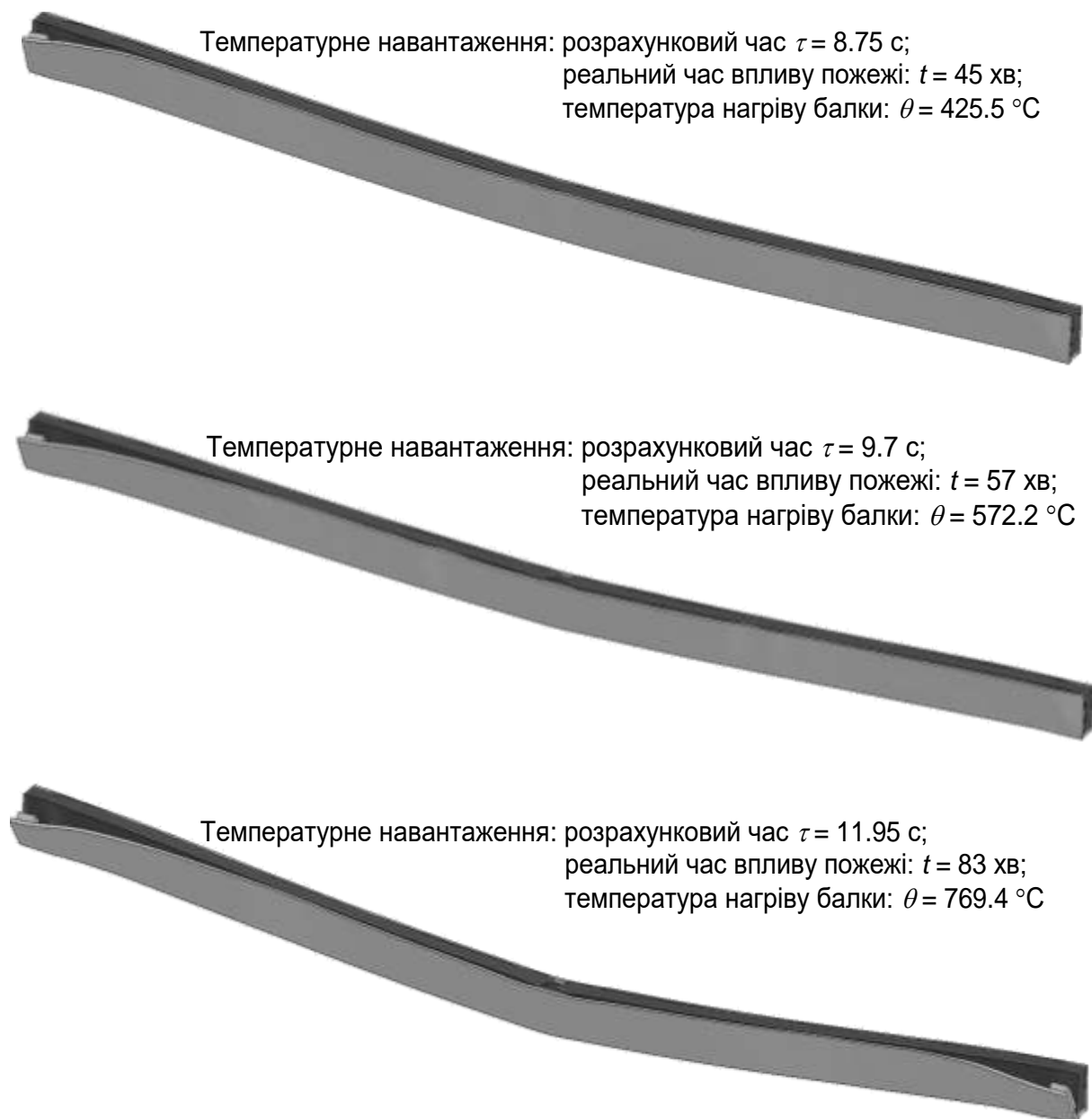


Рис. 14 Положення та геометрична форма облицювання у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі

Аналіз переміщення частин вогнезахисного мінераловатного облицювання досліджуваної сталеві балки показує, що відшарування облицювання починається після 40 хв. теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Для фіксування моменту, коли вогнезахисне покриття втрачає свою цілісність і не може виконувати захисні функції, можна скористатися ознаками втрати цілісності огорожувальних конструкцій.

На даних графіках позначений момент розкриття зазору при відшаруванні завбільшки 25 мм. При цьому, виявлено, що розкриття зазору між балкою та облицюванням завбільшки 25 мм спостерігається у момент часу 44,5 хв. при температурі нагрівання сталеві балки 425 °С.

Порівнюючи дані рис. 13 та рис. 14, можна зазначити, що втрата теплоізолювальної здатності вогнезахисним облицюванням відбувається раніше на 73 хв. за настання граничного стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю. Це значить, що розрахунок має проводитися до цього значення із врахуванням дії вогнезахисту, а після цього вогнезахисна дія вогнезахисного облицювання не може бути врахована, оскільки воно вважається відшарованим.

Було виявлено, що втрата вогнезахисної здатності мінераловатним за ознакою розкриття щілини між балкою та облицюванням завбільшки 25 мм відбувається раніше на 73 хв. за настання граничного стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю, що необхідно враховувати при розрахунках.

У **п'ятому розділі** була розроблена розрахункова методика оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із використанням величини часу його відшарування, визначеного за запропонованими номограмами, до рекомендацій другої частини Єврокоду 3.

При обчисленні температурного режиму пожежі має бути врахований факт втрати цілісності вогнезахисного облицювання внаслідок теплового впливу пожежі. Цього можна досягти за умови застосування формули збільшення температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt , яка має такий вигляд:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \varphi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \Delta\theta_{g,t} > 0), \quad (2)$$

$$\text{тут } \varphi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V,$$

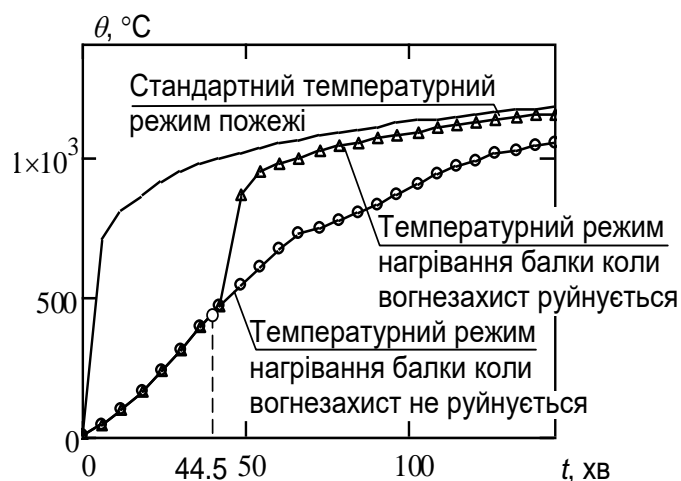


Рис. 15 Температурний режим нагрівання сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі без врахування та з врахуванням втрати цілісності вогнезахисним мінераловатним облицюванням

Використовуючи даний підхід, були проведені відповідні розрахунки, у результаті яких був побудований режим прогрівання сталевих балок із мінераловатним облицюванням за умови його втрати цілісності на 44,5 хв. при температурі нагрівання сталевих балок 472 °С згідно із розрахунками, що наведені в роботі. Отриманий температурний режим поданий на рис. 15.

З метою вивчення впливу конструктивних параметрів сталевих балок із мінераловатним вогнезахистом на межу вогнестійкості були проведені розрахунки, що включають проведення процедур, які описані у 4-му та 5-му розділах.

Після проведення розрахунку за даною методикою, були отримані результати у вигляді залежності часу відшарування вогнезахисного

облицювання та межі вогнестійкості від конструктивних параметрів сталевих балок із вогнезахистом на основі мінераловатного облицювання: коефіцієнту перерізу балки, рівня навантаження та товщини мінераловатного облицювання. Отримані графіки наведені на рис. 16.

Аналізуючи дані графіки можна помітити, що межа вогнестійкості має кореляцію з вибраними параметрами і її залежність від них близька до лінійної.

Вивчення графіків на рис. 16 показало, що залежність межі вогнестійкості та часу настання відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання від найбільш значущих конструктивних параметрів сталеві балки наближені до лінійних. Це може бути основою для прийняття гіпотези, 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 із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, визначені для побудовання регресійної моделі, є незалежними за їх фізичною природою.

Було проведено повний факторний експеримент з використанням розроблених методик визначення несучої здатності сталевих балок з мінераловатним вогнезахисним облицюванням, на основі чого встановлені закономірності і побудована математична модель зміни часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання в залежності від їх коефіцієнту перерізу, товщини мінераловатного облицювання та рівня навантаження.

Приймаючи подані вище припущення, регресійна модель, що встановлює залежність межі вогнестійкості сталеві балки із мінераловатним вогнезахисним облицюванням за граничним станом втрати несучої здатності від визначених конструктивних параметрів, має такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (3)$$

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

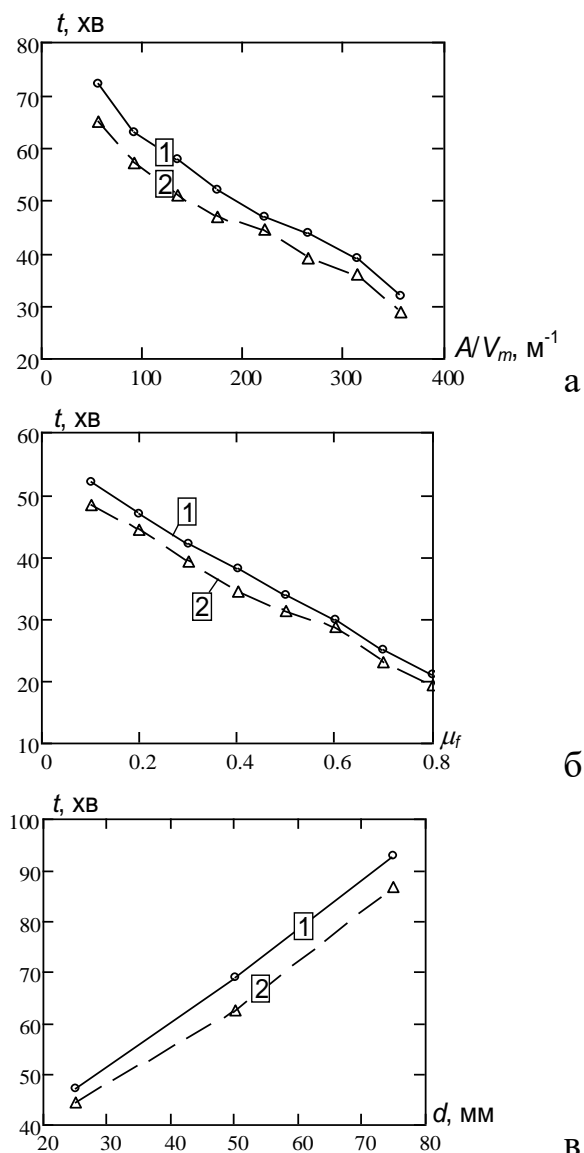


Рис. 16 Графіки залежності межі вогнестійкості сталеві балки із вогнезахисним мінераловатним облицюванням (1) та часу настання відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання (2): а - від величини коефіцієнту перерізу балки; б – від рівня прикладеного навантаження; в – від товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання

Таблиця 2 – Коефіцієнти регресії для часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталеві 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	$6,29 \cdot 10^{-4}$

Застосовуючи одержану регресійну залежність, були відтворені відповідні поверхні залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталевих балок від вибраних найбільш значущих конструктивних параметрів при завданні різних значень товщини вогнезахисного облицювання, які подані на рис. 17. На побудованих поверхнях показані рівні, що відповідають різним значенням часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання.

Для вивчення впливу найбільш значущих конструктивних параметрів сталевих балок на час відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання були побудовані взаємні залежності даних конструктивних параметрів за умови трьох можливих величин товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання: 25 мм, 50 мм та 75 мм, що кратні товщині мінераловатної плити. На рис. 18 подані одержані номограми.

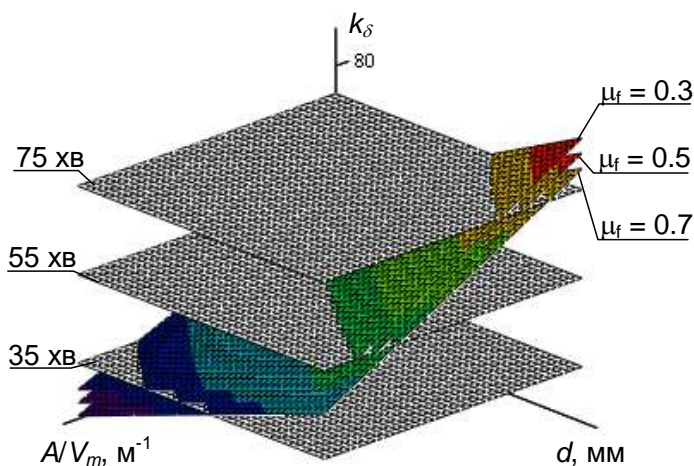


Рис. 17 Поверхні залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання для визначення межі вогнестійкості сталевих балок для різних значень діючого навантаження

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

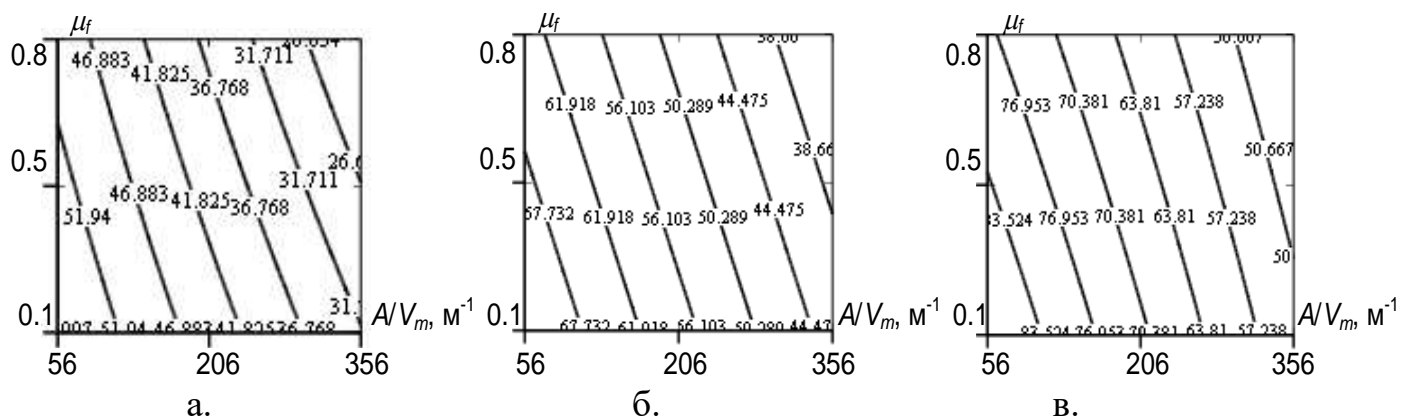


Рис. 18 Залежності час відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки від коефіцієнту перерізу та коефіцієнту навантаження для різних значень його товщини: а – 25 мм; б – 50 мм; в – 75 мм

Отримані дані дозволяють провести визначення меж вогнезахисних балок із врахуванням відшарування мінераловатного облицювання для забезпечення необхідної нормованої вогнестійкості.

Для запропонування методу проєктування сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням була запропонована розрахункова методика, що базується на визначенні часу відшарування вогнезахисного облицювання і використанні його у розрахунках. Дана методика принципово здійснюється за такою послідовністю розрахункових процедур.

1. Використовуючи коефіцієнт перерізу балки, коефіцієнт навантаження та товщину мінераловатного вогнезахисного облицювання, за номограмами, наведеними на рис. 17, визначається час відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання.

2. Використовуючи величину часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталеві балки та формулами визначається режим нагріву сталеві балки за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Використовуючи отриманий температурний режим нагріву сталеві балки та методики, рекомендовані EN 1993-1-2: 2005, оцінюється клас вогнестійкості досліджуваної сталеві балки.

Таким чином, було вирішено поставлену у дисертації науково-практичну задачу щодо удосконалення розрахункового методу оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості його відшарування під час пожежі і як наслідок втрати вогнезахисної здатності. Для цього розкрито закономірності залежності часу настання моменту відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання у залежності від конструктивних параметрів сталевих балок із таким типом вогнезахисту.

ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено результати вирішення актуальної науково-практичної задачі щодо удосконалення розрахункового методу оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості його відшарування під час пожежі, і як наслідок втрати вогнезахисної здатності. Для цього розкрито закономірності залежності часу настання моменту відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання у залежності від конструктивних параметрів сталевих балок із таким типом вогнезахисту. При цьому, у якості основних результатів виносяться такі положення.

1. Аналіз статистичних даних щодо пожеж в Україні показав, що існує високий рівень обвалень будівельних конструкцій внаслідок пожежі у тому числі з причин їх невідповідності вимогам протипожежних будівельних норм. Джерелом таких невідповідностей може слугувати раптова втрата вогнезахисної здатності вогнезахисних облицювань сталевих балок з причин його відшарування. Точне прогнозування такого стану дозволяє суттєво підвищити пожежну безпеку вогнезахисних сталевих балок, зокрема за допомогою мінераловатного матеріалу.

2. Для вивчення температури нагрівання сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням було розроблено експериментальну методику вогневих випробувань та проведені відповідні експериментальні дослідження. На основі результатів проведених досліджень було отримано закономірність часу досягнення критичної температури у вигляді регресійної залежності від значення критичної температури $\theta_{кр}$ та товщини d_p вогнезахисного мінераловатного облицювання $U = 33,938 + 1,397 \cdot d_p - 0,081 \cdot \theta_{кр} + 2,35 \cdot 10^{-3} d_p \cdot \theta_{кр}$ і на її основі побудована відповідна номограма. Отримана узагальнена температурна залежність

коефіцієнта теплопровідності мінераловатного вогнезахисного облицювання у табличній формі, яка може бути використана для розрахунку температури у сталевих конструкціях із таким вогнезахистом у діапазоні його товщини до 80 мм для питомої теплоємності $1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ та густини $200 \text{ кг}/\text{м}^3$.

3. Розроблено методику описання поведінки мінераловатного облицювання сталеві балки на основі рівнянь динаміки та їх реалізації за допомогою метода кінцевих елементів. Використовуючи дану методику була досліджена поведінка сталеві балки із мінераловатним вогнезахисним облицюванням у час впливу стандартного температурного режиму пожежі у період часу від 0 до 150 хв.

4. Виявлено, що розкриття зазору між балкою та мінераловатним вогнезахисним облицюванням завбільшки 25 мм спостерігається у момент часу 44,5 хв. при температурі нагрівання сталеві балки 425°C при цьому, такий стан виникає раніше на 73 хв. за настання граничного стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю, що необхідно враховувати при розрахунках.

5. Розроблена методика розрахунку несучої здатності сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням, що відшаровується у певний момент часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, у результаті чого показано, що межа вогнестійкості балки наступає на 59 хв. за графіком максимального прогину та на 47 хв. за графіком наростання максимальної швидкості, що на 70 хв. раніше, ніж результат, отриманий за умови відсутності відшарування.

6. 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 μ_f , що має вигляд $t_c = 44,4 - 0,0599 \cdot A/V_m + 0,725 \cdot d - 4,813 \mu_f - 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot A/V_m \cdot d - 0,0314 \cdot A/V_m \mu_f - 0,178 \cdot d \cdot \mu_f + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \mu_f$.

7. Побудовані номограми для визначення часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок в залежності від їх коефіцієнту перерізу та рівня навантаження при трьох величинах товщини мінераловатного вогнезахисного облицювання.

8. На основі отриманої регресійної залежності та відповідних номограм розроблена розрахункова методика оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із використанням величини часу його відшарування та рекомендацій другої частини Єврокоду 3.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У наукових фахових виданнях:

1. Бєліков А. С., Маладика І. Г., **Борсук О. В.** Підвищення вогнестійкості металевих конструкцій як шлях забезпечення вогнезахисту будівель. *Збірник наукових праць Пожежна безпека: теорія і практика*. Черкаси. 2014. № 18. С. 38 – 42.

2. Бєліков А. С., Маладыка І. Г., **Борсук Е. В.**, Шаломов В. А. Забезпечення вогнезахисту будівель шляхом підвищення вогнестійкості металевих конструкцій. *Сборник научных трудов Строительство, материаловедение, машиностроение. серия: Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве*. Днепропетровск. 2014. № 76. С. 29 – 33.

3. Бєліков А. С., Шаломов В. А., Трифонов І. В., **Борсук Е. В.** Внедрение средств огнезащиты для повышения огнестойкости строительных конструкций. *Збірник наукових праць Пожежна безпека: теорія і практика*. Черкаси. 2015. № 20. С. 9 – 18.

4. Поздєєв С. В., Швиденко А. В., Зажома В. М., Радченко В. А., **Борсук О. В.** Метод розрахункової оцінки можливості прогресивного руйнування будівель унаслідок пожежі. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2020, № 4(84), 1 т. С. 74 – 80.

5. S.Pozdieiev, O.Nuianzin, **O.Borsuk**, O. Binetska, A.Shvydenko, B.Alimov Temperature Effect on the Thermal-Physical Properties of Fire-Protective Mineral Wool Cladding of Steel Structures Under the Conditions of Fire Resistance Tests. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 4/12 (106) P. 39 – 45. **Видання входить до МНБ – Scopus.**

6. **Борсук О. В.** Дослідження поведінки сталеві балки із вогнезахисним мінераловатним облицюванням при пожежі. *Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування*. Черкаси. 2020. № 1, том. 4. С. 15 – 24.

7. **Борсук О. В.**, Нуянзін О. М., Кришталь В. М., Ведула С. А., Горовенко М. М. Дослідження межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття. *Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування*. Черкаси. 2020. № 2, том. 4. С. 5 – 14.

8. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Сідней С. О., Новгородченко А. Ю., **Борсук О. В.** Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 152. С. 116 – 126.

Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:

[1] – здобувачем здійснено аналіз нормативних документів та літературних джерел, проведено класифікацію з виділенням переваг та недоліків способів вогнезахисту будівельних конструкцій, акцентовано увагу на актуальності облаштування вогнезахисту металевих несучих конструкцій; [2] – здобувачем виділено недоліки несучих металевих конструкцій з точки зору пожежної безпеки, проведено аналіз ефективності існуючих видів способів підвищення вогнестійкості, їх термінів експлуатації, додаткових властивостей, вартості; [3] – здобувачем наведено правила безпеки при приготуванні та в процесі нанесення вогнезахисного складу на будівельні конструкції; [4] – здобувачем під час аналізу пожежної безпеки будівельних конструкцій розглянута імовірність їх прогресуючого обвалення під дією високих температур при ушкодженні їх окремих елементів; [5] – здобувачем за експериментальними та розрахунковими результатами визначена вогнестійкість сталевих колон з вогнезахисним мінераловатним облицюванням, визначено закономірності зміни ефективного коефіцієнту теплопровідності мінераловатного вогнезахисного облицювання сталеві балки при нагріві за стандартним температурним режимом пожежі та досліджено достовірність даних розрахунку температури для фрагментів сталевих конструкцій із мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах випробувань на вогнестійкість, отриманих на основі виявлених закономірностей коефіцієнту теплопровідності; [7] – здобувачем вивчено зміни межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття та досліджено температурний режим прогрівання сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття з мінераловатного облицювання; [8] – здобувачем описано методику проведення експериментального дослідження та підготовку зразків до випробування, здійснено аналіз результатів отриманих даних та побудований графік кривої часу досягнення критичної температури в залежності від товщини мінераловатного вогнезахисного облицювання.

Матеріали наукових конференцій:

1. Беліков А. С., Маладика І. Г., **Борсук О. В.** Перспективи розробки вогнезахисних засобів для металевих конструкцій із вологостійкими властивостями.

Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2013. С. 185 – 186.

2. Беликов А. С., Маладыка І. Г., **Борсук Е. В.** Перспективи підвищення огнестійкості металічних конструкцій огнезахисними влагостійкими покриттями. *Інноваційні технології захисту від надзвичайних ситуацій*: матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. Минск: КИИ, 2013. С. 103.

3. Беликов А. С., Маладыка І. Г., **Борсук Е. В.** Применение лёгкого бетона в качестве огнезащиты строительных конструкций. *Технології захисту/ПожежТех – 2014*: матеріали 16 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників Київ, 2014. С. 36 – 37.

4. **Борсук О. В.**, Дзєцина Є. В. Ніздрюваті бетони як будівельний матеріал з ефективною вогнезахисною здатністю. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. С. 97 – 98.

5. Беликов А. С., Шаломов В. А., **Борсук Е. В.**, Дзєцина Є. В. Средство огнезащиты повышения огнестойкости металлических конструкций. *Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій*: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016 С. 146 – 149.

6. Беликов А. С., **Борсук О. В.**, Тарасов С. С., Маладыка І. Г. Перспективи підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 171 – 172.

7. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., **Борсук О. В.**, Неділько І. А., Федченко С. М. Вивчення стану втрати вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним мінераловатним облицюванням. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали X Всеукр. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 120 – 122.

8. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., **Борсук О. В.**, Неділько І. А. Дослідження цілісності вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки в умовах пожежі. *Енергоефективність на транспорті*: Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 98 – 100.

АНОТАЦІЯ

Борсук О. В. Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням. – Кваліфікована наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2021.

Роботу присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі розкриття закономірностей залежності часу настання моменту відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання від конструктивних параметрів сталевих балок із таким типом вогнезахисту як наукове підґрунтя для удосконалення методів розрахункової оцінки вогнестійкості даних конструкцій. Підсумками досліджень є:

Уперше:

– встановлено, що залежність часу досягнення критичної температури у вигляді регресійної залежності від значення критичної температури $\theta_{кр}$ та товщини d_p вогнезахисного мінераловатного облицювання $U = 33,938 + 1,397 \cdot d_p - 0,081 \cdot \theta_{кр} + 2,35 \cdot 10^{-3} d_p \cdot \theta_{кр}$ і на її основі побудована відповідна номограма;

– встановлена залежність часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок під впливом стандартного температурного режиму

пожежі від їх коефіцієнту перерізу A/V_m , товщини мінераловатного облицювання d рівня навантаження μ_f , що має вигляд $t_c = 44,4 - 0,0599 \cdot A/V_m + 0,725 \cdot d - 4,813 \mu_f - 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot A/V_m \cdot d - 0,0314 \cdot A/V_m \mu_f - 0,178 \cdot d \cdot \mu_f + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \mu_f$;

– з урахуванням виявлених закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження сталевих балок на час відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання під час впливу стандартного температурного режиму пожежі, обґрунтовано та запропоновано удосконалений метод розрахункової оцінки вогнестійкості елементів конструкцій даного типу.

Набуло подальшого розвитку застосування розрахункових стандартних методів розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним облицюванням для визначення відповідних вихідних даних для проектування споруд з їх застосуванням.

Удосконалено науково-методичну базу забезпечення нормованої вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій із вогнезахистом.

Ключові слова: межа вогнестійкості, сталева балка, випробування на вогнестійкість, розрахунковий метод, математичне моделювання, обчислювальний експеримент.

ABSTRACT

Borsuk O. V. Improvement of the Method of Calculation Estimation of Fire Resistance of Steel Beams with Fire-protective Mineral Wool Facing. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences by Specialty 21.06.02, prepared in Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine. Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2021.

Thesis is devoted to solving an urgent scientific and technical problem of disclosure of regularities of dependence of time of occurrence of the moment of detachment of mineral wool fire-retardant facing on constructive parameters of steel beams with such type of fire protection as a scientific basis for improving the methods of calculated assessment of fire resistance of these structures.

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.

The analysis of scientific works performed in the field of fire resistance of steel beams with fire protection systems showed that the methods of assessing the fire resistance of steel beams with mineral wool fire protection cladding due to the possibility of delamination of fire protective mineral wool cladding have not been studied. This is a deterrent factor for the use of steel beams with mineral wool fire protection or is the cause of errors in the design of fire-resistant steel structures of buildings and structures in terms of their fire safety.

Disclosure of regularities of influence of constructive parameters of steel beams on conditions of exfoliation of mineral wool fire-retardant facing is an actual scientific task, the solution of which will be the scientific basis for improving the calculation methods for predicting the fire resistance of these structures, which in turn is part of the prerequisites for ensuring their compliance with the standardized classes of fire resistance of the above structures and increase the level of fire safety of buildings and structures built on their basis.

The idea of the work is seen in the creation of prerequisites for guaranteeing the standardized fire resistance of steel beams with mineral wool fire-retardant cladding by improving methods for predicting the time limits of detachment of fire-retardant cladding and, accordingly, the development on their basis of correct methods for the estimated assessment of fire resistance of these structures, taking into account the patterns of influence of structural parameters of such steel beams under the influence of standard temperature of the fire.

The purpose of the work involves the disclosure of the patterns of loss of fire-retardant ability due to delamination of mineral wool fire-retardant steel beams from the time of thermal exposure to fire, as a scientific basis for improving the method of calculated assessment of fire resistance of beams of this type.

According to the results of research for the first time:

- it is established that the dependence of the time of reaching the critical temperature in the form of a regression dependence on the value of the critical temperature θ_{kp} and thickness d_p fire-retardant mineral wool facing $U = 33,938 + 1,397 \cdot d_p - 0,081 \cdot \theta_{kp} + 2,35 \cdot 10^{-3} d_p \cdot \theta_{kp}$ and on its basis the corresponding nomogram is constructed;
- the dependence of the detachment time of mineral wool fire-retardant facing of steel beams under the influence of the standard temperature of the fire on their cross-sectional coefficient A/V_m , thickness of mineral wool facing d_p and load level μ_f , having the form $t_c = 44,4 - 0,0599 \cdot A/V_m + 0,725 \cdot d_p - 4,813 \mu_f - 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot A/V_m \cdot d_p - 0,0314 \cdot A/V_m \mu_f - 0,178 \cdot d_p \cdot \mu_f + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d_p \mu_f$;
- taking into account the identified patterns of influence of structural parameters, as well as the load of steel beams on the time of detachment of mineral wool fire protection cladding under the influence of standard fire temperature, substantiated and proposed an improved method for calculating fire resistance of structural elements of this type.

The application of calculated standard methods of calculation estimation of fire resistance of steel beams with fire-retardant facing to determine the appropriate initial data for the design of structures with their use *was further developed*.

The scientific and methodical base of providing standardized fire resistance of steel building structures with fire protection *was improved*.

The practical significance and realization of the obtained results is to develop an improved calculation method for assessing the fire resistance of steel beams with fire-retardant mineral wool cladding under the influence of standard fire temperature, which allows to establish compliance of these structures with the fire resistance class. It allows to increase the accuracy of calculations. The developed nomogram for determination of peeling time of mineral wool facing allows to estimate fire resistance more precisely when using usual standard methods of calculation.

The developed method of calculation estimation of fire resistance of steel beams with mineral wool fire-retardant facing is introduced into the activity of the Research and Testing Laboratory of the Emergency Rescue Team of Special Purpose of Cherkasy Regional Division of the State Emergency Service of Ukraine, into the educational process of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine when teaching of the academic disciplines «Buildings and Structures and Their Behavior in the Emergency Situations» and «Stability of Buildings and Structures in Case of Fire» and in the scientific activity of the Research Center of Fire Protection of the Institute of Public Administration and Research on Civil Defense during the research work code «High-Rise Public Buildings».

Keywords: fire resistance limit, steel beam, fire resistance tests, calculation method, mathematical modeling, computational experiment.

Підписано до друку 17.03.2021.
Ум. Друк. Арк. 0,9. Формат 60*80/16.
Замовлення № 7/2021.
ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034