

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора, проректора з наукової роботи Національного університету цивільного захисту України Рибки Євгенія Олексійовича на дисертаційну роботу Копила Богдана Яковича за темою «Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару», подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – пожежна безпека.

Актуальність роботи.

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 °C 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.

Одним з найбільш ефективних засобів захисту металу є вогнезахисні покриви реактивного типу, що під впливом температури здатні формувати спінений теплоізоляційний шар (пінококс). Реактивні покриви на основі водних полімерних дисперсій набули значного поширення завдяки їх екологічності, технологічності у застосуванні та можливості нанесення на великі площі металевих конструкцій. Важливо підкреслити, що такі покриви особливо ефективні для складних за конфігурацією металевих елементів – зварних швів, вузлів жорсткості, перфорацій, кріплень, профільованих балок, колон і ферм. Здатність таких покривів рівномірно формувати захисний пінококс на поверхнях будь-якої геометрії забезпечує їх високу універсальність та дозволяє застосовувати у конструкціях, де традиційні вогнезахисні рішення (мінеральні плити, обмотки, штукатурки) є малоефективними або непридатними.

Питання розроблення реактивних вогнезахисних покривів та методів комплексної оцінки їх ефективності широко представлене у працях Л. М. Вахітової, Р. А. Яковлевої, J. S. Lee, K. P. Nørgaard, O. M. Григоренка, А. І. Березовського, С. В. Новака, С. В. Жартовського, Н. В. Саєнко, Ю. В. Попова та інших дослідників. У цих роботах системно проаналізовано як термохімічні процеси, що відбуваються в реактивних системах під час дії високих температур, так і фізико-хімічні перетворення у конденсованій фазі, які визначають формування теплоізоляційного коксового шару та його здатність забезпечувати необхідний вогнезахист. Завдяки цим дослідженням сформовано наукові засади створення ефективних реактивних покривів та підходів до оцінювання їх захисних властивостей.

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 індентуванні, 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 пінококсів шару залишаються недостатньо розробленими та потребують наукового обґрунтування і стандартизації.

Новизна наукових положень.

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 щільні 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 покриття 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 покриття та мінімізацію вимивання активних компонентів, а також підвищення довговічності, структурної стабільності і експлуатаційної надійності реактивного покриття металевих конструкцій;

– метод кількісного визначення механічної міцності пінококсів шару вогнезахисного покриття для металевих конструкцій шляхом теоретичного обґрунтування та експериментального підтвердження застосування розподіленого навантаження стандартизованими щільними 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).

Практичне значення дисертаційних досліджень.

Практичне значення полягає у розробленні 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 покриттів.

Результати дослідження впроваджені в:

– діяльність ТОВ «ВОГНЕБІОЗАХИСТ» – розроблений Копилом Б. Я. метод визначення механічної міцності коксового шару вогнезахисних покриттів 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 покриттів 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).

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і 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.

Повнота викладення основних результатів в опублікованих наукових працях.

Основний зміст роботи викладено у 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, що свідчить про високий рівень апробації результатів.

Основні результати проведених досліджень оприлюднено, обговорено та позитивно оцінено на таких науково-комунікативних заходах:

– Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» (м. Харків, НУЦЗ України, 2022 р.);

– XIII Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція з міжнародною участю (м. Черкаси, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023 р.);

– XV Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024р.);

– Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів: ЛДУБЖД, 2024 р.);

– XIV Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція з міжнародною участю (м. Черкаси, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024 р.);

– Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, НУЦЗ України, 2024 р.);

– XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екології та енергозбереження» (м. Миколаїв, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2025 р.);

Коротка характеристика роботи.

У 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.

У 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.

У 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 (KI) 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, пентаеритриту 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.

У 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 щільних 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 сталевій 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 пентаеритрит, 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.

Оцінка оформлення дисертації.

Дисертація оформлена на високому професійному рівні відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 (зі змінами). Робота має чітку логічну структуру, містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Текст супроводжується необхідною кількістю таблиць та ілюстрацій, що полегшують сприйняття матеріалу.

Дисертація за змістом відповідає спеціальності 261 – пожежна безпека. Перелік опублікованих праць за темою дослідження в повному обсязі відображає зміст дисертаційної роботи.

Відсутність порушень принципів академічної доброчесності.

На основі аналізу тексту дисертації та опублікованих праць автора порушень принципів академічної доброчесності не виявлено. Усі використані ідеї та результати інших дослідників мають відповідні посилання. Факти маніпулювання даними або фабрикації результатів відсутні.

Зауваження та дискусійні положення:

Позитивно оцінюючи основні результати дисертаційної роботи в цілому, слід зробити певні зауваження, які полягають у такому:

1. У аналітичних дослідженнях не наведено статистичні дані щодо пожеж на об'єктах, де застосовувались вогнезахисні металеві конструкції.

2. Автор наводить використання безрозмірного коефіцієнту співвідношення методів К з метою кількісного зіставлення результатів, отриманих пенетраційним методом та методом розподіленого навантаження, доцільно, однак у роботі не достатньо уваги приділено саме деталізації коректності співвідношення результатів зіставлення результатів, отриманих цими методами.

3. На рис. 4.20 дисертаційної роботи значення вказано занадто дрібним шрифтом. Доцільно було б їх збільшити.

4. В дисертаційній роботі не достатньо приділено уваги обґрунтуванню доцільності застосування гідрофобізованого аеросилу.

5. Табличні дані, що представлені в роботі було б доцільно долучити додатком до рукопису дисертаційної роботи.

Зазначені зауваження мають переважно дискусійний характер і не применшують наукової та практичної цінності дисертації.

Висновки.

Дисертаційна робота Копила Богдана Яковича «Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару» є завершеною кваліфікаційною працею, що має вагомим значення для галузі знань 26 «Цивільна безпека». Робота відповідає вимогам наказу МОН України від 12.01.2017 № 40 (зі змінами) та Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 (зі змінами). Автор дисертації, Копил Богдан Якович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – пожежна безпека.

Рецензент:

проректор з наукової роботи
Національного університету
цивільного захисту України,
доктор технічних наук, професор

«10» серпня 2026 р.



Євгеній РИБКА

