

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Копила Богдана Яковича «Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару», подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» з галузі знань 26 «Цивільна безпека»

Актуальність вибраної теми дослідження.

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, К. Р. Nørgaard, О. М. Григоренка, А. І. Березовського, С. В. Новака, С. В. Жартовського, Н. В. Сасенко, 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.

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.

Таким чином, дисертаційна робота здобувача Копила Богдана Яковича є надзвичайно актуальною.

Формулювання наукової задачі, нове вирішення якої одержано в дисертації.

Метою роботи є 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.

Сформульовані та вирішені наступні **завдання дослідження:**

1. Провести аналіз стану проблематики вогнезахисту металевих будівельних конструкцій.
2. Обґрунтувати вибір матеріалів і методів дослідження для оцінювання вогнезахисної ефективності та механічної міцності пінококсу.
3. Дослідити вплив компонентів на вогнезахисну ефективність та експлуатаційні властивості розроблених покривів для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії.

4. Визначити критичне навантаження та механізм втрати міцності сформованого пінококсового шару вогнезахисного реактивного покритву для металевих конструкцій шляхом моделювання механічного навантаження та підвищити механічну міцність сформованого теплоізоляційного шару покриттів реактивного типу шляхом оптимізації компонентного складу.

5. Удосконалити метод визначення механічної міцності коксового шару вогнезахисних покриттів 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 покриттів для металевих конструкцій в умовах термічного впливу.

Для отримання, аналізу та обґрунтування результатів були цілком послідовно, закономірно та коректно використано комплекс теоретичних і експериментальних методів, у тому числі стандартизовані методики фізико-хімічного аналізу та механічних випробувань. Планування експериментальних досліджень здійснювалось з використанням методів математичного моделювання та оптимізації, що забезпечило раціональний вибір факторів і умов випробувань. Достовірність отриманих результатів підтверджували статистичною обробкою даних із застосуванням сучасного комп'ютерного програмного забезпечення.

Наукова новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів проведених досліджень.

Серед найбільш значущих наукових результатів, що мають наукову новизну, в роботі можна визначити наступні:

1. **Вперше розроблено** комбінований склад вогнезахисного покритву для металевих конструкцій ПФА:ПЕ $\text{Al}(\text{OH})_3 = 25:15:40$ мас.%, яка, на відміну від існуючих аналогів, реалізує синергізм «спучення-міцність», тобто зростання частки ПЕ підвищує спучення, але знижує міцність, а введення $\text{Al}(\text{OH})_3$ 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;

2. Вперше розроблено модель захисної системи вогнезахисного покритву 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 покритву при локальному навантаженні та визначити його граничні міцнісні характеристики;

3. Удосконалено склад розчину реактивного покритву 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 ІІ, зменшення димоутворення на 60–65 % (до групи Д2).

4. Удосконалено 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 покритву металевих конструкцій.

5. Удосконалено метод кількісного визначення механічної міцності пінококсів шару вогнезахисного покритву 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).

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення отриманих результатів 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 покривів.

Особистий внесок здобувача.

Всі результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, є результатом самостійної праці автора. Робота є завершеним науковим дослідженням, яке чітко відповідає поставленим цілям та завданням. Основний внесок автора полягає в наступному: проведення системного аналізу наукових публікацій, нормативної документації та існуючих методичних підходів до оцінювання механічної міцності коксового шару, а також у систематизації наукових положень щодо формування реактивних покривів для вогнезахисту металевих конструкцій; розроблення науково обґрунтованого методу кількісного визначення питомої міцності коксового шару із застосуванням розподіленого статичного навантаження, придатного для використання в лабораторній практиці та як основу для подальшої стандартизації оцінювання механічної стійкості реактивних покривів; результатами чисельного моделювання в середовищі ANSYS Explicit Dynamics відтворено напружено-деформований стан спученого вогнезахисного покриву при локальному навантаженні та визначено його граничні міцнісні характеристики; виконано комплекс експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта спучування та механічної міцності сформованого пінококсу, встановлено вплив компонентного складу реактивної системи на структурно-механічні характеристики коксового шару та обґрунтовано оптимальне співвідношення компонентів для забезпечення першої групи вогнезахисної ефективності при одночасному зниженні димоутворення та підвищенні механічної стійкості пінококсу.

Апробація результатів дисертації та публікації.

Основні результати та положення дисертаційного дослідження були успішно апробовані здобувачем протягом усіх років навчання на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних і науково-технічних конференціях.

За темою дослідження опубліковано 14 наукових праць, з них: 6 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у журналі, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus, а також 7 тез доповідей на конференціях.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається із анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 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.

Вступ відображає теоретичне та практичне значення роботи, основний внесок здобувача, відомості про публікації та апробацію дисертаційного дослідження.

В першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблематики вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. Розглянуто класифікацію та етапи розвитку реактивних вогнезахисних покривів, а також сучасний стан досліджень щодо методів оцінювання механічної міцності коксового шару. Визначено проблеми, пов'язані з відсутністю уніфікованої методики оцінювання механічної міцності коксового шару, яка б дозволяла адекватно відтворювати умови реальної експлуатації вогнезахисних покривів для металевих конструкцій. Сформульовано мету та завдання дисертаційного дослідження.

В другому розділі визначено матеріали та методи, використані для розроблення вогнезахисних покривів на водній основі, які безпосередньо впливають на їх експлуатаційну ефективність в умовах дії високих температур.

Особливу увагу приділено методу оцінювання міцності спученого теплоізоляційного шару (пінококсу), оскільки саме цей показник характеризує здатність покриття зберігати структурну цілісність та забезпечувати стабільний вогнезахисний ефект за впливу високих температур. Для визначення механічної міцності сформованого теплоізоляційного шару (пінококсу) використано метод розподіленого навантаження. Суть методу полягає у встановленні критичного навантаження, за якого напруження в структурі пінококсу досягає межі міцності матеріалу. Такий підхід дає можливість оцінити стійкість шару до дії нормальних механічних напружень під час стиску та визначити статичну міцність спученого теплоізоляційного каркасу, що є одним із ключових параметрів його вогнестійкості.

В третьому розділі встановлено закономірності впливу компонентів у складі стирол-акрилової дисперсії на її горючість, здатність до спучення та процес формування теплоізоляційного пінококсу. Показано, що комплексне використання кисневого індексу (КІ) та лінійного коефіцієнта спучення (КС) є ефективним підходом до оцінювання вогнезахисних властивостей водно-дисперсійних реактивних покриттів. Отримані результати підтверджують перспективність застосування стирол-акрилової дисперсії як плівкоутворювальної матриці для водно-дисперсійних покриттів реактивного типу, а також засвідчують ключову роль таких компонентів, як поліфосфат амонію, пентаеритрит та гідроксид алюмінію, у формуванні ефективного теплоізоляційного шару. Встановлені закономірності взаємодії зазначених компонентів формують наукове підґрунтя для подальшої оптимізації рецептур реактивних систем, спрямованої на підвищення їх структурної стабільності за дії високих температур.

В четвертому розділі представлено метод визначення міцності утвореного пінококсу вогнезахисних покриттів металевих конструкцій. Проведений порівняльний аналіз пенетраційного методу та методу розподіленого навантаження показав їх принципову відмінність за інформативністю під час оцінювання міцності пінококсу. Встановлено, що

пенетраційний метод через локальний характер навантаження переважно характеризує поверхневу міцність шару та не забезпечує достовірної оцінки його цілісності. Водночас метод щільних вантажів забезпечує рівномірний розподіл навантаження і дає можливість визначити критичну масу руйнування пінококсу. Отримані результати характеризуються високою відтворюваністю та фізичною відповідністю умовам реальної пожежі, що обґрунтовує доцільність застосування методу розподіленого навантаження для оцінювання механічної стійкості реактивних покривів.

Також проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану спученого вогнезахисного покриву на поверхні сталевій пластини у програмному середовищі ANSYS Explicit Dynamics. 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 дією локального навантаження та дали змогу визначити критичні параметри міцності, 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.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення.

Дисертаційне дослідження проведене на високому науковому рівні та є завершеною науковою роботою, яка повною мірою відповідає поставленим меті та завданням. У ньому розв'язано важливе науково-технічне завдання в галузі

пожежної безпеки спрямоване на підвищення достовірності оцінювання ефективності вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі водної дисперсії полімеру шляхом удосконалення методу визначення механічної міцності коксового шару, що формується в умовах термічного впливу для підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів металевих конструкцій. Оформлення дисертаційної роботи відповідає всім затвердженим вимогам.

Рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.

Дисертаційна робота виконана державною мовою. Розділи роботи містять достатній обсяг матеріалу, що підтверджує вирішення поставлених завдань, і завершуються відповідними висновками. Вважаю, що здобувач Копила Богдана Яковича продемонстрував високий рівень володіння необхідними для здобуття наукового ступеня доктора філософії компетенціями та методологією проведення наукових досліджень.

Дотримання академічної доброчесності.

Перевірка дисертаційної роботи та публікацій автора не виявила порушень академічної доброчесності.

Зауваження та дискусійні питання стосовно положень дисертації.

Зауваження до розділу 2:

1. Чи враховано при виборі матеріалів і методів дослідження можливість їх застосування для всіх типів вогнезахисних покривів чи тільки для покривів металевих конструкцій?

Зауваження до розділу 3:

2. Для покращення сприйняття результатів дисертаційних досліджень доцільно було б навести результати оцінки впливу компонентів на показники

пожежної небезпеки вогнезахисного покриття для металевих конструкцій у вигляді зведених таблиць з порівнянням показників існуючих покриттів.

3. На мій погляд, доцільно було б більш детально описати вплив структурної цілісності та механічної міцності пінококсу вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій на їх вогнезахисну ефективність в умовах термічного впливу.

4. В дисертаційній роботі не наведені детальні результати досліджень вогнезахисної ефективності відомих вітчизняних реактивних покриттів, однак, є порівняння з розробленим вогнезахисним покритвом для металевих конструкцій.

Зауваження до розділу 4:

5. Недостатньо повно висвітлена залежність оцінюваної міцності пінококсу вогнезахисного покриття для металевих конструкцій від характеру прикладеного навантаження та площі контакту.

6. На окремих рисунках (рис. 4.15, 4.16, 4.20) дуже малі літери та цифри. Бажано було б збільшити масштаб рисунків для покращення сприйняття матеріалу.

Проте вказані зауваження та дискусійні питання не знижують загальної позитивної оцінки проведеного дослідження і не впливають на наукове та практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи.

Вважаю, що робота повністю відповідає вимогам до наукових робіт освітньо-кваліфікаційного рівня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека».

Загальний висновок.

Таким чином, з огляду на актуальність, наукову новизну, достовірність та обґрунтованість отриманих результатів, відповідність науковому рівню та вірогідність висновків, дисертаційна робота Копила Богдана Яковича «Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару» відповідає встановленим вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від

12.01.2017 № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (зі змінами) та постанови Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами), а її автор, Копил Богдан Якович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека».

Офіційний опонент:

професор кафедри будівельних
конструкцій та мостів інституту будівництва,
інфраструктури та безпеки життєдіяльності
Національного університету
«Львівська політехніка»
доктор технічних наук, професор

Тарас ШНАЛЬ

