ВІДГУК

офіційного опонента
доктора технічних наук, професора ЦАПКА Юрія Володимировича
на дисертаційну роботу КОПИЛА Богдана Яковича «Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 26 – Цивільна безпека за спеціальністю 261 – Пожежна безпека

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Забезпечення нормативного рівня вогнестійкості сталевих конструкцій є одним з ключових завдань сучасного будівництва та експлуатації інженерних споруд. Незважаючи на високу міцність та надійність, сталь різко втрачає несучу здатність під дією високих температур: при нагріванні до 500°С її міцність зменшується на 50 % протягом перших хвилин пожежі. Це робить конструкції вразливими та створює ризик прогресуючого обвалення несучих елементів. У зв'язку з розвитком висотного, промислового і інфраструктурного будівництва, а також умовами воєнного часу, питання підвищення надійності металевих конструкцій набуває особливої актуальності.

Провідним показником ефективності реактивних систем традиційно вважається лінійний та об'ємний коефіцієнт спучення. Вони визначають здатність покриву до кратного збільшення об'єму коксового шару і формування теплоізоляційного бар'єра.

Проте сучасні дослідження свідчать, що:

високе спучення саме по собі не забезпечує вогнезахисного ефекту, якщо сформований шар не має достатньої механічної міцності;

руйнування коксового шару у реальних умовах пожежі часто відбувається через дію потоків гарячих газів, механічних ударів, часткового обвалення елементів конструкцій;

наявні методи випробувань не дозволяють коректно оцінити міцність пінококсу, оскільки переважно базуються на локальному індентифікуванні, що не відтворює реального навантаження.

Таким чином, механічна міцність коксового шару є одним із визначальних параметрів, що обумовлює реальну працездатність вогнезахисних покривів реактивного типу. Водночас на сьогодні відсутня уніфікована та стандартизована методика кількісного визначення цієї характеристики, причому ця проблема є спільною для всіх типів реактивних покривів незалежно від природи полімерної матриці. Зокрема, це стосується і покривів на основі водних полімерних дисперсій, для яких методи оцінювання механічної міцності сформованого пінококсового шару залишаються недостатньо розробленими та потребують наукового обґрунтування і стандартизації.

2. Відповідність мети, об`єкта, предмета та завдань дослідження паспорту спеціальності

Мета дисертаційного дослідження – підвищення достовірності оцінювання ефективності вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі водної дисперсії полімеру шляхом удосконалення науково обґрунтованого методу визначення механічної міцності коксового шару, що формується в умовах термічного впливу, для підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів металевих конструкцій.

Для досягнення цієї мети були поставлені та розв'язані такі завдання:

провести аналіз стану проблематики вогнезахисту металевих будівельних конструкцій;

обґрунтувати вибір матеріалів і методів дослідження для оцінювання вогнезахисної ефективності та механічної міцності пінококсу;

дослідити вплив компонентів на вогнезахисну ефективність та експлуатаційні властивості розроблених покривів для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії;

визначити критичне навантаження та механізм втрати міцності сформованого пінококсового шару вогнезахисного реактивного покриву для металевих конструкцій шляхом моделювання механічного навантаження та підвищити механічну міцність сформованого теплоізоляційного шару покривів реактивного типу шляхом оптимізації компонентного складу;

удосконалити метод визначення механічної міцності коксового шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій з метою кількісної оцінки здатності реактивних систем формувати структурно стабільний теплоізоляційний шар;

Об'єктом дослідження є процеси формування та механічної стабільності пінококсового шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій в умовах термічного впливу.

Предметом дослідження є залежності впливу вмісту компонентів на ефективність реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі водної дисперсії полімеру з урахуванням механічних показників сформованого коксового шару.

Відповідно до мети, об'єкта, предмета та завдань дослідження, робота належить до галузі знань 26 «Цивільна безпека» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека».

3. Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота включає анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить 233 сторінки, з них основного тексту 167 сторінок, 26 таблиць, 44 рисунки, список використаних джерел містить 150 найменувань та займає 16 сторінок, а також 2 додатки на 8 сторінках.

У вступі описана загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дисертаційного дослідження, вказано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

В першому розділі виконано аналіз сучасного стану проблематики вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. Вивчено класифікацію та розвиток реактивних вогнезахисних покривів та сучасний стан питання щодо методів оцінки механічної міцності коксового шару. Окреслено проблеми, пов'язані з відсутністю уніфікованої методики оцінювання механічної міцності коксового шару, здатної адекватно відтворювати умови реальної експлуатації вогнезахисних покривів для металевих конструкцій. Сформульовано мету і завдання дисертаційного дослідження.

В другому розділі визначено матеріали та методи, застосовані для розроблення вогнезахисних покривів на водній основі, що безпосередньо впливають на їх експлуатаційну ефективність під час дії високих температур. Особливу увагу приділено методу оцінювання міцності спученого теплоізоляційного шару (пінококсу), оскільки саме цей показник визначає здатність покриву зберігати структурну цілісність і забезпечувати стабільний вогнезахисний ефект в умовах впливу високих температур. Для визначення механічної міцності сформованого теплоізоляційного шару (пінококсу) застосовано метод розподіленого навантаження. Суть методу полягає у визначенні критичного навантаження, за якого напруження в структурі пінококсу досягає межі міцності матеріалу. Такий підхід дозволяє оцінити опір шару дії нормальних механічних напружень під час стиску та визначити статичну міцність спученого теплоізоляційного каркасу, що є ключовим параметром його вогнестійкості.

В третьому розділі встановлено закономірності впливу компонентів в складі стирол-акрилової дисперсії на її горючість, здатність до спучення та формування теплоізоляційного пінококсу. Показано, що поєднане використання кисневого індексу (КІ) та лінійного коефіцієнта спучення (КС) є ефективним підходом для комплексної оцінки вогнезахисних властивостей водно-дисперсійних реактивних покривів. Отримані результати підтверджують високу перспективність застосування стирол-акрилової дисперсії як плівкоутворювальної матриці для водно-дисперсійних покривів реактивного типу та підтверджують ключову роль компонентів – поліфосфату амонію, пентаерітриту та гідроксиду алюмінію – у формуванні ефективного теплоізоляційного шару. Встановлені закономірності взаємодії цих компонентів створюють наукове підґрунтя для подальшої оптимізації рецептури реактивних систем, орієнтованої на підвищення їх структурної стабільності при високих температурах.

В четвертому розділі представлено метод визначення міцності утвореного пінококсу вогнезахисних покривів металевих конструкцій. Порівняльний аналіз пенетраційного методу та методу розподіленого навантаження показав їх принципову відмінність за інформативністю при оцінці міцності пінококсу. Встановлено, що пенетраційний метод через локальний характер навантаження відображає переважно поверхневу міцність шару та не забезпечує достовірної оцінки його цілісності. Метод щілинних вантажів забезпечує рівномірне навантаження та дозволяє визначити критичну масу руйнування пінококсу. Отримані значення характеризуються високою відтворюваністю та фізичною відповідністю умовам реальної пожежі. Це обґрунтовує пріоритетність методу розподіленого навантаження для оцінки механічної стійкості реактивних покривів. Також проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану спученого вогнезахисного покриву на поверхні сталевої пластини у програмному середовищі ANSYS Explicit Dynamics та на основі отриманих результатів визначено оптимальний компонентний склад вогнезахисного покриву, який забезпечує максимальну механічну стійкість при стисканні. Зокрема, підтверджено ефективність застосування оптимального співвідношення таких компонентів, як пентаерітрит, поліфосфат амонію, стирол-акрилова основа та гідроксид алюмінію, у формуванні захисного спученого покриву. Таким чином, результати комп'ютерного моделювання підтвердили ефективність розробленого підходу до аналізу поведінки спученого покриву вогнезахисного матеріалу під локальним навантаженням та дало змогу визначити критичні параметри міцності, які необхідні для подальшого вдосконалення захисних покривів.

Загальні висновки цілком відповідають сформульованим задачам дослідження та є стислим висвітленням одержаних здобувачем результатів. Текст не містить запозичень, щодо яких не було б зроблено посилань на першоджерела.

4. Обґрунтованість, достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

Обґрунтованість, достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені результатами аналізу актуальних наукових публікацій та вимог нормативних документів з визначення механічної міцності коксового шару вогнезахисних покривів; відповідністю розроблених методів дослідження поставленій меті і завданням; адекватністю та достовірністю отриманих результатів експериментальних досліджень; удосконалення науково обґрунтованого методу визначення механічної міцності коксового шару, що формується реактивними вогнезахисними покривами, на основі водної дисперсії полімеру в умовах термічного впливу; апробацією та застосуванням на практиці впроваджених результатів досліджень.

5. Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна дисертації полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі водної дисперсії полімеру шляхом забезпечення міцності коксового шару, що формується в умовах термічного впливу.

Отримані такі основні наукові результати.

Уперше:

розроблено комбінований склад вогнезахисного покриву для металевих конструкцій ПФА:ПЕ:$Al(OH)_3$ = 25:15:40 мас.%, яка, на відміну від існуючих аналогів, реалізує синергізм «спучення-міцність», тобто зростання частки ПЕ підвищує спучення, але знижує міцність, а введення $Al(OH)_3$ до 40 мас.% підвищує механічну стійкість завдяки формуванню оксидного каркасу, що дозволило визначити оптимальне співвідношення як таке, що забезпечує збалансоване поєднання достатнього спучення та структурної стабільності шару в умовах пожежі.

розроблено модель захисної системи вогнезахисного покриву для металевих конструкцій, яка враховує реальні розміри експериментального зразка, включаючи металеву пластину, вогнезахисний покрив та стандартні щілинні вантажі та дозволила максимально точно відтворити напружено-деформований стан спученого вогнезахисного покриву при локальному навантаженні та визначити його граничні міцнісні характеристики.

Удосконалено:

склад розчину реактивного покриву для металевих конструкцій шляхом комбінованого використання ПФА, ПЕ та Al(OH)3, що підвищує механічну міцності пінококсу завдяки формуванню оксидного каркасу та забезпечує зниження температури продуктів горіння у 1,6 рази, перехід матеріалу до груп горючості Г1 та поширення полум'я І1, зменшення димоутворення на 60–65 % (до групи Д2).

склад реактивної системи на основі поліфосфату амонію, пентаеритриту та гідроксиду алюмінію шляхом введення гідрофобізованого аеросилу, що забезпечує зниження інтенсивності дифузії вологи в покрив та мінімізацію вимивання активних компонентів, а також підвищення довговічності, структурної стабільності і експлуатаційної надійності реактивного покриву металевих конструкцій.

метод кількісного визначення механічної міцності пінококсового шару вогнезахисного покриву для металевих конструкцій шляхом теоретичного обґрунтування та експериментального підтвердження застосування розподіленого навантаження стандартизованими щілинними вантажами, який враховує механізм руйнування коксового шару при зовнішньому механічному впливі, що підтверджується суттєвими відмінностями результатів порівняно з методом розподіленого навантаження (1,14–10,68; у середньому 3,19 рази).

Набуло подальшого розвитку уявлення про структурно-механічні характеристики пінококсового шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі водної дисперсії полімеру в умовах термічного впливу.

6. Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення полягає у розроблені та впровадженні методу кількісного визначення питомої міцності коксового шару із застосуванням розподіленого статичного навантаження, що може бути використано в лабораторній практиці та як основа для подальшої стандартизації оцінювання механічної стійкості реактивних покривів.

Результати дослідження впроваджено в:

діяльність ТОВ «ВОГНЕБІОЗАХИСТ» – Розроблений Копилом Б. Я. метод визначення механічної міцності коксового шару вогнезахисних покривів дозволяє обґрунтувати доцільність застосування розподіленого навантаження як більш адекватного інструменту оцінювання механічної стійкості спученого шару в умовах, наближених до реального пожежного впливу (акт упровадження від 07.04.2026);

у роботу Державного центру сертифікації ДСНС України – розроблений метод може бути взятий за основу при розробці відповідної нормативної бази, а також рекомендацій та методик в Україні у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій, які доповнюють нормативні документи на дослідження вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на стирол-акриловій основі (акт упровадження від 10.04.2026);

в освітній процес Національного університету цивільного захисту України, що підвищує якість лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти (акт упровадження від 13.06.2026).

7. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Результати досліджень, які висвітлено у дисертації, опубліковано в 14 наукових працях: 6 статей у наукових фахових періодичних виданнях України, 1 публікація, що індексується в наукометричній базі Scopus та 7 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Представлена дисертаційна робота є одноосібно виконаною кваліфікаційною науковою працею. Вона написана зрозумілою для фахівців у галузі цивільної безпеки мовою та належним чином оформлена. У кінці кожного розділу наведено відповідні висновки. Стиль викладу, мова та оформлення відповідають вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії і демонструють здатність автора стисло та чітко викладати теоретичні та практичні результати наукового дослідження.

8. Зауваження до дисертації

Не зважаючи на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, слід зазначити на деякі зауваження:

1. У другому розділі дисертації визначено матеріали та методи, застосовані для розроблення вогнезахисних покривів для металевих конструкцій. Доцільно було б детальніше обґрунтувати метод для визначення адгезійної міцності вогнезахисних покривів до металевої основи.

2. У третьому розділі описано вплив кожного компоненту на зниження горючості та утворення спученого шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій, проте відкритим залишилось питання щодо впливу даних компонентів на токсичність продуктів горіння при термічному впливі.

3. З тексту дисертації не зрозуміло, чи можуть бути використані результати досліджень для визначення механічної міцності вогнезахисних покривів інших видів матеріалів, наприклад дерев'яних.

4. У третьому розділі за результатами експериментів визначено оптимальний склад для вогнезахисного покриву для металевих конструкцій, який забезпечує високу механічну міцність, достатній ступінь спучення та мінімальну втрату маси. Доцільно було б детальніше розглянути довговічність запропонованого вогнезахисного покриву для металевих конструкцій.

5. У четвертому розділі дисертації показано відтворюваний метод оцінювання механічної міцності пінококсового шару із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів. Не зрозуміло чому метод передбачає ступінчасте збільшення навантаження з кроком саме 10 грам та витримкою 5 С на кожному етапі до моменту фіксації продавлювання або руйнування шару.

6. У четвертому розділі створено детальну тривимірну геометричну модель захисної системи, яка враховує реальні розміри експериментального зразка, включаючи металеву пластину, вогнезахисний покрив та циліндричні вантажі. Не зрозуміло чи враховано вплив факторів реальної пожежі при такому моделюванні.

9. Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна робота КОПИЛА Богдана Яковича «Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару» є завершеною науковою роботою в галузі цивільна безпека. Рівень вирішення поставлених в роботі завдань свідчить, що здобувач в повній мірі володіє методологією наукової діяльності та сформувався як дослідник.

Таким чином, дисертаційна робота відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12 січня 2022 року № 44, а її автор КОПИЛ Богдан

Якович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 26 «Цивільна безпека» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека».

Офіційний опонент:
Професор кафедри
технологій захисту навколишнього
середовища та охорони праці
Київського національного університету
будівництва і архітектури
доктор технічних наук, професор Юрій ЦАПКО