

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Національний університет цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Копил Богдан Якович

УДК 614.84

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАКТИВНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ
ПОКРИВІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ КОКСОВОГО ШАРУ**

Спеціальність – 261 Пожежна безпека
Галузь знань – 26 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Б. Я. Копил

Науковий керівник: **Березовський Андрій Іванович**
кандидат технічних наук, доцент

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Копил Б. Я. Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання, яке спрямоване на підвищення достовірності оцінювання ефективності вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі водної дисперсії полімеру шляхом розроблення науково обґрунтованого методу визначення механічної міцності коксового шару, що формується в умовах пожежі для підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів металевих конструкцій.

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.

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 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 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.

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.%, який, 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 покриття 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 покриття 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 П1, 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 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).

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

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 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 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 13.04.2026).

Ключові слова: пожежна безпека, вогнезахист, вогнестійкість, шар пінококсу, метод, метал, математична, експеримент, моделювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Berezovskyi A., Bychenko A., **Коруп В.**, Saienko N. Fire protection of metal structures with inflating coatings (overview). *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. № 2 (6). С. 109–116. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/140>
2. Березовський А. І., **Копил Б. Я.**, Іщенко І. І., Саєнко Н. В. Вплив співвідношення вогнезахисних компонентів на вогнезахисну ефективність покривів металевих конструкцій на водній основі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. № 2 (7). С. 19–28. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/176>
3. Березовський А. І., Саєнко Н. В., **Копил Б. Я.** Вплив інтумесцентних наповнювачів на водопоглинання вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 1(17). С. 85–92. <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/view/236>
4. Березовський А. І., Саєнко Н. В., **Копил Б. Я.**, Григоренко О. М. Вплив інтумесцентних компонентів на структурно-механічні властивості пінококсу вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії. *Пожежна безпека. Збірник наукових праць ЛДУБЖД*. 2025. № 47. С. 14–25. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/3107>
5. Саєнко Н. В., Березовський А. І., **Копил Б. Я.**, Григоренко О. М., Джулай О. М. Оцінка термічної стабільності стирол-акрилових покривів інтумесцентного типу. *Municipal economy of cities*. 2025. № 3 (191). С. 516–524. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/6583>
6. **Копил Б. Я.** Вогнезахисні та експлуатаційні властивості покривів реактивного типу для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2025. № 2 (57). С. 114–121. <https://jdmi.donntu.edu.ua/arkhiv-zbirky/%E2%84%962-vid-2025-r/vognezahysni-ta->

eksploatacyjni-vlastyvosti-pokryviv-reaktyvnogo-typu-dlya-metalevyh-konstrukcij-na-osnovi-styrol-akrylovoyi-dyspersiyi/

Публікації у наукових виданнях, що входять до бази даних Scopus та/або WoS:

7. Berezovskyi A., Saienko N., **Копил В.**, Sidnei S., Kostenko T. Study of the influence of fillers on swelling and water absorption of reactive fire-retardant coatings of metal structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Т. 1499, № 1. С. 012031. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1499/1/012031>

Матеріали науковопрактичних конференцій, що засвідчують апробацію дисертації:

8. Березовський А. І., **Копил Б. Я.** Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття металевих будівельних конструкцій // *Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Харків : НУЦЗ України, 2022. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/16676/1/FSI-2022-collection-2.pdf>

9. Berezovskyi A., **Копил В.** Fire protection of metal structures with inflating coatings // *Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матеріали XIII Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, 26–27 жовт. 2023 р.* Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Nadzvicaini_situaciy_i_bezpeka_ta_zaxist.pdf

10. Березовський А. І., **Копил Б. Я.** Особливості впливу компонентів на вогнезахисну ефективність покриттів металевих конструкцій на водній основі // *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф.*, 25 квіт. 2024 р. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. URL: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/TPGPNS-2024.pdf>

11. Березовський А. І., **Копил Б. Я.**, Саєнко Н. В. Екологічно безпечні тонкошарові вогнезахисні покриття для підвищення пожежної безпеки металевих конструкцій // *Проблеми екології та енергозбереження XVI : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф.*, 23–24 жовт. 2025 р. Миколаїв, 2025. С. 443–446. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/50105/188689.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

12. Березовський А., **Копил Б.**, Водопоглинання вогнезахисних покриттів металевих конструкцій залежно від наповнювачів // *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Львів, 13 груд. 2024 р. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 158–161. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/15234>

13. Березовський А., **Копил Б.**, Вплив наповнювачів на водопоглинання вогнезахисних покриттів металевих конструкцій // *Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матеріали XIV Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю*, 24–25 жовт. 2024 р. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 82–85. https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/z_conf_ns_24-25_10_24.pdf

14. Березовський А., **Копил Б.** Вплив співвідношення компонентів на вогнезахисну ефективність покриттів металевих конструкцій // *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених*, м. Харків, 2024 р. Харків, 2024. С. 55. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/MNPK_2024.pdf

ABSTRACT

Kopyl B. Ya. Increasing the efficiency of intumescent fire-protective coatings for metal structures by ensuring the strength of the char layer.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 261 – Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving a relevant scientific and technical problem aimed at increasing the reliability of evaluating the effectiveness of fire-protective coatings for metal structures based on an aqueous polymer dispersion by developing a scientifically substantiated method for determining the mechanical strength of the char layer formed under fire conditions in order to enhance the effectiveness of reactive fire-protective coatings for metal structures.

The introduction describes the general characteristics of the work, substantiates the relevance of the dissertation topic, reveals the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the purpose, objectives, object and subject of the dissertation research, indicates the scientific novelty and practical significance of the obtained results, defines the personal contribution of the applicant, provides data on approbation, publications, structure and scope of the work.

The first section analyzes the current state of the problem of fire protection of metal building structures. The classification and development of intumescent fire-protective coatings and the current state of methods for assessing the mechanical strength of the char layer are studied. Problems associated with the absence of a unified methodology for assessing the mechanical strength of the char layer capable of adequately reproducing real operating conditions of fire-protective coatings for metal structures are outlined. The purpose and objectives of the dissertation research are formulated.

The second section defines materials and methods used for the development of water-based fire-protective coatings that directly affect their operational efficiency under high temperature exposure. Special attention is paid to the method for assessing the strength of the expanded heat-insulating layer (char foam), since this indicator determines the ability of the coating to maintain structural integrity and provide a stable fire-protective effect under high temperatures. To determine the mechanical strength of the formed heat-insulating layer (char foam), the method of distributed loading was used. The essence of the method is to determine the critical load at which stresses in the structure of the char foam reach the strength limit of the material. This approach allows evaluation of the resistance of the layer to normal mechanical stresses under

compression and determination of the static strength of the expanded heat-insulating framework, which is a key parameter of its fire resistance.

The third section establishes regularities of the influence of components in the composition of the styrene-acrylic dispersion on its combustibility, expansion ability and formation of heat-insulating char foam. It is shown that the combined use of oxygen index (OI) and linear expansion coefficient (K_e) is an effective approach for comprehensive evaluation of fire-protective properties of water-dispersed intumescent coatings. The obtained results confirm the high prospects of using styrene-acrylic dispersion as a film-forming matrix for water-dispersed intumescent coatings and confirm the key role of components – ammonium polyphosphate, pentaerythritol and aluminum hydroxide – in the formation of an effective heat-insulating layer. The established regularities of interaction of these components create a scientific basis for further optimization of the formulation of intumescent systems aimed at increasing their structural stability at high temperatures.

The fourth section presents a method for determining the strength of the formed char foam of fire-protective coatings for metal structures. Comparative analysis of the penetration method and the distributed loading method showed their fundamental difference in informativeness when assessing the strength of char foam. It is established that the penetration method, due to the local nature of loading, mainly reflects the surface strength of the layer and does not provide a reliable assessment of its integrity. The method of slotted weights provides uniform loading and allows determining the critical mass of destruction of char foam. The obtained values are characterized by high reproducibility and physical correspondence to real fire conditions. This substantiates the priority of the distributed loading method for assessing the mechanical stability of intumescent coatings. Numerical modeling of the stress-strain state of the expanded fire-protective coating on the surface of a steel plate was also carried out in the ANSYS Explicit Dynamics software environment, and based on the obtained results the optimal component composition of the fire-protective coating providing maximum mechanical stability under compression was determined. In particular, the effectiveness of using the optimal ratio of such components as pentaerythritol, ammonium polyphosphate,

styrene-acrylic base and aluminum hydroxide in the formation of a protective expanded coating was confirmed. Thus, computer modeling confirmed the effectiveness of the developed approach to analyzing the behavior of the expanded coating of fire-protective material under local loading and made it possible to determine critical strength parameters necessary for further improvement of protective coatings.

Scientific novelty of the dissertation lies in solving an urgent scientific and technical problem of increasing the efficiency of intumescent fire-protective coatings for metal structures based on waterborne polymer dispersion by ensuring the strength of the char layer formed under thermal exposure.

The following main scientific results were obtained:

For the first time:

- a combined composition of fire-protective coating for metal structures APP:PER Al(OH)₃ = 25:15:40 wt.% was developed, which, unlike existing analogues, implements the “expansion-strength” synergism, that is, an increase in PER content increases expansion but reduces strength, while the introduction of Al(OH)₃ up to 40 wt.% increases mechanical stability due to the formation of an oxide framework, which made it possible to determine the optimal ratio as one that ensures a balanced combination of sufficient expansion and structural stability of the layer under fire conditions.

- a model of the protective system of a fire-protective coating for metal structures was developed, which takes into account the real dimensions of the experimental sample, including a metal plate, fire-protective coating and standard slotted weights, and allowed *максимально* accurate reproduction of the stress-strain state of the expanded fire-protective coating under local loading and determination of its limiting strength characteristics.

Improved:

- the composition of the intumescent coating solution for metal structures by combined use of APP, PER and Al(OH)₃, which increases the mechanical strength of char foam due to the formation of an oxide framework and ensures a decrease in the temperature of combustion products by 1.6 times, transition of the material to

combustibility groups G1 and flame spread I1, reduction of smoke formation by 60–65 % (to group D2).

- the composition of the intumescent system based on ammonium polyphosphate, pentaerythritol and aluminum hydroxide by introducing hydrophobized aerosil, which ensures reduction of moisture diffusion intensity into the coating and minimization of leaching of active components, as well as increasing durability, structural stability and operational reliability of the intumescent coating of metal structures.

- the method for quantitative determination of the mechanical strength of the char foam layer of a fire-protective coating for metal structures by theoretical substantiation and experimental confirmation of the use of distributed loading with standardized slotted weights, which takes into account the mechanism of destruction of the char layer under external mechanical action, which is confirmed by significant differences in results compared to the penetration method (1.14–10.68; on average 3.19 times).

Further development was given to the understanding of structural-mechanical characteristics of the char layer of fire-protective coatings for metal structures based on waterborne polymer dispersion under thermal exposure.

Practical significance lies in the development and implementation of a method for quantitative determination of the specific strength of the char layer using distributed static loading, which can be used in laboratory practice and as a basis for further standardization of assessing the mechanical stability of intumescent coatings.

The research results were implemented in:

- the activities of LLC “VOGNEBIOZAKHYST” – the method for determining the mechanical strength of the char layer of fire-protective coatings developed by Kopyl B.Ya. allows substantiating the feasibility of using distributed loading as a more adequate tool for assessing the mechanical stability of the expanded layer under conditions close to real fire exposure (implementation act dated 07.04.2026);

- the work of the State Certification Center of the State Emergency Service of Ukraine – the developed method can be used as a basis for the development of relevant regulatory framework, as well as recommendations and methodologies in Ukraine in the form of control tools and technological recommendations that complement regulatory documents for research of fire-protective coatings for metal structures on a styrene-acrylic basis (implementation act dated 10.04.2026);

- the educational process of the National University of Civil Protection of Ukraine, which improves the quality of lectures and practical classes for higher education students (implementation act dated 13.04.2026).

Keywords: fire safety, fire protection, fire resistance, char foam layer, method, metal, mathematical, experiment, modeling.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION

Articles in scientific professional editions of Ukraine:

1. Andrii Berezovskyi, Artem Bychenko, **Bohdan Kopyl**, Nataliia Saienko. Fire protection of metal structures with inflating coatings (overview). *Emergency Situations: Prevention and Elimination*. 2022. No. 2 (6). P. 109–116. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/140>
2. Berezovskyi A. I., **Kopyl B. Ya.**, Ishchenko I. I., Saienko N. V. Influence of the ratio of fire-protective components on the fire-protective efficiency of water-based coatings for metal structures. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*. 2023. No. 2 (7). P. 19–28. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/176>
3. Berezovskyi A. I., Saienko N. V., **Kopyl B. Ya.** Influence of intumescent fillers on water absorption of fire-protective coatings for metal structures based on acrylic dispersion. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2024. No. 1(17). P. 85–92. <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/view/236>
4. Berezovskyi A. I., Saienko N. V., **Kopyl B. Ya.**, Hryhorenko O. M. Influence of intumescent components on the structural and mechanical properties of

char foam of fire-protective coatings for metal structures based on acrylic dispersion. *Fire Safety. Collection of Scientific Papers of LSULS*. 2025. No. 47. P. 14–25. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/3107>

5. Saienko N. V., Berezovskyi A. I., **Kopyl B. Ya.**, Hryhorenko O. M., Dzhulai O. M. Assessment of thermal stability of styrene-acrylic intumescent coatings. *Municipal economy of cities*. 2025. No. 3(191). P. 516–524. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/6583>

6. **Kopyl B. Ya.** Fire-protective and operational properties of intumescent coatings for metal structures based on styrene-acrylic dispersion. *Journal of Donetsk Mining Institute*. 2025. No. 2(57). P. 114–121. <https://jdmi.donntu.edu.ua/arkhiv-zbirky/%E2%84%962-vid-2025-r/vognezahysni-ta-ekspluataczijni-vlastyvosti-pokryviv-reaktyvnogo-typu-dlya-metalevyh-konstrukcij-na-osnovi-styrol-akrylovoyi-dyspersiyi/>

Publications in scientific editions indexed in Scopus and/or WoS:

7. Berezovskyi A., Saienko N., **Kopyl B.**, Sidnei S., Kostenko T. Study of the influence of fillers on swelling and water absorption of reactive fire-retardant coatings of metal structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499, No. 1. P. 012031. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1499/1/012031>

Materials of scientific and practical conferences confirming approbation of the dissertation:

8. Berezovskyi A. I., **Kopyl B. Ya.**, Study of the fire-protective ability of a fire-protective coating for metal building structures // *Fire Safety Issues 2022 : materials of the International Scientific and Practical Conference*. Kharkiv : NUCP of Ukraine, 2022. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/16676/1/FSI-2022-collection-2.pdf>

9. Berezovskyi A., **Kopyl B.** Fire protection of metal structures with inflating coatings // *Emergency Situations: Safety and Protection : materials of the XIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation*, October 26–27, 2023. Cherkasy : Cherkasy Institute of Fire Safety named after

Chornobyl Heroes of NUCP of Ukraine, 2023. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Nadzvicaini_situaciy_i_bezpeka_ta_zaxist.pdf

10. Berezovskyi A. I., **Kopyl B.** Features of the influence of components on the fire-protective efficiency of water-based coatings for metal structures // Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Response : materials of the XV International Scientific and Practical Conference, April 25, 2024. Cherkasy : Chornobyl Heroes ChIFS of NUCP of Ukraine, 2024. URL: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/TPGPNS-2024.pdf>

11. Berezovskyi A. I., **Kopyl B. Ya.**, Saienko N. V. Environmentally safe thin-layer fire-protective coatings for improving the fire safety of metal structures // Problems of Ecology and Energy Saving XVI : materials of the International Scientific and Technical Conference, October 23–24, 2025. Mykolaiv, 2025. P. 443–446. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/50105/188689.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

12. Berezovskyi A., **Kopyl B.** Water absorption of fire-protective coatings for metal structures depending on fillers // Current Problems of Fire Safety and Prevention of Emergencies in Today's Conditions : collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference, Lviv, December 13, 2024. Lviv : LSULS, 2024. P. 158–161. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/15234>

13. Berezovskyi A., **Kopyl B.** Influence of fillers on water absorption of fire-protective coatings for metal structures // Emergency Situations: Safety and Protection : materials of the XIV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation, October 24–25, 2024. Cherkasy : Chornobyl Heroes ChIFS of NUCP of Ukraine, 2024. P. 82–85. https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/z_conf_ns_24-25_10_24.pdf

14. **Kopyl B.**, Berezovskyi A. Influence of the component ratio on the fire-protective efficiency of coatings for metal structures // Problems and Prospects of Ensuring Civil Protection : materials of the International Scientific and Practical

Conference of Young Scientists, Kharkiv, 2024. Kharkiv, 2024. P. 55. URL:
https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/MNPK_2024.pdf

ЗМІСТ

ВСТУП	20
Розділ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМАТИКИ ВОГНЕЗАХИСТУ МЕТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	31
1.1. Реактивні вогнезахисні покриття: класифікація та розвиток.	31
1.2. Механізм дії вогнезахисних покриттів реактивного типу	38
1.3. Сучасний стан справ щодо розробок в галузі вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій на водній основі.	45
1.4. Методи оцінки механічної міцності спученого шару вогнезахисних покриттів металевих конструкцій: сучасний стан питання.	54
1.5. Висновки до розділу 1	67
Розділ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	70
2.1. Використовувані матеріали та їхні властивості	70
2.2. Методи дослідження	82
2.2.1. Методи дослідження вогнезахисної ефективності покриттів для металевих конструкцій	82
2.2.2. Методи визначення експлуатаційно-технологічних характеристик вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій.	90
2.2.3. Методи математичної та статистичної обробки експериментальних даних.	92
2.3. Висновки до розділу 2	95
Розділ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПОНЕНТІВ НА ВОГНЕЗАХИСНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОКРИТТІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.	97
3.1. Першочергова оцінка впливу компонентів на зниження горючості та утворення спученого шару вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій.	97

3.2. Результати термогравіметричного та диференційно-термічного аналізів вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.	107
3.3. Вплив компонентів на структурно-механічні властивості пінококсу вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії.	116
3.4. Комплексний підхід оцінювання ефективності вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.	124
3.5. Дослідження вогнезахисної ефективності розробленого покриву для металевих конструкцій	137
3.6. Висновки до розділу 3	143
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗРОБЛЕНИХ ПОКРИВІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ	146
4.1. Вплив компонентів на водопоглинання вогнезахисних покривів для металевих конструкцій	146
4.2. Експлуатаційні властивості розроблених вогнезахисних покривів для металевих конструкцій	154
4.3 Удосконалення методу визначення міцності утвореного пінококсу вогнезахисних покривів для металевих конструкцій	157
4.4. Комп'ютерне моделювання з метою визначення напружено-деформованого стану вогнезахисного покриву для металевих конструкцій	169
4.5. Порівняльний аналіз пенетраційного методу та методу розподіленого навантаження при визначенні міцності пінококсу вогнезахисного покриву для металевих конструкцій	188
4.6. Висновки до розділу 4	201
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	204
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	207
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	224
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації	228

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми 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.

Одним з найбільш ефективних засобів захисту металу є вогнезахисні покриття реактивного типу, що під впливом температури здатні формувати спінений теплоізоляційний шар (пінококс). Реактивні покриття 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 покриття особливо ефективні для складних за конфігурацією металевих елементів – зварних швів, вузлів жорсткості, перфорацій, кріплень, профільованих балок, колон і ферм. Здатність таких покриттів 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 покриттів та методів комплексної оцінки їх ефективності широко представлене у працях Л. М. Вахітової, Р. А. Яковлевої, J. S. Lee, K. P. Nørgaard, О. М. 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 пінококового шару залишаються недостатньо розробленими та потребують наукового обґрунтування і стандартизації.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами та темами.

Робота виконувалась у рамках науково-дослідної роботи № 0125U001309 «Дослідження особливостей застосування вогнезахисних покривів для

будівельних конструкцій, інженерних мереж та комунікацій об'єктів енергетики в умовах воєнного стану».

Ідея роботи полягає у підвищенні міцності коксового шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій та удосконаленні методу визначення його механічної міцності як передумови для кількісної оцінки здатності реактивних вогнезахисних систем формувати структурно стабільну теплоізоляційну оболонку для підвищенні ефективності вогнезахисту металевих конструкцій.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження 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.

Для досягнення поставленої мети були сформовані завдання:

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 пінококсів 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.
5. 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'єкт дослідження – процеси формування та механічної стабільності пінококсового шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій в умовах термічного впливу.

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

Методи дослідження. Для реалізації поставленої мети та вирішення сформульованих наукових завдань застосовано комплекс теоретичних і експериментальних методів, у тому числі стандартизовані методики фізико-хімічного аналізу та механічних випробувань. Планування експериментальних досліджень здійснювали 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 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 покриття 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 покриття 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 міцність 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 П1, 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 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).

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

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 покривів. Усі положення, які винесені на захист, та результати досліджень наведено в роботах [1–14], з яких робота [6] опубліковано здобувачем самостійно.

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).

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 покриттями, на основі водної дисперсії полімеру в умовах термічного впливу; апробацією та застосуванням на практиці впроваджених результатів досліджень.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у проведенні системного аналізу наукових публікацій, нормативної документації та існуючих методичних підходів до оцінювання механічної міцності коксового шару, а також у систематизації наукових положень щодо формування реактивностатних покриттів для вогнезахисту металевих конструкцій; здобувачем розроблено науково обґрунтований метод кількісного визначення питомої міцності коксового шару із застосуванням розподіленого статичного навантаження, придатний для використання в лабораторній практиці та як основу для подальшої стандартизації оцінювання механічної стійкості реактивних покриттів та за результатами чисельного моделювання в середовищі ANSYS Explicit Dynamics відтворено напружено-деформований стан спученого вогнезахисного покриття 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; запропоновано введення гідрофобізованого аеросилу до складу реактивностатних покриттів з метою зменшення дифузії вологи, мінімізації вимивання активних компонентів і підвищення експлуатаційної стабільності покриттів.

Особистий внесок здобувача у публікаціях, де містяться отримані результати наукових досліджень за участі співавторів, указано нижче:

- у публікації [33] «Fire protection of metal structures with inflating coatings (overview)» здобувачем виконано аналіз вогнезахисних покриттів реактивного типу, які застосовуються в Україні та за кордоном, систематизовано їх

основні експлуатаційні характеристики (вогнезахисна ефективність, технологічність нанесення, довговічність, стійкість до зовнішніх впливів), а також здійснено оцінку токсичності продуктів термоокиснювальної деструкції існуючих реактивних систем. Березовський А. І. здійснив загальне наукове керівництво роботою, брав участь у формулюванні наукової проблематики та редагуванні висновків. Биченко А. О. виконав перевірку щодо класифікації токсичності продуктів згорання та опрацювання показників пожежної небезпеки матеріалів;

- у публікації [99] «Вплив співвідношення вогнезахисних компонентів на вогнезахисну ефективність покривів металевих конструкцій на водній основі» здобувачем обґрунтовано вибір плівкоутворювального зв'язуючого для реактивної системи з урахуванням його термодеструкційних характеристик. Також здобувачем виконано експериментальні дослідження з визначення коефіцієнта спучування, механічної міцності пінококсу розроблених покривів. Березовський А. І. брав участь у підготовці розділу «Оцінка впливу інтумесцентних компонентів на зниження горючості та формування спученого шару стирол-акрилової дисперсії», зокрема у систематизації експериментальних результатів та їх інтерпретації. Саєнко Н. В. брала участь в обґрунтуванні вибору плівкоутворювального зв'язуючого для розробки вогнезахисних покривів з урахуванням їх термодеструкційних та реологічних характеристик;

- у публікації [129] «Вплив інтумесцентних наповнювачів на водопоглинання вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії» здобувачем самостійно проведено експериментальні дослідження щодо водопоглинання вогнезахисних покривів, виконано порівняльний аналіз впливу наповнювачів на водостійкість та обґрунтовано рекомендації щодо розроблення водостійких вогнезахисних матеріалів для захисту металевих конструкцій. Березовський А. І. брав участь в аналізі експериментальних результатів та їх узагальненні. Саєнко Н. В. брала участь у формулюванні наукових положень щодо підвищення експлуатаційної стійкості покривів та редагуванні рукопису статті;

- у публікації [114] «Вплив інтумесцентних компонентів на структурно-механічні властивості пінококсу вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії» здобувачем проведено експериментальні дослідження впливу співвідношення компонентів реактивного типу на коефіцієнт спучення, механічну міцність і термостійкість пінококсу, проаналізовано результати термогравіметричного аналізу і випробування на статичне навантаження, визначено оптимальний склад реактивного покриву. Березовським А. І. здійснено перевірку інтерпретації отриманих результатів та спільно встановлено оптимальний склад реактивної системи, що забезпечує раціональний баланс між ступенем спучення та механічною міцністю пінококсу. Саєнко Н. В. брала участь у науковому консультуванні, обговоренні результатів та підготовці рукопису до публікації;

- у публікації [112] «Оцінка термічної стабільності стирол-акрилових покривів інтумесцентного типу» здобувачем здійснено комплексний аналіз результатів термогравіметричних досліджень розроблених покривів, визначено закономірності їх термодеструкційної поведінки та встановлено характер синергетичної взаємодії компонентів реактивної системи. Досліджено механізми формування пінококсів шару та науково обґрунтовано оптимізовані склади покривів, що забезпечують підвищену термічну стабільність і вогнестійкість сталевих конструкцій. Саєнко Н. В. виконала аналіз стадій термодеструкції та механізмів реактивної системи. Березовський А. І. здійснив аналіз і систематизацію даних диференційно-термогравіметричного аналізу, узагальнення отриманих результатів та формулювання основних висновків дослідження. Григоренко О. М. виконав аналіз експериментальних кривих масовтрат і залишкової маси в температурному діапазоні до 800 °С. Джулай О. М. здійснив наукове консультування, брав участь в обговоренні результатів та редагуванні рукопису;

- у публікації [131] «Вогнезахисні та експлуатаційні властивості покривів реактивного типу для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії» здобувачем самостійно проведено комплексну оцінку вогнезахисних властивостей розроблених реактивних покривів, встановлено

взаємозв'язок між складом системи та її характеристиками, обґрунтовано ефективність введення гідрофобізованого аеросилу для підвищення водостійкості та розроблено рекомендації щодо підвищення довговічності покривів для металевих конструкцій;

- у публікації [123] «Study of the influence of fillers on swelling and water absorption of reactive fire-retardant coatings of metal structures» здобувачем проведено експериментальні дослідження визначення коефіцієнта лінійного спучення, міцності пінококсу, проаналізовано структуру сформованого пінококсу реактивних покривів й обґрунтовано їх високі ізоляційні та захисні властивості. Березовський А. здійснив опрацювання методологічних засад дослідження, забезпечив логічну структуру матеріалу, формування композиційної побудови розділів та виконав наукове редагування й узагальнення висновків. Саєнко Н. здійснила аналітичний огляд сучасних методів оцінювання та нормативно-технічної документації, необхідної для визначення вогнезахисних і експлуатаційних характеристик покривів та виконала аналіз бар'єрного ефекту аеросилу в реактивній системі. Сідней С. брав участь у формуванні структурної концепції статті та науковому обґрунтуванні актуальності дослідження. Костенко Т. забезпечила методичний супровід експериментальних досліджень водопоглинання та брала участь у науковому консультуванні та формулюванні висновків дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дослідження представлені на таких науково-практичних конференціях:

- 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.);

Кількість публікацій за темою дисертаційної роботи. 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.

Структура дисертації та її обсяг. Робота містить анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації 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.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ВОГНЕЗАХИСТУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.

1.1. Реактивні вогнезахисні покриття: класифікація та розвиток.

Забезпечення необхідного рівня вогнестійкості будівельних конструкцій, а також інженерних мереж і комунікацій, є одним із ключових завдань у галузях будівництва, промислового виробництва та транспорту.

Відповідно до [1], вогнестійкість конструкції (виробу) - здатність будівельних конструкцій і елементів зберігати свою несучу здатність, а також чинити опір виникненню наскрізних отворів чи прогріванню до критичних температур і поширенню вогню.

У сучасних будівельних практиках найчастіше використовують конструкції, виготовлені із залізобетону, сталі та деревини. З позиції пожежної безпеки кожен із цих матеріалів має як позитивні характеристики, так і певні обмеження. Наприклад, конструкції з деревини належать до горючих, тому під час пожежі вони здатні сприяти швидкому розвитку вогню та поширенню полум'я по поверхні. Для підвищення рівня їхньої вогнестійкості застосовують методи просочування спеціальними речовинами та нанесення захисних вогнезахисних покриттів [2].

Залізобетонні елементи за впливу високої температури можуть втрачати міцність унаслідок процесів дегідратації компонентів цементного каменю (алюмінатів і гідроксидів кальцію), а також через явища, які характеризуються як крихке руйнування. З метою підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій на практиці широко використовують облицювання, збільшення або заглиблення армування, а також введення наповнювачів із коефіцієнтом температурного розширення, близьким до цементного каменю [3, 4].

Разом із тим найбільшої уваги потребує питання вогнезахисту металевих конструкцій, оскільки вони є надзвичайно поширеними в будівельній та промисловій сферах.

Металеві конструкції активно застосовуються у різних видах будівництва й промислового виробництва. Сталеві елементи, незважаючи на переваги — порівняно невелику масу, високу міцність, надійність і зручність монтажу — мають істотний недолік, а саме недостатній рівень вогнестійкості [5]. Це пояснюється високою теплопровідністю сталі та тим, що за відносно невисоких температур вона втрачає міцнісні характеристики, переходячи в пластичний стан. Температуру, за якої відбувається суттєве зменшення межі текучості, називають критичною ($T_{кр}$). Критичним вважається такий температурний рівень, коли текучість сталі знижується приблизно на 40–50 % порівняно з її показниками за нормальних умов [6, 7].

Унаслідок дії підвищених температур та механічних навантажень у сталевих конструкціях виникають деформації, зумовлені тепловим розширенням, що пов'язано з великим коефіцієнтом лінійного температурного розширення, а також із проявами повзучості матеріалу [8]. За умов пожежі металеві конструкції без вогнезахисного покриття можуть втрачати несучу здатність уже через 10-15 хвилин [9], що часто спричиняє часткове або повне руйнування будівель, ускладнює евакуацію людей та створює додаткові труднощі для роботи підрозділів цивільного захисту під час гасіння пожежі.

Захистити конструкцію від безпосереднього впливу полум'я та підвищених температур можливо шляхом влаштування на її поверхні теплоізоляційних екранів, які характеризуються низькою теплопровідністю. Такі захисні елементи повинні бути здатними працювати в умовах високих температур без втрати своїх властивостей. У результаті застосування подібного екранування межа вогнестійкості металевих елементів суттєво зростає, а їх несуча здатність зберігається протягом потрібного проміжку часу.

Наразі існує значна кількість методів вогнезахисту металевих конструкцій, серед яких найбільш поширеними є:

1. конструктивний спосіб — нанесення штукатурного шару або бетону, а також облицювання цеглою;
2. нанесення на поверхню конструкцій вогнезахисних матеріалів (фарб, обмазок, напилювань тощо);
3. збільшення площі поперечного перерізу несучих елементів;
4. монтаж вогнезахисних екранів із зазором від конструкції або облицювання листовими та плитними матеріалами;
5. застосування поєднання декількох методів (комбінований спосіб).

Вибір оптимального способу вогнезахисту визначається рядом чинників, серед яких важливими є характер навантаження, умови експлуатації конструкції, а також необхідний рівень вогнестійкості. На рис.1.1. представлена структура системи вогнезахисту будівельних конструкцій.

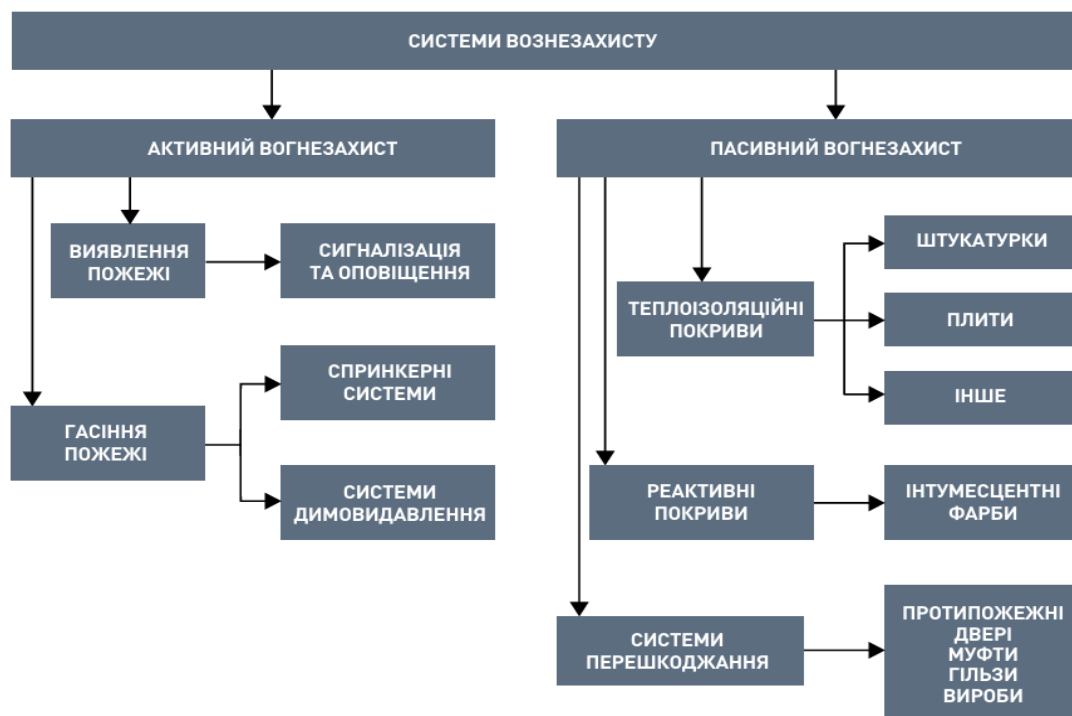


Рис. 1.1. Структура системи вогнезахисту будівельних конструкцій

Кожен із наведених методів характеризується як перевагами, так і певними обмеженнями. Найдоступнішим з економічної точки зору є вогнезахист шляхом нанесення на поверхню конструкцій штукатурних або бетонних шарів, а також

облицювання цеглою. Водночас застосування такого підходу призводить до суттєвого збільшення габаритів елементів і, як наслідок, підвищення навантаження на фундамент. До основних недоліків також належать значна трудомісткість виконання робіт та складність подальшого ремонту й відновлення захисного шару.

Застосування вогнезахисту шляхом монтажу облицювань або захисних екранів є обмеженим у складних кліматичних умовах, оскільки такі елементи мають недостатню вологостійкість. Крім того, їх встановлення зазвичай потребує значних трудових витрат, а для досягнення необхідного рівня вогнестійкості часто необхідно використовувати матеріали великої товщини, що спричиняє підвищену витрату ресурсів.

Водночас цей спосіб може бути доцільним у випадках, коли важливо зберегти декоративні та естетичні характеристики захищуваної поверхні. До вогнезахисних матеріалів такого типу належать вермикулітові, гіпсокартонні та гіпсоволокнисті листи, мінераловатні й оксид-магнієві вогнетривкі плити та листові матеріали, а також комплексні системи вогнезахисту, створені на їх основі.

Застосування вогнезахисних покривів, які наносяться на поверхню, що захищається, тонким шаром є найбільш розповсюдженим способом вогнезахисту металевих конструкцій [12-13]. Залежно від методу захисту конструкції, такі покриви розподіляються на важкозаймісті та покриви, що спучуються (реактивні).

Перші наукові розробки у сфері реактивних вогнезахисних композицій були здійснені у США ще в 1930-х роках. Одними з авторів першого патенту в цьому напрямі вважають Х. Трамма та його співавторів [14]. Ними було запропоновано склад, основою якого слугували діамонійфосфат, диціандіамід і формальдегід. Така композиція під час нагрівання забезпечувала утворення шару «спученого» вуглецю, який виконував захисну функцію [14].

Починаючи з 1960-х років у США спостерігалось активне зростання інтересу до застосування вогнезахисних матеріалів. На початку 1970-х їх

використання збільшилося приблизно у чотири рази, що було пов'язано з поширенням підходів, заснованих на неконструктивному вогнезахисті. У цей період інтенсивно розвивалися дослідження, спрямовані на покращення характеристик та ефективності таких покривів.

Найбільш ґрунтовний огляд інформації щодо вогнезахисних композицій у 1971 році опублікував Х. Вандерсал [15]. Зокрема, він зазначав, що амоній поліфосфат вперше почали застосовувати у вогнезахисних матеріалах ще у 1965 році, а запропонована ним типова рецептура водно-дисперсійної композиції залишається актуальною та використовується й сьогодні.

У Великій Британії проводилися дослідження, спрямовані на розроблення реактивних фарб і лакофарбових матеріалів. У результаті було створено атмосферостійкий вогнезахисний склад фарби [16], який позиціонується не лише як засіб підвищення вогнестійкості, а й як матеріал для захисту від інших агресивних впливів навколишнього середовища та як основа під декоративні фінішні покриття. До складу такої композиції входять фенольні смоли, терморозширюваний графіт, поліхлоропрен, хлорований каучук, а також (як приклад) хлорований поліетилен або поліпропілен чи їх суміші, а також рідке скло.

Значні темпи розвитку спостерігаються й у Китаї, де активно вдосконалюють технології виробництва реактивних композицій. На сьогодні КНР є одним із найбільших світових виробників лакофарбової продукції. Обсяг виробництва лакофарбових покривів у Китаї в середньому досяг 17 тис. тон на рік, що становило близько 38 % від загального світового випуску таких матеріалів. Нижче наведено приклади окремих спучувальних вогнезахисних складів, розроблених у КНР.

Спучуваний вогнезахисний покрив [17] містить полівініловий спирт, карбамідоформальдегідну смолу, окиснений графіт, діоксид титану та оксид молібдену. Зазначена композиція характеризується підвищеною адгезією, достатньою механічною міцністю, а також практично відсутнім виділенням токсичних газів.

Іншим прикладом є ультратонке спучуваний вогнезахисний покрив для сталевих конструкцій на водній основі [18], до складу якого входять епоксидна смола та терморозширюваний графіт. До основних переваг такого матеріалу належать простота нанесення, інтенсивне піноутворення та високий коефіцієнт спучування.

На підставі виконаного патентного аналізу [19–32] можна зробити висновок, що з часу появи перших реактивних композицій склад їхніх базових компонентів загалом не зазнав суттєвих змін. Водночас у розвитку цієї галузі чітко простежуються кілька основних напрямів досліджень і промислового впровадження реактивних вогнезахисних матеріалів.

Першим напрямом є створення та удосконалення складів на акриловій та водній основі. До їх переваг зазвичай відносять зручність нанесення, технологічність і підвищену екологічність. Другий напрям охоплює вогнезахисні системи на базі епоксидних смол, ключовими перевагами яких є вологостійкість, стійкість до атмосферних факторів, а також можливість виконання робіт за знижених температур.

Окрему увагу останнім часом привертають силіконові вогнезахисні матеріали, розробка яких стала перспективним шляхом підвищення експлуатаційних характеристик покривів. З метою отримання якісно нового рівня властивостей було запропоновано замінити водну основу на силіконовий каучук.

Перші спроби реалізації такого підходу відносять ще до 1980-х років, однак активні дослідження в цьому напрямі тривають і нині. Саме силіконові композиції сьогодні розглядають як третій і один із найбільш актуальних напрямів розвитку спучувальних систем.

Отже, покриття реактивного типу класифікують за природою зв'язуючого, зокрема розрізняють системи на основі водних дисперсій полімерів, акрилові полімерні матеріали, композиції на основі епоксидних смол та силіконові системи.

Разом із тим спучувальні вогнезахисні покриття, виготовлені на водній основі, мають низку суттєвих обмежень.

Найважливішими недоліками є недостатня вологостійкість, відносно невеликий термін ефективної служби та низька стійкість до зовнішніх впливів за відсутності додаткових захисних фінішних шарів.

На цьому тлі епоксидні зв'язувальні компоненти вигідно відрізняються більшою стійкістю до агресивних кліматичних умов і хімічних чинників.

Водночас акрилові, водні та епоксидні системи не є універсальним рішенням, оскільки мають слабкі сторони за рядом важливих експлуатаційних показників.

Зокрема, до таких обмежень належать вимоги щодо мінімальної температури нанесення (для водних та епоксидних складів зазвичай близько $+5^{\circ}\text{C}$, тоді як для органорозчинних можливе нанесення приблизно до -10°C), необхідність використання фінішного захисного шару у випадку водних композицій, а також недостатня вібро- та сейсмостійкість. Останній фактор є критично важливим при застосуванні таких покриттів у сейсмоактивних районах.

Сучасним інноваційним напрямом у сфері розробки реактивних вогнезахисних покриттів стало використання каучукових або силіконових зв'язувальних компонентів.

На сьогоднішній день як в Україні, так і за кордоном все частіше використовують реактивні вогнезахисні покриття на водній основі.

Основні переваги таких покриттів полягають у наступному:

- застосування екологічно безпечної водної дисперсії, що не має запаху під час нанесення та експлуатації, що дозволяє використовувати матеріал у закритих або погано вентильованих приміщеннях;
- технологічність нанесення забезпечує можливість скорочення кількості шарів під час виконання вогнезахисних робіт.

1.2. Механізм дії вогнезахисних покривів реактивного типу

У попередніх дослідженнях було проаналізовано етапи розвитку вогнезахисних реактивних покривів та визначено їх основні експлуатаційні характеристики. Разом із тим залишається актуальним поглиблене вивчення механізмів формування реактивного шару.

Процеси спучування та коксоутворення вогнезахисної композиції супроводжуються сукупністю фізико-хімічних перетворень, які відбуваються у визначеній послідовності в міру зростання температурного навантаження. Дослідження механізму спучення ускладнюється тим, що ключові реакції, відповідальні за утворення ефективного теплоізоляційного захисного шару, реалізуються в області високих температур, що істотно обмежує можливості їх математичного та експериментального моделювання.

Необхідно також зазначити, що реактивні вогнезахисні покриття належать до багатокомпонентних композиційних матеріалів. Це зумовлює значну кількість потенційних міжфазних та міжкомпонентних взаємодій у структурі спученого шару за умов термічного впливу. У зв'язку з цим ідентифікація та прогнозування складних високотемпературних реакцій є складним науковим завданням.

На думку окремих дослідників, вогнезахисна ефективність реактивних вогнезахисних складів визначається сукупністю кількох чинників [33]. Передусім вона пов'язана з поглинанням теплової енергії, що відбувається внаслідок різноманітних фізичних і хімічних перетворень компонентів реактивного матеріалу під час формування пінококсового шару. У процесі спучення виділяються негорючі газоподібні продукти (водяна пара, азот, аміак, вуглекислий газ тощо), які виконують роль флегматизаторів і сприяють помітному охолодженню карбонізованого шару.

Важливу роль відіграє також тепловий опір сформованого карбонізованого шару, що визначається його структурою, щільністю каркаса, теплопровідністю, термостійкістю та умовами утворення. Крім того, ефективність реактивних

покривів зумовлена здатністю поверхневого шару пінококсу ендотермічно поглинати тепловий потік.

Карбонізований теплоізоляційний шар обмежує поширення газоподібних продуктів термічного розкладання полімеру та перешкоджає доступу кисню до його поверхні. Збільшення об'єму карбонізованих продуктів і товщини пінококсового шару призводить до зменшення кількості газоподібних продуктів, що надходять у зону горіння, а також знижує швидкість передачі тепла до нижніх шарів покриву. Структура пінококсу істотно впливає на його теплопровідність, проникність, а також схильність до вигорання і тління.

На підставі проведеного патентного аналізу [34–48] можна зробити висновок, що сучасні вогнезахисні реактивні композиції у більшості випадків базуються на трьох основних компонентах: пентаеритриті (ПЕР), меламіні (МЛ) та поліфосфаті амонію (ПФА). У процесі спучення меламін виступає джерелом амінів, пентаеритрит — джерелом альдегідних сполук, тоді як поліфосфат амонію виконує функцію каталізатора тверднення полімерно-олігомерного просторового каркаса [49].

Основні компоненти реактивної вогнезахисної композиції доцільно розглянути детальніше.

Пентаеритрит (ПЕ (2,2-біс(гідроксиметил)пропан-1,3-діол)), хімічна формула $C_5H_{12}O_4$, є органічною сполукою класу багатоатомних спиртів, що містить чотири гідроксильні групи та являє собою білу кристалічну дрібнодисперсну речовину. У наукових працях [50] ПЕ розглядається як компонент, відповідальний за формування вуглецевого каркаса в реактивних вогнезахисних системах. Його ефективність зумовлена співвідношенням між кількістю гідроксильних груп у молекулі та вмістом вуглецю, що визначає масу карбонізованого залишку. При цьому число гідроксильних груп впливає на інтенсивність виділення водяної пари та, відповідно, на швидкість утворення пінококсового шару.

Плавлення пентаеритриту відбувається у два етапи: на першому спостерігається перехід тетрагональної кристалічної ґратки в кубічну за

температури 185–195 °С, а на другому — плавлення кубічної структури з одночасним термічним розкладанням і можливим утворенням альдегідів у діапазоні 240–260 °С. Деякі автори [51, 52] зазначають, що в цей період у процесі карбонізації активно залучається поліфосфат амонію.

Поліфосфат амонію (ПФА), $(\text{NH}_4\text{PO}_4)_n$, є неорганічною амонійною сіллю фосфорної кислоти. Захисна дія ПФА зумовлена значним збільшенням об'єму реактивного матеріалу під час нагрівання та високою стабільністю сформованого пінококсового шару. Водночас у наукових джерелах практично відсутні детальні відомості щодо фізико-хімічних властивостей ПФА саме в складі реактивних композицій, які пояснюють його специфічну поведінку. Переважно описуються загальні характеристики, притаманні компонентам спучувальних систем, зокрема виділення негорючих газів за високих температур і здатність до утворення полі- та олігомерних структур.

У роботі [52] наведено результати дослідження поліфосфату амонію методом диференціальної сканувальної калориметрії ДСК в окисному (повітря) та інертному (азот) середовищах. Встановлено, що процес його розкладання починається за температур, близьких до температури термічного розкладання пентаеритриту, і завершується при температурах понад 380 °С. Дані ДСК свідчать про складний характер реакцій, які охоплюють кілька стадій формування пінококсу, зокрема плавлення компонентів композиції, перебіг спучення з виділенням водяної пари та газів, вигорання зв'язувальної фази, а також тверднення й горіння пінококсового шару.

Отже, вогнезахисна дія поліфосфату амонію в реактивних складах полягає в тому, що під впливом високої температури ПФА розкладається з виділенням негорючого аміаку, який утворює захисний бар'єр і зменшує доступ кисню до поверхні матеріалу. Залишкова поліфосфорна кислота виконує роль каталізатора процесів піноутворення та сприяє виділенню вільного вуглецю. Експериментально підтверджено, що ранній початок процесу фосфорування пентаеритриту забезпечує майже повне перетворення вуглецю, що міститься в ньому, у кокс.

Надалі, у процесі горіння, сформована вуглецева плівка спучується без переходу в розплавлений стан і утворює товстий пористий шар, який забезпечує ефективну теплоізоляцію конструкції, на поверхню якої нанесено вогнезахисний склад. Таким чином, теплоізоляційний бар'єр формується за рахунок взаємодії вуглецевого матеріалу, джерелом якого є пентаеритрит, поліфосфорної кислоти, що утворюється з поліфосфату амонію, вуглецевої плівки та газоутворювального компонента.

Під час термічного впливу газоутворювач виділяє газ, які спричиняють спучування вуглецевої плівки та формування товстого піноподібного вуглецевого шару. У складі амонійфосфатних реактивних композицій функцію піноутворювача, як правило, виконує меламін.

Меламін (МЛ), $C_3H_6N_6$ (2,4,6-триаміно-1,3,5-триазин), являє собою безбарвні кристали без запаху. Ця сполука належить до класу циклічних ціанамідних похідних і характеризується сукупністю властивостей, зокрема термічною, світловою та хімічною стійкістю, а також здатністю утворювати поліфункціональні реакційноздатні хімічні сполуки. З огляду на молекулярну будову меламіну він зберігає кристалічний стан. За результатами термічного аналізу температура його плавлення становить близько 340 °С. Після плавлення в інтервалі температур 350–430 °С меламін перетворюється на мелем, а за температур 430–500 °С відбувається остаточне перетворення мелему на мелон.

Отже, меламін і продукти його термічних перетворень відзначаються високою термостійкістю та здатні вступати в реакції з альдегідними сполуками, що утворюються під час розкладання пентаеритриту, зокрема з фурфуролом, із формуванням меламіно-альдегідних олігомерів. Високі температури синтезу сприяють утворенню просторово зшитих структур — меламіноальдегідних смол складного складу.

Таким чином, під час термолізу реактивної системи, основними компонентами якої є пентаеритрит, меламін і фосфати амонію, визначальним є утворення та взаємодія тривимірної аміноальдегідної полімерно-олігомерної смоли складної структури. Ця смола залучається до процесу спучення та твердне

за участі поліфосфату амонію, у результаті чого формується об'ємний і відносно міцний пінококсовий шар з вираженими теплоізоляційними властивостями.

Вогнезахисні характеристики спучувальних матеріалів визначаються не лише бар'єрною дією пінококсу, а й значними ендотермічними ефектами, пов'язаними з фазовими та хімічними перетвореннями, випаровуванням водяної пари та виділенням негорючих газів, насамперед аміаку.

Під час термолізу реактивного вогнезахисного матеріалу формування шару з оптимальними захисними властивостями значною мірою залежить від структури вогнезахисної композиції, її компонентного складу та хімічних перетворень, що супроводжують утворення теплоізоляційного пінококсового шару. У зв'язку з цим підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів ґрунтується на розумінні функціональної ролі окремих компонентів і хімічної природи їх перетворень у карбонізований шар.

Вогнезахисний ефект реактивних покривів обумовлюється двома основними чинниками – хімічним та фізичним [53]. Хімічний аспект полягає у поглинанні енергії полум'я завдяки ендотермічним хімічним реакціям та фазовим перетворенням, що призводять до утворення теплоізоляційного бар'єру у вигляді спіненого коксового шару [53]. Фізичний чинник полягає у тому, що утворений коксовий шар функціонує як бар'єр, який уповільнює тепло- та масообмін між газовою та конденсованою фазами, забезпечуючи захист металевій поверхні від теплового впливу [54]. При цьому кратність спучення реактивного покриву може сягати 20–80 разів.

Механізм формування коксового шару можна спрощено представити як комплекс послідовних і частково паралельних процесів [54]: виділення неорганічної кислоти при температурі, що залежить від природи джерела кислоти та інших компонентів покриву; етерифікація коксоутворювачів під дією кислоти (під час плавлення композиції або безпосередньо перед етерифікацією); розкладання складних естерів із виділенням води та формування вуглецево-неорганічного залишку; спінювання в'язкої карбонізованої маси газоподібними

продуктами деструкції; гелеутворення та подальше затвердіння спіненого коксового шару завдяки взаємодії з продуктами розкладання кислоти.

Процес спучення можна поділити на декілька етапів [7, 55, 56] (рис. 1.2):

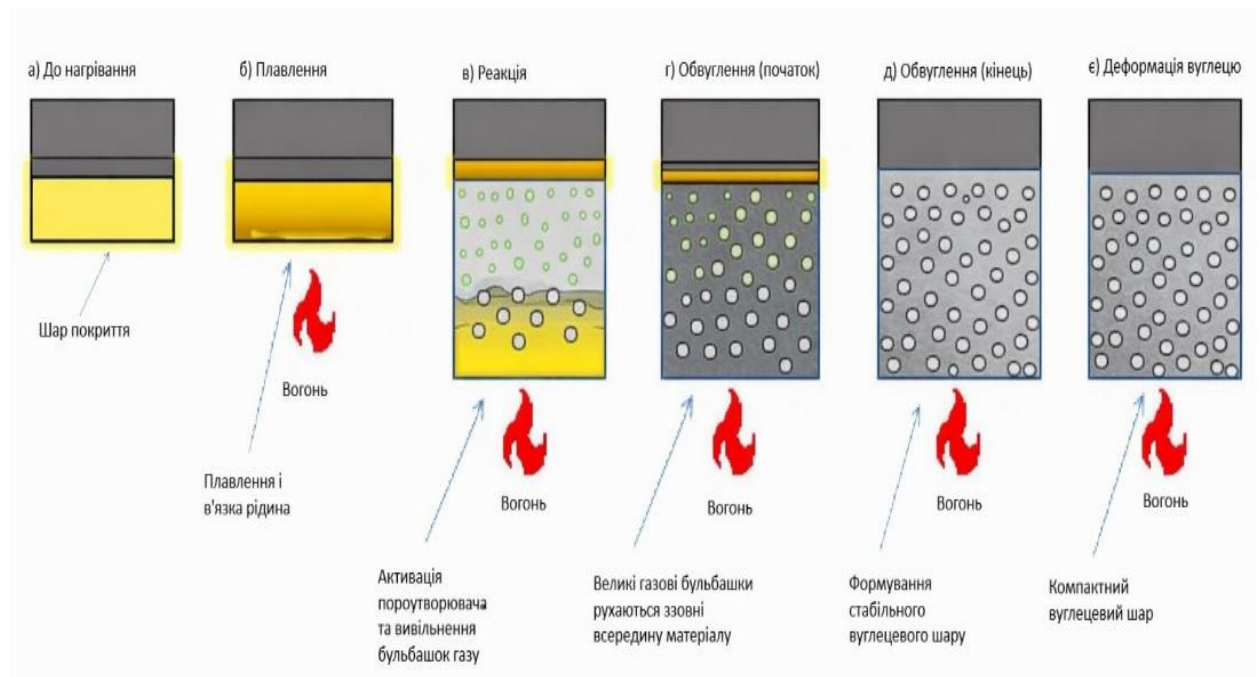


Рис.1.2. Етапи спучення реактивного вогнезахисного покриття

Перший етап – термічне розкладання (зона плавлення). Під дією полум'я вогнезахисний покриття нагрівається до критичної температури, внаслідок чого відбувається термічний розклад неорганічної кислоти. При цьому плівка покриття розм'якшується, плавиться та переходить у в'язкий рідкий стан.

Другий етап – спучення (реакційна зона). На цій стадії активується газоутворювальний компонент, який зазнає термічної деструкції з виділенням газоподібних продуктів у в'язку масу покриття. Оскільки процес має ендотермічний характер, частина теплової енергії витрачається на перебіг реакції, що призводить до зниження температури у реакційній зоні. Утворені гази частково утримуються в покритті, спричиняючи спучення розплавленої матриці та збільшення її товщини до 100 разів порівняно з початковою. У результаті формуються пористі структури з низькою густиною та малою теплопровідністю, які виконують роль теплового бар'єру та перешкоджають передачі тепла вглиб захищеної конструкції. Процес спучення триває до повного

вичерпання газоутворювача або до моменту, коли вуглецева матриця втрачає здатність утримувати газові включення.

Третій етап – формування вуглецевого каркасу (зона коксування). За подальшого підвищення температури пориста структура твердне, при цьому відбувається виділення залишкових летких сполук і утворення вуглецевого каркасу. На цьому етапі структура характеризується високим вмістом карбону та, як правило, має темно-сіре або чорне забарвлення поверхні.

Четвертий етап – структурні перетворення вуглецевого каркасу (зона деградації). У цій зоні вуглецевий каркас піддається окисненню з виділенням діоксиду вуглецю. Стадія супроводжується руйнуванням щільної чорної структури та формуванням крихкої, пилоподібної пінистої маси світлого кольору.

При цьому слід зазначити, що окремі компоненти реактивної системи можуть по-різному впливати на процеси формування та стабільність вуглецевого каркасу. Узгодженість і послідовність перебігу хімічних реакцій і фізичних процесів є критично важливими, оскільки вони повинні відбуватися в певному температурному діапазоні та у визначеній послідовності.

Температурні інтервали реалізації наведених етапів залежать від складу реактивного вогнезахисного покриття. Орієнтовні температурні межі для окремих стадій становлять [7]:

- перший етап (термічне розкладання, зона плавлення) – 90–310 °С;
- другий етап (спучення, реакційна зона) – 180–470 °С;
- третій етап (утворення вуглецевого каркасу, зона коксування) – 220–690 °С;
- четвертий етап (деградація вуглецевого каркасу) – 410–820 °С.

Отже, вогнезахисна дія реактивних покриттів зумовлена поєднанням фізичних і хімічних чинників, що визначаються характером перебігу реакцій і фазових перетворень з подальшим формуванням теплоізоляційного бар'єру у вигляді спіненого коксового шару та залежать від складу вогнезахисної композиції.

1.3. Сучаний стан справ щодо розробок в галузі вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на водній основі.

За останні роки розвиток вогнезахисних матеріалів спрямований на підвищення екологічності, безпеки для здоров'я та технічної ефективності.

Одним із ключових напрямів є створення реактивних покривів на основі полімерів, які розширюють традиційні органорозчинні системи, зменшують викиди летких органічних сполук та дозволяють працювати в закритих приміщеннях без масових вентиляційних заходів.

Вогнезахисні покриття реактивного типу на основі водних полімерних дисперсій формуються з використанням акрилових, стирол-акрилових або інших водно-дисперсійних плівкоутворювачів у поєднанні з реактивними компонентами, такими як антипірени, газоутворювачі та мінеральні наповнювачі.

Ефективність таких систем значною мірою визначається структурою полімерної матриці, оскільки її фізико-хімічні характеристики впливають на процеси спучення, формування та механічну стабільність пінококсового шару, а також на адгезійну міцність покриття до поверхні підкладки.

Переважаюча частина вогнезахисних матеріалів, представлених на українському ринку, виробляється вітчизняними підприємствами, серед яких провідне місце займає ТОВ «Ковлар Груп» (м. Київ).

Водночас вагомий внесок у розвиток і впровадження вогнезахисних технологій здійснюють й інші спеціалізовані виробники, зокрема ТОВ НВП «Спецматеріали» (м. Бориспіль), ТОВ «Фаєр Протекшн» (м. Київ) та низка інших компаній, продукція яких широко застосовується для підвищення вогнестійкості будівельних і металевих конструкцій.

Розподіл сучасних вогнезахисних засобів реактивного типу на ринку України наведено на рис. 1.3. [57].

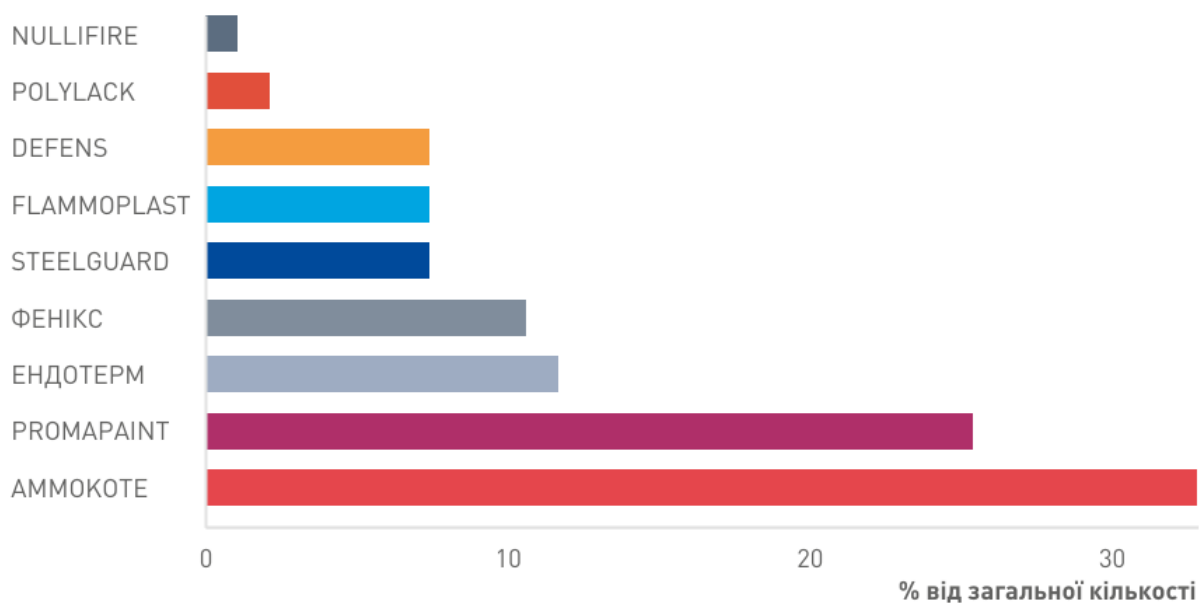


Рис. 1.3. Розподіл сучасних вогнезахисних засобів реактивного типу на ринку України.

У таблиці 1.1 наведено номенклатуру вогнезахисних матеріалів різних типів для сталевих конструкцій на основі водних полімерних дисперсій, які пройшли сертифікацію та офіційно допущені до застосування на території України [57].

Таблиця 1.1.

Номенклатура вогнезахисних матеріалів різних типів для сталевих конструкцій на основі водних полімерних дисперсій

ВЛАСНИК СЕРТИФІКАТА ВІДПОВІДНОСТІ/ВИРОБНИК	ВОГНЕЗАХИСНИЙ ЗАСІБ	ТИП ВОГНЕЗАХИСНОГО ЗАСОБУ
ТДВ «Сініат» (Україна)/ Підприємство F/033 Promat Sp. A (Італія)	Вогнезахисний засіб «Prompaint SC3»	Водно-дисперсійна реактивна (що терморозширюється) фарба
PPG Coatings Europe BV Нідерланди)/ PPG Deco Polska Sp.z.o.o (Польща)	Вогнезахисний засіб «Steelguard 651»	Водно-дисперсійна реактивна (що терморозширюється) фарба

Продовження таблиці 1.1.

ВЛАСНИК СЕРТИФІКАТА ВІДПОВІДНОСТІ/ВИРОБНИК	ВОГНЕЗАХИСНИЙ ЗАСІБ	ТИП ВОГНЕЗАХИСНОГО ЗАСОБУ
PPG Coatings Europe BV (Нідерланди)/ PPG Coatings Europe SPRL/BVBA (Бельгія)	Вогнезахисний засіб «Steelguard 751», «Steelguard 851»	Органорозчинна реактивна фарба
Rudolf Hensel GmbH (Німеччина)	Вогнезахисний засіб «Hensotherm 421 KS»	Водно-дисперсійна реактивна фарба
	Вогнезахисний засіб «Hensotherm 410 KS»	Водно-дисперсійна реактивна фарба
	Вогнезахисний засіб «Hensotherm 310 KS»	Органорозчинна реактивна фарба
ТОВ «Капітель ЛКМ» (Україна)	Вогнезахисний засіб «Defens M120»	Водно-дисперсійна реактивна фарба
	Вогнезахисний засіб «Defens M»	Водно-дисперсійна реактивна фарба
	Вогнезахисний засіб «Defens MS»	Органорозчинна реактивна (що терморозширюється) фарба
ТОВ «Ковлар Груп» (Україна)	Вогнезахисний засіб «Ammokote MW-60»	Водно-дисперсійна реактивна (що терморозширюється) фарба
	Вогнезахисний засіб «Ammokote MW-90»	Водно-дисперсійна реактивна (що терморозширюється) фарба
	Вогнезахисний засіб «Ammokote MW-120»	Водно-дисперсійна реактивна (що терморозширюється) фарба
	Вогнезахисний засіб «Ammokote MS-90»	Органорозчинна реактивна (що терморозширюється) фарба

Продовження таблиці 1.1.

ВЛАСНИК СЕРТИФІКАТА ВІДПОВІДНОСТІ/ВИРОБНИК	ВОГНЕЗАХИСНИЙ ЗАСІБ	ТИП ВОГНЕЗАХИСНОГО ЗАСОБУ
ТОВ «НВП «Спецматеріали» (Україна)	Вогнезахисний засіб «Ендотерм 400202»	Органорозчинна реактивна (що терморозширюється) фарба
	Вогнезахисний засіб «Ендотерм 170205»	Водно-дисперсійна реактивна (що терморозширюється) фарба

Один із сучасних зразків реактивних покриттів на водній основі — фарба Ammokote MW-120. Ця система містить водну дисперсію полімеру, антипірени, газо- та коксо утворювачі, що сприяють утворенню захисного бар'єру при високих температурах.

Фарба Ammokote MW-60 для вогнезахисту металевих конструкцій [58].

Ammokote MW-60 відноситься до вогнезахисних матеріалів, що спучуються (терморозширювальна фарба), який складається з антипіренов, коксо- і газоутворювачів, нанонаповнювачів у водній дисперсії полімеру.

Призначена для утворення вогнезахисного покриття, яке під дією високих температур спучується та, утворюючи теплоізоляційний шар, захищає металоконструкції від руйнування.

Фізико-хімічні характеристики представлено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Фізико-хімічні характеристики фарби Ammokote MW-120

НАЙМЕНУВАННЯ ПОКАЗНИКА	ЗНАЧЕННЯ
Зовнішній вигляд	Однорідна густа маса без грудок, згустків і сторонніх включень.

Продовження таблиці 1.2.

НАЙМЕНУВАННЯ ПОКАЗНИКА	ЗНАЧЕННЯ
Зовнішній вигляд покриву	Суцільне без відшарувань, здуття та включень, білого кольору, відтінок не нормується.
Вміст нелетких речовин, %	69 ± 2
Щільність покрив, кг/м ³	1250 ± 50
Час висихання покриву до ступеня 3, год, не більше	2
Адгезія покриву методом Х-подібного надрізу, бал, не більше	1

Вогнезахисна ефективність: вогнезахисний покрив підвищує межу вогнестійкості несучих металоконструкцій до 60 хвилин (клас вогнестійкості R60). Класифікація реакції на вогонь: вогнезахисний покрив відноситься до класу E за ДСТУ EN 13501-1. Умови застосування: при температурі від +5 °C до +35 °C та відносній вологості повітря не вище 80 %. Умови експлуатації: в закритих приміщеннях при температурі від - 30 °C до + 60 °C та вологості повітря до 90 %. [58].

Вогнезахисна фарба «DEFENS M» являє собою водорозчинний вогнезахисний однокомпонентний склад спучуючого типу, є терморасширяючим конструктивним вогнезахисним матеріалом і призначений для підвищення межі вогнестійкості сталевих несучих будівельних конструкцій, які експлуатуються в громадських будівлях адміністративного призначення, торгових, промислових і цивільних об'єктах, в т.ч. об'єктах харчового, лікувально-профілактичного, освітнього і розважального призначення та ін. [59].

Вогнезахисний склад «DEFENS M» призначений для утворення реактивного вогнезахисного покрив несучих сталевих будівельних конструкцій, що підвищує межу їх вогнестійкості до R120.

Призначена для підвищення межі вогнестійкості сталевих конструкцій і споруд промислового і цивільного призначення (ТЕЦ, ГРЕС, АЕС, ТРК і т.д.), в тому числі і на об'єктах харчової промисловості (поза контактом з харчовими продуктами), експлуатованих усередині приміщень з неагресивним, слабоагресивним і середньоагресивним середовищами, а також для зовнішніх робіт в умовах впливу кліматичних факторів.

Базовий колір – білий. Можливе колірування в пастельні ненасичені тони (в умовах заводу-виробника).

Матеріал поставляється готовим до застосування. При нанесенні вогнезахисної фарби на відкритому повітрі необхідно застосовувати покривні матеріали. Вибір покривного матеріалу залежить від умов експлуатації покриву.

Вогнезахисна фарба «DEFENS M» наноситься методом безповітряного розпилення агрегатами високого тиску поршневого типу (180-250 бар) виробництва Graco або Wagner. Допускається використовувати пензлик або валик при нанесенні на невеликих площах і в важкодоступних місцях.

Нанесення і транспортування – в діапазоні температур від +5°C до +35°C.

Технічні характеристики представлено в таблиці 1.3. [59].

Таблиця 1.3.

Технічні характеристики фарби «DEFENS M»

Найменування показника і одиниці вимірювання	Значення показника
Колір і зовнішній вигляд складу	Однорідна густа маса білого кольору без грудок і сторонніх включень
Блиск	Матовий
Зовнішній вигляд покриву	Суцільне, без тріщин, відшарувань і здуття
Густина, г/см ³	1,28 – 1,36
Вміст нелетких речовин	не менше 65%

Продовження таблиці 1.3.

Найменування показника і одиниці вимірювання	Значення показника
Сухий залишок, мас.%	60-70
pH	7,5 – 9,5
Час висихання покриття до ступеня 3 при t 20°C, годин	не більше 6
Умовна світлостійкість (зміна коефіцієнта дифузійного відбиття),%	не більше 5
Ступінь перетирання, мкм	не більше 70 мкм
Адгезія до металевої поверхні, бал	не більше 1
Об'ємний коефіцієнт спучування, см ³ /г	30,16
Упаковка	Металеве або пластикове відро
Маса упаковки, нетто, кг	25
Термін експлуатації покриття	до 30 років
Час повного формування покриття, готового до експлуатації, діб.	Не менше 7
Температура експлуатації покриття	Від -50°C до +40°C
Температура нанесення	Від +5°C до +35°C

Вогнезахисна фарба SteelMaster є однокомпонентним водорозчинним тонкошаровим покритвом, яке під дією вогню та температури спучується. Покрив призначений для вогнезахисту конструкційної сталі. Може використовуватися як проміжне або фінішний покрив в залежності від атмосферних умов експлуатації [60].

Фарба SteelMaster 600WF є реактивною, що складається з антипіренів, коксо- та газоутворювачів і функціональних наповнювачів у водній дисперсії акрилового полімеру.

Під впливом високих температур вогнезахисний покрив створений на основі вогнезахисної фарби SteelMaster 600WF створює теплоізоляційний спінений коксовий шар, який захищає металеві конструкції від дії вогню. Покрив відноситься до реактивних тонкошарових вогнезахисних засобів.

Згідно з сертифікатом відповідності SteelMaster 600WF дозволяє підвищити клас вогнестійкості несучих сталевих будівельних конструкцій до ступеню R 90 при малих товщинах покриття [60].

Фарба PROMAPAINТ® SC3 є терморозширюючимся вогнезахистом і являє собою суспензію газоутворюючих і піноутворюючих наповнювачів з цільовими добавками у синтетичному плівкоутворювальному розчині [61].

Фарба призначена для підвищення межі вогнестійкості до R180 несучих сталевих будівельних конструкцій, які експлуатуються на цивільних і промислових об'єктах різного призначення, в тому числі і об'єктах енергетики, теплових і атомних електростанцій.

Розріджувач: вода. Консистенція: сметано-подібна маса білого кольору
Витрата: 1,85 кг/м² для досягнення покриття товщиною 1000 мкм (без урахування технологічних втрат). Сухий залишок: 71 % ±3 %. Щільність 1350 ± 50 кг/м³. Дозволяє підвищити межу вогнестійкості несучих металевих конструкцій до R 180 [61].

Вогнезахисна речовина «HENSOTHERM 421 KS» виробляється Rudolf Hensel GmbH (Німеччина). Речовина призначена для підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій і виробів, що експлуатуються на цивільних та промислових об'єктах різного призначення, в тому числі на об'єктах енергетики (теплових та атомних електростанціях), об'єктах газової та нафтової промисловості (об'єкти видобутку, переробки й транспортування), а також на об'єктах металургійної промисловості в період їх будівництва, реконструкції або ремонту. HENSOTHERM 421 KS дозволяє підвищити межу вогнестійкості несучих сталевих конструкцій ($\delta_{пр} \geq 2,20$ мм) до 180 хвилин. [62].

Речовина HENSOTHERM 421 KS дозволяє підвищити клас вогнестійкості несучих металевих будівельних конструкцій до R 180. Товщина шару покриття

визначається на підставі даних сертифікату відповідності в залежності від необхідного класу вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій, зведеної товщини та проектної критичної температури металоконструкцій - колон, балок перекриття і покриття, ферм, прогонів, арок, рам, зв'язків, косоурів і т.д. Умови нанесення речовини: при температурах від +5 °С до +35 °С та відносній вологості повітря до 80 %. 4 Умови експлуатації покриву: в кліматичних умовах Z2, Z1, Y (ETAG 018-2/EAD 350402-00-1106) з захисним покривом та без нього; в кліматичних умовах X (ETAG 018- 2/EAD 350402-00-1106) з захисним покривом [62].

«DEFENS M 120» - являє собою однокомпонентний вогнезахисний засіб (суспензію) цільових компонентів і пігментів у водних дисперсіях синтетичних полімерів з додаванням біоцидних, що модифікують, стабілізуючих і інших добавок. Вогнезахисний засіб призначений для утворення реактивного вогнезахисного покриву несучих сталевих будівельних конструкцій (колон), що підвищує межу їх вогнестійкості до R120. Сфери застосування - сталеві будівельні конструкції (колони) в громадських, адміністративних, виробничих будівлях і спорудах, усередині опалювальних і неопалюваних приміщень, під навісом і відкритому повітрі, у всіх кліматичних районах, типах атмосфери і умов агресивного впливу середовища. Межа вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій R120 [63].

Ендотерм 170205 представляє однокомпонентну вогнезахисну суміш на водній основі. Призначений для утворення вогнезахисного покриву, який при дії високих температур спучується і формує теплоізоляційний шар, який охороняє конструкції від нагріву. Використовується для підвищення вогнестійкості сталевих несучих конструкцій, а також дерев'яних конструкцій, що експлуатуються всередині приміщень. Суміш підвищує вогнестійкість металоконструкцій до R60 на об'єктах суспільного і промислового будівництва. Забезпечує I групу вогнезахисної ефективності при експлуатації на дерев'яних конструкціях в будівлях та спорудах різного призначення [64].

1.4. Методи оцінки механічної міцності спученого шару вогнезахисних покривів металевих конструкцій: сучасний стан питання.

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що у більшості досліджень механічну стійкість реактивного коксового шару оцінюють із застосуванням локальних механічних випробувань, які передбачають точкове навантаження або стискання шару за допомогою індентора, поршня чи циліндричного елемента. Фізична сутність зазначених методів є близькою до пенетраційних випробувань, оскільки навантаження прикладається до обмеженої ділянки поверхні пінококсу і викликає локальну деформацію або руйнування шару. Такі методи дозволяють порівняльно оцінювати вплив рецептурного складу реактивних систем на формування коксової структури та її опір механічному навантаженню.

Водночас літературні дані вказують на низку принципів обмежень локальних інденторних тестів. Зокрема, результати таких випробувань характеризуються високою чутливістю до локальних дефектів, неоднорідності пористої структури та градієнтів щільності пінококсу по товщині шару. Унаслідок цього вимірювана міцність часто відображає властивості лише зовнішньої або, навпаки, ослабленої центральної зони шару, а не його інтегральну несучу здатність як теплоізоляційного елемента.

Крім того, встановлено, що значення механічної міцності, отримані за допомогою локальних пенетраційних або інденторних методів, не завжди корелюють з експлуатаційною ефективністю реактивного покриву під час пожежі, оскільки в реальних умовах пінококс зазнає дії розподілених навантажень від власної ваги, потоків гарячих газів і механічних впливів. Це обумовлює необхідність пошуку та впровадження альтернативних методів оцінювання механічної міцності, які більш адекватно відтворюють умови реального теплового та механічного навантаження спученого шару.

Далі буде наведено системний аналіз сучасних методів оцінки механічної міцності спученого шару, включаючи інденторні, компресійні, згинальні та методи розподіленого навантаження. Такий аналіз дозволить зіставити їх фізичну

сутність, чутливість до структурної неоднорідності пінококсу, відтворюваність результатів та ступінь відповідності реальним експлуатаційним умовам вогнезахисних покривів, а також обґрунтувати доцільність вибору найбільш репрезентативного підходу для подальших експериментальних досліджень.

Найбільш поширеним первинним показником ефективності реактивних вогнезахисних покривів є лінійний коефіцієнт спучення, який характеризує здатність матеріалу до об'ємного розширення під дією високої температури. Даний параметр визначають як відношення кінцевої товщини сформованого спученого шару (пінококсу) до початкової товщини покриву та використовують для кількісної оцінки інтенсивності процесу спучення. Водночас коефіцієнт спучення не відображає механічних властивостей утвореної структури і не дає уявлення про її здатність зберігати цілісність під дією зовнішніх впливів.

Коефіцієнт спучення K_s визначають за співвідношенням:

$$K_s = \frac{h}{h_0},$$

де h – товщина спученого шару після термічного впливу, мм;

h_0 – початкова товщина нанесеного покриву, мм.

Для визначення K_s реактивний покрив з початковою товщиною близько 1 мм наносять на металеву пластину розміром 100×100 мм, після чого зразки витримують у термічній камері при температурі 600 °С протягом 5 хвилин. Товщину спученого шару вимірюють у декількох характерних точках, а кінцеве значення коефіцієнта спучення визначають як середнє арифметичне не менше ніж трьох вимірювань.

Зазначений метод є простим у виконанні та забезпечує оперативну оцінку здатності покриву до спучення. Однак він не враховує механічну стабільність та структурну цілісність сформованого пінококсового шару, у зв'язку з чим коефіцієнт спучення доцільно розглядати лише як допоміжний показник ефективності реактивних систем.

Результати сучасних досліджень свідчать, що високі значення K_s не мають прямої кореляції з механічною міцністю коксового прошарку. Надмірне спучення

часто супроводжується утворенням високопористої, слабкозв'язаної та крихкої структури, яка є нестійкою до механічних навантажень і схильною до руйнування в умовах реальної пожежі [65,66].

Пенетраційні методи (інденторні тести за допомогою механічного навантаження).

Для безпосереднього визначення міцності спученого шару використовується модифікований метод пенетрації з використанням консистометра Хеплера (рис. 1.4.). У цьому методі індентор із плоским кінцем діаметром 5 мм занурюється в шар пінококсу під дією стандартного навантаження протягом 5 с при температурі 25 °С. Метод був запропонований та вперше застосований для оцінювання механічних властивостей реактивних вогнезахисних покривів професором Яковлевою Р. А. ще у 2008 році в рамках досліджень фосфоровмісних антипіренів для епоксидних композицій.

Разом із тим, мала площа контакту індентора з поверхнею пінококсу зумовлює концентрацію напружень у локальній зоні, що призводить переважно до точкового пробиття шару, а не до його рівномірного деформування. Цей ефект є особливо вираженим у випадку нерівномірного спучення покриття, коли товщина та щільність пінококсового шару істотно змінюються по площині зразка. У зв'язку з цим результати пенетраційних випробувань характеризуються підвищеною чутливістю до локальних дефектів структури та не відображають інтегральну несучу здатність спученого шару. Тому зазначений метод доцільно розглядати насамперед як порівняльний інструмент для якісної оцінки впливу складу реактивної системи, а не як універсальний спосіб абсолютного визначення механічної міцності пінококсу.

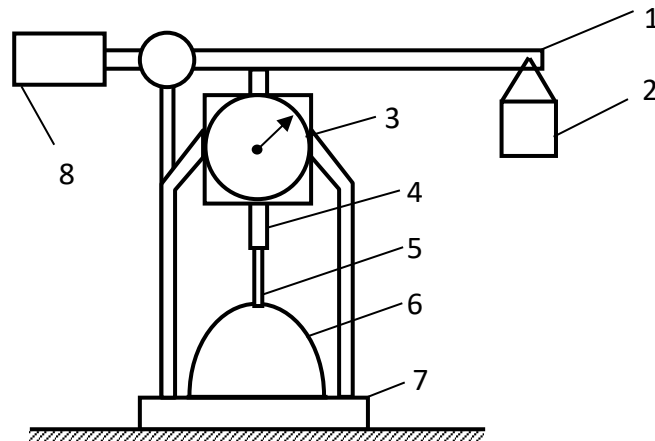


Рис. 1.4. Лабораторна установка з визначення механічної міцності спученого вогнезахисного покриття: 1 – важіль; 2 – навантаження; 3 – індикатор годинникового типу; 4 – плунжер; 5 – індентор; 6 – спучений пенококс; 7 – підставка; 8 – противага.

Незважаючи на простоту реалізації та поширеність у лабораторній практиці, пенетраційний метод із використанням консистометра Хеплера має низку принципових обмежень, які суттєво знижують його репрезентативність для оцінки реальної механічної стійкості спученого шару:

1. Локальний характер навантаження. Мала площа контакту індентора ($\approx 19,6 \text{ мм}^2$ для діаметра 5 мм) зумовлює концентрацію напружень у вузькій зоні, внаслідок чого відбувається точкове пробиття пінококсу, а не рівномірне стискання шару. Такий режим деформації не відповідає умовам реальної пожежі, де на спучений шар діють переважно розподілені навантаження.

2. Висока чутливість до локальних дефектів. Результати випробувань істотно залежать від місця прикладання індентора. Наявність пор, тріщин або зон зниженої щільності у верхньому шарі пінококсу може призводити до передчасного руйнування і зниження оцінюваної міцності.

3. Пенетраційний метод фактично характеризує лише локальні властивості поверхневої зони пінококсу і не дозволяє оцінити механічний стан середніх та нижніх шарів, які відіграють ключову роль у забезпеченні теплоізоляційної функції покриття.

4. Для реактивних покриттів характерна виражена структурна неоднорідність за товщиною (градієнт пористості та щільності). Пенетраційний метод не враховує ці особливості та не дозволяє інтегрально оцінити несучу здатність всього пінококсового шару.

5. Через локальний характер навантаження та значний вплив випадкових чинників (мікрогеометрія поверхні, локальні дефекти) отримані значення мають підвищену дисперсію, що ускладнює коректне порівняння різних рецептур реактивних систем.

У зв'язку з наведеними обмеженнями пенетраційний метод доцільно розглядати переважно як порівняльний та допоміжний інструмент, придатний для якісної оцінки впливу компонентного складу на локальну жорсткість пінококсу, але недостатній для визначення його реальної механічної стійкості та довговічності в умовах експлуатації [67].

Подібні висновки підтверджено у роботах Nørgaard «Investigation of char strength and expansion properties of an intumescent coating exposed to rapid heating rates» (2013 рік). Було досліджено міцність пінококсу також за допомогою вдавлювання циліндричного або конічного індентора в пінококс під дією сталої маси (за допомогою механічного навантаження) [68].

Для експериментів використовували зразки у вигляді тонких плівок покриття (товщиною приблизно 150 мкм), які нагрівали в муфельній печі, імітуючи умови різкого теплового впливу. Після утворення пінококсу його механічну міцність визначали методом стиску (компресії) – тобто вимірювали, яку силу може витримати шар перед деформацією або руйнуванням.

Nørgaard та співавтори. визначали механічну міцність пінококсу методом стиску з використанням Texture Analyzer TA XT plus (Stable Micro Systems). Для випробувань застосовували циліндричний індентор діаметром 2 мм, що занурювався в шар із швидкістю 0,1 мм/с, а сила та переміщення реєструвалися з частотою 500 точок/с

Малий діаметр поршня (2 мм) дає локальну точкову дію, отже результати чутливі до локальних дефектів і неоднорідностей структури (автори показали, що зовнішня зона міцніша, а центральна зона - слабкіша).

Дослідження показало, що міцність зовнішньої частини пінококсу вища, ніж у середніх шарів, які мають пористу структуру. Також встановлено, що високий коефіцієнт спучення не гарантує високої міцності: при надмірному спіненні структура стає крихкою, і шар легше руйнується при навантаженні. Автори підкреслюють, що під час оцінки ефективності покривів слід враховувати не лише об'єм спучення, але й стійкість утвореного каркасу до стискання.

Метод визначення механічної міцності пінококсу, застосований Nørgaard et al., за своєю фізичною сутністю належить до інденторних (пенетраційних) випробувань, оскільки ґрунтується на вдавлюванні циліндричного індентора малого діаметра (2 мм) у спучений шар. Незважаючи на використання високоточного вимірювального обладнання (Texture Analyzer), характер прикладення навантаження зумовлює низку методичних обмежень, а саме:

1. Локальний характер навантаження – мала площа контакту індентора призводить до концентрації напружень у вузькій зоні та переважно до локального руйнування або пробиття пінококсу, а не до його рівномірної деформації.

2. Висока чутливість до структурної неоднорідності – результати істотно залежать від локальних особливостей структури, зокрема пористості, наявності дефектів та градієнтів щільності, що підтверджується встановленою авторами різницею між міцністю поверхневих і внутрішніх шарів пінококсу.

3. Обмежена репрезентативність інтегральної міцності – отримані значення відображають переважно локальні механічні властивості матеріалу та не характеризують несучу здатність пінококсу як цілісного теплоізоляційного шару.

4. Відсутність прямої кореляції з коефіцієнтом спучення – показано, що високі значення коефіцієнта спучення не супроводжуються пропорційним зростанням механічної стійкості, що ускладнює використання результатів для комплексної оцінки ефективності реактивних покривів.

Отже, як і класичні пенетраційні методи, підхід Nørgaard et al. є доцільним насамперед для порівняльного аналізу структурних особливостей пінококсу та впливу складу реактивних систем, однак він має обмежену придатність для кількісного визначення інтегральної механічної міцності спученого шару в умовах, наближених до реальної пожежі.

Методи стиску та згину.

Також у низці робіт запропоновано альтернативні підходи до оцінювання залишкової механічної міцності реактивних систем після термічного впливу. Зокрема, у дослідженні Kandola та співавтори (2015) «The effects of thermophysical properties and environmental conditions on fire performance of intumescent coatings on glass fibre-reinforced epoxy composites» було запропоновано метод комплексної оцінки вогнезахисної ефективності реактивних покривів шляхом поєднання теплового навантаження та механічних випробувань після нагрівання [69].

У зазначеній роботі реактивні покриття наносили на пластини зі склопластика, після чого зразки піддавали тепловому впливу в умовах кінцевого калориметра за теплового потоку 50 кВт/м^2 . Такий режим нагрівання дозволяє відтворити інтенсивну дію теплового потоку, характерну для розвиненої стадії пожежі, та забезпечити формування спученого коксового шару без безпосереднього полум'яного впливу. Після завершення термічного навантаження та охолодження зразків здійснювали визначення залишкових механічних властивостей системи методом трьохточкового згинального випробування [70].

Трьохточковий згинальний тест застосовували для оцінки згинальної міцності та модуля пружності системи «покритв – підкладка», що дозволяє кількісно визначити ступінь збереження механічної цілісності композитної конструкції після дії високих температур. Зразки мали стандартні розміри (приблизно $125 \times 20 \times 3 \text{ мм}$) та навантажувалися зі сталюю швидкістю деформації близько 1 мм/хв , що відповідає загальноприйнятим умовам механічних випробувань композитних матеріалів.

Отримані авторами результати показали, що формування щільного, однорідного та малопористого пінококсу істотно підвищує залишкову жорсткість і несучу здатність матеріалу після термовпливу. Покриви, які забезпечували утворення стабільного коксового шару з низькою теплопровідністю та високою структурною цілісністю, сприяли збереженню механічних властивостей композитної підкладки та ефективнішому захисту від теплового руйнування.

Отримані авторами результати показали, що формування щільного, однорідного та малопористого пінококсу істотно підвищує залишкову жорсткість і несучу здатність матеріалу після термовпливу. Покриви, які забезпечували утворення стабільного коксового шару з низькою теплопровідністю та високою структурною цілісністю, сприяли збереженню механічних властивостей композитної підкладки та ефективнішому захисту від теплового руйнування.

Недоліки методу оцінювання міцності реактивних систем методом стиску або згину:

1. Метод згину або стиску дозволяє визначити механічні властивості всієї системи «покров-підкладка», а не власне міцність спученого коксового шару. У результаті внесок пінококсу в загальну несучу здатність конструкції неможливо відокремити від впливу підкладки. Для жорстких або армованих підкладок (метал, композити) отримані значення згинальної міцності значною мірою визначаються властивостями підкладки, тоді як реальний стан і цілісність пінококсу відіграють другорядну роль.

2. Метод не дозволяє виявити неоднорідності механічних властивостей по товщині спученого шару, зокрема відмінності між зовнішньою кіркою, центральною пористою зоною та приповерхневим шаром біля підкладки.

3. Руйнування зразка під час згинальних випробувань може бути зумовлене відшаруванням покриву або міжфазним руйнуванням, а не втратою міцності самого пінококсу, що ускладнює інтерпретацію результатів.

4. Складність відтворення умов формування пінококсу. Застосування кінчного калориметра або подібних джерел тепла ускладнює контроль теплового потоку в процесі інтенсивного спучення, оскільки геометрія поверхні

змінюється, що впливає на однорідність прогріву та властивості сформованого шару.

5. Обмежена репрезентативність щодо реальних умов пожежі. Метод оцінює залишкову міцність після завершення теплового впливу, але не відображає поведінку пінококсу під час одночасної дії високої температури та механічних навантажень, які мають місце в реальних пожежних сценаріях.

6. Висока експериментальна складність і вартість. Проведення випробувань потребує спеціалізованого обладнання (конічний калориметр, універсальні випробувальні машини), складної підготовки зразків і значного часу, що ускладнює використання методу для рутинних або порівняльних досліджень рецептур.

Таким чином, методи згину та стиску після термічного впливу є корисними для оцінювання загальної залишкової працездатності конструкцій, однак не забезпечують прямого та кількісного визначення механічної міцності пінококсу як самостійної реактивної структури. Це зумовлює необхідність розроблення та застосування спеціалізованих методів, орієнтованих на оцінку власної міцності спученого шару під дією розподілених навантажень.

У низці наукових робіт як допоміжний підхід до кількісних методів застосовується візуальна оцінка стану спученого шару реактивних покривів після термічного впливу. Такий підхід, як правило, використовується для попереднього аналізу морфологічних особливостей пінококсу та якісної характеристики результатів спучення.

Зокрема, у роботі Ven та співавторів (2019) після випробувань з використанням пальника Бунзена здійснювали візуальне спостереження за товщиною, формою та рівномірністю спучення коксового шару з метою оцінки пожежозахисної ефективності тонкоплівкових реактивних покривів [71].

У дослідженні Kwang Yin et al. (2019) візуальний аналіз у поєднанні зі сканувальною електронною мікроскопією (SEM) було використано для оцінювання однорідності поверхні, пористості та наявності дефектів (пор,

тріщин, отворів) у сформованому пінококсовому шарі на поверхні дерев'яних конструкцій [72].

Застосування візуального контролю дозволяє якісно оцінити: загальну геометрію та рівномірність спучення; характер формування коксового каркасу; вплив мінеральних наповнювачів на морфологію та жорсткість структури; наявність макродефектів, що можуть зумовлювати локальне руйнування шару.

Разом із тим, візуальні методи мають суттєві обмеження, а саме:

1. Відсутність кількісної оцінки механічної міцності – метод не дозволяє визначити граничні навантаження, напруження або деформації, які може витримати пінококс.

2. Суб'єктивність результатів – оцінка стану шару значною мірою залежить від досвіду дослідника та умов спостереження, що ускладнює відтворюваність результатів.

3. Неможливість відокремлення властивостей пінококсу від підкладки – у випадку оцінки системи «покрив-основа» результати відображають комплексну механічну поведінку, а не власну міцність спученого шару.

4. Обмежена чутливість до внутрішньої структури – навіть при використанні SEM аналізу, як правило, охоплює локальні ділянки і не дає уявлення про інтегральну структурну стабільність шару по всій площині.

Таким чином, візуальні методи доцільно розглядати виключно як доповнення до кількісних механічних випробувань, оскільки вони не забезпечують об'єктивної оцінки механічної стійкості пінококсу, яка є визначальним чинником ефективності реактивних вогнезахисних покривів в умовах реальної пожежі.

Комбінований підхід.

У роботах Jeske Н. та співавторів запропоновано комбінований експериментальний підхід до дослідження реактивних вогнезахисних покривів, який поєднує термогравіметричний аналіз (TGA), термомеханічний аналіз (ТМА) та диференціальну сканувальну калориметрію (DSC) з метою вивчення процесів спучення, деградації та морфологічних змін поверхні покривів під час

теплого навантаження. Застосування DSC дозволяє фіксувати теплові ефекти, пов'язані з фазовими та хімічними перетвореннями, одночасно з візуалізацією процесів утворення пор, розширення шару та зміни поверхневої структури в реальному часі.

Зазначений підхід забезпечує комплексне уявлення про термофізичну поведінку реактивних систем і механізми формування пінококсового шару, проте не передбачає прямого визначення механічних характеристик сформованого спученого шару, зокрема його міцності на стиск, згин або руйнування. Отже, отримані результати мають переважно якісний або напівкількісний характер і потребують доповнення механічними випробуваннями для повноцінної оцінки експлуатаційної стійкості пінококсу.

Основні недоліки комбінованого термоаналітичного підходу:

- відсутність прямої кількісної оцінки механічної міцності спученого шару (граничних напружень, сили руйнування);
- орієнтація на малі зразки, що не відображають реальні геометричні та масштабні умови реактивного спучення;
- неможливість моделювання дії зовнішніх механічних навантажень, характерних для реальних пожежних умов;
- складність екстраполяції результатів на практичні системи вогнезахисту металевих конструкцій;
- висока чутливість до режимів нагрівання та експериментальних умов, що ускладнює відтворюваність результатів.

Таким чином, комбінований термоаналітичний підхід є доцільним для дослідження механізмів спучення та морфологічних особливостей пінококсового шару, однак не може розглядатися як самостійний метод оцінювання його механічної міцності та потребує інтеграції з методами механічних випробувань [73].

Такі методи є орієнтовними й не забезпечують кількісної оцінки міцності, однак надають важливу інформацію про рівномірність спучення та дефекти поверхні.

Аналітичні методи оцінювання ефективності реактивних систем.

Аналітичні методи, зокрема підходи, що базуються на даних термогравіметричного аналізу (ТГА), широко застосовуються для непрямого оцінювання вогнезахисної ефективності реактивних систем. У межах таких підходів ефективність матеріалу характеризують за допомогою об'ємного коефіцієнта спучення K (см³/г), масової частки коксового залишку Δm (%) та узагальненого безрозмірного параметра: $\alpha = \frac{K}{\Delta m}$.

Параметр α інтерпретується як характеристика балансу між інтенсивністю спучення та кількістю сформованого твердого залишку. Встановлено, що значення α у межах $3 < \alpha < 4$ відповідають оптимальному поєднанню спучення та карбонізації, що асоціюється з підвищеною стабільністю коксового шару. За значень $\alpha < 3$ або $\alpha > 4$ спостерігається зниження механічної стійкості пінококсу, зумовлене відповідно недостатнім спученням або надмірною пористістю структури.

Таким чином, аналітичний параметр α дозволяє здійснювати попередню якісну оцінку ефективності реактивних системи та прогнозувати тенденції зміни стабільності коксового шару залежно від рецептури.

Разом із тим, аналітичні методи мають низку принципних обмежень, що істотно звужують сферу їх практичного застосування для оцінювання механічної міцності пінококсу:

Недоліки аналітичних методів:

- відсутність прямого визначення механічних характеристик коксового шару (міцності на стиск, згин або руйнування);
- використання інтегральних масо- об'ємних показників, які не відображають просторової неоднорідності структури пінококсу;
- неможливість врахування реального характеру навантаження, якому зазнає спучений шар у пожежних умовах;

- залежність результатів від умов ТГА (швидкості нагрівання, атмосфери, маси зразка), що ускладнює їх порівняння з експлуатаційними характеристиками покривів;
- непряма інтерпретація механічної стабільності, що не дозволяє кількісно оцінити граничну несучу здатність пінококсу.

У зв'язку з цим аналітичні методи доцільно розглядати як допоміжний інструмент для попередньої оцінки ефективності реактивних систем і виявлення загальних тенденцій, але не як самодостатній підхід до визначення механічної міцності сформованого коксового шару [74].

Методи зі щілинними вантажами.

З урахуванням обмежень локальних пенетраційних та інденторних випробувань, більш обґрунтованим підходом до оцінювання механічної міцності реактивного пінококсового шару є метод із використанням стандартизованих щілинних вантажів. У межах цього методу на поверхню спученого шару послідовно прикладається статичне навантаження у вигляді металевих щілинних вантажів стандартної геометрії (зовнішній діаметр – 20 мм, товщина – 4,4 мм, внутрішній діаметр – 6,4 мм), що забезпечує значно більшу площу контакту порівняно з інденторними методами.

Завдяки збільшеній площі дотику навантаження рівномірно розподіляється по поверхні пінококсу, що дозволяє реалізувати режим квазистатичного розподіленого навантаження. Такий характер навантаження є фізично близьким до умов реальної пожежі, за яких реактивний шар зазнає дії власної ваги, тиску продуктів горіння, полум'я та можливих механічних впливів. У процесі випробування визначається критична маса навантаження, за якої відбувається руйнування або втрата цілісності пінококсового шару, що кількісно характеризує його статичну механічну міцність.

Аналогічний підхід описано у роботах Lee J. S. (2019), де міцність спученого шару визначали шляхом поступового нарощування маси навантаження (кроком 50 г) до моменту руйнування коксового залишку. Запропонований метод відзначається простотою реалізації, наочністю

результатів і можливістю застосування без використання складного випробувального обладнання.

З огляду на фізичну адекватність характеру навантаження та можливість кількісного визначення граничної несучої здатності, метод зі щілинними вантажами слід розглядати як один із найбільш репрезентативних для оцінювання механічної стійкості пінококсу. [75].

Переваги методу зі щілинними вантажами:

- забезпечення рівномірного розподілу навантаження по поверхні пінококсу, що відповідає умовам реальної експлуатації;
- можливість кількісного визначення критичної маси руйнування спученого шару;
- низька чутливість до локальних дефектів та структурної неоднорідності пінококсу;
- можливість стандартизації геометрії навантаження та процедури випробування;
- висока відтворюваність результатів (коефіцієнт варіації $< 5\%$ за даними Lee, 2020);
- наочність та простота інтерпретації експериментальних даних.

На сьогодні відсутній уніфікований або стандартизований протокол визначення механічної міцності реактивного пінококсого шару, у зв'язку з чим параметри випробувань (маса та геометрія навантаження, площа контакту, тривалість дії навантаження) визначаються дослідниками індивідуально та істотно варіюють залежно від методичного підходу. Це ускладнює зіставлення результатів різних досліджень і обмежує можливості їх прямого порівняння.

1.5. Висновки до розділу 1.

Проведений аналіз сучасних наукових джерел та експериментальних методик засвідчує, що на сьогодні не існує уніфікованої та стандартизованої методики визначення механічної міцності пінококсу, що значно ускладнює

порівняння результатів різних досліджень і стримує розвиток науково обґрунтованих підходів до проєктування вогнезахисних систем. На тлі різноманіття методів – від пенетраційних тестів до випробувань на стиск і згин – простежується чітка тенденція: традиційні локальні інденторні методи не забезпечують адекватного відтворення реальних умов експлуатації реактивних покривів. Через малу площу контакту та високу чутливість до мікродефектів вони відображають лише локальну поведінку матеріалу, а не його фактичну несучу здатність у масштабі сформованого теплоізоляційного коксового шару.

У цьому контексті методи, що базуються на дії розподіленого навантаження (зокрема, метод зі щільними вантажами), є найбільш репрезентативними. Вони відтворюють механічні умови, характерні для реальної пожежі: дію власної маси шару, осад продуктів горіння, конвективний тиск, локальні механічні впливи. Такий підхід дозволяє оцінити не лише граничне навантаження, що призводить до руйнування коксової структури, але й механізм її деформування, що є критично важливим для прогнозування довготривалої вогнезахисної здатності покриву.

Крім того, результати свідчать, що лінійний коефіцієнт спучення K_s не може розглядатися як самостійний індикатор ефективності реактивного покриву. Значне спучення саме по собі не гарантує формування міцної та стабільної структури пінококсу. Ба більше, численні дослідження доводять, що надмірне спучення часто супроводжується зниженням механічної міцності шару через збільшення пористості та нерівномірність структури. Тому визначення K_s повинно обов'язково доповнюватися аналізом механічної міцності пінококсу, що дозволяє робити комплексну оцінку як інтенсивності спучення, так і здатності сформованого шару виконувати свою основну функцію – забезпечення тривалої теплозахисної дії.

Таким чином, проведений аналіз однозначно підтверджує, що науково обґрунтований підхід до оцінювання вогнезахисних покривів має включати поєднання методів оцінки спучення та методів визначення механічної міцності сформованого шару, причому останні повинні базуватися на випробуваннях під

розподіленим, а не локальним навантаженням. Це створює передумови для розроблення нових стандартизованих методик, спрямованих на підвищення достовірності оцінки здатності реактивних матеріалів забезпечувати довготривалий та надійний вогнезахист конструкцій.

Аналіз сучасних методів оцінювання механічної міцності реактивного пінококсового шару показав відсутність уніфікованої методики, здатної адекватно відтворювати умови реальної експлуатації вогнезахисних покривів. Переважна більшість наявних підходів ґрунтується на локальних інденторних або стискальних випробуваннях, які є чутливими до структурної неоднорідності пінококсу та не дозволяють оцінити його механічні властивості. Аналітичні та візуальні методи надають допоміжну інформацію щодо процесів спучення, проте не забезпечують прямого кількісного визначення механічної стійкості шару. У зв'язку з переважно розподіленим характером навантажень у реальних пожежних умовах обґрунтованою є необхідність застосування методів із розподіленим статичним навантаженням, зокрема методу щільних вантажів, який є найбільш репрезентативним для оцінювання міцності пінококсу та формує основу подальших експериментальних досліджень.

Аналіз сучасних методів оцінювання механічної міцності реактивного пінококсового шару показав відсутність уніфікованої методики, здатної адекватно відтворювати умови реальної експлуатації вогнезахисних покривів. Переважна більшість наявних підходів ґрунтується на локальних інденторних або стискальних випробуваннях, які є чутливими до структурної неоднорідності пінококсу та не дозволяють оцінити його механічні властивості. Аналітичні та візуальні методи надають допоміжну інформацію щодо процесів спучення, проте не забезпечують прямого кількісного визначення механічної стійкості шару. У зв'язку з переважно розподіленим характером навантажень у реальних пожежних умовах обґрунтованою є необхідність застосування методів із розподіленим статичним навантаженням, зокрема методу щільних вантажів, який є найбільш репрезентативним для оцінювання міцності пінококсу та формує основу подальших експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Використовувані матеріали та їхні властивості

Роль полімерного плівкоутворювача у складі реактивного вогнезахисного покриття є визначальною, оскільки він забезпечує комплекс функціональних властивостей, що зумовлюють ефективність, стабільність та довговічність покриття як у нормальних умовах експлуатації, так і під дією високих температур. Під час термічного навантаження плівкоутворювач переходить у в'язкотекучий стан і частково карбонізується, беручи участь у формуванні коксової просторово-сітчастої структури, яка підвищує структурну цілісність і міцність спіненого шару [76, 77].

Як водну дисперсію плівкоутворювача використано стирол-акрилову дисперсію «Acronal 290D» (яка випускається найбільшим у Німеччині хімічним концерном BASF Societas Europaea), [78] отриману емульсійним методом на основі співполімеру бутилакрилату та стиролу. Зазначена дисперсія призначена для застосування у виробництві будівельних клейових матеріалів, лакофарбових композицій, покриттів для зовнішніх і внутрішніх робіт, синтетичних штукатурок і шпаклівок, де необхідні висока в'язкість та значний вміст сухих речовин.

Основні фізико-хімічні характеристики водної дисперсії «Acronal 290D» та фізико-механічні властивості сформованої з неї плівки наведено у таблицях 2.1 та 2.2. Механізм дії полягає в ущільненні полімерних частинок після випаровування води, формуванні суцільної плівки з мінімальною пористістю, що забезпечує бар'єрні властивості та підвищену термостійкість системи.

Водна дисперсія «Acronal 290D» не містить органічних розчинників і класифікується як малонебезпечна речовина (4-й клас безпеки).

Таблиця 2.1

Основні характеристики дисперсії Acronal 290D

Властивості	Значення
Масова частка нелеткої речовини (вміст твердої речовини) (ISO 3219, DIN 53189), %	50±1
В'язкість за Брукфільдом за 23°C, мПа за швидкості зсуву 100с-1 (ISO 3219, DIN 53019)	700–1500
pH (ISO 1148, DIN 53785)	7,5–9,0
Щільність (ISO 8962, DIN 53217), г/см ³	близько 1,04
Середній розмір частинок, мкм	близько 0,1
Мінімальна температура плівкоутворення (ISO 2115, DIN 53787), °C	близько 20
Тип дисперсії	аніонна

Таблиця 2.2

Фізико-механічні властивості плівки на основі
акрилової дисперсії «Acronal 290D»

Властивості	Значення
Об'ємна щільність (ISO 1183, DIN 53479), г/см ³	близько 1,08
Температура склування (DSC), °C	близько 22
Водопоглинання, після 24 годин у воді (ISO 62, DIN 53495), %	близько 10
Механічна міцність (DIN 53455):	
– міцність на розрив, Н/мм ²	близько 7
– відносне розтягування на розриві, %	близько 500

Для регулювання в'язкісно-пластичних властивостей системи застосовано комбінацію загусників різної природи. Як асоціативний загусник використано

«Latekoll DS 6269» – лужнонабухальну емульсію, що є частково нейтралізованим співполімером (мет)акрилових мономерів. Додатково введено целюлозний загусник «Headcel ME 60 MS», який є порошком карбоксиметилцелюлози (табл. 2.3).

Механізм дії асоціативного загусника полягає в утворенні фізичної просторової сітки за рахунок гідрофобних взаємодій між полімерними ланцюгами, що стабілізує систему, регулює її тиксотропність та запобігає розшаруванню. Целюлозний загущувач, у свою чергу, формує гідратовану сітку з водневими зв'язками, підвищуючи в'язкість і стабільність композиції під час зберігання. Сумісна дія цих добавок забезпечує оптимальний реологічний профіль, рівномірне нанесення та стійкість покриву до плинності.

Таблиця 2.3

Основні характеристики загущувача на основі карбоксиметилцелюлози

Властивості	Значення
Зовнішній вигляд	дрібнозернистий сипучий порошок білого кольору
Масова частка води, %, не більше	10
Ступінь заміщення за карбоксиметильними групами, у межах	75–90
Ступінь полімеризації, не менше	600–700
Розчинність у воді в перерахунку на абсолютно сухий технічний продукт, %, не менше	97
pH водного розчину з масовою часткою 2% при 20°C	6,5–11

Як диспергувальний агент використано поліфосфат натрію, зокрема гексаметафосфат натрію $(NaPO_3)_n \cdot H_2O$ (або $Na_6P_6O_{18}$), який являє собою білий склоподібний порошок, добре розчинний у воді. Поліфосфат натрію

характеризується високими адсорбційними та диспергувальними властивостями, нетоксичністю і хімічною стабільністю.

Механізм дії ґрунтується на утворенні комплексів між аніонами поліфосфатів і катіонами лужноземельних та важких металів, що зменшує негативний вплив жорсткості води та сприяє ефективному змочуванню і диспергуванню пігментних частинок. Крім того, завдяки гігроскопічності речовини поверхнева активність композиції залишається стабільною навіть при коливаннях вологості. Фізико-хімічні показники поліфосфату натрію наведено в табл. 2.4. [79].

Таблиця 2.4

Фізико-хімічні показники поліфосфату натрію

Властивості	Значення
Температура плавлення, °С	408
Вміст оксиду фосфату, %, не менш	68
Вміст неактивних оксидів фосфату, %, не більш	7,5
Вміст заліза, %, не більш	0,05
рН водного розчину	5,8–7,3
Вміст нерозчинних у воді речовин, %, не більш	0,05

Для зниження мінімальної температури плівкоутворення застосовано коалесцент Теханол ($C_{12}H_{24}O_3$) – високомолекулярну органічну сполуку, що є сумішшю складного ефіру та спирту (табл. 2.5) [80].

Механізм дії Теханол полягає у тимчасовому пластифікуванні полімерних частинок дисперсії, що сприяє їх зближенню та злиттю під час висихання покриву, з утворенням однорідної плівки з покращеними бар'єрними властивостями. Теханол характеризується високою температурою кипіння (близько 254 °С), низькою токсичністю та здатністю до біологічного розкладання під дією мікроорганізмів.

Відповідно до Наказу Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 02.10.2018 № 1394 «Про затвердження Технічного регламенту щодо обмеження викидів летких органічних сполук унаслідок використання органічних розчинників у лакофарбових матеріалах для будівель та ремонту колісних транспортних засобів» [81], для декоративних матеріалів доцільним є використання сполук з низьким вмістом летючих органічних сполук (ЛОС) і температурою кипіння не вище 250 °С, що робить Texanol одним із найбільш придатних коалесцентів сучасного типу.

Таблиця 2.5

Основні характеристики коалесценту Texanol

Властивості	Значення
Температура кипіння, °С	255–260
Температура замерзання, °С	-50
Температура займання, °С	120
Температура самозаймання, °С	393
Розчинність у воді за 20 °С, г/100 мл	0,9
Відносна щільність за 20 °С, г/см ³	0,95

Для регулювання процесів піноутворення застосовано антиспінювальний агент FoamStar ED 2521 (концерн BASF Societas Europaea, Німеччина), що є полімерною емульсією з відсутністю летких органічних сполук (ЛОС) і низьким вмістом середньоолетких органічних компонентів (табл. 2.6). [82]. Механізм дії піногасника полягає у дестабілізації газорідної межі фаз за рахунок локального зниження поверхневого натягу та руйнування стабілізуючих плівок поверхнево-активних речовин, які утримують повітряні бульбашки у системі. Унаслідок цього відбувається коалесценція дрібних бульбашок повітря з подальшим їх видаленням із системи. Завдяки цьому FoamStar ED 2521 забезпечує рівномірність структури покриття, запобігає утворенню дефектів поверхні та сприяє збереженню стабільності композиції протягом технологічного процесу.

Основні фізико-хімічні характеристики піногасника FoamStar ED 2521 наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6.

Основні характеристики піногасника

Властивості	Значення
Вміст твердих речовин, %	16
Щільність за 20 °С, г/см ³	1,00
В'язкість за Брукфільдом за 23 °С, мПа·с	2300

Під час виготовлення складів використано дистильовану воду, що відповідає ДСТУ ISO 3696:2003 (ISO 3696:1987, IDT) [83].

З метою регулювання реологічних властивостей та підвищення водостійкості водно-дисперсійних покривів використано гідрофобізований диметилдихлорсиланом аеросил марки АМ-1/300 (SiO₂). Матеріал є високодисперсним аморфним діоксидом кремнію, одержаним методом високотемпературного гідролізу летких сполук кремнію.

Механізм дії аеросилу полягає у формуванні просторової тривимірної сітки з міжчастинкових водневих зв'язків та ван-дер-ваальсових взаємодій між силанольними групами на поверхні частинок SiO₂.

Така структура надає системі тиксотропних властивостей, підвищує в'язкість у стані спокою та забезпечує її відновлення після механічного навантаження.

Додатково аеросил виконує функцію стабілізатора, запобігаючи агрегації пігментів і покращуючи структурну рівномірність покриву. Мінеральний склад аеросилу АМ-1/300 наведено в табл. 2.7. [84].

Унаслідок цього аеросил підвищує стабільність водно-дисперсійних складів, запобігає агрегації й осіданню пігментних частинок, покращує однорідність структури покриву та сприяє формуванню рівномірного шару без дефектів.

Мінеральний склад та фізико-хімічні показники аеросилу марки АМ-1/300 наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7.

Мінеральний склад аеросилу марки АМ-1/300

Наповнювачі	Питома поверхня, м ² /г	ρ, г/см ³	рН	Мінеральний склад, % мас						
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mg O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ca O	K ₂ O
Аеросил	300	0,051-0,059	5,5	99,9	0,05	–	0,003	0,03	–	–

Основні характеристики аеросилу марки АМ-1/300 наведено у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8.

Характеристики аеросилу аеросилу марки АМ-1/300

Характеристики	Значення
1.	2.
Зовнішній вигляд: неуцільненого уцільненого	Пухкий блакитно-білий порошок Біла маса у вигляді пухких шматочків
Масовий міст двоокису кремнію (SiO ₂) в перерахунку на прожарену речовину, %, не менше	99,9
Масовий вміст оксиду заліза (Fe ₂ O ₃), %, не більше	0,003
Масовий вміст оксиду алюмінію (Al ₂ O ₃), %, не більше	0,05
Масовий вміст діоксиду титану (TiO ₂), %, не більше	0,02
рН суспензії	3,6-4,3

Продовження таблиці 2.8.

Характеристики	Значення
Масовий вміст вологи, %, не більше	1,5
Втрати маси при прожарюванні, %, не більше	2
Насипна щільність, г/л: неущільненого	40-60
ущільненого	110-140
Питома поверхня, м ² /г, за методом БЕТ	300±30
Масовий вміст великих часток, %, не більше	0,04

Як було відзначено в попередньому розділі, формування реактивних покривів, як правило, забезпечується завдяки поєднанню трьох основних складових: джерела неорганічної кислоти, вуглецевмісного компонента (коксоутворювача) та газотворювального агента.

Як джерело неорганічної кислоти в системах реактивних вогнезахисних полімерних покривів одним із найпоширеніших класів сполук є антипірени на основі фосфору. Фосфоровмісні антипірени проявляють вогнезахисну дію як у конденсованій, так і в газовій фазах, ефективно впливаючи на процеси термічного розкладання полімерів.

Механізм їх дії полягає у тому, що під впливом високих температур або полум'я фосфоровмісні сполуки зазнають термічного розкладання з утворенням фосфорної кислоти, а надалі – поліфосфорної кислоти.

Остання каталізує реакції естерифікації та дегідратації полімерної матриці, сприяючи формуванню карбонізованого шару з аморфно-склоподібною структурою. Цей шар виконує функцію теплоізоляційного бар'єра, зменшуючи теплопередачу до підкладки та уповільнюючи процеси подальшого піролізу й горіння полімеру.

Найбільш ефективним і практично значущим представником фосфоровмісних антипіренів на сучасному етапі є поліфосфат амонію (ПФА) з кристалічною фазою II ($n > 1000$), який характеризується високою термічною стабільністю, низькою розчинністю у воді та здатністю до тривалого утримання кислотних залишків у конденсованій фазі [85–88].

Одночасно з плівкоутворювачем стирол-акрилової дисперсії поліфосфат амонію утворює систему кислотно-каталітичного зшивання, у результаті чого формується структурно зміцнений коксовий шар.

Утворена фосфорорганічна матриця забезпечує жаростійкість і цілісність покриття при дії полум'я.

Фізико-хімічні характеристики поліфосфату амонію Exolit AP 422, використаного в даній роботі, наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9.

Характеристики поліфосфату амонію

Характеристики	Значення
Зовнішній вигляд	Білий порошок
Хімічний склад	$[\text{NH}_4\text{PO}_3]_n$ ($n > 1000$)
Масовий вміст фосфору, %	31,0-32,0
Масовий вміст вологи, %, не більше	0,25
Масовий вміст нітрогену, %	14,0-15,0
В'язкість (25 °C) 10 %-ої суспензії у воді, Па·с, не більше	0,1
Кислотне число, мг КОН/г, не більше	1,0
Температура термічної деструкції, °C, не нижче	275
Середній розмір частинок, D50, мкм	17
Масовий вміст частинок з розміром менше 50 мкм, % не менше	95,0

Як вуглецевмісний компонент для формування карбонізованого каркасу спіненого шару застосовували пентаеритрит. Ця сполука являє собою

дрібнодисперсний білий кристалічний порошок, який при термічному впливі за температур понад 250 °С зазнає дегідратації та часткового термолізу з утворенням щільного карбонового залишку.

Отриманий карбонізований шар характеризується низькою теплопровідністю та високою термостійкістю, що забезпечує ефективне екранування теплового потоку й суттєво знижує термічне навантаження на захищену поверхню або конструкційний матеріал [89, 90].

Основні фізико-хімічні характеристики пентаеритриту наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10.

Характеристики пентаеритриту

Фізико-хімічні характеристики	Марка А вищий сорт
Зовнішній вигляд	Білий кристалічний порошок без сторонніх домішок, видимих неозброєним оком.
Хімічний склад	$C_5H_{12}O_4$
Масовий вміст монопентаеритриту, %, не менше	97
Температура плавлення, °С, не нижче	255(250)
Масовий вміст води і летких речовин, %, не більше	0,2
Масовий вміст золи, %, не більше	0,006(0,01)
Кольори плаву по платиново-кобальтової шкалою, не більше	100
Масова частка гідроксильних груп, %, не менше	49,5(49,3)
pH водного розчину з масовим вмістом 5 %	5,7-7,0

Як газоутворювальний компонент у складі реактивного вогнезахисного покриття застосовано гідроксид алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$), який належить до перспективних мінеральних добавок для систем антипіренового типу.

Гідроксид алюмінію під дією температур близько $200\text{ }^\circ\text{C}$ і вище зазнає ендотермічної дегідратації з утворенням оксиду алюмінію (Al_2O_3) і виділенням водяної пари, що зумовлює охолодження реакційної зони та зниження концентрації горючих газів у фазі горіння.

Вивільнення парів води сприяє також розбавленню зони займання й гальмуванню процесів полум'яного окиснення.

Ендотермічний характер розкладання $\text{Al}(\text{OH})_3$ супроводжується інтенсифікацією процесів карбонізації полімерної матриці та каталізує реакції поперечного зшивання, що сприяє утворенню структурно зміцненого реактивного шару.

Такий шар зменшує газообмін між зоною деструкції полімеру й навколишнім середовищем, проявляючи додатковий димознижувальний і вогнепригнічувальний ефекти.

Крім вогнезахисної функції, гідроксид алюмінію виконує роль реологічного модифікатора. Завдяки стабільним розмірам частинок ($1 - 5\text{ }\mu\text{m}$) і майже сферичній морфології, він підвищує оптичну стабільність лакофарбових покриттів до дії ультрафіолетового випромінювання через рівномірне відбиття світла від поверхні плівки.

Одночасно спостерігається покращення тиксотропних властивостей і текучості матеріалу, що є важливим фактором під час його технологічного нанесення [91, 92].

В дослідженнях використовували гідроксид алюмінію марки TS-303. Основні характеристики гідроксиду алюмінію марки TS-303 наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.11.

Характеристики гідроксиду алюмінію марки TS-303

Характеристики	Значення
Зовнішній вигляд	Порошок білого кольору або прозорий
Хімічний склад	Al(OH) ₃
Молярна маса, г/моль	78
Густина, г/см ³	2,42
Температура плавлення, °C	300
Масова частка води, %, не більше	0,3
Втрата маси при прожарюванні, %	33,0-34,5
Масова частка оксидів заліза, %, не більше	0,01
pH водної суспензії з масовою часткою 10 %, од., не більше	10
Середній розмір часток, мкм	3-5
Білизна, у.о., не менше	95

Методика приготування реактивного вогнезахисного покритву передбачає послідовне змішування компонентів реактивної системи в єдиному технологічному циклі, що забезпечує утворення однорідної композиційної маси з рівномірним розподілом складових.

На першому етапі компоненти системи у визначених стехіометричних співвідношеннях завантажували до лабораторного дисольвера з об'ємом робочої чаші 1 дм³. Процес диспергування здійснювали протягом 60 хв при швидкості обертання фрези 900 – 1000 об./хв до досягнення візуальної однорідності суміші та стабільного реологічного стану.

Після цього до отриманої пастоподібної маси вводили полімерну дисперсію, яку додатково перемішували при зниженій швидкості фрези

500 – 600 об./хв упродовж 30 хв для забезпечення рівномірного розподілу полімерного плівкоутворювача та запобігання коагуляції частинок.

Отриману композицію витримували в герметичній тарі до моменту подальшого використання з метою збереження стабільності системи та запобігання передчасному випаровуванню водної фази [93].

2.2. Методи дослідження.

Розроблення реактивних вогнезахисних покриттів є складним багатокомпонентним процесом, оскільки введення окремих інгредієнтів або їх комбінацій у систему може істотно впливати на її технологічні параметри, структурно-реологічні характеристики та експлуатаційні властивості.

У зв'язку з цим процес створення вогнезахисних композицій супроводжується комплексом експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення оптимального складу, механізмів взаємодії компонентів і закономірностей формування структури під дією температурного навантаження.

Методи дослідження, застосовані в межах даної роботи, доцільно класифікувати за напрямками:

- методи дослідження вогнезахисної ефективності покриттів;
- методи визначення експлуатаційно-технологічних характеристик;
- методи математичної та статистичної обробки експериментальних даних.

2.2.1. Методи дослідження вогнезахисної ефективності покриттів для металевих конструкцій.

Для попереднього оцінювання горючості водно-дисперсійних покриттів реактивного типу та визначення оптимального вмісту джерела неорганічної кислоти – поліфосфату амонію (ПФА) було проведено випробування з визначення кисневого індексу (КІ) відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN ISO

4589-2:2018 «Пластмаси. Визначення характеристик горіння за кисневим індексом. Частина 2. Випробування за температури навколишнього середовища» (EN ISO 4589-2:2017, IDT; ISO 4589-2:2017, IDT). Метод визначення кисневого індексу застосовували як індикативний критерій первинної оцінки пожежної небезпеки покривів, що дозволяє встановити тенденції впливу складу системи на її горючість, але не є вичерпним показником вогнезахисної ефективності.

Одним із ключових параметрів, що визначає вогнезахисну ефективність покривів для металевих конструкцій, є коефіцієнт спучування (КС).

Методика визначення лінійного коефіцієнта спучування ґрунтується на порівнянні товщини шару покриву до та після термічного впливу. Для проведення випробувань використовували сталеві пластини розміром $50 \times 50 \pm 1$ мм і товщиною $2,0 \pm 0,2$ мм. Товщину покриву вимірювали штангенциркулем до нагрівання, а після термічного впливу – глибиноміром у п'яти контрольних точках.

Точки вимірювання розташовували наступним чином: перша – у геометричному центрі зразка, решта чотири – на рівних відстанях від центральної точки по діагоналях пластини, на відстані $0,25$ її довжини.

На відміну від вимог стандарту ДСТУ 9291:2024 «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатації об'єктів вогнезахисту», випробування проводили не при фіксованій температурі 340 °С, а за температури 500 °С, що наближена до критичного діапазону втрати несучої здатності сталевих конструкцій.

Для дослідження коефіцієнта спучування зразків реактивного вогнезахисного покриву було використано спеціалізовану установку на основі електричної муфельної печі. Схему експериментальної установки подано на рис. 2.1.

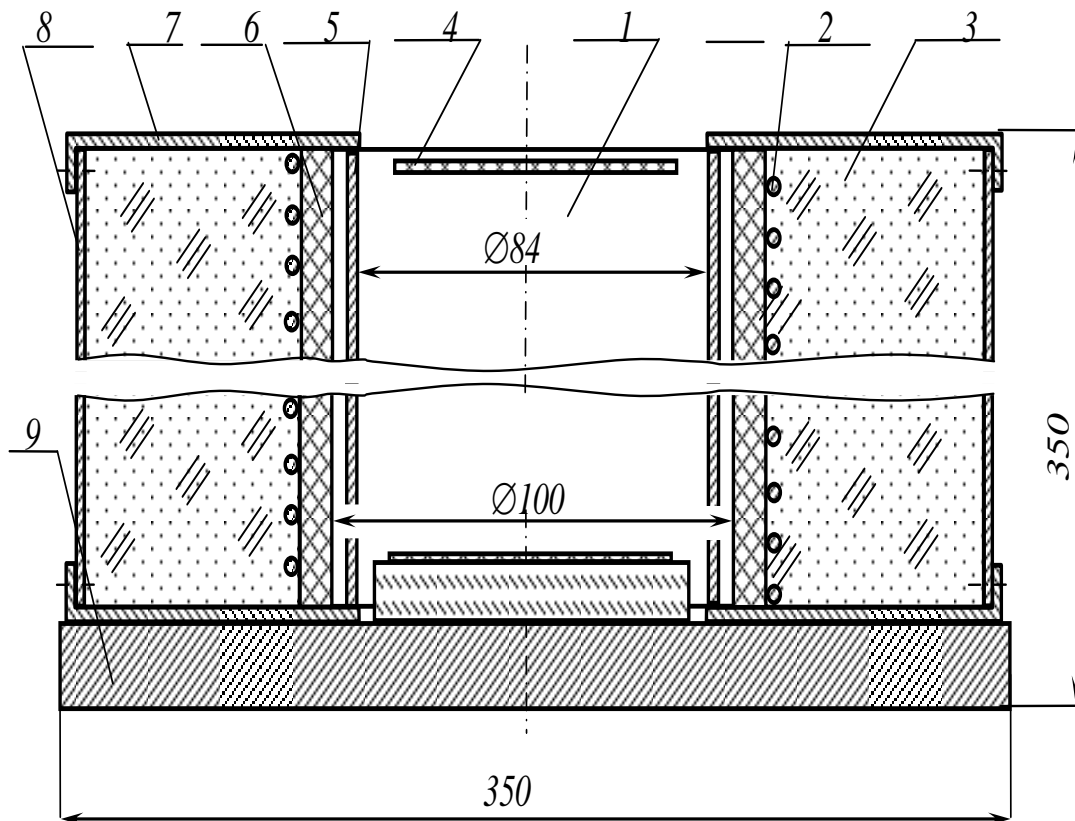


Рис. 2.1. Схема установки для випробувань зразків вогнезахисного покритву: 1 – внутрішній простір камери печі; 2 – ніхромова спіраль; 3 – азбесто-шамотна засипка; 4 – азбестова тканина; 5 – сталевий муфель; 6 – стінка вогнетривкої камери; 7 – кришка; 8 – кожух печі; 9 – основа.

Випробування проводили із застосуванням електричної муфельної печі СНОЛ 1,6.2.0.0,8/9-М-1 (номінальна потужність – 2,4 кВт) з горизонтальним типом завантаження. Основною конструктивною особливістю печі є наявність муфеля – теплостійкої оболонки, яка формує робочий об’єм печі та забезпечує ізоляцію зразків від прямого контакту з нагрівальними елементами. Така конструкція сприяє рівномірному розподілу температури в робочій зоні та підвищенню відтворюваності експериментальних результатів.

Зовнішній вигляд муфельної печі перед початком випробувань представлено на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Вигляд муфельної печі перед початком випробувань.

Температурний режим нагрівання задавався з лінійною швидкістю $8,6$ $^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Після досягнення температури 600 $^{\circ}\text{C}$ встановлювався стаціонарний режим шляхом регулювання потужності нагрівальних елементів. Усі зразки розміщувалися одночасно в робочій камері печі та витримувалися при постійній температурі (600 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ протягом 5 хвилин.

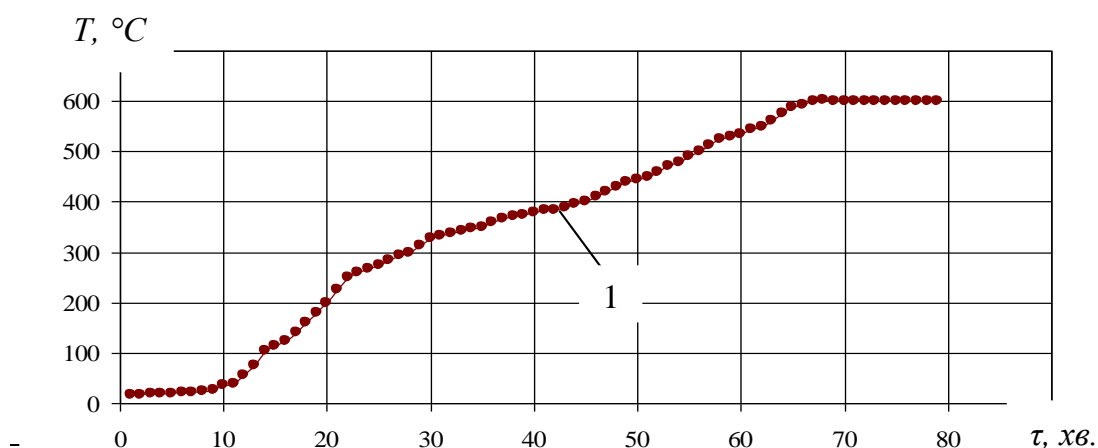


Рис. 2.3. Лінійна швидкість нагрівання камери печі: 1 – температурно-часова залежність в камері муфельної печі.

Контроль температурного поля в печі здійснювали за допомогою термопар типу ТХА з діаметром дроту $1,5$ мм (див. рис. 2.4). Зазначені термопари

призначені для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1100 °С і забезпечують достатню точність контролю теплового режиму в зоні розміщення зразків.



Рисунок 2.4 – Термопара ТХА-VIII – 1-27-К-2-И-320-INC-6-А-(0...1100)°С.

Для реєстрації цифрових значень температури у точках встановлення термопар використовували вторинний вимірювальний електронний прилад Digital Multimeter DT-700С, який підключався безпосередньо до вихідних контактів термопар.

Зазначений прилад забезпечує вимірювання температури в діапазоні від -20 °С до +1370 °С із відносною похибкою не більше ніж $\pm 1,0\%$, що гарантує достатню точність контролю температурного поля в зоні випробувань.

Для розрахунку лінійного коефіцієнта K_L спучування застосували наступну формулу:

$$K_L = \frac{h_{c1} + h_{c2} + h_{c3} + h_{c4} + h_{c5}}{d_c}, \quad (2.1),$$

де h_{c1}, \dots, h_{c5} – товщина спіненого шару покриття у відповідних точках вимірювання, мм;

d_c – середня товщина шару покриття до випробування, визначена як середнє арифметичне з чотирьох вимірювань.

Механічну міцність сформованого теплоізоляційного шару (пінококсу) після спучування вогнезахисного покриття оцінювали за методикою Lee Jin Sheng

(Universiti Tunku Abdul Rahman) [94], яка базується на визначенні граничного статичного навантаження, що може витримати шар без руйнування.

Випробування проводили за температури $25\pm 2^\circ\text{C}$ протягом 5 с, шляхом поступового збільшення навантаження на поверхню пінококсового шару за допомогою щілинних вантажів стандартних розмірів (зовнішній діаметр – 20 мм, товщина – 4,4 мм, внутрішній діаметр отвору – 6,4 мм).

На поверхню зразка вертикально встановлювали навантажувальний елемент початковою масою 10 г, з'єднаний із підвіскою масою 10 г (Рис. 2.5). Додаткове навантаження створювали шляхом послідовного приєднання щілинних вантажів по 10 г кожен. Після кожного кроку навантаження здійснювали короткочасну витримку для стабілізації зусилля, після чого проводили візуальний контроль цілісності шару.



Рис. 2.5. Вид навантажувального елемента

Критичну масу навантаження $m_{\text{кр}}$ визначали як сумарну масу навантажувального елемента, підвіски та вантажів, за якої фіксували руйнування або деформацію пінококсового шару.

Питому міцність шару (σ , г/см²) розраховували за формулою:

$$\sigma = \frac{m_{\text{кр}}}{S} \quad (2.2),$$

де $m_{\text{кр}}$ – критична маса навантаження, г,

S – площа зони контакту навантаження, см².

Площу зони контакту визначали за формулою площі кола:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.3)$$

де d – діаметр навантажувального елемента, см.

Отримані значення питомої міцності (σ) характеризують механічну стійкість, структурну цілісність та щільність теплоізоляційного шару, що формується внаслідок спучення вогнезахисного покриття.

З метою оцінювання термічної стабільності вогнезахисних покриттів, а також визначення температур початку деструкції, пікових значень масової втрати та залишкової маси, було проведено комплексний термічний аналіз, який включав диференційно-термічний (ДТА) та термогравіметричний (ТГА) методи дослідження.

Дослідження здійснювали методом дериватографії у діапазоні температур 25 – 800 °С із використанням дериватографа Linseis STA PT1600. Нагрівання зразків проводили в атмосфері повітря зі швидкістю 10 °С/хв, при цьому точність вимірювання температури становила ± 1 °С. Як еталон використовували оксид алюмінію ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$).

Для аналізу використовували зразки масою 0,1 г. У процесі дослідження реєстрували три основні термограми:

- температурну криву (Т);
- залежність маси зразка від часу (TG);
- залежність теплового ефекту від часу (HDSC), отриману методом високотемпературної диференційної сканувальної калориметрії.

Після завершення термогравіметричного експерименту зміни маси кожного зразка було перераховано у відсоткове відношення до початкової маси.

Для встановлення температури, що відповідає максимальній швидкості втрати маси, криві термогравіметрії було продиференційовано, отримавши криві ДТГ.

Криві HDSC перетворювали у мілліджоулі на секунду (мДж/с) з урахуванням калібрувальної залежності, побудованої відносно еталонного зразка свинцю. Отримані результати дозволили оцінити термостабільність покриттів, а також виявити характерні температурні інтервали ендо- та екзотермічних процесів, пов'язаних із деструкцією полімерної матриці та утворенням залишкового вуглецевого шару.

Дослідження вогнезахисної ефективності покриттів оцінювали за стандартними методиками, які наведені в табл. 2.12.

Таблиця 2.12.

Дослідження вогнезахисної ефективності покриттів

Види дослідження	Нормативний документ
Кисневий індекс	ДСТУ EN ISO 458:2018
Лінійний та об'ємний коефіцієнт спучення	ДСТУ 9291:2024
Група вогнезахисної ефективності вогнезахисних речовин	ГОСТ 16363-98
Група горючості будівельних матеріалів	ДСТУ 8829:2019
Група займистості	ДСТУ Б В.1.1-2-97
Коефіцієнт димоутворення	ДСТУ 8829:2019
Індекс поширення полум'я по поверхні	ДСТУ 8829:2019
Температура займання	ДСТУ 8829:2019
Температура самозаймання	ДСТУ 8829:2019
Випробування на вогнестійкість	ДСТУ EN 1363-1:2023

2.2.2. Методи визначення експлуатаційно-технологічних характеристик вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.

Реактивні вогнезахисні покриття, поряд із низкою переваг, зокрема здатністю формувати високоефективний теплоізоляційний шар спіненого коксу за відносно малої товщини нанесеного шару, характеризуються також рядом суттєвих недоліків [95]. Основними з них є обмеження щодо сфер їх практичного застосування, що зумовлено низькою стійкістю таких матеріалів до дії атмосферної вологи, агресивних середовищ, а також недостатньою адгезією до різних типів поверхонь і потенційною корозійною активністю компонентів системи. Зазначені чинники істотно звужують можливості використання вогнезахисних покривів реактивного типу в умовах експлуатаційних навантажень.

У зв'язку з цим під час розроблення нових композицій реактивних вогнезахисних покривів особливу увагу необхідно приділяти дослідженню їхніх експлуатаційних характеристик, що визначають довговічність і стабільність захисних властивостей.

У межах даної роботи проведено оцінювання таких експлуатаційних показників:

- водостійкості покривного шару.
- тривалості висихання покриття;
- адгезійної міцності до металевої основи.

Випробування на водостійкість при статичному зануренні у воду проводили з метою оцінювання здатності реактивного покриття зберігати масу та структурну цілісність під дією вологи.

У даній роботі методика випробування на водостійкість при зануренні у воду базується на міжнародному стандарті ISO 2812-2:2018, що є чинним на 2026 рік. На сьогодні в Україні не встановлено окремого національного ДСТУ, який замінює або оновлює стандарт ISO 2812-2 для методів занурення у воду. Тому, для досліду використовували зразки плівки реактивного покриття розміром

(30×30×1) мм, які занурювали у ємність з дистильованою водою об'ємом 1 дм³. Після заданого часу експозиції зразки вилучали з води, видаляли поверхневу вологу за допомогою фільтрувального паперу, після чого висушували до сталої маси протягом 1 години при температурі (40 ± 2) °С та зважували.

Зміну маси зразка (Δm , %) обчислювали за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m}{m_0} \cdot 100\% \quad (2.4.),$$

Де m_0 – маса плівки до занурення у воду, г;

m – маса плівки після висушування, г.

Для кожного зразка виконували п'ять паралельних вимірювань, за результатами яких визначали середнє значення зміни маси. Відносна похибка експерименту не перевищувала 1,5 %, що забезпечує достовірність отриманих результатів.

Експлуатаційні та фізико-механічні властивості покриттів на основі водної дисперсії визначено за стандартними методиками, наведеними в табл. 2.13.

Таблиця 2.13.

Фізико-механічні властивості покриттів на основі водних дисперсій

Назва показника	Нормативний документ
Щільність у рідкому стані, г/м ³	ДСТУ ISO 2811-1:2019
Масова частка нелетких речовин, %	ДСТУ EN ISO 3251:2022
Показник концентрації іонів водню, рН складів	ДСТУ EN 13300:2024
Час висихання, хв	ДСТУ EN ISO 9117-6:2022
Стійкість до статичного впливу води, год.	ДСТУ ISO 2812
Адгезія, бал	ДСТУ EN ISO 2409:2022

2.2.3. Методи математичної та статистичної обробки експериментальних даних.

Для встановлення закономірностей зміни властивостей водно-дисперсійних покриттів залежно від складу та співвідношення компонентів, а також з метою оптимізації рецептур досліджуваних композицій, застосовано метод повного факторного експерименту (ПФЕ) [96-98].

Побудова ортогонального плану другого порядку здійснювалася шляхом розширення базової структури ПФЕ за рахунок додавання експериментальних точок – як у центрі плану (на нульовому рівні факторів), так і на певній відстані від нього (у так званих зіркових точках). Такий підхід забезпечує можливість визначення нелінійних (квадратичних) ефектів факторів та їх взаємодій.

У разі проведення двофакторного експерименту ($k = 2$), за варіювання кожного фактора на двох рівнях, загальна кількість дослідів (n) визначається співвідношенням:

$$n = 2^k + 2k + 1 = 9,$$

де 2^k – кількість точок ядра ПФЕ, $2k$ – кількість зіркових точок, а одиниця відповідає центральній точці плану.

Оптимальний склад композиції оцінювали за значенням вихідної змінної (функції відгуку), що характеризувала певну цільову властивість системи. Математична постановка задачі має вигляд:

$$y = \phi(C_A, C_B), \quad (2.5)$$

де y – значення обраної властивості композиції; C_A, C_B – концентрації основних компонентів системи.

Для опису функціональної залежності відгуку доцільно застосовувати модель другого порядку. Відповідно до положень математичної теорії експерименту, поведінку функції відгуку адекватно описує ортогональний центральний композиційний план (ОЦКП) другого порядку. Це дає змогу

встановити аналітичну залежність функції відгуку від варійованих факторів у вигляді квадратичного рівняння регресії:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (2.6)$$

де x_i, x_j – незалежні змінні (фактори); b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коефіцієнти регресії.

Процес планування, проведення та математичного оброблення результатів експерименту включав такі етапи:

1. Кодування факторів (нормування змінних до безрозмірних координат);
2. Формування план-матриці експерименту;
3. Реалізація експерименту відповідно до плану;
4. Побудова моделі та перевірка її адекватності шляхом регресійного аналізу.

Регресійний аналіз дає змогу визначити дисперсію коефіцієнтів, оцінити похибки спостережень, розрахувати довірчі інтервали істинних значень коефіцієнтів та побудувати квадратичні поверхні відгуку, що відображають вплив факторів на властивості композиції.

Коефіцієнти регресії обчислювали за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} y_u}{x_{iu}^2}, \quad (2.7)$$

де x_{iu} – значення i -го фактора в u -му експерименті, n – загальна кількість дослідів.

Дисперсію випадкової похибки експерименту визначали за рівнянням:

$$S^2_{(y)} = \frac{\sum_{u=1}^n \sum_{q=1}^m (y_q^{Ai} - \bar{y}_u)^2}{n(m-1)}, \quad (2.8)$$

де m – кількість паралельних дослідів, n – кількість незалежних оцінок дисперсії.

Коефіцієнт регресії вважався статистично значущим, якщо виконувалася умова:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \cdot S_{b_i}, \quad (2.9)$$

де $t_{(0,05;f_y)}$ – критичне значення критерію Стюдента при рівні значущості 0,05 та f_y ступенях свободи.

Адекватність моделі оцінювали за критерієм Фішера (F). Модель вважається адекватною, якщо виконується нерівність:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05;f_{ад};f_y)}, \quad (2.10)$$

де дисперсія адекватності визначається за виразом:

$$S_{ay}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_{\text{мод}})^2}{f_{ад}}, \quad (2.11)$$

де $y_{\text{мод}}$ – розрахункове значення відгуку в i -ому досліді; $F_{(0,05;3;9)}$ – критерій Фішера за 5-відсоткового рівня значущості; $f_{ад} = n - 0,5(k + 2)(k + 1)$ – кількість ступенів свободи дисперсії адекватності $9 - 0,5(2 + 2)(2 + 1) = 3$; f_y – кількість ступенів свободи під час визначення помилки дослідів.

Отримані статистичні оцінки дозволили визначити значущість факторів, побудувати регресійну модель та оптимізувати склад композицій водно-

дисперсійних вогнезахисних покривів із урахуванням взаємного впливу їх компонентів.

2.3. Висновки до розділу 2

У розділі визначено матеріали та методи, застосовані для розроблення вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на водній основі полімерів, що безпосередньо впливають на їх експлуатаційну ефективність під час дії високих температур. Особливу увагу приділено методиці 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.

Як плівкоутворювач використано стирол-акрилову дисперсію Acronal 290D. Для регулювання реологічних властивостей системи застосовано комбінацію асоціативного (Latekoll DS 6269) та целюлозного (Headcel ME 60 MS) загусників, поліфосфат натрію – як диспергувальний агент, Texanol ($C_{12}H_{24}O_3$) – як коалесцент, а FoamStar ED 2521 – як антиспінювальний засіб. Для підвищення водостійкості та стабільності покриву введено гідрофобізований аеросил AM-1/300.

Основними реактивними компонентами були поліфосфат амонію (ПФА), пентаеритрит (ПЕ) та гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$).

Дослідження вогнезахисних властивостей проводили згідно вимог стандарту ДСТУ 9291:2024 «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатації об'єктів вогнезахисту», випробування проводили при фіксованій температурі 340 °C та за температури 500 °C, що наближена до критичного діапазону втрати несучої здатності сталевих конструкцій.

Критеріями оцінювання ефективності покривів обрано лінійний та об'ємний коефіцієнти спучення, які визначали за стандартною методикою відповідно до ДСТУ 9291:2024.

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.

З метою оцінювання термічної стабільності вогнезахисних покривів, а також визначення температур початку деструкції, пікових значень масової втрати та залишкової маси, було проведено комплексний термічний аналіз, який включав диференційно-термічний (ДТА) та термогравіметричний (ТГА) методи дослідження.

У контексті оцінювання технологічної ефективності реактивних покривів для металевих конструкцій основними критеріями було прийнято водостійкість та адгезійну міцність до металевої основи, визначені за стандартизованими методиками. Для оптимізації складу компонентів вогнезахисних систем застосовано метод математичного планування експерименту з побудовою ортогонального композиційного плану другого порядку, що забезпечило достовірність отриманих закономірностей і точність вибору оптимальної рецептури покривів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПОНЕНТІВ НА ВОГНЕЗАХИСНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОКРИВІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.

3.1. Першочергова оцінка впливу компонентів на зниження горючості та утворення спученого шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.

Для встановлення комплексної залежності між складом реактивного покриву для металевих конструкцій, її горючістю та здатністю до спучення, одночасне визначення кисневого індексу (КІ) та лінійного коефіцієнта спучення (Кс) є доцільним підходом. Такий підхід дозволяє оцінити не лише термостійкість і пожежну безпечність покривів, а й інтенсивність процесів піноутворення, що безпосередньо впливають на формування теплоізоляційного шару. Отримані результати є базовими для подальшого визначення оптимального співвідношення компонентів системи та прогнозування її вогнезахисної ефективності.

Для першочергової оцінки горючості водно-дисперсійних покривів для металевих конструкцій реактивного типу та визначення оптимального вмісту джерела неорганічної кислоти – поліфосфат аммоній (ПФА) – було проведено вимірювання кисневого індексу (КІ) згідно зі стандартом EN ISO 4589-2:2017 (еквівалент ДСТУ EN ISO 4589-2:2018) [99-101] та лінійний коефіцієнт спучування (Кс) [21. 22]. Метод визначення КІ використовують як первинний індикатор горючості покривів, дозволяючи виявити тенденції впливу реактивної системи на її здатність підтримувати горіння, хоча сам по собі він не дає повної картини вогнезахисної ефективності.

Відповідно до літературних даних, зразки із КІ менше 25 % вважаються горючими, значення в межах 25–27 % вважаються важкогорючими матеріалами,

а значення вище 28 % – відносяться до важкогорючих і самозагасаючих матеріалів в нормальних умовах [102-104].

У дослідженнях вогнезахисних покривів часто фіксують товщину утвореного «пінококсу» або обчислюють коефіцієнт спучення після витримки зразків при заданих температурах – зазвичай при 500 °С або 600 °С (на відміну від вимог стандарту ДСТУ 9291:2024, а саме: 340 °С) – оскільки ці температури корелюють із критичними умовами нагріву металевих конструкцій. Такі експерименти дають пряме вимірювання розширення шарів і дозволяють зіставити вплив складу на об’ємне/лінійне спучення і залишкову міцність утвореного каркасу [105-109].

На рис. 3.1 представлено залежності кисневого індексу (КІ) та лінійного коефіцієнта спучення (K_c) при температурі 600 °С стирол-акрилової дисперсії від вмісту ПФА у системі при фіксованому вмісту ПЕ та $Al(OH)_3$ товщиною покриву 2 мм.

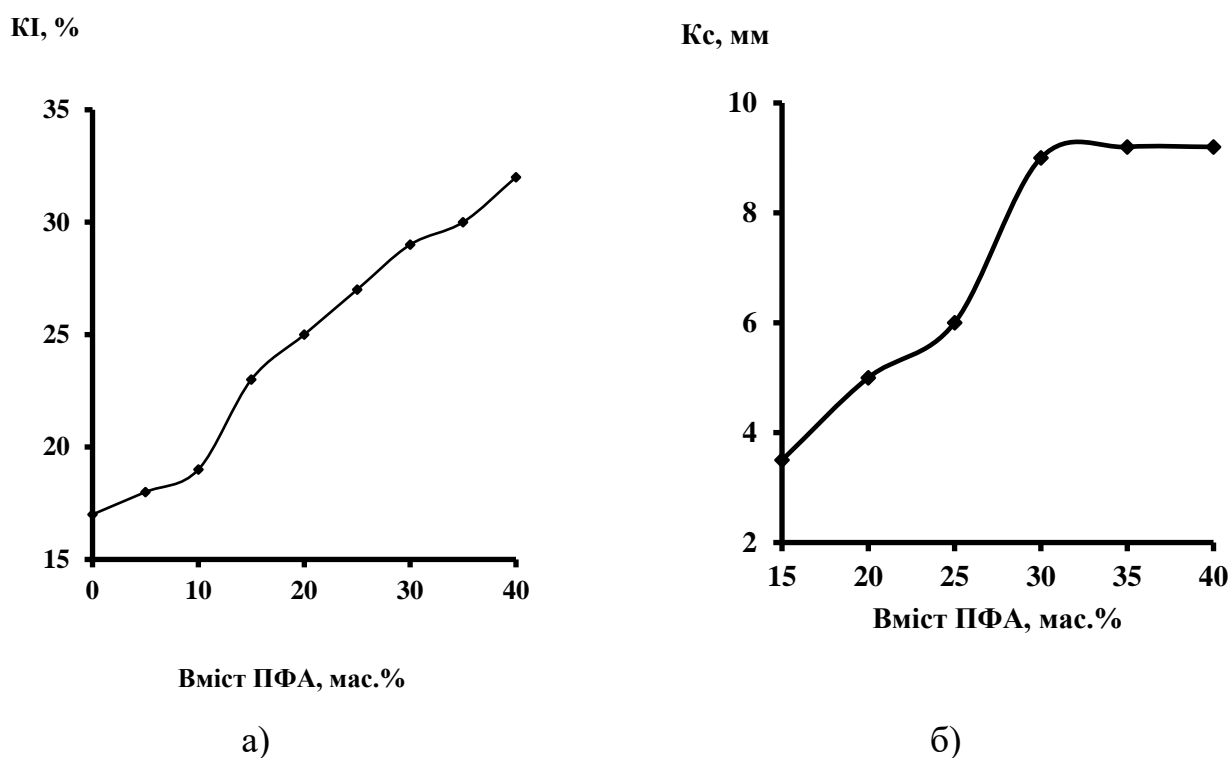


Рисунок 3.1 Залежність кисневого індексу (КІ) (а) та коефіцієнту спучення (K_c) (б) стирол-акрилової дисперсії від вмісту ПФА.

Як видно з рис. 3.1, із зростанням вмісту ПФА у складі водно-дисперсійної реактивної системи спостерігається чітка закономірність підвищення КІ та стабілізації Кс.

Зокрема, на рис. 3.1, а показано, що при збільшенні концентрації ПФА від 0 до 40 мас.% значення КІ зростає з 16 % до приблизно 32 %, що свідчить про перехід системи з групи горючих до важкогорючих самозагасаючих матеріалів. Така тенденція пояснюється інтенсифікацією процесів дегідратації та утворенням фосфоровмісного коксового шару, який ізолює основу від дії кисню.

На рис. 3.1., б показано, що лінійний коефіцієнт спучення (Кс) різко зростає в інтервалі 15–25 мас.% ПФА, досягаючи значень близько 9 – 9,2 мм, після чого крива виходить на плато. Це свідчить, що вміст ПФА понад 25 мас.% не призводить до подальшого збільшення висоти спученого шару, оскільки при надлишковій кількості кислотоутворювального агента процеси газоутворення та карбонізації досягають граничної ефективності.

Отже, концентрація ПФА близько 25 мас.% є оптимальною для досягнення збалансованих показників горючості та спучення, що забезпечує максимальну вогнезахисну ефективність без погіршення технологічних властивостей покривів на основі стирол-акрилової дисперсії.

Відомо, що зростання коефіцієнта спучення супроводжується зменшенням щільності пінококсу. Через інтенсивне виділення летких продуктів під час спучення відбувається розуцільнення структури, що призводить до зниження її механічної стійкості. Надмірно пориста структура з великими осередками та мікротріщинами погіршує теплозахисні властивості шару, тоді як рівномірна, дрібнокомірчаста морфологія забезпечує оптимальне поєднання ізоляційних і міцнісних характеристик.

Структуру утвореного після термічного впливу спученого шару покривів реактивного типу представлено на рисунку 3.2.

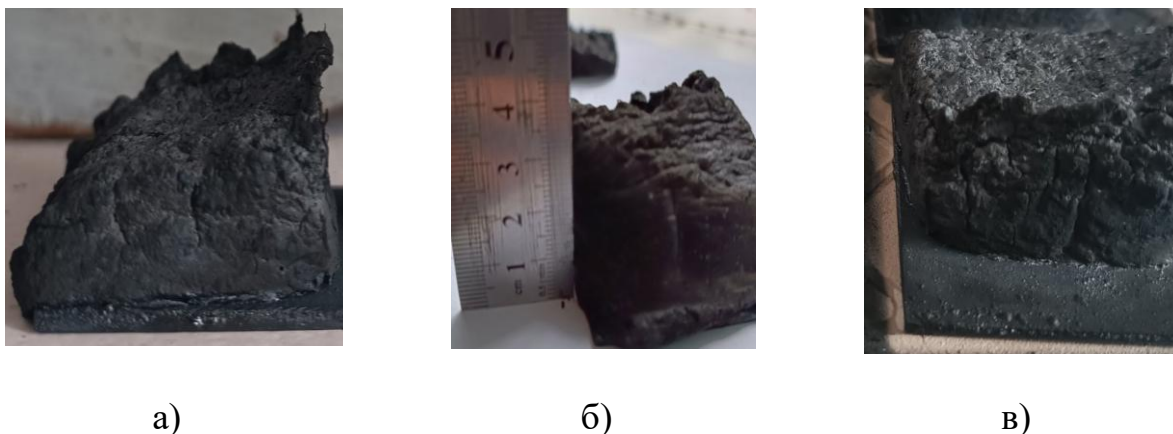


Рисунок 3.2. Структура пінококсу при різному вмісті ПФА, ПЕ та $Al(OH)_3$:
 ПФА: ПЕ: $Al(OH)_3$ = 15:20:35 мас.% (а), ПФА: ПЕ: $Al(OH)_3$ = 15:20:40 мас.% (б),
 ПФА: ПЕ: $Al(OH)_3$ = 20:15:40 мас.% (в)

Варто зазначити, що вогнезахисна ефективність покривів реактивного типу значною мірою залежить не лише від об'єму та щільності шару, який виникає під час горіння спученого шару, а й від його здатності протистояти вигоранню та механічному руйнуванню, адгезії до поверхні, що захищається після спучування. Однак питання міцності та адгезії коксового залишку вивчені недостатньо і залишаються поза розглядом авторів численних робіт.

Для попереднього визначення міцності спученого вогнезахисного складу був модифікований метод пенетрації з використанням консистометра Хеплера.

Метод заснований на зануренні тіла з певною стандартною формою досліджувану речовину, під впливом сили тяжіння і робочої маси, протягом 5 с при температурі $25^{\circ}C$.

Як пенетрометр (міра проникнення конусного тіла у середовище) використовували консистометр Хеплера, який є вільно ковзним плунжером з закріпленим на ньому робочим тілом у вигляді голки з плоским кінцем (індентор), діаметром 5 мм (рис 3.3).

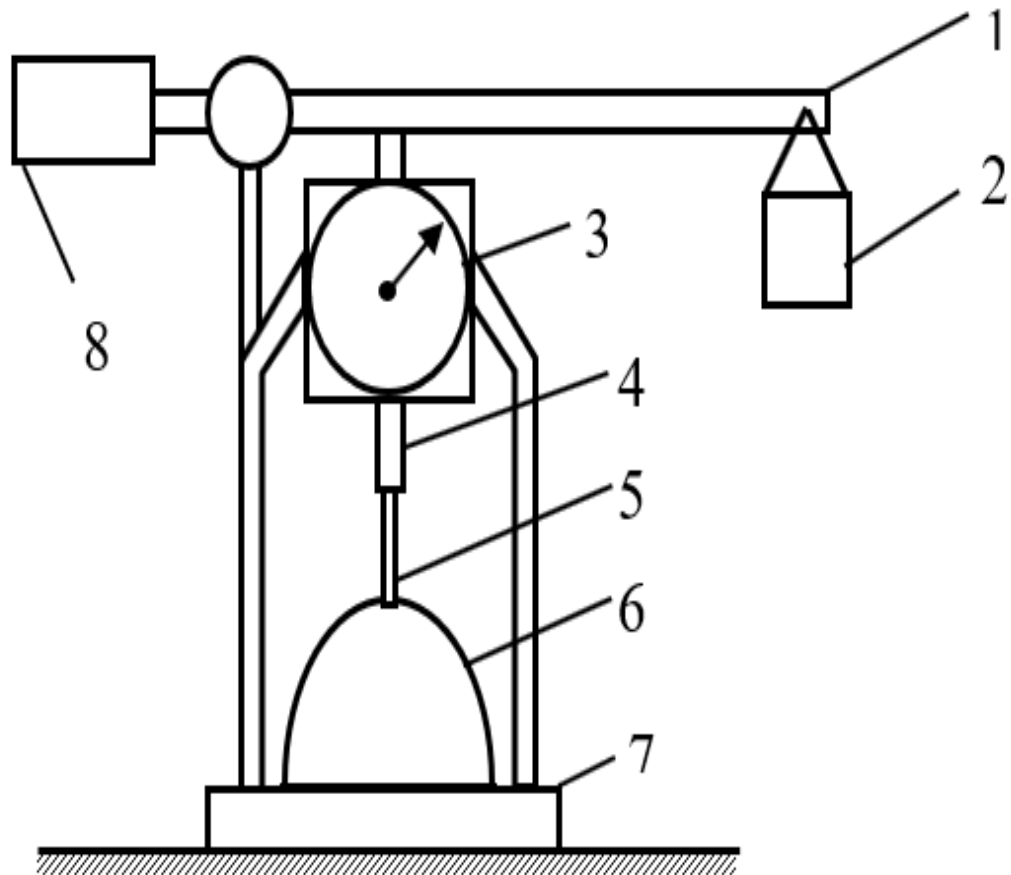


Рис. 3.3. Лабораторна установка визначення механічної міцності вогнезахисного покриття реактивного типу: 1 – важіль; 2 – навантаження; 3 – індикатор годинного типу; 4 – плунжер; 5 – індентор; 6 – спучений пінококс; 7 – підставка; 8 - противага

Перед початком вимірювання індентор підводиться впритул до поверхні спученого складу, а до верхньої частини плунжера прикладається певна сила. Потім плунжер звільняється і починає занурюватись у середу під дією прикладеної сили. Фіксувалася сила, за якої протягом 5 секунд індентор занурювався у спучене реактивного типу на глибину 10 мм.

Вимірювання проводили у трьох точках на поверхні спученого шару, після чого визначали мінімальну силу, необхідну для руйнування поверхні. Механічну міцність розраховували за такою формулою:

$$F = m/S , \quad (3.1)$$

де m – маса навантаження, доданої до індентора, г,
 S – площа, до якої прикладено навантаження (площа перерізу індентора),
 см^2 .

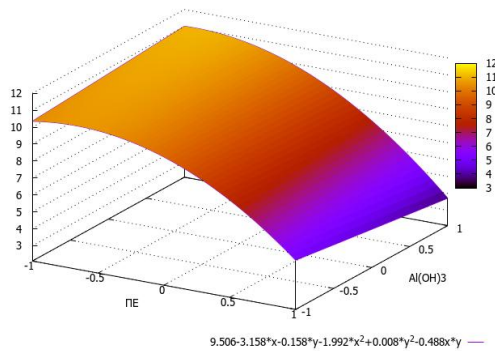
У таблиці 3.1 наведено експериментальні дані щодо визначення лінійного коефіцієнта спучення (K_c), міцності пінококсу за методом пенетрації (F), втрати маси після випробувань на визначення вогнезахисної ефективності (Δm) та класифікацію покривів за групами вогнезахисної ефективності. Дослідження проводили для зразків стирол-акрилового покритву товщиною $2,0 \pm 0,2$ мм, модифікованого ПФА у кількості 25 мас.% та композиціями, що містять ПЕ і $\text{Al}(\text{OH})_3$ у різних співвідношеннях.

Таблиця 3.1.

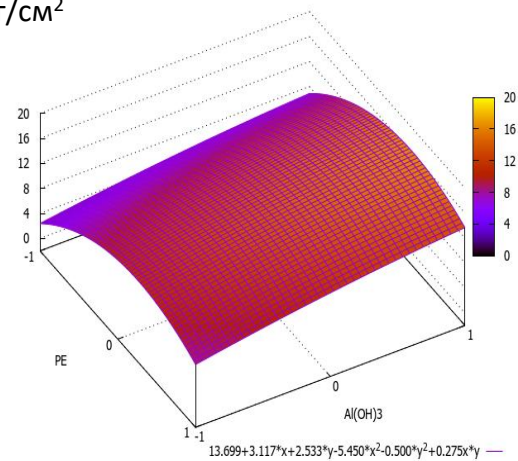
Експериментальні дані щодо визначення лінійного коефіцієнта спучення (K_c), міцності пінококсу за методом пенетрації (F)

Склад покритву, мас.% ПЕ/ $\text{Al}(\text{OH})_3$	K_c , мм	F , г/ см^2	Втрата маси, Δm , %	Група вогнезахисної ефективності
15/20	10	5,3	3,5	I
15/30	12,5	9,5	2,5	I
15/40	13,5	11,5	3,7	I
20/20	14	16,5	3,8	I
20/30	10,5	17,3	5,3	I
20/40	8	18,2	3,4	I
25/20	5	11,2	2,9	I
25/30	5,5	15,3	2,8	I
25/40	6,5	18,5	2,5	I

Кс, мм

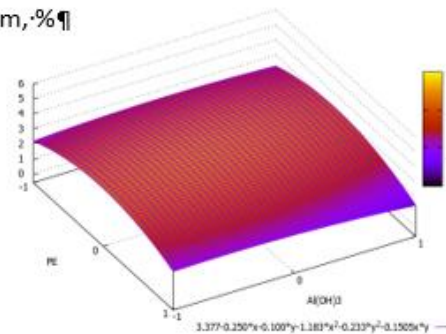


а)

F, г/см²

б)

Δm, %



в)

Рис. 3.4. Поверхні відгуку залежності величини межі лінійного коефіцієнта спучення (Кс), (а), міцності пінококсу (F) (б), втрати маси після випробувань на визначення вогнезахисної ефективності (Δm) (в) від вмісту наповнювачів PE та Al(OH)₃ при фіксованому вмісту ПФА (25 мас.%)

Аналіз поверхні відгуку (Рис. 3.4.) для лінійного коефіцієнта спучення показує, що зі збільшенням вмісту PE від низьких до середніх значень інтенсивність спучення істотно зростає. Зокрема, лінійний коефіцієнт спучення зростає приблизно з 5-6,5 мм до 14 мм, тобто у 2-2,5 рази, що зумовлено активізацією процесів газоутворення та формуванням розвиненої пористої структури шару. Однак при подальшому підвищенні частки PE спостерігається зниження коефіцієнта спучення на 20-40 %, що свідчить про порушення

цілісності пінококсового каркасу внаслідок надмірного газовиділення та часткового колапсу пористої структури.

Збільшення вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ супроводжується зменшенням ступеня спучення: при переході від нижчих до вищих концентрацій $\text{Al}(\text{OH})_3$ коефіцієнт спучення знижується до 6,5 мм, тобто приблизно в 1,5-2 рази, що пов'язано з ущільненням структури шару та обмеженням його об'ємного розширення внаслідок формування неорганічного каркасу.

Графічна залежність міцності пінококсу, визначеної методом penetрації, демонструє протилежну тенденцію. Зі збільшенням вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ механічна міцність сформованого шару суттєво зростає: значення міцності підвищуються з 5,3 г/см² до 18,5 г/см², тобто у 3,5 рази, що зумовлено утворенням більш жорсткого та стабільного каркасу пінококсу за рахунок оксидного залишку Al_2O_3 .

Вміст ПЕ при цьому чинить подвійний вплив. За помірних концентрацій ПЕ спостерігається зростання міцності шару до 17,3 г/см², що відповідає формуванню зв'язаної, рівномірно спученої структури. Проте подальше підвищення частки ПЕ призводить до зниження міцності до 15,3, що пов'язано зі зростанням пористості, зменшенням щільності та ослабленням механічного каркасу пінококсу.

Сумісний аналіз графічних залежностей коефіцієнта спучення та міцності пінококсу підтверджує, що ці параметри не перебувають у прямій пропорційній залежності. Максимальні значення коефіцієнта спучення (понад 14 мм) відповідають зниженим показникам міцності (менше 16,5 г/см²), тоді як максимальна механічна стійкість шару досягається за помірного спучення (18,5 мм) при коефіцієнту спучування 6,5 мм. Це свідчить, що підвищення міцності забезпечується за рахунок обмеження надмірного спучення та стабілізації структури пінококсового каркасу.

Таким чином, графічні залежності кількісно підтверджують наявність компромісу між інтенсивністю спучення та механічною стійкістю пінококсу. Оптимальні властивості вогнезахисного покриття реалізуються в області середніх концентрацій ПЕ та підвищеного, але обмеженого вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$, де

забезпечується формування спученого шару з достатньою теплоізоляційною здатністю та в 3-5 рази вищою механічною міцністю порівняно з системами, орієнтованими виключно на максимальне спучення.

Усі дослідні зразки належать до першої групи вогнезахисної ефективності, однак саме зазначене співвідношення компонентів характеризується найкращою структурною стабільністю пінококсу, що є вирішальним для забезпечення тривалої дії теплоізоляційного шару під впливом високих температур.

Слід зазначити, що абсолютне значення коефіцієнта спучення не може розглядатися як єдиний критерій вогнезахисної ефективності. Збільшення K_c не завжди корелює з підвищенням межі вогнестійкості, оскільки вирішальним чинником є структурно-механічна стабільність сформованого коксового каркасу. Теплоізоляційна здатність спіненого шару значною мірою визначається його міцністю, щільністю та морфологією комірок.

Встановлено взаємозв'язок впливу реактивних компонентів вогнезахисних покривів для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії на горючість та здатність до спучення. Показано, що визначення кисневого індексу (КІ) у поєднанні з оцінкою лінійного коефіцієнта спучення (K_c) є доцільним підходом для комплексної характеристики вогнезахисних властивостей водно-дисперсійних покривів реактивного типу. Такий метод дозволяє оцінити не лише пожежну небезпеку системи, але й ефективність процесів піногенерації, що формують теплоізоляційний шар.

1. Встановлено, що вміст ПЕ істотно впливає на інтенсивність спучення: зі збільшенням його концентрації до середніх значень лінійний коефіцієнт спучення зростає у 2–2,5 рази (з 5–6,5 до 14 мм), однак подальше підвищення призводить до зниження спучення на 20–40 % внаслідок руйнування пінококового каркасу через надмірне газовиділення.

2. Підвищення вмісту $Al(OH)_3$ зумовлює зменшення ступеня спучення до 6,5 мм (у 1,5–2 рази), що пов'язано з ущільненням структури шару та формуванням неорганічного оксидного каркасу, який обмежує об'ємне розширення.

3. Механічна міцність пінококсу, визначена методом пенетрації, зростає зі збільшенням вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ у 3,5 рази (з 5,3 до 18,5 г/см²), тоді як ПЕ проявляє подвійний ефект: за помірних концентрацій міцність зростає до 17,3 г/см², а при надлишку знижується до 15,3 г/см² через підвищення пористості.

4. Показано, що коефіцієнт спучення та механічна міцність пінококсу не перебувають у прямій пропорційній залежності: максимальне спучення (>14 мм) відповідає зниженій міцності (<16,5 г/см²), тоді як найбільша механічна стійкість (18,5 г/см²) досягається за помірного спучення (6,5 мм).

5. Отримані результати підтверджують наявність компромісу між інтенсивністю спучення та механічною стійкістю пінококсу й свідчать, що оптимальні вогнезахисні властивості забезпечуються за середніх концентрацій ПЕ та підвищеного, але обмеженого вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$, що дозволяє підвищити механічну міцність шару у 3–5 разів порівняно з системами, орієнтованими лише на максимальне спучення.

6. Незважаючи на те, що всі дослідні зразки належать до першої групи вогнезахисної ефективності, вирішальним чинником, що визначає довговічність та стійкість покривів при високотемпературному впливі, є механічна міцність і структурна стабільність пінококсу, а не лише величина коефіцієнта спучення. Саме ці параметри зумовлюють тривалість теплозахисної дії реактивних систем у реальних умовах пожежі.

Отримані результати мають важливе прикладне значення для оптимізації рецептури покривів для металевих конструкцій реактивного типу на водній основі, що забезпечують підвищену вогнестійкість металевих конструкцій у критичних температурних умовах.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження дозволили встановити оптимальне співвідношення реактивних компонентів, що забезпечує максимальну вогнезахисну ефективність та структурну стабільність спіненого шару.

Однак отримані результати описують лише кінцеві параметри процесу спучення – ступінь спучення, міцність пінококсу та втрату маси, – не розкриваючи механізмів, які визначають ці властивості на мікрорівні.

Для глибшого розуміння природи вогнезахисної дії та встановлення закономірностей термохімічних перетворень компонентів системи необхідно дослідити сам процес утворення пінококсу в динаміці.

У зв'язку з цим доцільним є проведення фізико-хімічного аналізу термічної поведінки реактивних компонентів покривів для металевих конструкцій реактивного типу із використанням методів термогравіметрії (ТГ та диференційного термічного аналізу (ДТГ)), що дозволяють простежити послідовність стадій дегідратації, розкладу, газоутворення та формування коксового каркасу під час нагрівання.

3.2. Результати термогравіметричного та диференційно-термічного аналізів вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.

Поглиблене дослідження механізму формування спученого шару залишається одним із ключових напрямів у галузі вогнезахисних технологій. Процеси спучення та коксоутворення супроводжуються комплексом послідовних фізико-хімічних реакцій, інтенсивність і характер яких змінюються в залежності від температури.

Складність їх дослідження обумовлена полікомпонентною природою реактивних систем, у яких одночасно відбуваються численні взаємодії між органічними сполуками – джерелами вуглецю та кислотними каталізаторами, і неорганічними наповнювачами, що впливають на теплоперенос і стабільність коксового шару.

Для поглибленого розуміння механізмів термічної стабілізації, газоутворення, спінення та формування теплоізоляційного бар'єра у сучасних дослідженнях широко застосовуються фізико-хімічні методи термічного аналізу.

Серед них особливе значення має диференційно-термогравіметричний аналіз, який дозволяє визначати температури початку й завершення розкладу, ідентифікувати фази та хімічні перетворення, а також аналізувати ендо- та екзотермічні ефекти, що супроводжують утворення коксового шару.

Методика термогравіметричного (ТГ) та диференційно-термічного (ДТГ) аналізів у поєднанні з високотемпературною диференціальною сканувальною калориметрією (HDSC) забезпечує повну термоаналітичну характеристику реактивної системи – від початкових процесів дегідратації до формування стабільного, термостійкого пінококсу.

Застосування такого підходу дозволяє:

- визначити температурні інтервали активації основних компонентів (поліфосфату амонію, пентаеритриту, гідроксиду алюмінію);
- оцінити теплові ефекти, пов'язані з ендо- та екзотермічними реакціями деградації й коксоутворення;
- кількісно охарактеризувати термостабільність та ефективність утворення коксового залишку.

Використання дериватографічного аналізу є науково обґрунтованим і надзвичайно важливим для розкриття механізму термічного захисту реактивних покриттів, що дає змогу обґрунтовано оптимізувати склад систем з метою підвищення їх вогнезахисної ефективності [110-113].

З цією метою для оцінювання термічної стабільності та визначення температурних інтервалів основних стадій розкладу реактивних компонентів вогнезахисного покриття на основі стирол-акрилової дисперсії було проведено диференційно-термогравіметричний аналіз (ДТГ) зразків, що містили ПФА – 25 мас.%, ПЕ – 25 мас.%, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 25 мас.%, а також їх спільного використання (ВЗП), результати якого наведено на рис. 3.5.

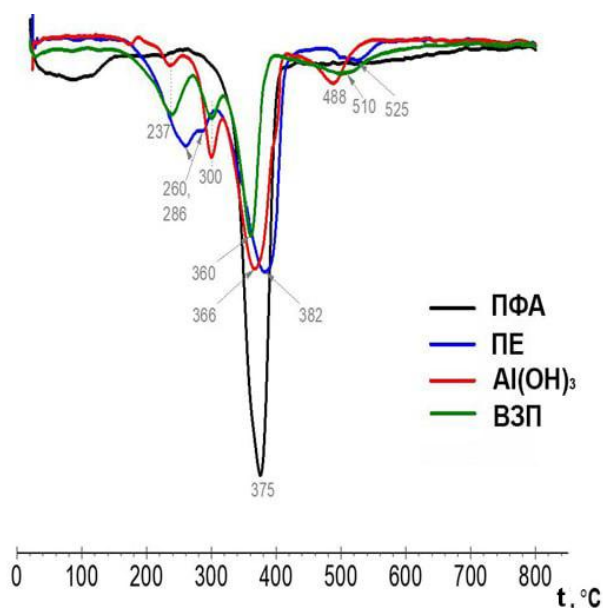


Рис. 3.5. Графіки диференційних термічних кривих швидкості втрати маси зразків покривів на основі стирол-акрилової дисперсії, наповненої ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та їх спільного використання (ВЗП).

Згідно з даними, наведеними на рис. 3.5, зразок, модифікований ПФА, демонструє інтенсивну втрату маси – близько 60 % – у вузькому температурному інтервалі 300–400 °С із максимумом швидкості деградації при 375 °С. У межах нижчих (< 300 °С) та вищих (> 400 °С) температур спостерігається повільне, поступове зниження маси без виражених максимумів на кривій ДТГ, що свідчить про завершення основних процесів термічного розкладу в цьому інтервалі.

Усі досліджувані системи характеризуються максимумом швидкості втрати маси в діапазоні 320–430 °С, який відповідає стадії активного термічного розкладу органічних компонентів: для зразків із ПЕ – 382 °С, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 366 °С, а для комбінованої системи (ВЗП) – 360 °С. Найширший температурний інтервал інтенсивної деструкції спостерігається для ПЕ (190–410 °С), тоді як для $\text{Al}(\text{OH})_3$ та ВЗП він становить 220–400 °С і 200–380 °С відповідно.

Зразки, що містять ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та їх комбінації, мають по два виражені максимуми швидкості втрати маси у діапазоні 180–320 °С (260 і 286 °С для ПЕ; 237 і 300 °С для $\text{Al}(\text{OH})_3$ та ВЗП) і ще один максимум за температур понад 410 °С (525 °С – ПЕ, 488 °С – $\text{Al}(\text{OH})_3$, 510 °С – ВЗП), що свідчить про багатостадійний

характер їх термодеструкції. Найвищу термостійкість проявляє зразок з $\text{Al}(\text{OH})_3$, який характеризується мінімальною загальною втратою маси.

Перетворення, що відбуваються при температурах нижче $430\text{ }^\circ\text{C}$, мають ендотермічний характер (рис. 3.6.) і супроводжуються поглинанням теплоти, що відповідає процесам дегідратації, десорбції летких сполук та утворенню проміжних фаз. У цьому інтервалі спостерігається основна масовтрата – 60-90 % (табл. 3.1). При підвищенні температури до $430\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ домінують екзотермічні процеси, пов'язані з окиснювальним горінням залишкових органічних фрагментів та утворенням коксового шару. Для зразка з ПФА на термограмі спостерігається широке екзотермічне гало з інтегральною тепловіддачею $100\text{--}30\text{ мДж/с}$ без чітко вираженого максимуму. Для зразків із ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та ВЗП фіксується виразний екзотермічний пік у межах $430\text{--}565\text{ }^\circ\text{C}$ (близько 110 мДж/с для ПЕ і ВЗП та 130 мДж/с для $\text{Al}(\text{OH})_3$), що відповідає основній фазі вигорання, а також друге, більш розмите гало в діапазоні $565\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ ($90\text{--}100\text{ мДж/с}$), у якому подальша втрата маси є незначною, що свідчить про стабілізацію утвореного коксового залишку.

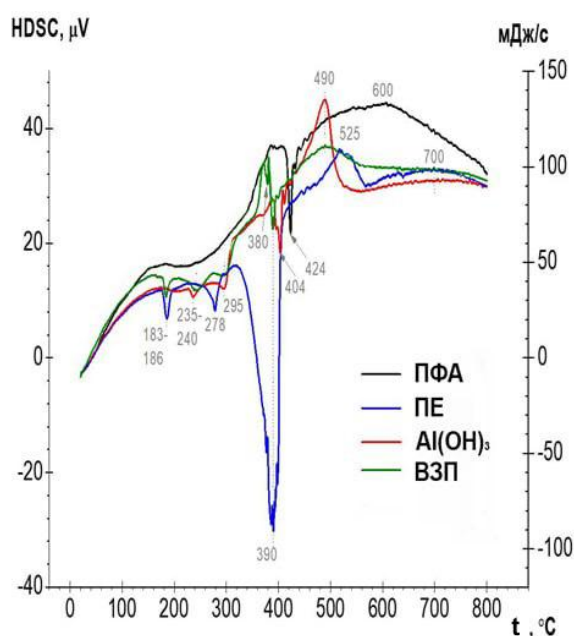


Рис. 3.6. Теплові ефекти перетворень зразків покривів на основі стирол-акрилової дисперсії, наповненої ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та їх спільного використання (ВЗП) у процесі нагріву.

На підставі термоаналітичних кривих, наведених на рис. 3.6, можна виокремити характерні закономірності термічної поведінки основних реактивних компонентів та їх спільної системи, що визначають механізм утворення захисного коксового шару при дії високих температур:

а) Термограма ПФА демонструє багатостадійну деградацію з чітко вираженими фазами розкладу. Початкове незначне зменшення маси реєструється при $\approx 230\text{--}240\text{ }^\circ\text{C}$ і відповідає виділенню фосфорної кислоти внаслідок розкладу поліфосфатного ланцюга. На цій стадії відбувається дегідратація, супроводжувана виділенням аміаку (NH_3), та утворення поліфосфорної кислоти, яка в подальшому виконує функцію кислотного каталізатора дегідратації поліолів (зокрема, пентаеритриту).

При подальшому підвищенні температури ($360\text{--}375\text{ }^\circ\text{C}$) спостерігається основний пік швидкості втрати маси, що відповідає інтенсивним реакціям дегідратації, коксування та утворення фосфоровмісного вуглецевого залишку. Візуально відзначається перехід порошкоподібного ПФА у в'язку, склоподібну фазу, яка сприяє формуванню термостійкого захисного шару. Цей процес супроводжується спіканням частинок і утворенням поліфосфатної матриці, що цементує коксову структуру.

б) ПЕ характеризується нижчою термічною стабільністю – основний пік деградації фіксується вже при $285\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає деструкції гідроксильних груп і виділенню летких продуктів дегідратації (H_2O , CO_2 , CO). У присутності поліфосфорної кислоти, утвореної з ПФА, відбуваються реакції етерифікації між кислотними і гідроксильними групами, що призводить до появи фосфоровмісних вуглецевих структур – попередників майбутнього коксового каркасу.

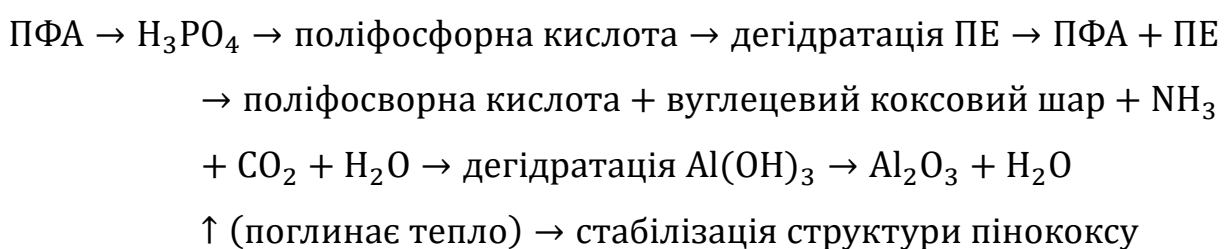
Цей процес є ендотермічним, оскільки частина теплової енергії витрачається на перебіг реакцій дегідратації, що сприяє локальному зниженню температури системи. Газоподібні продукти розкладу затримуються в розм'якшеній полімерній матриці, викликаючи її розширення та спучення, яке

забезпечує збільшення товщини покриття й утворення пористої теплоізоляційної структури.

в) Для $\text{Al}(\text{OH})_3$ характерна ендотермічна дегідратація в діапазоні $360 - 380\text{ }^\circ\text{C}$, що супроводжується переходом у беміт ($\gamma\text{-AlOOH}$), а за вищих температур – у безводний оксид алюмінію (Al_2O_3) з виділенням водяної пари. Водяна пара відіграє роль охолоджувального агента, який знижує температуру реакційної зони та перешкоджає поширенню полум'я. Одночасно утворений оксид алюмінію формує жорсткий оксидний каркас, який підвищує механічну міцність і стабільність спіненого шару, зменшуючи його усадку та деформацію при нагріванні. Це пояснює більшу кількість залишкового коксу у зразках з $\text{Al}(\text{OH})_3$ порівняно з ПФА або ПЕ.

г) На термограмі комбінованої системи ВЗП спостерігається кілька послідовних максимумів при $260, 300, 366$ і $382\text{ }^\circ\text{C}$, що свідчить про узгоджений перебіг взаємопов'язаних реакцій кислотно-каталітичної дегідратації, газоутворення та утворення оксидного каркасу. Таке поєднання забезпечує синергетичний ефект між фосфоровмісним каталізатором (ПФА), карбонізатором (ПЕ) та охолоджувальним агентом ($\text{Al}(\text{OH})_3$). В результаті формується термостійка, дрібнопориста теплоізоляційна структура, яка характеризується підвищеною стабільністю при тривалій дії високих температур.

Отже, спільне використання зазначених компонентів сприяє створенню ефективної реактивної системи, в якій процеси дегідратації, газоутворення, карбонізації та утворення неорганічного каркасу відбуваються у взаємно збалансованій послідовності. Це забезпечує утворення однорідного, механічно стійкого та термозахисного пінококсу. Узагальнена схема термічного розкладу реактивної системи може бути представлена у вигляді послідовності реакцій:



У результаті взаємодії цих процесів формується фосфор-вуглецева структура з високою міцністю, пористістю та стійкістю до дії високих температур, що визначає вогнезахисну ефективність реактивного покриття.

На рис. 3.7 наведено термогравіметричні криві (ТГ) основних компонентів реактивної системи: ПФА, ПЕ, $Al(OH)_3$ та їх спільного використання у складі вогнезахисного покриття (ВЗП).

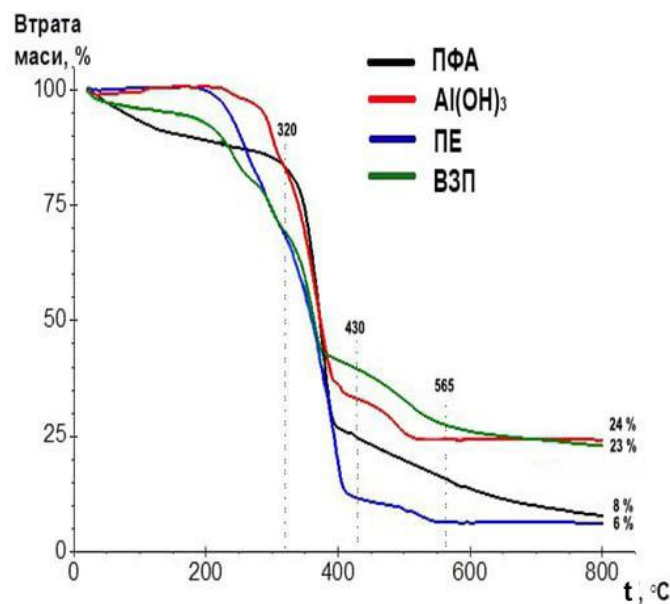


Рис. 3.7. Термогравіметричні криві зразків покриттів на основі стирол-акрилової дисперсії, наповненого ПФА, ПЕ, $Al(OH)_3$ та їх спільного використання (ВЗП)

У таблиці 3.2 представлено результати термогравіметричного аналізу – втрату маси зразками (%), досліджуваних покриттів на основі стирол-акрилової дисперсії, у різних температурних діапазонах.

Отримані дані свідчать, що всі досліджувані системи характеризуються багатостадійним характером термічної деструкції, проте ступінь втрати маси та кількість залишкового коксу істотно залежать від природи компонентів;

– ПФА демонструє плавний характер розкладу з початком деструкції приблизно при 320 °C та формуванням залишку масою близько 8 %, що свідчить

про обмежену здатність цього компонента самостійно утворювати стабільний вуглецевий шар при високих температурах:

– ПЕ характеризується різкою втратою маси в діапазоні 260–320 °С із залишком близько 6 %, що є мінімальним серед усіх зразків. Це підтверджує низьку коксоутворювальну здатність поліолу без участі кислотного каталізатора або мінеральних стабілізаторів.

– $\text{Al}(\text{OH})_3$, навпаки, виявляє високу термостійкість: після дегідратації, яка починається при 300–320 °С, утворюється беміт ($\gamma\text{-AlOOH}$), а за вищих температур – оксид алюмінію (Al_2O_3). Це супроводжується утворенням залишку масою ≈ 24 %, що свідчить про ефективне теплопоглинання та формування стабільного оксидного бар'єра.

Зразок ВЗП демонструє виражений синергічний ефект. Незважаючи на подібний температурний інтервал втрати маси, його залишок становить ≈ 23 %, що істотно перевищує показники для окремих компонентів. Такий результат свідчить про покращену термостійкість і здатність системи до формування щільного, термостабільного теплоізоляційного шару завдяки комплексній дії кислотного каталізатора (ПФА), вуглецевого донора (ПЕ) та газогенерувального неорганічного наповнювача ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

Таблиця 3.2.

Втрата маси зразками в окремих температурних діапазонах

Зразок	Температурний діапазон, °С						
	20–320	320–430	20–430	430–565	565–800	400–800	20–800
ПФА	17	58	75			17	92
ПЕ	32	56	88	5	1	6	94
$\text{Al}(\text{OH})_3$	17	50	67	8	1	9	76
ВЗП	31	30	61	12	4	16	77

Згідно з результатами термогравіметричного аналізу, інтеграція основних компонентів у складі реактивної системи (ВЗП) сприяє підвищенню термічної стабільності композиції та збільшенню частки твердого залишку після нагрівання до 800 °С. Найменші значення залишкової маси спостерігаються для окремих компонентів – пентаеритриту (6 %) та поліфосфату амонію (8 %), що

свідчить про їх обмежену термостійкість у чистому вигляді. Натомість гідроксид алюмінію демонструє найвищий рівень термостабільності з формуванням залишку близько 24 % за рахунок утворення оксидних структур.

Комбінована дія компонентів (ВЗП) забезпечує високий коксовий залишок – 23 %, що істотно перевищує прогнозовані значення для індивідуальних компонентів. Такий результат свідчить про синергічну взаємодію органічних і неорганічних складових, яка сприяє формуванню стабільного термостійкого спіненого шару з розвиненою вуглецево-оксидною структурою, здатною ефективно виконувати теплозахисну функцію в умовах підвищених температур.

Отримані результати термогравіметричного (ТГ) та диференційно-термогравіметричного (ДТГ) аналізів дозволили комплексно оцінити вплив основних діючих компонентів реактивних покриттів для металевих конструкцій – поліфосфату амонію (ПФА), пентаеритриту (ПЕ), гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$), а також їх спільної дії у складі вогнезахисного покритву (ВЗП) – на термічну стабільність та здатність до формування вуглецево-неорганічного залишку на основі стирол-акрилової дисперсії.

Встановлено, що індивідуальні компоненти характеризуються різною термохімічною поведінкою та механізмом впливу:

- Поліфосфат амонію (ПФА) розкладається в інтервалі 260–320 °С з утворенням поліфосфорної кислоти, яка виступає каталізатором реакцій дегідратації та етерифікації пентаеритриту, ініціюючи процеси карбонізації. Його залишкова маса становить близько 8 %, що вказує на обмежену ефективність у відсутності синергічних компонентів.
- Пентаеритрит (ПЕ), як вуглецевий донор, проявляє низьку термостійкість, інтенсивно деградує в діапазоні 260–360 °С, утворюючи лише 6 % залишкової маси, що свідчить про його потребу в кислотному каталізі для ефективного коксоутворення.
- Гідроксид алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$) функціонує як термостабілізатор та фізичний охолоджувач системи через ендотермічну дегідратацію (320-430 °С) з утворенням оксиду алюмінію (Al_2O_3). Його залишкова маса сягає 24 %, що є

максимальним серед досліджених зразків.

Композиційна система складу реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій демонструє виражений синергічний ефект, що проявляється у підвищеній термостійкості та формуванні значного коксового залишку ($\approx 23\%$ при $800\text{ }^\circ\text{C}$). Це свідчить про взаємодію компонентів у процесах дегідратації, естерифікації та карбонізації з утворенням стабільного вуглецево-оксидного каркасу, який забезпечує тривалу теплозахисну дію при високих температурах.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування стирол-акрилової дисперсії як плівкоутворювальної основи для створення високоефективних водно-дисперсійних реактивних покривів, здатних забезпечувати довготривалий вогнезахист металевих конструкцій.

3.3. Вплив компонентів на структурно-механічні властивості пінококсу вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії.

Аналіз сучасних підходів до оцінювання механічної міцності пінококсів свідчить про відсутність єдиної уніфікованої методики, здатної адекватно відобразити умови реальної експлуатації вогнезахисних покривів металевих конструкцій. Більшість наявних методів ґрунтується на локальних інденторних або стискальних випробуваннях, які дозволяють отримувати порівняльні характеристики матеріалів, однак характеризуються високою чутливістю до локальних дефектів структури та не відображають інтегральну несучу здатність пінококсів шару. Термоаналітичні та візуальні методи забезпечують цінну інформацію щодо механізмів спучення та морфологічної еволюції шару, проте не дозволяють кількісно оцінити його механічну стійкість під дією зовнішніх навантажень. Водночас методи стиску й згину визначають сумарну міцність системи «покрив-підкладка», що

унеможливиює ізольовану оцінку власне пінококсу як функціонального теплоізоляційного елемента.

У реальних умовах пожежі коксовий шар зазнає не точкового, а переважно розподіленого статичного та квазистатичного навантаження, зумовленого тиском продуктів горіння, власною вагою спученого шару, дією полум'я та можливими механічними впливами. Відповідно, оцінювання міцності пінококсу має ґрунтуватися на випробуваннях, які відтворюють саме такий характер навантаження. З огляду на це обґрунтованою є необхідність розроблення та застосування методики визначення міцності пінококсів за умов розподіленого навантаження, що забезпечує більш репрезентативну оцінку його механічної стійкості. У цьому контексті особливий інтерес становить метод із використанням стандартизованих щілинних вантажів, який дозволяє кількісно визначати граничне навантаження руйнування пінококсу, мінімізує вплив локальних дефектів структури та наближує умови випробування до реальних пожежних впливів. Саме розроблення, експериментальне обґрунтування та адаптація цього методу для оцінювання міцності реактивного пінококсів становлять основу наукової новизни даного дисертаційного дослідження.

Актуальність зазначеної проблематики істотно зростає в умовах воєнного стану, підвищених ризиків техногенних загроз, збільшення кількості критично важливих об'єктів інфраструктури, а також інтенсивного розвитку висотного та енергоефективного будівництва. За таких умов підвищуються вимоги не лише до вогнестійкості металевих конструкцій, а й до експлуатаційної надійності вогнезахисних покривів реактивного типу. Ефективність таких покривів визначається не стільки величиною коефіцієнта спучення, скільки міцністю та структурною стабільністю сформованого пінококсу, який виконує функцію термоізоляційного бар'єра. Руйнування цього шару призводить до втрати вогнезахисної дії незалежно від інтенсивності спучення.

Таким чином, ключовою науково-практичною проблемою є розроблення та валідація методів кількісної оцінки механічної міцності пінококсу, яка визначає реальну здатність покривів реактивного типу забезпечувати довготривалий

вогнезахист металевих конструкцій у високотемпературних умовах. Створення таких методик є необхідною передумовою підвищення надійності вогнезахисних покривів, обґрунтованого вибору їх рецептур і прогнозування ефективності в умовах пожежі.

Попри наявність значного масиву наукових публікацій, у сучасній літературі відсутні системні дослідження, спрямовані на комплексну оцінку впливу співвідношення основних компонентів ПФА:ПЕ:Al(OH)₃ на механічну стабільність сформованого пінококсу. Більшість робіт зосереджується переважно на рецептурних стратегіях підвищення вогнезахисних властивостей шляхом варіювання кислотного донора, карбонізувального агента та газотворювача, а також використання мінеральних або наноструктурованих модифікаторів. Водночас, вплив цих компонентів не лише на ступінь спучення, але й на міцність, структурну цілісність і довготривалу стабільність коксового каркасу залишається недостатньо вивченим.

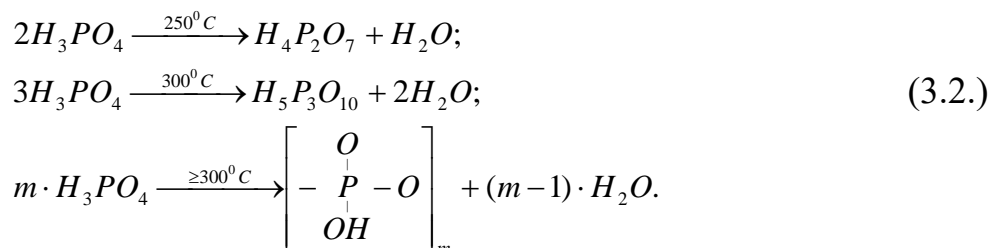
Ключовим компонентом у складі вогнезахисного покриву для металевих конструкцій є поліфосфат амонію (ПФА) з кристалічною модифікацією II та високим ступенем полімеризації ($n > 1000$). ПФА є термостійкою, малорозчинною у воді сполукою, що виконує функцію кислотоутворювального агента. За умов теплового впливу він поступово розкладається з утворенням фосфорної кислоти та її полімеризованих форм, які каталізують дегідратацію поліолів, зокрема пентаеритриту. Це активує процеси карбонізації та формування термостійкого вуглецевого коксового шару, який забезпечує теплоізоляційні властивості реактивного покриву [114, 115].

Утворення фосфорної кислоти під час термолізу фосфоровмісних антипіренів описується реакцією:



У процесі подальшого термічного розкладу амонійних солей ортофосфорної кислоти відбувається послідовне утворення дифосфорної,

трифосфорної та поліметафосфорної кислот. Ці високомолекулярні фосфоровмісні кислоти виконують роль активних кислотних каталізаторів, інтенсифікуючи дегідратацію поліолів і прискорюючи формування захисного коксового шару. Відповідні стадії їх утворення описуються такими реакціями:



Роль ПЕ у формуванні міцності пінококсу.

Пентаеритрит (ПЕ, $C(CH_2OH)_4$) є ключовим компонентом покривів реактивного типу і виконує роль вуглецевого донора, з якого формується вуглецевий (коковий) каркас спіненого шару. Проте його ефективність як джерела карбону визначається не самою молекулою, а механізмом її термічної деградації в умовах дії кислотного каталізатора та високої температури.

Механізм термічної поведінки ПЕ доцільно розглядати як сукупність послідовних стадій, що визначають його роль у формуванні пінококсу.

1. Початкова стадія: кислотно-каталізована дегідратація.

Після утворення фосфорної та поліфосфорних кислот із ПФА ці кислоти виступають каталізаторами для дегідратації пентаеритриту.

Утворюються: моно- та діетери пентаеритриту, проміжні ненасичені продукти дегідратації, попередники вуглецевого коксу.

Цей етап є ендотермічним, що додатково знижує локальну температуру полум'я.

2. Стадія конденсації та перегрупувань.

Проміжні продукти дегідратації далі зазнають: етерифікації, внутрішньомолекулярної конденсації, часткового розриву C–O зв'язків.

На цьому етапі утворюються перші вуглецеві ядра, які є зародками майбутнього коксу.

3. Стадія руйнування поліолової структури.

За температур $> 260\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ починається глибша термічна деструкція, що відбувається через: дегідрогенізацію, розрив С–С зв'язків, утворення низькомолекулярних органічних сполук.

Основні газоподібні продукти: H_2O , CO_2 , CO , формальдегід (HCHO), ненасичені альдегіди та кетони, включно з акролеїноподібними структурами.

Саме ці гази забезпечують розширення (спучення) композиції.

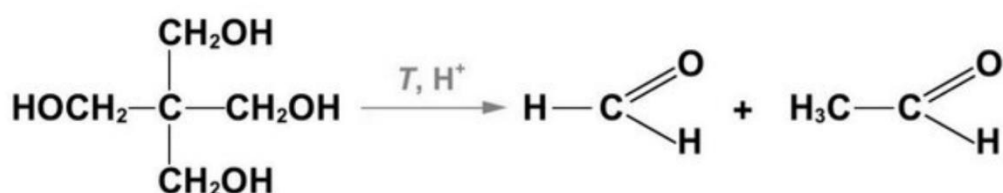
4. Стадія карбонізації та коксоутворення.

За участі кислотних форм фосфору та під впливом високої температури залишкові органічні структури дегідратуються до: аморфного вуглецю, вуглецевих поліциклічних фрагментів, фосфоровмісних вуглецевих сіток.

Цей етап формує вуглецевий коксовий каркас, який:

- зберігає структуру спіненого шару;
- забезпечує механічну стабільність;
- виконує основну теплоізоляційну функцію [116].

Слід підкреслити, що за умов нагрівання у кислому середовищі пентаеритрит зазнає кислотного-каталізованого розкладання з утворенням низькомолекулярних карбонільних сполук, зокрема формальдегіду та ацетальдегіду [117].

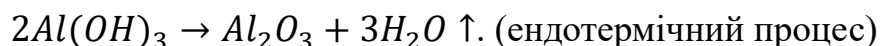


Пентаеритрит не лише виконує роль вуглецевого донора, але й визначає морфологію, ступінь пористості та механічну стабільність пінококсу. Ефективність його карбонізації суттєво підвищується у присутності кислотних форм фосфору, що пояснює необхідність сумісного використання ПФА та ПЕ в

реактивних системах. Кінцеві властивості пінококсу є результатом збалансованого перебігу дегідратації, газоутворення та вуглецевої конденсації.

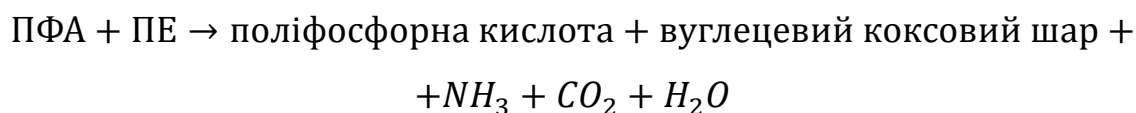
Узагальнена схема термохімічних перетворень у системі ПФА– ПЕ $Al(OH)_3$: послідовне утворення фосфорних кислот із ПФА, кислотнокаталізована дегідратація ПЕ з формуванням фосфор-вуглецевого коксового каркасу та ендотермічна дегідратація $Al(OH)_3$ з утворенням оксиду алюмінію, який зміцнює пінококс (Рис. 3.8). Побудова такої схеми добре узгоджується з відомими моделями реактивних систем на основі ПФА/ПЕ та мінеральних наповнювачів [118-120].

Гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$) є одним із ключових функціональних компонентів реактивної системи, що виконує роль ендотермічного газогенератора. У процесі термічного нагрівання, переважно в інтервалі 200– 300°C, $Al(OH)_3$ зазнає інтенсивної ендотермічної дегідратації, у результаті якої утворюється оксид алюмінію (Al_2O_3) та виділяється значний об'єм водяної пари:



Виділення водяної пари супроводжується суттєвим поглинанням тепла, що знижує температуру нагрівання покриву, сповільнює розвиток термоокиснювальних перетворень і частково гальмує процеси горіння. Пара, що утворюється, виконує функцію інертного газу, зменшуючи концентрацію кисню в приповерхневій зоні та, відповідно, інтенсивність окиснення органічних компонентів покриву [121, 122].

Крім газогенерації, Al_2O_3 , що формується під час розкладу гідроксиду алюмінію, відіграє роль мінерального армуючого наповнювача. Він підвищує механічну міцність, термостійкість та структурну стабільність коксового залишку, сприяючи утворенню більш щільного й термостійкого теплоізоляційного шару. Узагальнена схема термічної взаємодії компонентів реактивного покриву:



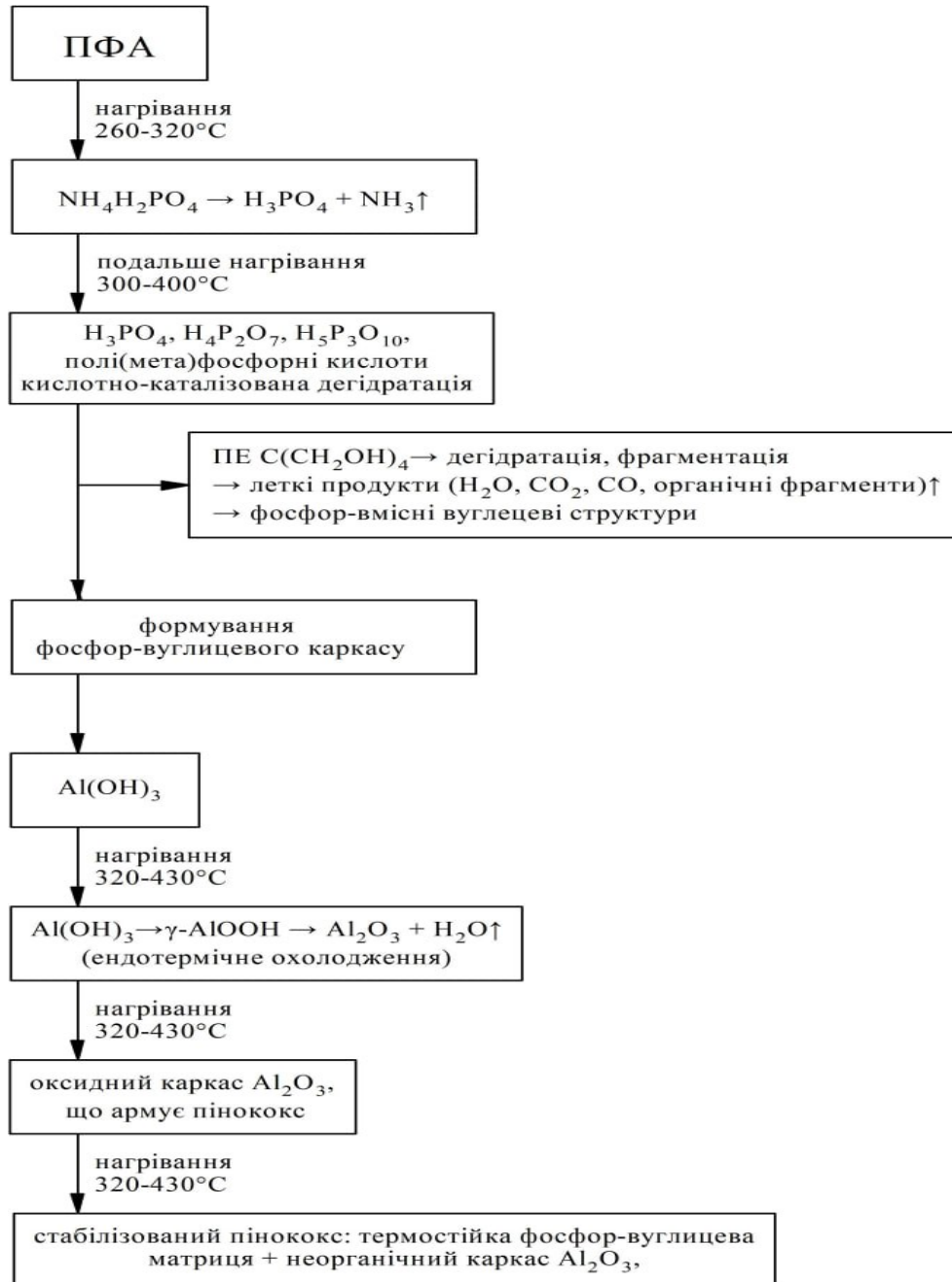
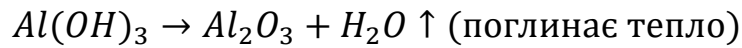


Рис. 3.8. Узагальнена схема термохімічних перетворень у системі ПФА–ПЕ–Al(OH)₃

Такий комплекс реакцій забезпечує формування механічно стабільного, термостійкого, багатокомпонентного реактивного бар'єра, ефективного при дії високих температур.

Далі наведено порівняльна таблиця ролі ПФА, ПЕ та Al(OH)₃ у коксоутворенні (табл.3.3.)

Таблиця 3.3

Порівняльна таблиця ролі ПФА, ПЕ та $Al(OH)_3$ у коксоутворенні

Компонент	Хімічна природа та функція	Основні термічні перетворення	Роль у спученні	Роль у міцності та стабільності пінококсу
Поліфосфат амонію (ПФА)	Високомолекулярна амонійна сіль ортофосфорної кислоти; донор неорганічної кислоти, кислотний каталізатор	260–320 °С: деградація з утворенням H_3PO_4 та полі(мета)фосфорних кислот; виділення NH_3 ; подальша конденсація фосфатів	Опосередковано підвищує ступінь спучення через каталіз дегідратації ПЕ, інтенсифікацію газоутворення та зшивання вуглецевих структур	Формує фосфор-вмісну склоподібну фазу, що цементує коксовий каркас; сам по собі дає невисокий коксовий залишок, але критично важливий для механічної цілісності шару у комбінації з ПЕ й $Al(OH)_3$
Пентаеритрит (ПЕ)	Поліфункціональний чотирьохатомний спирт; донор вуглецю й джерело летких продуктів	260–360 °С: кислотно-каталізована дегідратація в присутності фосфорних кислот; утворення H_2O , CO_2 , CO , органічних парів, фосфор-модифікованих вуглецевих структур	Забезпечує інтенсивне газоутворення й спінення, збільшує товщину спученого шару; надлишок ПЕ → надмірна пористість і зниження щільності	Є основним джерелом вуглецевого коксового залишку, але без ПФА формує слабкий, малостабільний кокс; оптимальний вміст потрібен для досягнення достатньої міцності пінококсу
Гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$)	Мінеральний гідроксид; ендотермічний наповнювач, газоутворювач водяної пари, неорганічний армувальний компонент	320–430 °С: дегідратація → $\gamma-AlOOH$; за вищих $T \rightarrow Al_2O_3 + H_2O \uparrow$; значне поглинання теплоти	Практично не збільшує спучення, а іноді трохи його зменшує (менший об'єм газів, ніж у органічних компонентів); підвищує термостійкість системи	Утворений жорсткий оксидний каркас, який армує пінококс, підвищує його механічну міцність, зменшує усадку та запобігає обваленню шару при тривалому нагріванні

Узагальнений аналіз ролі ПФА, ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ підтверджує, що реактивна система функціонує як узгоджений кислотно-карбонізаційно-мінеральний комплекс. ПФА забезпечує утворення фосфорних кислот і склоподібної фосфатної фази, ПЕ слугує основним джерелом вуглецю та газів для спучення, тоді як $\text{Al}(\text{OH})_3$ виконує роль ендотермічного охолоджувача й джерела оксидного каркасу Al_2O_3 . Саме їхня синергічна взаємодія зумовлює формування терmostійкого пінококсу з достатнім ступенем спучення і високою механічною міцністю, що є критично важливим для довготривалої вогнезахисної дії покривів реактивного типу.

3.4. Комплексний підхід оцінювання ефективності вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.

З метою встановлення закономірностей формування вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій проведено комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на кількісну та якісну оцінку впливу компонентного складу реактивної системи на її вогнезахисні властивості. У межах досліджень визначено основні показники пожежної небезпеки матеріалів, зокрема групу горючості будівельних матеріалів, індекс поширення полум'я по поверхні, групу займистості, температуру займання, температуру самозаймання та коефіцієнт димоутворення.

Результати визначення групи горючості будівельних матеріалів на основі стирол-акрилових покривів, наповнених ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$, а також їх спільного застосування у складі вогнезахисного покриву (ВЗП) [123], зокрема середнє арифметичне значення температури газоподібних продуктів горіння $T_{\text{ср}}$, °С, ступінь пошкодження зразків за довжиною S_L , %, середнє арифметичне значення втрати маси $\Delta m_{\text{ср}}$, г та ступінь пошкодження зразків за масою S_m , % отримані відповідно до вимог пункту 7.4 ДСТУ 8829:2019 [124], наведено на рисунку 3.9-3.10. (а, б).

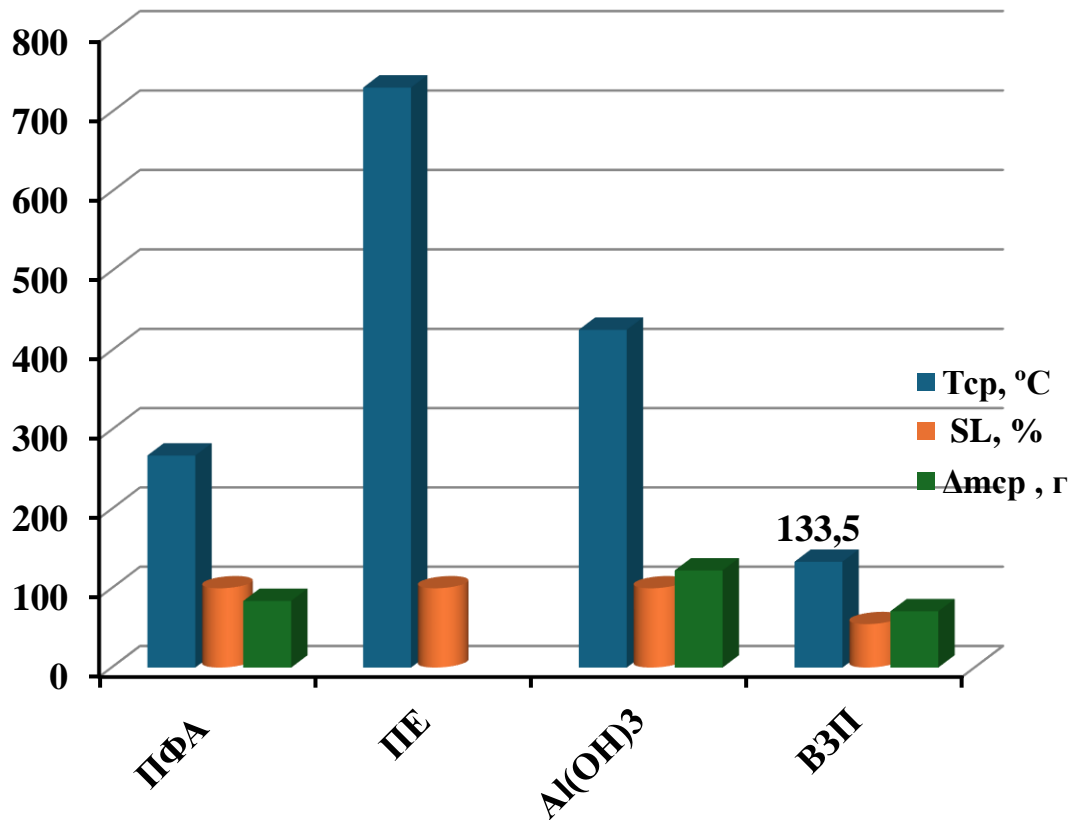


Рис. 3.9. Результати визначення групи горючості будівельних матеріалів на основі стирол-акрилових покриттів, наповнених ПФА, ПЕ, Al(OH)₃, а також їх спільного застосування (ВЗП)

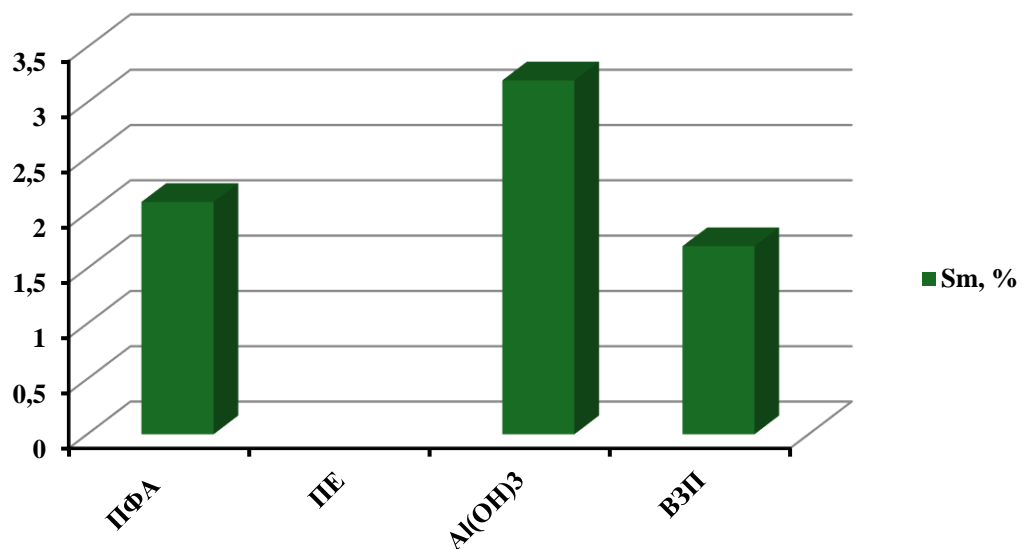


Рис. 3.10. Результати визначення ступеню пошкодження зразків за масою Sm, % матеріалів на основі стирол-акрилових покриттів, наповнених ПФА, ПЕ, Al(OH)₃, а також їх спільного застосування (ВЗП)

Аналіз отриманих результатів показав, що стирол-акрилові покритви, наповнені ПФА, характеризуються середнім арифметичним значенням температури газоподібних продуктів горіння $T_{cp} 267,5$ °С, ступенем пошкодження зразків за довжиною $S_L = 100,0\%$ та середньою втратою маси $\Delta m_{cp} = 84,0$ г. Самостійне горіння зразків після припинення зовнішнього теплового впливу не зафіксовано ($t_f = 0$ с), що дозволяє віднести дані матеріали до групи горючості ГЗ – середньої горючості.

Для зразків, наповнених ПЕ, зафіксовано найвищі показники пожежної небезпеки. Середнє арифметичне значення температури газоподібних продуктів горіння становить $731,0$ °С, а ступінь пошкодження зразків за довжиною досягає $100,0$ %.

У процесі випробувань при досягненні температури димових газів понад 450 °С подавання газу до газового пальника та повітря в камеру спалювання було припинено на 195-й секунді від початку випробувань. Зазначені характеристики відповідають матеріалам підвищеної горючості – групі Г4.

Покритви, наповнені $Al(OH)_3$ характеризуються середнім значенням температури газоподібних продуктів горіння $426,1$ °С, ступенем пошкодження зразків за довжиною $100,0$ % та середньою втратою маси $122,5$ г. Самостійне горіння зразків не спостерігалось ($t_f = 0$ с), що дозволяє віднести дані матеріали до групи горючості ГЗ – середньої горючості.

Найбільш сприятливі показники пожежної небезпеки зафіксовано для комбінованого вогнезахисного покритву ВЗП. Значення T_{cp} для ВЗП становить 135 °С, що у $5,4$ рази нижче порівняно зі зразками, наповненими ПЕ, та майже у $1,9$ рази нижче порівняно з покритвами, наповненими ПФА. Ступінь пошкодження зразків за довжиною зменшується до $54,8$ %, а середня втрата маси – до $71,0$ г. Самостійне горіння зразків відсутнє ($t_f = 0$ с), що дозволяє класифікувати ВЗП як матеріал групи горючості Г1 – низької горючості.

Аналіз отриманих даних по вивченню дії реактивних компонентів на ступінь пошкодження зразків за масою (S_m , %) показує, що найбільший ступінь

пошкодження за масою спостерігається для зразків, наповнених гідроксидом алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$, для яких значення S_m становить близько 3,4 %.

Підвищена втрата маси в цьому випадку зумовлена ендотермічним розкладом $\text{Al}(\text{OH})_3$ з виділенням водяної пари, що супроводжується частковою дегідратацією та зменшенням маси матеріалу, не пов'язаним безпосередньо з інтенсивною термічною деструкцією полімерної матриці.

Для покривів, наповнених ПФА, ступінь пошкодження за масою є нижчим і становить приблизно 2,2-2,3 %, що свідчить про формування захисного вуглецевого шару та пригнічення процесів глибокої термічної деструкції матеріалу.

Комбінований вогнезахисний покрив (ВЗП) характеризується ще меншим ступенем пошкодження за масою – близько 1,8-1,9 %, що на 15-20 % менше порівняно з покривами, наповненими ПФА, та майже на 45 % менше порівняно зі зразками, наповненими $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Це свідчить про ефективну стабілізацію структури матеріалу внаслідок синергічної дії реактивних компонентів, які забезпечують формування щільного теплоізоляційного шару та обмежують вихід летких продуктів деструкції.

Для зразків, наповнених ПЕ, у процесі випробувань зафіксовано інтенсивний розвиток термічного розкладання та димоутворення. У зв'язку з досягненням температури димових газів понад 450 °С подавання газу до газового пальника та повітря в камеру спалювання було припинено на 195-й секунді від початку випробувань, що свідчить про підвищену пожежну небезпеку даного матеріалу та його схильність до інтенсивного горіння.

Результати визначення індексу поширення полум'я по поверхні досліджуваних покривів відповідно до вимог ДСТУ 8829:2019, зокрема максимальне значення температури газоподібних продуктів горіння, T_{max} , °С, середній проміжок часу до досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння τ_{max} , а також відстань поширення фронту полум'я l , мм, наведено на рисунку 3.11.

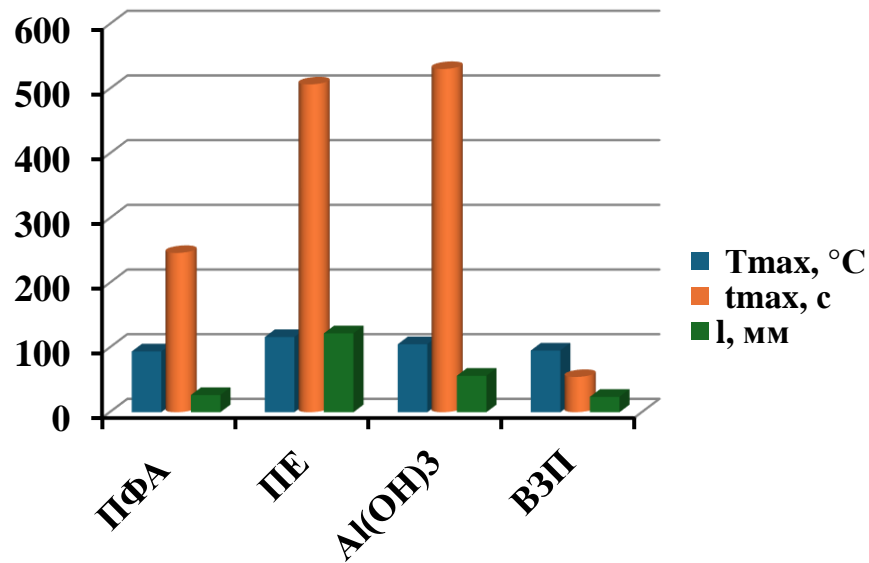


Рис. 3.11. Результати визначення індексу поширення полум'я по поверхні зразків на основі стирол-акрилових покриттів, наповнених ПФА, ПЕ, Al(OH)₃, а також їх спільного застосування (ВЗП).

Встановлено, що для покриттів, наповнених ПФА, поширення полум'я по поверхні відсутнє (група I1). Максимальна температура газоподібних продуктів горіння для цих зразків становить 94 °C, що на 22,2 °C (близько 19 %) нижче порівняно зі зразками, наповненими ПЕ, та на 11,2 °C (приблизно 11 %) нижче порівняно зі зразками, наповненими гідроксидом алюмінію Al(OH)₃. Відстань поширення фронту полум'я зменшується до 26,6 мм, що на 95,4 мм (приблизно 78 %) менше порівняно з ПЕ та на 29,8 мм (близько 53 %) менше порівняно з Al(OH)₃. Середній час досягнення T_{\max} становить 246,2 с.

Зразки, наповнені ПЕ, характеризуються повільним, але найбільш протяжним поширенням полум'я по поверхні (група I2). Для них зафіксовано найбільшу відстань поширення фронту полум'я – 122 мм, що у 4,6 рази більше, ніж для ПФА, та у 2,2 рази більше, ніж для Al(OH)₃. Максимальна температура газоподібних продуктів горіння досягає 116,2 °C, а середній проміжок часу до досягнення T_{\max} становить 506,8 с, що на 260,6 с більше порівняно з ПФА.

Покритви, наповнені Al(OH)₃, також належать до групи I2 і демонструють зменшення інтенсивності поширення полум'я порівняно з ПЕ. Відстань

поширення фронту полум'я для цих зразків становить 56,4 мм, що на 65,6 мм (приблизно 54 %) менше, ніж для ПЕ. Максимальна температура газоподібних продуктів горіння знижується на 11,0 °С (близько 9,5 %), а середній час досягнення T_{\max} збільшується до 530,6 с, що на 23,8 с більше порівняно зі зразками, наповненими ПЕ. Найкращі показники зафіксовано для комбінованого вогнезахисного покриття (ВЗП), для якого поширення полум'я по поверхні відсутнє (група ІІ). Максимальна температура газоподібних продуктів горіння становить 95,4 °С, що на 20,8 °С (близько 18 %) нижче порівняно з ПЕ та практично відповідає рівню ПФА. Відстань поширення фронту полум'я зменшується до 23,8 мм, що на 98,2 мм (понад 80 %) менше порівняно з ПЕ та на 32,6 мм (близько 58 %) менше порівняно з $\text{Al}(\text{OH})_3$. Середній проміжок часу до досягнення T_{\max} для ВЗП становить 54,5 с, що вказує на швидке досягнення стабільного теплового режиму без розвитку поверхневого горіння.

На рис. 3.12 наведено результати визначення димоутворювальної здатності стирол-акрилових покриттів, наповнених реактивними компонентами за умов полуменевого горіння та тління при тепловому потоці 35 кВт/м².

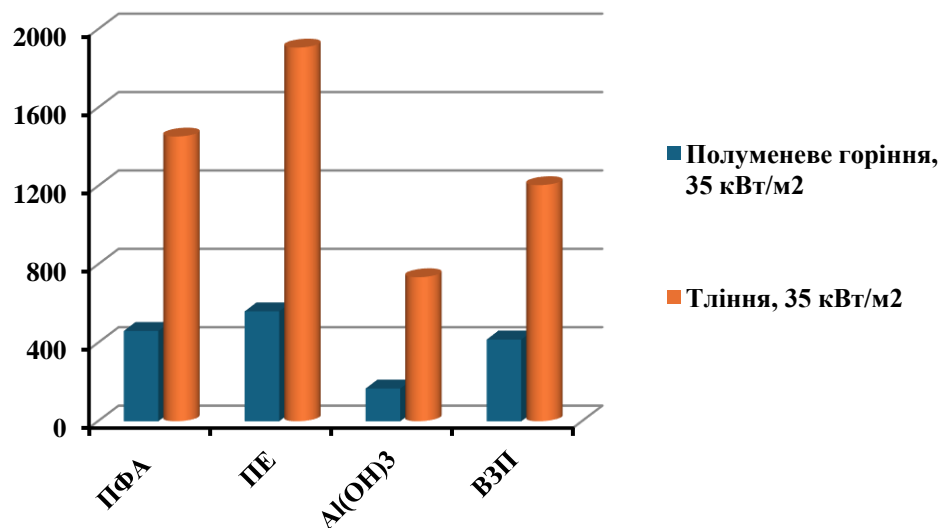


Рис. 3.12. Результати визначення димоутворювальної здатності зразків на основі стирол-акрилових покриттів, наповнених ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$, а також їх спільного застосування (ВЗП)

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що всі досліджувані стирол-акрилові покриття, за винятком зразків, наповнених ПЕ, характеризуються помірною димоутворювальною здатністю та належать до групи Д2. Для цих матеріалів значення димоутворення як у режимі полуменевого горіння, так і в режимі тління є відносно невисокими. Зокрема, порівняно з покриттями, наповненими ПЕ, інтенсивність димоутворення зменшується приблизно на 25 % у режимі полуменевого горіння та на 35–40 % у режимі тління, що свідчить про істотне обмеження виділення продуктів неповного згорання та термічної деструкції полімерної матриці.

Натомість зразки, наповнені ПЕ, демонструють найвищі значення димоутворювальної здатності, особливо в умовах тління, де показники димовиділення є максимальними серед усіх досліджуваних систем.

У порівнянні з комбінованим вогнезахисним покритвом (ВЗП) димоутворення для ПЕ є вищим приблизно на 30 % при полуменевому горінні та більш ніж на 35 % при тлінні, що дозволяє віднести ці матеріали до групи з високою димоутворювальною здатністю. Така поведінка зумовлена органічною природою пентаеритриту та його інтенсивною термічною деструкцією з утворенням значної кількості летких горючих і димотворних продуктів.

Найменші значення димоутворювальної здатності зафіксовано для покриттів, наповнених гідроксидом алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$. У порівнянні з покриттями, наповненими ПЕ, інтенсивність димоутворення зменшується орієнтовно на 60-65 %, а відносно комбінованого покритву ВЗП – на 20-25 %. Суттєве зниження димоутворення обґрунтовується фізико-хімічною природою гідроксиду алюмінію: при температурах близько 200 °С і вище він зазнає ендотермічної дегідратації з виділенням водяної пари, що призводить до охолодження та розбавлення зони займання.

Одночасно динаміка його розкладання сприяє прискоренню процесів карбонізації полімерної матриці та реакцій поперечного зшивання, що зменшує інтенсивність газообміну під час термічної деструкції через коксовий

шар, який формується, забезпечуючи додаткову димознижувальну та вогнепригнічувальну дію.

У таблиці 3.4 наведено узагальнені результати експериментальних досліджень показників вогнезахисної ефективності та пожежної небезпеки стирол-акрилових покривів, наповнених окремими компонентами – ПФА, ПЕ, $Al(OH)_3$, а також їх комбінованим застосуванням у складі вогнезахисного покриву (ВЗП). Оцінювання проводили відповідно до вимог ДСТУ 8829:2019 [123] і включало визначення групи вогнезахисної ефективності, групи горючості будівельних матеріалів, температурних параметрів газоподібних продуктів горіння, ступеня пошкодження зразків за довжиною та масою, втрати маси, тривалості самостійного горіння, а також індексу поширення полум'я по поверхні. Наведені дані дозволяють здійснити комплексну порівняльну оцінку впливу компонентного складу реактивної системи на формування вогнезахисних властивостей покривів.

Узагальнені результати експериментальних досліджень (табл. 3.4) показників вогнезахисної ефективності та пожежної небезпеки стирол-акрилових покривів, наповнених окремими реактивними компонентами, а також їх комбінованим застосуванням, показали, що стирол-акрилові покриви, наповнені реактивними компонентами, за показниками займистості належать до групи В2 – помірнозаймистих матеріалів. Для досліджуваних зразків зафіксовано температуру самозаймання на рівні $495\text{ }^{\circ}\text{C}$, що свідчить про їхню підвищену термічну стабільність у порівнянні з матеріалами з більш низькими значеннями цього показника. Встановлено, що температура займання покривів, за винятком зразків, наповнених ПЕ, становить $335\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для покривів, наповнених ПЕ, температура займання є нижчою і дорівнює $295\text{ }^{\circ}\text{C}$, що вказує на підвищену схильність даного матеріалу до займання під дією зовнішнього джерела запалювання. Зниження температури займання у випадку застосування ПЕ зумовлене його органічною природою та здатністю до термічної деструкції з утворенням летких горючих продуктів на більш ранніх стадіях нагрівання.

Таблиця 3.4.

Результати експериментальних досліджень показників вогнезахисної ефективності та пожежної безпеки стирол-акрилових покривів, наповнених реактивними компонентами.

Показники	Наповнювачі			
	ПФА	ПЕ	Al(OH) ₃	ВЗП
Група вогнезахисної ефективності вогнезахисних речовин (ГОСТ 16363-98)				I група
Група горючості будівельних матеріалів згідно з п. 7.4 ДСТУ 8829:2019:	Г3 середньої горючості	Г4 підвищеної горючості	Г3 середньої горючості	Г1 низької горючості
– середнє арифметичне значення температури газоподібних продуктів горіння T _{сп} , °C	267,5	731,0	426,1	133,5
– ступінь пошкодження зразків за довжиною SL, %	100,0	100,0	100,0	54,8
– ступінь пошкодження зразків за масою S _m , %	2,1	–	3,2	1,7
– середнє арифметичне значення втрати маси Δm _{сп} , г	84,0	За досягнення температури димових газів > 450 °C подавання газу до газового пальника і повітря в камеру спалювання було припинено на 195-й секунді від початку випробувань	122,5	65,0
– тривалість самостійного горіння зразків t _f , с	горіння відсутнє		горіння відсутнє	горіння відсутнє

Продовження таблиці 3.4.

Показники	Наповнювачі	Показники	Наповнювачі	Показники
Індексу поширення полум'я по поверхні ДСТУ 8829:2019:	0 не поширюють полум'я по поверхні (група І1)	9,4 повільно поширюють полум'я по поверхні (група І2)	2,9 повільно поширюють полум'я по поверхні (група І2)	0 не поширюють полум'я по поверхні (група І1).
– максимальна температура газоподібних продуктів горіння, °С	94	116,2	105,2	95,4
– середній проміжок часу до досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння t _{max} , с	246,2	506,8	530,6	54,5
– відстань, на яку поширився фронт полум'я, l, мм	26,6	122	56,4	23,8
Група займистості згідно з ДСТУ Б В.1.1-2-97:	В2 помірнозаймисті матеріали			
– середнє значення поверхневої густини теплового потоку, що діє на зразок, кВт/м ²	23,75			
– критична поверхнева густина теплового потоку, кВт/м	25			

Продовження таблиці 3.4.

Показники	Наповнювачі	Показники	Наповнювачі	Показники
Температура займання згідно з п. 7.8 ДСТУ 8829:2019, °С	335	295	335	335
Температури самозаймання згідно з п. 7.10 ДСТУ 8829:2019, °С	495	495	495	495
Коефіцієнт димоутворення згідно з п. 7.19 ДСТУ 8829:2019: – полуменеве горіння, 35 кВт/м ²	461 з помірною димоутворюв альною здатністю (група Д2)	561 з високою димоутворювальню здатністю (група Д3)	167 з помірною димоутвор ювальною здатністю (група Д2)	417 з помірною димоутвор ювальною здатністю (група Д2)
– тління, 35 кВт/м ²	1453	1907	735	1205

Отримані результати узгоджуються з фізико-хімічною сутністю процесів горіння, оскільки чим нижчими є температури самозаймання та займання матеріалу, тим меншої теплової енергії потребує ініціювання процесу горіння, що підвищує пожежну безпеку. Водночас підвищення температури самозаймання до 495 °С для реактивних систем з комбінованим компонентним складом свідчить про ефективне пригнічення процесів займання за рахунок термохімічних перетворень реактивних компонентів та формування захисного теплоізоляційного шару.

Таким чином, встановлені температурні характеристики підтверджують, що наповнення стирол-акрилових дисперсій реактивними компонентами сприяє зниженню займистості матеріалів і підвищенню рівня їх пожежної безпеки, а зниження температури займання у випадку використання ПЕ обґрунтовує необхідність його застосування виключно в поєднанні з кислотними та газоутворювальними компонентами реактивної системи.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що вогнезахисні властивості стирол-акрилових покривів для металевих конструкцій істотно визначаються компонентним складом реактивної системи та проявляються в комплексі показників пожежної безпеки, зокрема групі горючості будівельних матеріалів, індексі поширення полум'я по поверхні, групі займистості, температурах займання і самозаймання, а також коефіцієнті димоутворення.

Хоча покрити, наповнені поліфосфатом амонію (ПФА) та гідроксидом алюмінію $Al(OH)_3$, за класифікацією належать до групи горючості Г3 (середньої горючості), застосування ПФА забезпечує зниження середнього арифметичного значення температури газоподібних продуктів горіння приблизно у 1,6 рази. Комбінована дія реактивних компонентів у складі вогнезахисного покриття (ВЗП) призводить до подальшого зниження цього показника до рівня, характерного для групи Г1, а також до істотного зменшення індексу поширення полум'я по поверхні з переходом матеріалу до групи І1.

При цьому для покривів, наповнених окремими компонентами, ступінь пошкодження зразків за довжиною становить 100 %, тоді як для комбінованого вогнезахисного покриття цей показник зменшується до 54,8 %, а ступінь пошкодження за масою не перевищує 1,7 %, що відповідає вимогам групи Г1 (менше 20 %). За показниками займистості всі досліджувані покриття, незалежно від компонентного складу, належать до групи В2, при цьому для комбінованого покриття зафіксовано температури самозаймання до 495 °С та стабілізацію температури займання.

Встановлено, що комбінований реактивний покрив для металевих конструкцій характеризується коефіцієнтом димоутворення, який відповідає групі Д2, тоді як використання окремого органічного компонента – пентаеритриту (ПЕ) – призводить до суттєвого підвищення димоутворювальної здатності матеріалу (група Д3). Водночас найменші значення димоутворення зафіксовано для покривів, наповнених гідроксидом алюмінію $Al(OH)_3$, для яких інтенсивність димовиділення зменшується орієнтовно на 60–65 % порівняно з покриттями, наповненими ПЕ, та на 20–25 % відносно комбінованого вогнезахисного покриття (ВЗП).

Пригнічення димоутворювальної здатності у присутності $Al(OH)_3$ обґрунтовується його фізико-хімічною природою: при температурах близько 200 °С і вище гідроксид алюмінію зазнає ендотермічної дегідратації з виділенням водяної пари, що призводить до охолодження та розбавлення зони займання. Одночасно динаміка його розкладання сприяє прискоренню процесів карбонізації полімерної матриці та реакцій поперечного зшивання, що зменшує інтенсивність газообміну під час термічної деструкції через коксовий шар, який формується, забезпечуючи додаткову димознижувальну та вогнепригнічувальну дію.

Сукупність наведених результатів підтверджує наявність вираженого синергічного ефекту при сумісному використанні кислотних, газоутворювальних і мінеральних компонентів реактивної системи, що забезпечує формування ефективного теплоізоляційного шару, пригнічення

процесів займання, поширення полум'я та димоутворення і обґрунтовує доцільність застосування комбінованого вогнезахисного покриття для підвищення пожежної безпеки будівельних конструкцій.

3.5. Дослідження вогнезахисної ефективності розробленого покриття для металевих конструкцій.

Підвищення рівня вогнезахисної ефективності металевих конструкцій шляхом застосування реактивних вогнезахисних покриттів є актуальним науково-технічним завданням у галузі пожежної безпеки. Ефективність протипожежного захисту металевих конструкцій визначається тривалістю часу від моменту початку теплового впливу до досягнення металом критичної температури.

Методика досліджень базується на експериментальному визначенні процесу нестационарного теплового прогріву вогнезахисного покриття за умов вогневого впливу відповідно до стандартного температурного режиму пожежі згідно з ДСТУ EN 1363-1:2023 [125]. Як основу використовують сталеву пластину квадратної форми розміром 500×500 мм і товщиною 5 мм, на поверхню якої нанесено вогнезахисне покриття завтовшки 2,0 мм, а на необігрівну поверхню зразка додатково встановлюють шар теплоізоляційної плити. На підставі експериментальних даних для кожного моменту часу t_j вимірювань температуру сталеві пластини дослідного зразка θ_{a_j} визначають як середнє арифметичне значення показань термопар, розміщених на необігрівній поверхні сталеві пластини.

Зовнішній вигляд зразка до проведення досліджень та схема розташування термопар на необігрівній поверхні сталеві пластини зразка наведено на рисунку 3.13

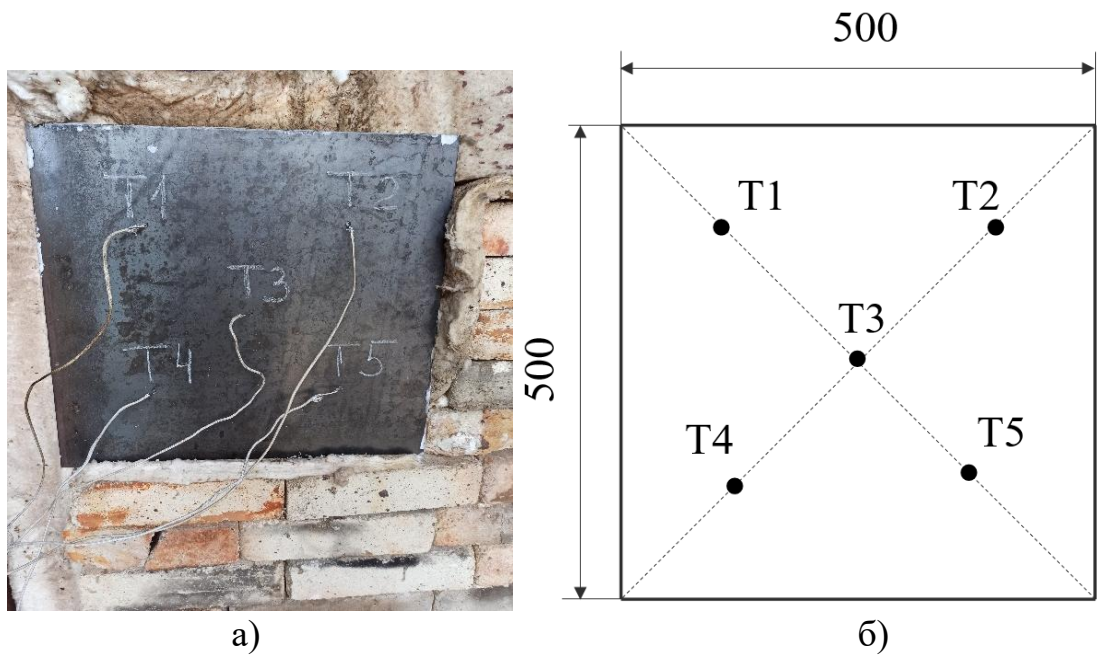


Рисунок 3.13 – Зовнішній вигляд зразка до проведення досліджень (а) та схема розташування термопар (б).

На підставі розрахункових значень температури θ_a визначають час t_{cr} , необхідний для досягнення сталлю критичної температури θ_{cr} у діапазоні 350–500 °С для сталевієї пластини зразка досліджуваного вогнезахисного покрив. При цьому значення часу t_{cr} встановлюють з урахуванням приведення до номінальної початкової температури, що дорівнює 20 °С, відповідно до наведеної умови.

$$\theta_a = \theta_{cr} + \theta_0 - 20, \quad (3.3.)$$

де θ_a – середня температура сталевієї пластини, яка відповідає критичній температурі θ_{cr} , °С;

θ_{cr} – критична температура сталі, °С;

θ_0 – початкова температура сталевієї пластини, °С.

Результати вимірювань температур у вогневій печі наведено на рисунку 3.14

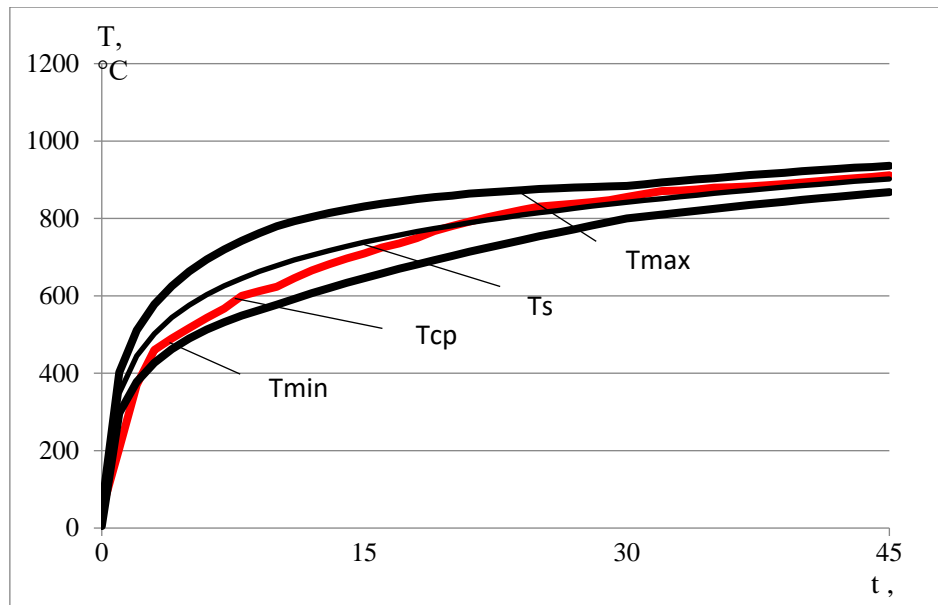


Рис. 3.14. Зміна температури у випробувальній печі стандартної максимальної (T_{\max}), стандартної мінімальної (T_{\min}), стандартної номінальної (T_s) та середньої температури у печі (T_{cp}).

Експериментально зафіксована температура в печі (крива 4) розташовується в межах стандартних мінімальних і максимальних значень та практично відповідає стандартній номінальній температурній кривій, у зв'язку з чим коригування температурних показників не потребується.

Метою дослідження було встановлення конкурентоспроможності розробленого вогнезахисного покритву для металевих конструкцій порівняно з відомими вітчизняними покритвами на основі водних дисперсій полімерів, а також визначення впливу товщини реактивного покритву на його вогнезахисну ефективність і отримання порівняльних характеристик у межах діапазону товщин, найбільш поширеного в практиці застосування інтумесцентних систем. Товщини покритву 1 та 2 мм відповідають параметрам, регламентованим технічними умовами більшості промислових тонкошарових вогнезахисних покриттів, призначених для забезпечення класів вогнестійкості R30–R40. На рис. 3.15 наведено залежності зміни температури в експериментальній установці (1) та на необігрітій поверхні металеві пластины, захищеної вогнезахисними покритвами ВЗП товщиною 1 мм (2) і

2 мм (3), а також порівняльні показники часу досягнення критичної температури сталі для відомих покриттів Endoterm та IC4, IC5.

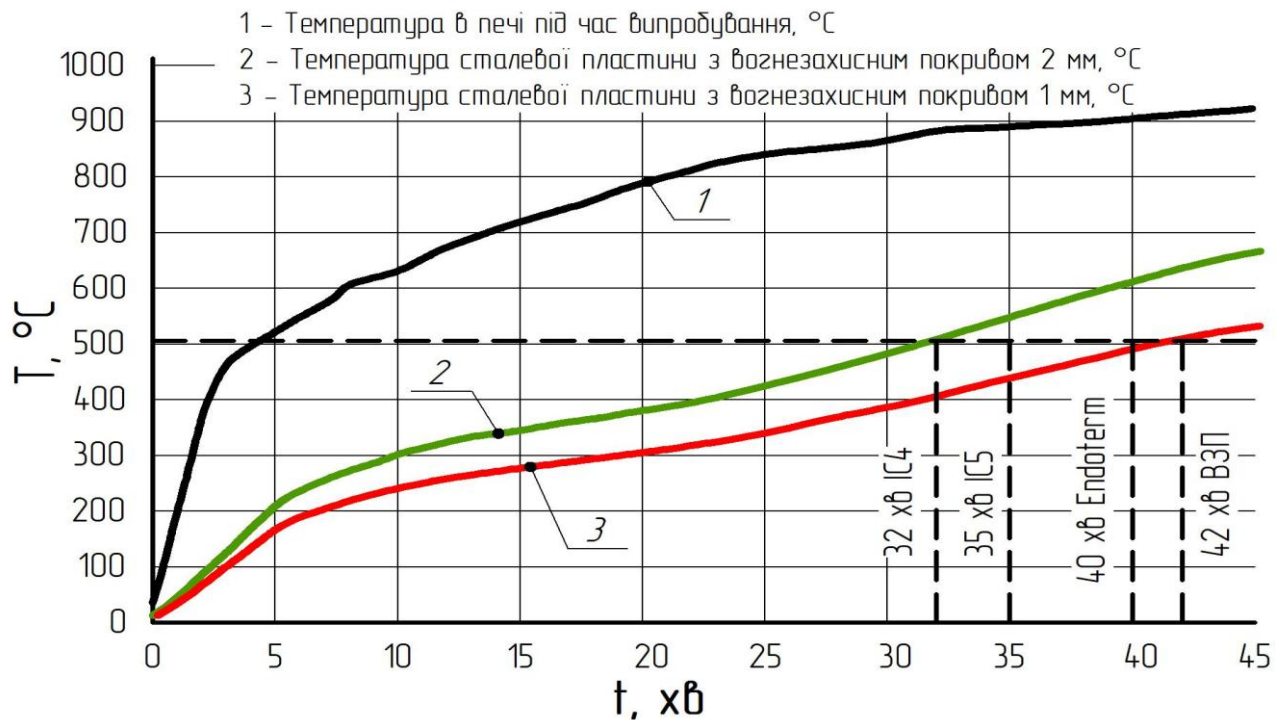


Рис. 3.15 – Залежності зміни температури в експериментальній печі (1) та на необігрітій поверхні сталевих пластинок, захищеної вогнезахисним покриттям ВЗП товщиною 2 мм (2) і 1 мм (3), а також порівняльні показники часу досягнення критичної температури сталі для відомих покриттів Endoterm та IC4, IC5.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що збільшення товщини вогнезахисного покриття для металевих конструкцій призводить до зростання тривалості нагрівання сталевих пластинок до критичної температури 500 $^\circ\text{C}$. Так, для зразка ВЗП з товщиною покриття 1 мм досягнення критичної температури відбувається приблизно через 32 хв, тоді як для зразка ВЗП з товщиною покриття 2 мм – через близько 42 хв, що відповідає межі вогнестійкості R40. Згідно з наведеними температурними залежностями, зразок із покриттям товщиною 1 мм характеризується більш інтенсивним

підвищенням температури сталевий пластини порівняно зі зразком із покривом товщиною 2 мм, що свідчить про вищу вогнезахисну ефективність останнього.

У результаті проведеного порівняльного аналізу з відомими вогнезахисними покриттями для металевих конструкцій встановлено, що розроблений реактивний покрив характеризується підвищеною ефективністю термозахисту сталевих конструкцій. На ринку України представлений вітчизняний виробник вогнезахисних матеріалів на водній основі – ТОВ «НВП Спецматеріали» (м. Бориспіль), продукція якого за функціональним призначенням і механізмом дії є аналогічною розроблюваним реактивним покриттям [126–127]. Вогнезахисні покриття цього виробника застосовуються для підвищення межі вогнестійкості металевих несучих конструкцій. Відповідно до технічних характеристик, нанесення покриття товщиною 1–2 мм забезпечує підвищення вогнестійкості металоконструкцій до рівня R30–R40, що відповідає вимогам, які висуваються до об'єктів громадського та промислового будівництва.

Зокрема, реактивний покрив Endoterm 170205, який являє собою воднодисперсійну систему для захисту металевих конструкцій, відповідно до технічної документації забезпечує класи вогнестійкості R30–R90 залежно від товщини шару. За сертифікаційними таблицями для критичної температури сталі $T \approx 500$ °C у діапазоні товщини покриття 1–2 мм (залежно від коефіцієнта перерізу A_m/V) час досягнення критичної температури становить приблизно 40 хв, що відповідає рівню вогнестійкості R30–R40.

Результати проведених досліджень узгоджуються з даними інших авторів. Зокрема, у роботах Л. М. Вахітової та К. Калафта [128] показано, що для тонкошарових інтумесцентних покриттів на основі стирол-акрилової дисперсії (IC4, IC5) товщиною близько 2 мм час досягнення критичної температури сталі 500 °C зазвичай знаходиться в межах 30–40 хв (IC4 – 35 хв, IC5 – 32 хв). Порівняння з отриманими експериментальними результатами показало, що розроблений у даній роботі вогнезахисний покрив для металевих конструкцій при аналогічній товщині 2 мм забезпечує досягнення критичної

температури сталі через 42 хв, що перевищує показники відомих вітчизняних інтумесцентних систем приблизно на 5–8 %. Це свідчить про більш ефективне формування теплоізоляційного інтумесцентного шару та вищу здатність покриву сповільнювати нагрівання металевих конструкцій під дією пожежного навантаження.

Порівняльний аналіз здійснювався з метою орієнтовної оцінки практичної значущості отриманих результатів. Паспортні дані виробника використано як відкриту та офіційно задекларовану інформацію, що застосовується в проєктній та експлуатаційній практиці. Водночас експериментальні результати, отримані в роботі за стандартним температурним режимом пожежі, становлять самостійну наукову основу для формування висновків щодо ефективності та конкурентоспроможності розробленого покриву.

Проведений порівняльний аналіз показав, що розроблений у межах даного дослідження вогнезахисний покрив для металевих конструкцій за основними показниками вогнезахисної ефективності не поступається характеристикам вітчизняних аналогів, представлених на українському ринку. Отримані значення часу досягнення критичної температури та характер температурних залежностей дають підстави стверджувати, що розроблений покрив має потенціал практичного впровадження та може розглядатися як конкурентоспроможне вогнезахисне рішення для захисту металевих конструкцій.

Порівняльна оцінка експериментальних результатів, отриманих у межах даного дослідження, з технічними характеристиками промислових вогнезахисних матеріалів аналогічного призначення засвідчила, що розроблений реактивний вогнезахисний покрив за показниками вогнезахисної ефективності не поступається вітчизняним аналогам. Зокрема, встановлено, що при товщині покриву 2 мм час досягнення критичної температури сталі 500 °С становить 42 хв, тоді як для відомих вітчизняних інтумесцентних покриттів (Endoterm, IC4, IC5) цей показник знаходиться в межах 32–40 хв.

Таким чином, розроблений покрив для металевих конструкцій забезпечує збільшення часу нагрівання сталі до критичної температури приблизно на 5–8 %, що свідчить про більш ефективне формування теплоізоляційного інтумесцентного шару та підвищену здатність покриття сповільнювати нагрівання металевих конструкцій під дією пожежного навантаження.

Отримані результати підтверджують можливість практичного застосування розробленого покриття для металевих конструкцій для підвищення межі вогнестійкості сталевих конструкцій до класів R30–R40 при технологічно доцільних товщинах вогнезахисного шару 1–2 мм. Це свідчить про доцільність впровадження розробленого покриття у практику вогнезахисту будівельних конструкцій, а також підтверджує його потенційну конкурентоспроможність на ринку вогнезахисних матеріалів України. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення нових вітчизняних вогнезахисних матеріалів, а також у практиці проектування та експлуатації будівель і споруд громадського та промислового призначення.

3.6. Висновки до розділу 3.

У результаті проведених досліджень встановлено закономірний вплив реактивноздатних 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 першочергової комплексної оцінки вогнезахисних властивостей водно-дисперсійних покриттів для металевих конструкцій реактивного типу.

1. Вміст поліфосфату амонію (ПФА) є ключовим чинником, що визначає горючість і ступінь спучення реактивної системи. Оптимальна концентрація ПФА – 25 мас. % – забезпечує перехід покриття до групи важкогорючих матеріалів та максимальну ефективність процесів дегідратації та карбонізації.

2. Встановлено, що механічна міцність пінококсу суттєво залежить від співвідношення пентаеритриту (ПЕ) і гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$): ПЕ інтенсифікує газоутворення, але знижує щільність структури, тоді як $\text{Al}(\text{OH})_3$ формує оксидний каркас і підвищує міцність пінококсу.

3. За результатами експериментів визначено оптимальний склад для вогнезахисного покриття для металевих конструкцій: ПФА – 25 мас. %, ПЕ – 15 мас. %, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас. %, який забезпечує високу механічну міцність ($\approx 18,5 \text{ г/см}^2$), достатній ступінь спучення ($\approx 11,6 \text{ мм}$) та мінімальну втрату маси ($\approx 2,5 \%$).

4. Термогравіметричний (ТГ) і диференційно-термогравіметричний (ДТГ) аналізи підтвердили, що ПФА, ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ мають різну термохімічну поведінку, а їх спільне використання супроводжується вираженим синергічним ефектом. Композиція ПФА-ПЕ- $\text{Al}(\text{OH})_3$ формує стабільний вуглецево-оксидний залишок ($\approx 23 \%$), що забезпечує тривалу теплозахисну дію при температурах до $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Показано, що ефективність реактивних покриттів для металевих конструкцій визначається не лише величиною спучення, а насамперед структурною цілісністю та механічною міцністю пінококсу, які забезпечують стійкість матеріалу в умовах пожежного впливу.

6. Порівняльний аналіз експериментальних результатів показав, що розроблений реактивний вогнезахисний покриття для металевих конструкцій при товщині шару 2 мм забезпечує досягнення критичної температури сталі $500 \text{ }^\circ\text{C}$ через 42 хв, що на 5–8 % перевищує показники відомих вітчизняних інтумесцентних покриттів. Отримані результати підтверджують можливість його практичного застосування для підвищення межі вогнестійкості сталевих конструкцій до класів R30–R40 при товщині шару 1–2 мм та свідчать про конкурентоспроможність розробленого покриття на ринку вогнезахисних матеріалів України.

Отримані результати підтверджують високу перспективність застосування стирол-акрилової дисперсії як плівкоутворювальної матриці для

водно-дисперсійних покривів реактивного типу та підтверджують ключову роль реактивних 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.

Водночас актуальним науковим завданням залишається розроблення та стандартизація методики кількісної оцінки механічної міцності сформованого пінококсу, що є критично важливим для прогнозування довговічності покривів для металевих конструкцій реактивного типу у реальних умовах пожежного впливу.

РОЗДІЛ 4.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗРОБЛЕНИХ ПОКРИВІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.

4.1. Вплив компонентів на водопоглинання вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій.

Водостійкість реактивних покриттів для металевих конструкцій є критичним параметром, що визначає їхню довговічність та стабільність вогнезахисних властивостей в умовах реальної експлуатації. Параметри водопоглинання значною мірою залежать від природи та кількісного вмісту компонентів, зокрема поліфосфату амонію (II типу), пентаеритриту та гідроксиду алюмінію, які по-різному взаємодіють з водною фазою й формованою полімерною матрицею.

Пентаеритрит, як багатоатомний спирт, є вираженою гідрофільною сполукою: він добре розчиняється у воді та полярних розчинниках, активно взаємодіє з водною фазою й істотно підвищує водопоглинання полімерної плівки на етапі формування.

Поліфосфат амонію (II типу) не належить до гідрофільних речовин у прямому значенні, однак є водорозчинним антипіреном із низькою розчинністю. У водних дисперсіях він може частково переходити у водну фазу, що за високих концентрацій сприяє підвищенню сорбції вологи та зниженню водостійкості сформованого покриття.

Гідроксид алюмінію є гідрофільним за природою поверхні, однак практично нерозчинним у воді та не здатним до вимивання, що зумовлює його нейтральний вплив на водопоглинання.

Наявність у покриттєвих композиціях гідрофільних та частково водорозчинних компонентів зумовлює підвищену чутливість полімерних плівок до дії вологи, що призводить до зростання водопоглинання, зниження

механічної міцності та ризику вимивання активних речовин. Таке погіршення водостійкості безпосередньо впливає на довговічність покриттів в умовах експлуатації, спричиняючи поступову деградацію їхніх вогнезахисних та експлуатаційних властивостей.

Із метою зменшення сорбції води високонаповнених водних дисперсій останнім часом як нанорозмірний модифікатор використовують гідрофобізований діоксид кремнію. Діоксид кремнію, володіючи сильними електричними полями, виконує також роль стабілізатора водних дисперсій полімерів [129], запобігає осіданню наповнювачів, надає седиментаційної стійкості й тиксотропних властивостей високонаповненим водно-дисперсійним покриттям [130].

На рис.4.1 представлено залежності впливу кількісного вмісту гідрофобізованого аеросилу (0,5; 1,0 мас. %) на водопоглинання досліджуваної стирол-акрилової водної дисперсії (ВД-СА).

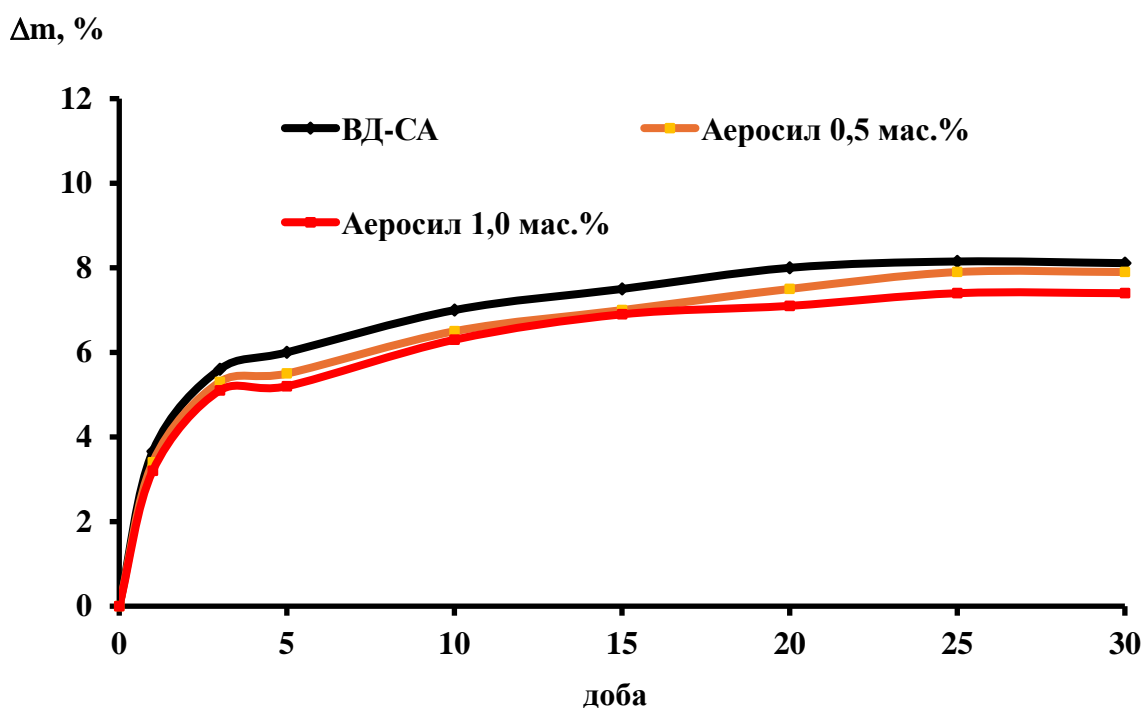


Рис. 4.1. Залежність впливу кількісного вмісту аеросилу (0,5; 1,0 мас. %) на водопоглинання досліджуваної стирол-акрилової дисперсії

Використання гідрофобізованого аеросилу у водних дисперсіях стирол-акрилового полімеру сприяє підвищенню їхньої структурної стабільності та зменшенню водопоглинання сформованих покривів. Завдяки високій питомій поверхні та гідрофобним органічним групам на поверхні частинок аеросил формує у дисперсії просторову структуру, яка перешкоджає седиментації наповнювачів і забезпечує рівномірний розподіл реактивних компонентів.

У плівкоутворювальній системі дрібнодисперсний аеросил виконує функцію структурного модифікатора: він заповнює мікропорожнини полімерної матриці та зменшує кількість капілярів, доступних для проникнення води. Гідрофобний характер частинок обмежує змочування поверхні та сприяє локальній мікрогідрофобізації дефектних зон. Це забезпечує зниження водопоглинання на 2,5–9 % при введенні 0,5–1,0 мас. % аеросилу, що підтверджується експериментальними даними (рис. 4.1)

Сумарно аеросил виконує подвійну роль: стабілізує водну дисперсію та підвищує водостійкість покриттів за рахунок ущільнення структури й зниження капілярної проникності, що позитивно впливає на довговічність реактивних систем.

На рис. 4.2 та рис. 4.3 наведено кінетичні залежності водопоглинання стирол-акрилових плівок за різного кількісного вмісту реактивних наповнювачів (ПФА – 20, 30 мас.%; ПЕ – 15, 20, 25 мас.%; $Al(OH)_3$ – 20, 30, 40 мас.%), отримані відповідно впродовж перших 24 год експозиції (рис. 2) та протягом 30 діб витримування у водному середовищі (рис. 3).

Представлені залежності відображають вплив природи та концентрації реактивних компонентів на швидкість сорбції води та рівноважне водопоглинання полімерної матриці, що дозволяє оцінити їхній внесок у формування водостійкості, стабільності структури та потенційної довговічності реактивних покриттів під час експлуатації в умовах тривалого впливу вологи.

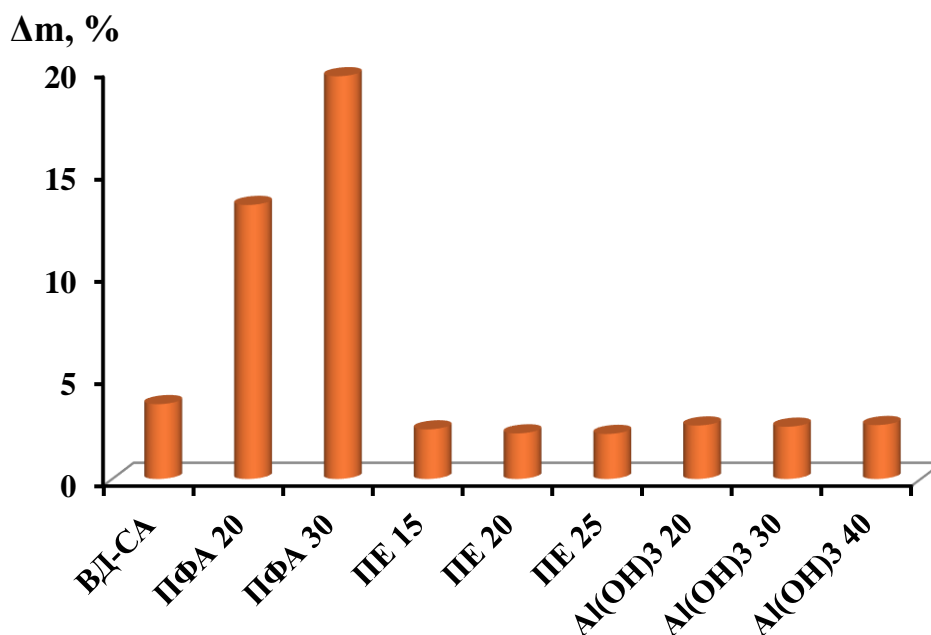


Рис. 4.2. Залежність впливу кількісного вмісту наповнювачів за перші 24 години експозиції (ПФА=20, 30; ПЕ=15, 20, 25; Al(OH)₃=20, 30, 40 мас.%) на водопоглинання досліджуваних плівок ВД-СА

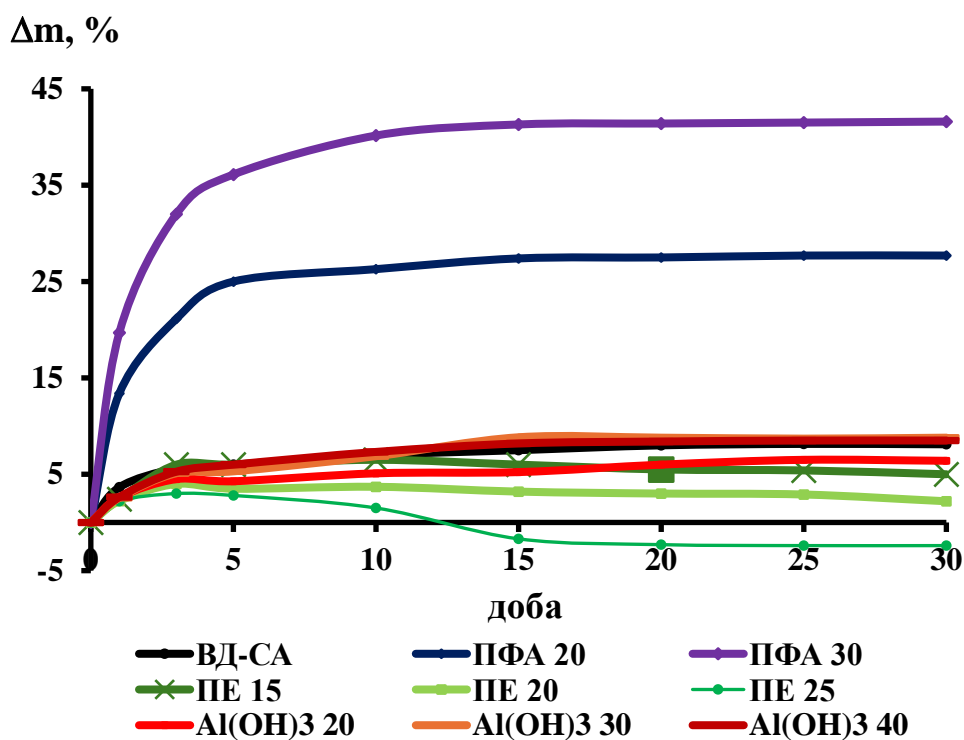


Рис. 4.3. Залежність впливу кількісного вмісту наповнювачів (ПФА=20, 30; ПЕ=15, 20, 25; Al(OH)₃=20, 30, 40 мас.%) протягом 30 діб витримування на водопоглинання досліджуваних плівок ВД-СА.

Аналіз кінетичних кривих водопоглинання (рис. 4.2 та рис. 4.3) демонструє чітку залежність цього показника від тривалості експозиції зразків у водному середовищі та природи реактивних компонентів. Упродовж перших 24 годин найбільш інтенсивну сорбцію води зумовлює фосфоровмісний антипірен ПФА: значення водопоглинання для зразків із його вмістом зростають у 3,17–5,4 рази порівняно з контрольними плівками. На противагу цьому, введення 20 мас.% гідроксиду алюмінію зменшує водопоглинання на 2 % відносно ненаповненої стирол-акрилової плівки, що свідчить про обмежений вплив $Al(OH)_3$ на сорбцію води та його нейтральну взаємодію з водною фазою.

Кінетика водопоглинання покриттів, модифікованих пентаеритритом, характеризується двофазним процесом: первинне збільшення маси зразка обумовлене інтенсивною сорбцією води гідрофільним компонентом, тоді як подальше зменшення маси є наслідком часткового розчинення полімерної матриці та вимивання ПЕ. Така поведінка реактивної системи потенційно може призводити до втрати її вогнестійкісних властивостей при тривалому впливі вологи.

З аналізу швидкісних параметрів водопоглинання випливає, що максимальна швидкість надходження води у стирол-акрилову матрицю спостерігається протягом першої доби експозиції, після чого процес істотно уповільнюється та наближається до рівноважного стану, що відповідає максимальному набухання полімерної плівки.

Для зниження водопоглинання та підвищення структурної стабільності системи застосовано гідрофобізований аеросил. Цей наповнювач виконує функцію не лише гідрофобного модифікатора, але й реологічного стабілізатора водних дисперсій, запобігаючи седиментації пігментів і забезпечуючи тиксотропні властивості композиції. Гідрофобізований аеросил являє собою високодисперсний аморфний діоксид кремнію з питомою поверхнею близько $300 \text{ м}^2/\text{г}$ та середньою насипною щільністю $0,051\text{--}0,059 \text{ г}/\text{см}^3$; його поверхня модифікована органічними апретами, які заміщують гідрофільні силанольні

групи на неполярні метильні, що забезпечує формування гідрофобного бар'єру на мікрорівні та зменшує змочуваність плівки водою.

Результати дослідження сумісного впливу реактивних наповнювачів на водопоглинання стирол-акрилової дисперсії (Δm , %) для композицій, модифікованих ПФА (25 мас.%) у поєднанні з аеросилом (1,0 мас.%), а також систем із комбінованим введенням ПЕ та $Al(OH)_3$, подано у вигляді поверхонь відгуку на рис. 4.4.

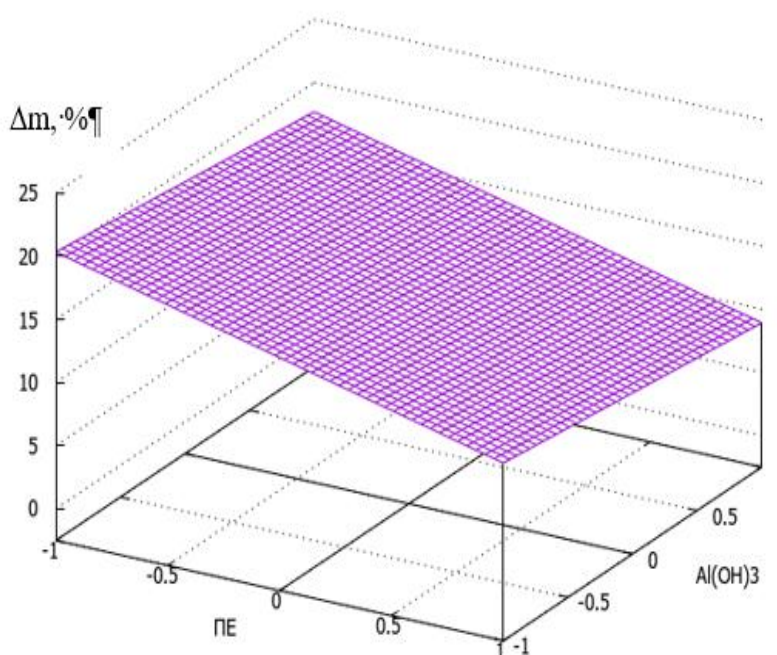


Рис. 4.4. Поверхні відгуку, що характеризують зміну величини водопоглинання ВД-СА за різного вмісту компонентів.

На представленій поверхні відгуку наведено вплив концентрацій пентаеритриту (ПЕ) та гідроксиду алюмінію ($Al(OH)_3$) на величину водопоглинання стирол-акрилового покриття при сталому вмісті поліфосфату амонію. Значення факторів -1 , 0 та $+1$ відповідають реальним концентраціям реактивних агентів, а саме: для пентаеритриту – 15, 20 та 25 мас.% відповідно; для $Al(OH)_3$ – 20, 30 та 40 мас.% відповідно.

Поверхня має майже планарний характер із незначним нахилом, що свідчить про слабку залежність водопоглинання від зміни концентрацій обох компонентів у цьому діапазоні. Збільшення вмісту ПЕ від 15 до 25 мас.% не призводить до суттєвого зростання величини Δm , хоча теоретично більш

високі концентрації ПЕ мали б підвищувати водопоглинання через його гідрофільність. Це свідчить про те, що структурна стабілізація полімерної матриці, зумовлена дією аеросилу, нівелює гідрофільний внесок ПЕ у межах випробуваних концентрацій.

Аналогічно, збільшення вмісту гідроксиду алюмінію від 20 до 40 мас.% не викликає істотних змін у водопоглинанні. Це узгоджується з тим, що $\text{Al}(\text{OH})_3$ є практично нерозчинним у воді та не здатний суттєво впливати на сорбцію вологи полімерною матрицею.

Відсутність помітних змін Δm при переході від низьких до високих рівнів обох факторів свідчить, що у системі з гідрофобізованим аеросилом домінує стабілізуючий ефект останнього, який приглушує можливий негативний вплив гідрофільного ПЕ та нейтралізує внесок інертного $\text{Al}(\text{OH})_3$. Таким чином, у межах досліджуваного варіювання факторів водопоглинання покриття залишається відносно сталим, що підтверджує ефективність структурної стабілізації полімерної матриці.

Покращення водостійкості стирол-акрилових покриттів для металевих конструкцій у разі введення гідрофобізованого аеросилу зумовлене формуванням більш щільної та однорідної полімерної структури. Дрібнодисперсний аеросил із питомою поверхнею близько $300 \text{ м}^2/\text{г}$ ефективно заповнює мікропорожнини та ділянки структурної неоднорідності, зменшуючи кількість дефектів, які можуть слугувати шляхами для проникнення води. Локалізація частинок аеросилу в таких зонах формує мікрогідрофобні області, що знижують змочуваність і капілярну проникність покриття. Це уповільнює дифузію води в полімерну матрицю та мінімізує ризик вимивання активних реактивних компонентів, зокрема пентаеритриту та частково водорозчинного поліфосфату амонію. Сукупна дія цих механізмів забезпечує збереження вогнезахисних властивостей реактивного покриття в умовах тривалого впливу вологи. Додавання гідрофобізованого аеросилу суттєво модифікує характер впливу ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ на водопоглинання: аеросил стабілізує полімерну матрицю, знижує кількість доступних капілярів для

проникнення води та мінімізує наслідки потенційної гідрофільності органічних компонентів. У результаті, навіть за наявності гідрофільного ПЕ та інертного $Al(OH)_3$, варіативність величини Δm залишається незначною, а покриття демонструє підвищену водостійкість та стабільність.

Таким чином, гідрофобізований аеросил відіграє ключову роль у забезпеченні довговічності покриття реактивного типу при впливі вологи, оскільки зменшує водопоглинання, обмежує процеси вимивання активних компонентів та сприяє збереженню структурної цілісності й вогнезахисної ефективності протягом експлуатаційного періоду.

Проведений аналіз показав, що у стирол-акрилових реактивних покриттях для металевих конструкцій варіювання вмісту пентаеритриту (15–25 мас.%) та гідроксиду алюмінію (20–40 мас.%) за сталого вмісту поліфосфату амонію не призводить до суттєвих змін водопоглинання, що свідчить про відносну стабільність систем під дією вологи. Незважаючи на гідрофільну природу пентаеритриту, його вплив на сорбцію води в межах досліджених концентрацій є обмеженим, тоді як практично нерозчинний гідроксид алюмінію проявляє інертність у процесах водопоглинання, що підкреслює визначальну роль структурної організації покриттів.

Встановлено, що введення гідрофобізованого аеросилу є ключовим чинником підвищення довговічності реактивних покриттів за умов підвищеної вологості. Частинки аеросилу сприяють ущільненню полімерної матриці, зменшенню дефектності та уповільненню дифузії води, що знижує вимивання активних реактивних компонентів, зокрема пентаеритриту та поліфосфату амонію. Таким чином, структурна стабілізація матриці за допомогою аеросилу забезпечує тривале збереження вогнезахисних властивостей і підвищує експлуатаційну надійність покриттів у вологих середовищах.

4.2. Експлуатаційні властивості розроблених вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.

Поряд із вогнезахисною ефективністю, важливою умовою практичного застосування реактивних покривів для металевих конструкцій є сукупність їхніх експлуатаційних властивостей, які визначають технологічність нанесення, адгезійну надійність та довговічність захисного шару в процесі експлуатації.

Особливої уваги потребують показники, що характеризують поведінку покривів у реальних умовах впливу вологи, температурних коливань та механічних навантажень, оскільки саме ці фактори значною мірою впливають на збереження вогнезахисних властивостей у часі.

У зв'язку з цим, для оптимального складу покриву реактивного типу було проведено комплексну оцінку основних експлуатаційних характеристик відповідно до чинних нормативних документів [131].

Такий підхід дозволяє не лише визначити відповідність матеріалу стандартним вимогам, але й обґрунтувати можливість його використання для захисту металевих конструкцій у будівельній практиці. Подальші результати випробувань наведено в табл. 4.1.

Визначення експлуатаційних характеристик оптимального складу покриву для металевих конструкцій реактивного типу проводили за стандартними методиками:

- час і ступінь висихання – згідно з ДСТУ ISO 9117-1:2015 [132],
- стійкість покривів до статичного впливу води – за ДСТУ ISO 2812 1:2019 [133],
- покривність – згідно з ДСТУ EN ISO 6504-3:2022 [134],
- адгезію методу решітчастих надрізів – згідно з ДСТУ EN ISO 2409:2022 [135].

Результати випробувань наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Основні експлуатаційні характеристики реактивного вогнезахисного покриття.

Назва показника, нормативний документ	ВЗП
Щільність у сухому стані, кг/м ³ (ДСТУ ISO 11272)	1,8
pH, (ДСТУ EN 13300)	8-9
Час висихання до ступеня 3, хв (ДСТУ ISO 9117-1)	40
Стійкість до статичного впливу води, год., не менше (ДСТУ ISO 2812)	72
Водопоглинання за 24 год., % (ДСТУ EN 1062)	4,1
Стійкість покриттів до впливу температури +150±2°C за 24 год (ISO 3248)	пожовтіння, розтріскування, відшарувань та бульбашок немає
Покривність, г/м ² (ДСТУ ISO 6504-3)	110
Адгезія, бал (ДСТУ BISO 2409)	1
Витрата матеріалу, кг/м ²	3,51

Результати випробувань експлуатаційних характеристик розробленого вогнезахисного покриття реактивного типу, наведені в табл. 4.1, свідчать про його відповідність вимогам, що висуваються до матеріалів для захисту металевих конструкцій у будівельній практиці. Всі показники визначено відповідно до чинних державних і гармонізованих міжнародних стандартів (ДСТУ ISO, ДСТУ EN), що забезпечує достовірність та відтворюваність отриманих результатів. Значення щільності покриття у сухому стані перебуває в межах, характерних для наповнених реактивних систем на водно-дисперсійній основі, що підтверджує коректність формування товстошарового покриття та узгоджується з експериментально визначеною витратою матеріалу. Слаболужний рівень pH (8–9) є типовим для стирол-акрилових дисперсій і забезпечує стабільність композиції при зберіганні та нанесенні, не створюючи передумов для кислотної корозії сталеві основи.

Покрив характеризується швидким висиханням до ступеня 3 (40 хв), що є важливою технологічною перевагою, особливо при багатошаровому

нанесенні. Показник стійкості до статичного впливу води (не менше 72 год) та відносно низьке водопоглинання (4,1 % за 24 год) свідчать про достатню вологостійкість покриття для умов базової експлуатації. Водночас отримані значення підтверджують доцільність застосування додаткового атмосферостійкого фінішного шару у разі тривалого впливу вологи.

Випробування на термостійкість при $+150 \pm 2$ °C протягом 24 год не виявили візуальних дефектів покриття (пожовтіння, розтріскування, відшарування чи утворення бульбашок), що свідчить про його стабільність за підвищених температур, характерних для експлуатаційних режимів до настання пожежі. Покривність на рівні 110 г/м^2 підтверджує добру покриттєву здатність матеріалу та його економічність при формуванні суцільного шару, тоді як фактична витрата матеріалу ($3,51 \text{ кг/м}^2$) зумовлена необхідністю нанесення товстошарового реактивного покриття для досягнення заданого рівня вогнезахисту. Особливо важливим є показник адгезії, який становить 1 бал за ISO 2409, що свідчить про надійне зчеплення покриття з металевою основою та забезпечує збереження цілісності вогнезахисного шару в процесі експлуатації та під час термічного впливу. У сукупності наведені результати підтверджують високу експлуатаційну ефективність розробленого покриття реактивного типу та обґрунтовують доцільність його використання для вогнезахисту металевих конструкцій.

Результати випробувань експлуатаційних характеристик розробленого вогнезахисного покриття для металевих конструкцій реактивного типу підтверджують його відповідність вимогам до матеріалів для захисту металевих конструкцій. Покриття характеризується слаболужним рівнем рН (8–9), швидким висиханням до ступеня 3 (40 хв) та високою адгезією до металу (1 бал за ISO 2409). Значення водопоглинання (4,1 % за 24 год) і стійкості до статичного впливу води (не менше 72 год) свідчать про достатню вологостійкість у базових умовах експлуатації. Відсутність дефектів після термічного навантаження при $+150 \pm 2$ °C підтверджує стабільність покриття за підвищених температур. Отримані значення покриттєвості (110 г/м^2) і фактичної

витрати матеріалу (3,51 кг/м²) обґрунтовують необхідність формування товстошарового реактивного покриття для забезпечення заданої вогнезахисної ефективності.

4.3. Удосконалення методу визначення міцності утвореного пінококсу вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій.

Одним із ключових критеріїв ефективності покриттів реактивного типу є механічна міцність утвореного при нагріванні пінококсу, який забезпечує теплоізоляційний бар'єр, що захищає металеві конструкції від дії критичних температур. Незважаючи на те, що коефіцієнт спучення та хімічний склад пінококсу традиційно розглядаються як основні показники якості реактивних систем, саме міцнісні характеристики спіненого шару визначають його здатність зберігати цілісність упродовж усього періоду пожежного впливу. У разі недостатньої міцності коксовий шар руйнується під дією власної ваги, потоків газів, механічних навантажень або термоерозії, що зводить нанівець теплоізоляційний ефект і призводить до різкого зростання температури захищеної поверхні.

Попри очевидну важливість цього параметра, єдина стандартизована методика оцінювання міцності пінококсу сьогодні відсутня, а наявні підходи є фрагментарними та значно відрізняються між собою як за принципом дії, так і за критеріями оцінки. Значна частина досліджень зосереджується на рецептурному вдосконаленні реактивних систем, тоді як формування методів об'єктивної та відтворюваної механічної оцінки коксового залишку залишається недостатньо розробленим науково-практичним напрямом.

У зв'язку з цим актуальним є створення науково обґрунтованої, відтворюваної та технологічно придатної методики визначення міцності пінококсу, яка б дозволила:

- встановити реальну несучу здатність спіненого шару при локальних та рівномірних навантаженнях;

- оцінити структурну стабільність коксового каркасу, сформованого різними співвідношеннями ПФА: ПЕ: $Al(OH)_3$;
 - порівняти ефективність реактивних систем різного складу;
- створити базу для оптимізації вогнезахисних покривів відповідно до вимог пожежної безпеки будівель і критичної інфраструктури. Запропонований в цьому розділі метод спрямована на комплексне визначення механічних властивостей утвореного пінококсу з урахуванням його пористості, крихкості, неоднорідності та анізотропності, що забезпечує об'єктивну характеристику здатності коксово шару виконувати функцію довготривалого теплоізоляційного бар'єра при дії високих температур.

Для оцінювання механічної стабільності сформованого коксового шару було адаптовано експериментальний метод, запропонований Lee Jin Sheng (Universiti Tunku Abdul Rahman), який дозволяє визначати несучу здатність пінококового шару шляхом прикладання поступово зростаючого статичного навантаження. Метод був модифікований з урахуванням особливостей тонкошарових водно-дисперсійних реактивних покривів, що досліджуються у даній роботі [136].

У даній роботі метод застосовано вперше для оцінювання механічної міцності пінококсу водно-дисперсійних реактивних покривів для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії.

Метод ґрунтується на визначенні критичного навантаження, за якого відбувається руйнування або пролом утвореного пінококсу під дією поступово зростаючого статичного тиску. Такий підхід дозволяє оцінити здатність коксового шару протистояти зовнішнім механічним впливам, які виникають під час реальної пожежі: дію потоків гарячих газів, тиск повітряного потоку, осипання частинок, вібраційні навантаження та локальні механічні впливи.

Проведення випробування

Після термічного спучення та охолодження зразків до температури $25 \pm 2^\circ C$, поверхню пінококсу піддавали локальному навантаженню за допомогою стандартизованих щілинних вантажів. Параметри застосованих

вантажів: зовнішній діаметр – 20 мм, товщина - 4,4 мм, діаметр центрального отвору – 6,4 мм.

У межах даного дослідження було уточнено параметри прикладання навантаження, інтервали збільшення маси та час стабілізації напружено-деформованого стану, що дозволило підвищити відтворюваність результатів для пористих реактивних шарів з різною структурною щільністю.

Початкове навантаження встановлювали на рівні 10 г, після чого масу збільшували ступінчасто, додаючи по 10 г через підвіску з витримкою 5 с для стабілізації напружено-деформованого стану матеріалу. Руйнування, продавлювання або пролом шару фіксували візуально як момент втрати несучої здатності. Відповідну масу навантаження позначали як критичну масу (m_k).

Розрахунок питомої міцності

Питома міцність шару (σ , г/см²) обчислювалася за формулою:

$$\sigma = \frac{m_{кр}}{S} \quad (4.1.)$$

де $m_{кр}$ – критична маса навантаження, г,

S – площа зони контакту навантаження, см².

Площу контакту визначали за формулою площі кола:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4.2.)$$

де d – діаметр навантажувального елемента, см.

На відміну від локальних пенетраційних методів, запропонований підхід дозволяє оцінювати інтегральну несучу здатність пористого коксового каркасу, що більш адекватно відображає умови експлуатації коксового шару під час пожежі.

Отримані значення питомої міцності (σ , г/см²) дозволяють:

- оцінити щільність та структурну цілісність пінококсу;
- порівняти якість коксового залишку, сформованого різними рецептурами (ПФА : ПЕ : $\text{Al}(\text{OH})_3$);
- встановити оптимальне співвідношення компонентів для забезпечення максимальної стійкості коксового шару;
- визначити, чи здатний покрив зберігати теплоізоляційні властивості при механічних впливах, характерних для пожежного середовища;
- використовувати тест як критерій відбору рецептур під час розробки нових вогнезахисних матеріалів.

Переваги методу:

- забезпечує кількісну, а не суб'єктивну оцінку міцності пінококсу;
- дозволяє моделювати умови локального механічного навантаження, критичного для крихкої пористої структури;
- підходить для матеріалів різної товщини та структури;
- відтворюється в лабораторних умовах без складних приладів.

З огляду на зазначені переваги, даний метод є науково обґрунтованим підходом для визначення міцності пінококсу і може бути використана як основа для розроблення національного стандарту оцінювання механічної стабільності реактивних покривів. Поряд із визначенням механічної міцності сформованого пінококсу, важливою складовою оцінювання ефективності реактивної системи є вимірювання лінійного коефіцієнта спучення (регламентованого ДСТУ 9291:2024) [137], який характеризує здатність покриву до формування теплоізоляційного шару. Саме інтенсивність та рівномірність спучення є первинним індикатором роботи компонентів – джерела кислоти (ПФА), карбонізуючого агента (ПЕ) та газоутворювача ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Недостатнє або нерівномірне спучення може призвести до формування дефектного коксового шару, що знижує його здатність протистояти високотемпературному впливу [138].

На рис. 4.5 показано характер і ступінь спучування індивідуальних компонентів реактивної системи – ПФА, ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – за умов термічного

впливу при температурі 600 °С. Експериментальні дослідження проводилися для зразків з різним масовим вмістом кожного компонента за умови сталої початкової товщини покриття, що становила 2 мм. Встановлено, що зміна масової частки досліджуваних компонентів за незмінної товщини шару не призводить до суттєвих відмінностей у величині лінійного спучування, а отримані результати мають однаковий характер.



а)

б)

в)

Рис. 4.5 Характер і ступінь спучування сформованого спученого шару в залежності від компонентів реактивної системи: ПФА (а), ПЕ (б) та $Al(OH)_3$ (в)

На рис. 4.6 представлено результати експериментального визначення критичного навантаження сформованого спученого шару із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів для індивідуальних компонентів реактивної системи: ПФА, ПЕ та $Al(OH)_3$.



а)

б)

в)

Рис.4.6 Результати експериментального визначення критичного навантаження сформованого спученого шару із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів для індивідуальних компонентів реактивної системи: ПФА (а), ПЕ (б) та $Al(OH)_3$ (в).

За результатами експерименту (рис. 4.6, а) встановлено, що ПФА не здатний до повноцінного самостійного спучування, тому що він не є

газоутворювачем. Під час термічного впливу ПФА переходить у в'язкотекучий стан з утворенням склоподібної фосфоровмісної плівки на поверхні зразка. У процесі дегазації, пов'язаної з виділенням аміаку (NH_3), спостерігалось слабе набухання шару, що проявлялось незначним збільшенням його товщини 1-2 мм. Проте сформований шар мав низьку механічну стійкість і не відповідав критеріям повноцінного пінококсу. Однак він є ключовим компонентом для ініціювання спученого механізму в композиційних системах.

ПЕ виконує функцію донора вуглецю та карбонізуючого агента. За умов термічного впливу ПЕ зазнає розкладу з виділенням летких продуктів деградації, що супроводжується незначним об'ємним розширенням шару. Експериментально встановлено (рис 4.6, б), що лінійне спучування пентаеритриту в індивідуальному вигляді досягає 2-3 мм. При цьому утворюється крихкий, нестійкий, частково обвуглений залишок з високою пористістю, який швидко руйнується при мінімальному механічному навантаженні. ПЕ забезпечує обмежене та нестабільне спучування і без присутності кислотного каталізатора (ПФА) не здатний формувати механічно стійкий пінококсний шар.

Гідроксид алюмінію досліджувався як газогенеруючий та теплопоглинаючий компонент. Під час нагрівання $\text{Al}(\text{OH})_3$ зазнає ендотермічної дегідратації з виділенням водяної пари та утворенням оксиду алюмінію (Al_2O_3).

Самостійного збільшення товщини шару при цьому не спостерігалось. Лінійне спучування як таке відсутнє, однак фіксувалось локальне розпушення структури шару, зумовлене виділенням водяної пари, що може створювати ілюзію незначного об'ємного розширення без реального нарощування товщини. Під час спроби визначення механічної міцності утворених шарів методом навантаження стандартизованими щілинними вантажами встановлено, що вже при початковому навантаженні масою 10 г вантажі миттєво провалювалися крізь шар ПФА, ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$. У зв'язку з цим

визначення реальної механічної міцності сформованих залишків для індивідуальних компонентів виявилось неможливим.

Це підтверджує, що жоден з досліджуваних компонентів у чистому вигляді не здатний формувати механічно стійкий пінококсовий шар, а ефект вогнезахисту реалізується виключно за рахунок їхньої синергічної взаємодії у складі реактивної композиції.

З метою встановлення взаємозв'язку між інтенсивністю спучування та механічною стійкістю сформованого пінококсового шару було проведено дослідження впливу співвідношення ПЕ та $Al(OH)_3$ за фіксованого вмісту ПФА (25 мас. %) на структурно-механічні характеристики реактивного вогнезахисного покриття. Особливу увагу приділено оцінці ролі карбонізуючого та стабілізуючого компонентів у формуванні просторово стійкої структури пінококсу, здатної забезпечувати збереження цілісності теплоізоляційного шару під дією механічних навантажень після термічного впливу.

На рис. 4.7 показано характер і ступінь спучування (K_c , мм) сформованого спученого шару за фіксованого вмісту ПФА та різного вмісту $Al(OH)_3$: 20 мас. % та 40 мас. %.

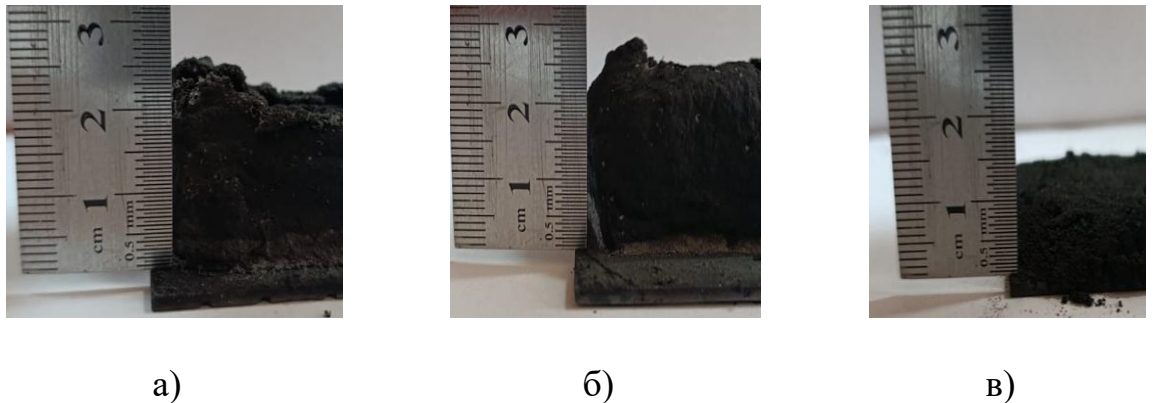


Рис. 4.7 Залежність лінійного коефіцієнта спучення сформованого спученого шару в залежності вмісту ПЕ 15 (а), 20 (б), 25 (в) мас.% у складі вогнезахисного покриття за фіксованого вмісту $Al(OH)_3$ 20 мас.%.

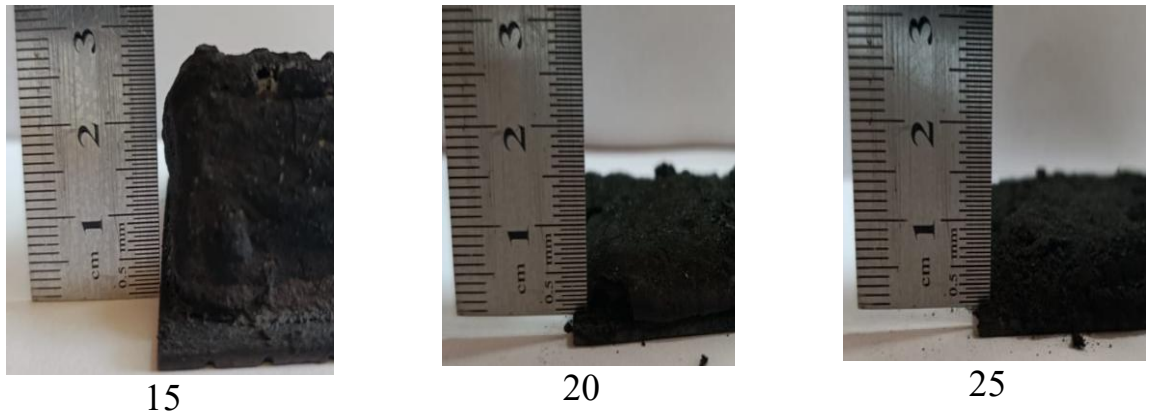


Рис. 4.8. Залежність лінійного коефіцієнта спучення сформованого спученого шару в залежності вмісту ПЕ 15 (а), 20 (б), 25 (в) мас.% у складі вогнезахисного покриття за фіксованого вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ 40 мас. %.

На рис. 4.8. показано визначення критичного навантаження (σ , $\text{г}/\text{см}^2$) сформованого спученого шару за фіксованого вмісту ПФА та різного вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$: 20 мас. % та 40 мас. %.

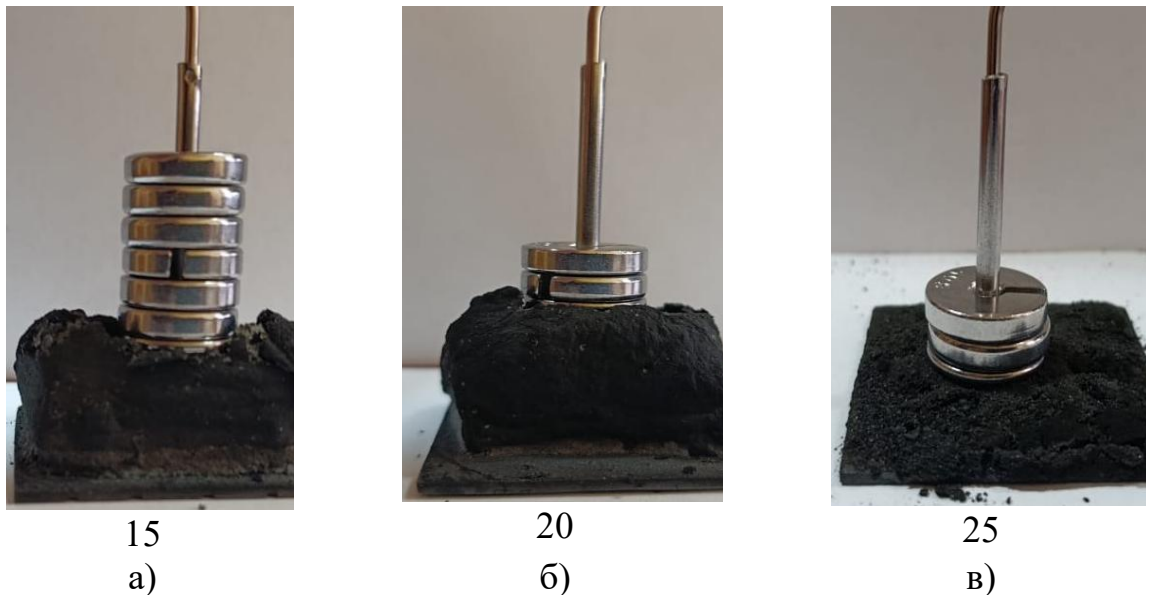


Рис. 4.9. Визначення критичного навантаження сформованого спученого шару в залежності вмісту ПЕ 15 (а), 20 (б), 25 (в) мас.% у складі вогнезахисного покриття за фіксованого вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ 20 мас.%.

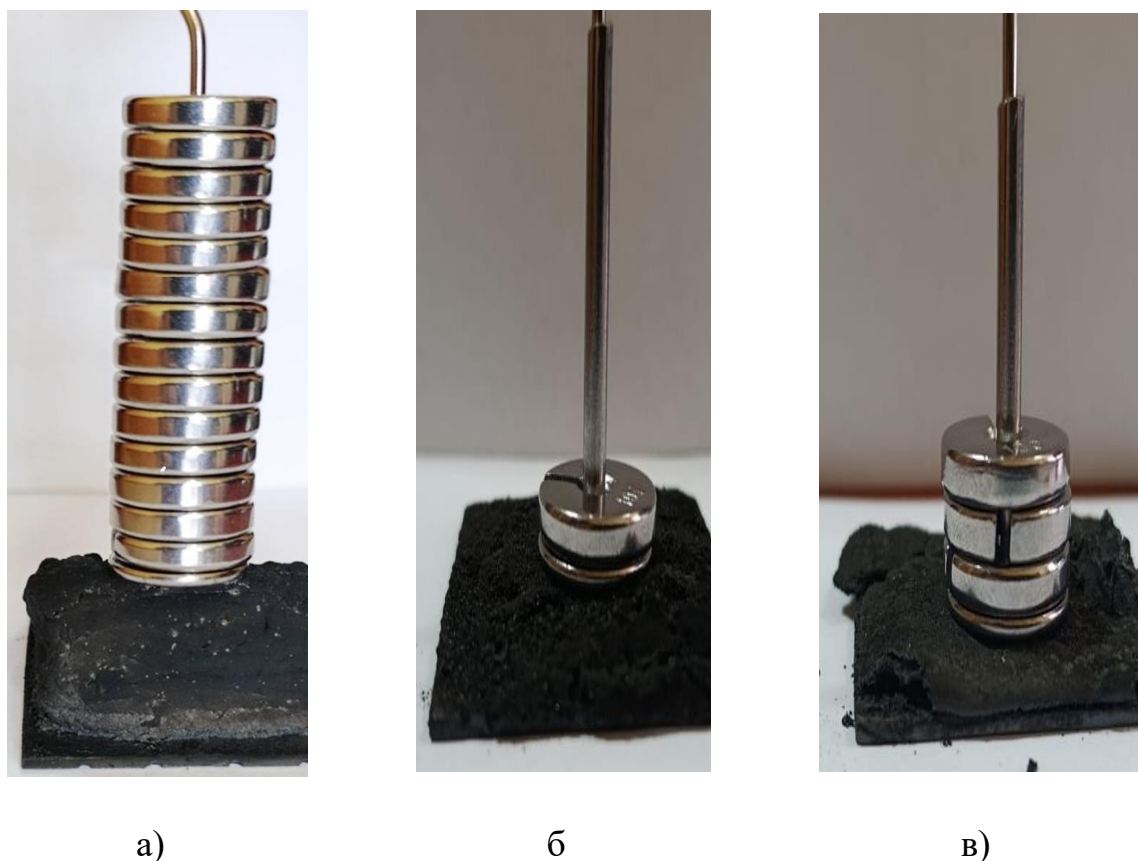


Рис.4.10. Визначення критичного навантаження сформованого спученого шару в залежності вмісту ПЕ 15 (а), 20 (б), 25 (в) мас.% у складі вогнезахисного покритву за фіксованого вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ 40 мас.%.

Подальший аналіз експериментальних даних здійснювали шляхом їх подання у вигляді графічних залежностей. З метою встановлення впливу реактивних компонентів на структурно-механічні характеристики вогнезахисного покритву проаналізовано зміну лінійного коефіцієнта спучення (K_s , мм) та міцності сформованого спученого шару (σ , г/см^2) за фіксованого вмісту поліфосфату амонію (ПФА) – 25 мас.% та змінного вмісту гідроксиду алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$ (рис.4.10).

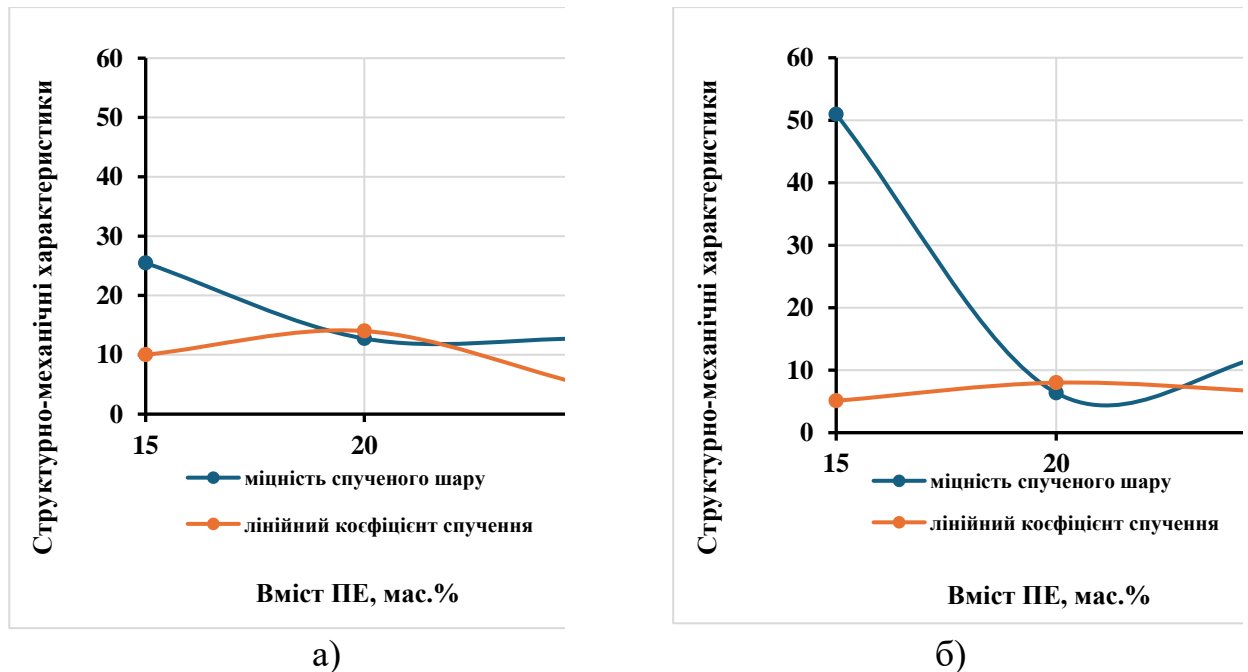


Рис. 4.11. Залежність міцності спученого шару та лінійного коефіцієнта спучення в залежності вмісту ПЕ у складі вогнезахисного покриття при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 20 мас. % (а) та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас. % (б).

Отримані графічні залежності для систем із вмістом $\text{Al}(\text{OH})_3$ 20 мас. % (рис. 4.11, а) свідчать, що зі збільшенням вмісту ПЕ від 15 до 20 мас. % відбувається різке зниження механічної міцності спученого шару з 25,5 до 12,7 г/см². Подальше підвищення частки ПЕ до 25 мас. % не спричиняє істотних змін міцності, що вказує на досягнення граничного рівня ослаблення структури пінококсу. У досліджуваному діапазоні чітко простежується тенденція: чим менший вміст ПЕ, тим вища механічна міцність сформованого шару, що пов'язано з меншою пористістю та більш цілісним каркасом.

Лінійний коефіцієнт спучення за цих умов має аналогічний характер залежності, однак його абсолютні значення зменшені приблизно вдвічі порівняно з попередніми результатами. Зі збільшенням вмісту ПЕ від 15 до 20 мас. % коефіцієнт спучення зростає, досягаючи максимального значення при середньому вмісті ПЕ (близько 20 мас. %), після чого знижується при 25 мас. %. Це свідчить про наявність оптимальної концентрації ПЕ, за якої інтенсивність газоутворення є достатньою для формування розвиненої пористої структури без істотного руйнування пінококсівого каркасу.

Для композицій із підвищеним вмістом $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас.% (рис. 2, б) характер залежностей зберігається, однак із суттєвим зсувом у бік вищих значень міцності та нижчих значень спучення. За мінімального вмісту ПЕ (15 мас.%) фіксується максимальна механічна міцність спученого шару (понад 50 $\text{г}/\text{см}^2$), тоді як лінійний коефіцієнт спучення є порівняно невеликим. Збільшення частки ПЕ до 20 мас.% призводить до різкого зниження міцності та одночасного зменшення висоти спученого шару, що вказує на порушення структурної цілісності пінококсу внаслідок надлишкового газоутворення. Подальше підвищення вмісту ПЕ до 25 мас.% супроводжується частковим відновленням міцності, що можна пов'язати зі стабілізуючим впливом оксидного каркасу Al_2O_3 , утвореного під час термічної дегідратації $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Загалом підвищення вмісту гідроксиду алюмінію з 20 до 40 мас.% сприяє зростанню механічної міцності спученого шару, особливо за низьких концентрацій ПЕ, за рахунок формування жорсткої неорганічної матриці, яка ущільнює структуру та зменшує її пористість. Водночас це супроводжується зменшенням ступеня спучення, що проявляється у зниженні висоти сформованого шару.

Таким чином, результати, отримані за новими графічними залежностями, підтверджують, що механічна міцність пінококсу не зростає пропорційно до коефіцієнта спучення. Максимальне спучення досягається за середнього вмісту ПЕ, однак найбільша міцність формується за мінімальних концентрацій ПЕ та підвищеного вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$. Оптимальний баланс між інтенсивністю спучення та механічною стійкістю пінококсового шару реалізується при співвідношенні компонентів ПФА : ПЕ : $\text{Al}(\text{OH})_3$ = 25 : 15 : 40 мас.%, що забезпечує формування структурно стабільного шару, здатного ефективно протистояти механічним і термічним навантаженням.

Таким чином, результати експериментальних досліджень міцності спученого шару, отримані з використанням різних методичних підходів, свідчать про суттєву залежність визначених значень від характеру прикладеного навантаження та площі контакту з поверхнею пінококсу.

Виявлені відмінності між результатами, отриманими пенетраційним методом і методом розподіленого навантаження, зумовлюють необхідність їх системного зіставлення з метою оцінки репрезентативності та інформативності кожного підходу.

У зв'язку з цим у наступних розділах виконано порівняльний аналіз пенетраційного методу та методу розподіленого навантаження при визначенні міцності пінококсу, що дозволяє обґрунтувати доцільність застосування розподіленого навантаження як більш адекватного інструменту оцінювання механічної стійкості коксового шару в умовах, наближених до реального пожежного впливу.

Показано, що коефіцієнт спучення сам по собі не гарантує вогнезахисний ефект, оскільки руйнування пінококсу під час пожежі (власна вага, газові потоки, механічні впливи) різко знижує теплоізоляцію.

Експериментально апробовано відтворюваний метод оцінювання механічної міцності пінококового шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій із застосуванням стандартизованих щільних вантажів. Метод передбачає ступінчасте збільшення навантаження з кроком 10 г та витримкою 5 с на кожному етапі до моменту фіксації продавлювання або руйнування шару, з подальшим перерахунком критичного навантаження у значення питомої міцності σ (г/см²) з урахуванням площі контакту. Запропонований підхід забезпечує кількісне визначення граничної несучої здатності пінококсу та більш адекватно відтворює характер розподіленого навантаження, притаманного умовам реальної пожежної дії. У даній роботі зазначений метод вперше застосовано для оцінювання механічної міцності пінококсу водно-дисперсійних реактивних покривів на основі стирол-акрилової дисперсії.

Встановлено, що застосування індивідуальних компонентів (ПФА, ПЕ, Al(OH)₃) не забезпечує формування механічно стійкого пінококового шару. Зокрема, ПФА утворює тонку склоподібну плівку зі слабо вираженим спученням (1–2 мм), ПЕ забезпечує обмежене збільшення товщини (2–3 мм) із

формуванням крихкого залишку, тоді як $\text{Al}(\text{OH})_3$ практично не сприяє приросту товщини, зумовлюючи лише локальне розпушення структури. За таких умов руйнування шару відбувається вже при мінімальному навантаженні (10 г), що унеможливорює коректне визначення його граничної міцності для одно-компонентних систем. Для покриттів із фіксованим вмістом ПФА (25 мас.%) експериментально встановлено наявність компромісної залежності типу «ступінь спучення – механічна міцність». Збільшення частки ПЕ з 15 до 20 мас.% (за вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ 20 мас.%) супроводжується зниженням питомої міцності з 25,5 до 12,7 г/см², тоді як максимальний коефіцієнт спучення досягається при середній концентрації ПЕ (близько 20 мас.%) з подальшим його зменшенням за вищих вмістів. Підвищення концентрації $\text{Al}(\text{OH})_3$ до 40 мас.% зумовлює зміщення балансу системи в бік зростання механічної міцності та зниження інтенсивності спучення, що пов'язано з формуванням жорсткого оксидного каркасу та ефектом структурного армування. У межах проведеного дослідження оптимальним співвідношенням компонентів визначено ПФА : ПЕ : $\text{Al}(\text{OH})_3$ = 25 : 15 : 40 мас.%.

Отримані результати підтверджують суттєву залежність оцінюваної міцності від характеру прикладеного навантаження та площі контакту, що обґрунтовує необхідність подальшого порівняльного аналізу пенетраційного методу та методу розподіленого статичного навантаження як більш репрезентативного для оцінювання механічної стійкості пінококсового шару.

4.4. Комп'ютерне моделювання з метою визначення напружено-деформованого стану вогнезахисного покриття для металевих конструкцій.

У межах дослідження важливою складовою є визначення напружено-деформованого стану коксового шару вогнезахисного покриття для металевих конструкцій, який формується внаслідок дії пожежі шляхом спучення нанесеного розчину на поверхню металевої пластини. Оскільки основним

завданням є вивчення механічної поведінки вже сформованого під час теплового впливу пожежі спученого покритву під дією зосередженого механічного навантаження, доцільним кроком є виконання комп'ютерного моделювання як етапу перед фізичним експериментом.

З огляду на необхідність попереднього прогнозування поведінки матеріалу в умовах експлуатації, було обґрунтовано доцільність застосування попереднього чисельного моделювання. Отже, з метою попередньої оцінки ефективності та надійності такого вогнезахисного покритву перед виконанням фізичного експерименту було прийнято рішення здійснити комп'ютерне моделювання поведінки спученого покритву вогнезахисного матеріалу під дією механічного навантаження. Такий підхід дає змогу заздалегідь проаналізувати механічну поведінку матеріалу в умовах зосередженого навантаження, визначити критичне навантаження, за якого ймовірно руйнування, а також встановити зони потенційного пошкодження в його структурі.

З урахуванням характеру задачі, в якій необхідно відстежити часовий розвиток деформацій до моменту руйнування, особливу увагу приділено вибору відповідного обчислювального підходу. Було проаналізовано доцільність застосування неявного методу (*implicit*), який добре працює для статичних або квазістатичних процесів. Проте, враховуючи ймовірність утворення локального руйнування в зоні контакту з вантажем, значні нелінійності в поведінці матеріалу (врахування пошкодження) та наявність складної контактної взаємодії, неявний метод потенційно міг би призводити до чисельної нестійкості або помилок сітки [139, 140], особливо при недостатній густоті елементів у критичних зонах. Для уникнення таких труднощів цей підхід було свідомо не застосовано.

Натомість у моделюванні було використано явний метод (*explicit dynamic analysis*), який є кращим вибором для динамічних задач з високою чутливістю до часу та з можливістю локального руйнування матеріалу [141]. Явний розрахунок забезпечує стабільне рішення при великих деформаціях, дозволяє точно контролювати процес втрати цілісності матеріалу [142] та дає

змогу спостерігати механізм деформування вогнезахисного покриття в реальному часі моделювання. Контактні взаємодії, залипання тіл, проникнення вантажу в межах геометричних розмірів – усе це обробляється із високою точністю без потреби у наддрібній сітці, що є особливо важливим для задач такого типу [143, 144].

Для проведення чисельного моделювання було обрано програмний комплекс ANSYS Workbench, модуль Explicit Dynamics, оскільки він дозволяє проводити обчислення такого рівня складності. Цей модуль оптимізований для аналізу швидкоплинних, нелінійних фізичних процесів, включаючи великі деформації, контактні взаємодії та руйнування матеріалів із урахуванням часової залежності навантаження [145, 146]. Його використання забезпечує високу точність відображення фізичних явищ, характерних для поведінки спученого вогнезахисного покриття під дією локального навантаження.

Таким чином, метою чисельного моделювання є визначення рівня механічного навантаження, який може витримати розроблений вогнезахисний матеріал після його спучення. Оскільки границя міцності матеріалу на стиск у спученому стані є невідомою, моделювання дозволяє провести її попередню оцінку, враховуючи реальні геометричні умови контакту, особливості локалізованого навантаження та потенційний механізм руйнування. Отримані результати будуть використані як основа для подальших фізичних експериментів і уточнення механічних характеристик матеріалу.

З метою проведення комп'ютерного моделювання для дослідження напружено-деформованого стану спученого покриття вогнезахисного матеріалу було створено геометричну модель у геометричному модулі SpaceClaim.

Геометрична модель представлена на рис. 4.12 і складається з трьох основних елементів:

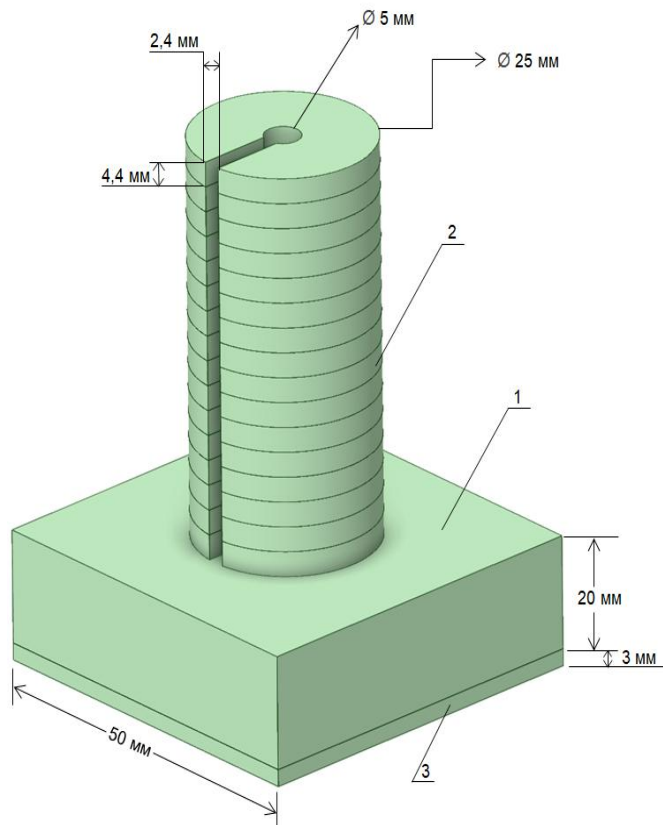


Рис. 4.12. Геометрична модель металевої (сталевій) пластини з спученим вогнезахисним покривом: 1 – шар спученого вогнезахисного покриву; 2 – вантажі (16 одиниць); 3 – металева пластина, що захищена вогнезахисним покривом.

Загальна висота стосу вантажних дисків становить приблизно 70,4 мм, що відповідає 16 окремим дискам, які накладаються один на одного. Така конфігурація створює локалізоване (зосереджене) навантаження на поверхню спученого вогнезахисного покриву. Це дозволяє змоделювати характер впливу предметів з обмеженою площею опори, які в умовах реальної експлуатації можуть створювати тиск на поверхню захисного покриву.

Передача навантаження відбувається через вогнезахисний шар, який розташований на сталевій пластині. Пластина виконує функцію жорсткої основи (опори), що забезпечує необхідну фіксацію всієї конструкції в процесі моделювання. Така постановка задачі дозволяє симулювати реалістичний механізм взаємодії з навантаженням та дає змогу простежити розвиток

напружено-деформованого стану матеріалу до моменту можливої втрати його цілісності.

Всі геометричні параметри – включно з товщиною захисного покриття, розмірами дисків і габаритами сталеві пластина – підбрані відповідно до експериментальних зразків, які планується застосувати в натурних випробуваннях. Це забезпечує порівнюваність та верифікацію результатів чисельного моделювання із подальшими фізичними експериментами.

У процесі моделювання особливу увагу приділено заданню фізико-механічних властивостей матеріалів, що беруть участь у взаємодії в межах розрахункової моделі. Кожен з елементів – металева пластина, спучений вогнезахисний шар та вантажі – моделювався як окремий матеріал із відповідними характеристиками, що забезпечує точне відтворення їхньої взаємодії під час навантаження.

Металева пластина розглядається як лінійно-еластичний ізотропний матеріал з густиною 7850 кг/м^3 . Вона виступає жорсткою опорою, практично не деформується під дією навантаження, що дозволяє зосередити увагу на поведінці вогнезахисного покриття.

Вантажі змодельовано як тверді циліндричні тіла з густиною 5100 кг/м^3 , що дозволяє забезпечити необхідну масу в межах 10 г при заданих геометричних розмірах, аналогічних до тих, які будуть використані під час натурального експерименту. Жорсткість матеріалу (модуль пружності $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$) гарантує передачу навантаження без деформацій власної структури вантажу, імітуючи реальні умови контакту твердого тіла з поверхнею спученого вогнезахисного покриття.

Вогнезахисний шар змодельовано як спучений матеріал із нелінійною механічною поведінкою. Основні параметри для нього підбрані на основі попередніх випробувань і припущень щодо властивостей спінених вогнезахисних матеріалів [147, 148], та представлені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Основні параметри змодельованого вогнезахисного матеріалу

№ п/п	Параметр	Позначення, одиниці вимірювання	Величина
1	Густина	ρ , кг/м ³	400
2	Модуль Юнга	E , Па	3 000
3	Міцність на стиск	$f_{ст.}$, Па	5 000
4	Міцність на розтяг	$f_{роз.}$, Па	1 500
5	Коефіцієнт Пуассона	ν , -	0,375

У параметрах деформаційної моделі для вогнезахисного матеріалу обрано тип Incremental. Такий варіант передбачає облік приросту деформації на кожному кроці інтегрування у часі, що дозволяє детально відслідковувати поступовий розвиток напружено-деформованого стану матеріалу. З огляду на завдання, яке включає локальне навантаження та потенційне накопичення деформацій у часі, вибір інкрементного підходу є доцільним для коректного чисельного опису поведінки матеріалу під дією зовнішніх механічних впливів.

Таким чином, розрахункова модель включає набір матеріалів з різними властивостями, що взаємодіють у динамічних умовах, з урахуванням реальних механічних процесів, включно з руйнуванням і контактною взаємодією.

У моделі було реалізовано систему граничних умов, що максимально наближена до умов майбутнього натурного експерименту та забезпечує достовірність симуляції локального навантаження на спучений вогнезахисний шар.

Для металевої (сталеві) пластини, що виконує роль жорсткої основи, були застосовані умови повного закріплення по нижній поверхні. Це означає фіксацію всіх ступенів свободи (переміщень і обертів), що імітує нерухоме опирання пластини в реальних умовах (рис. 4.13 а).

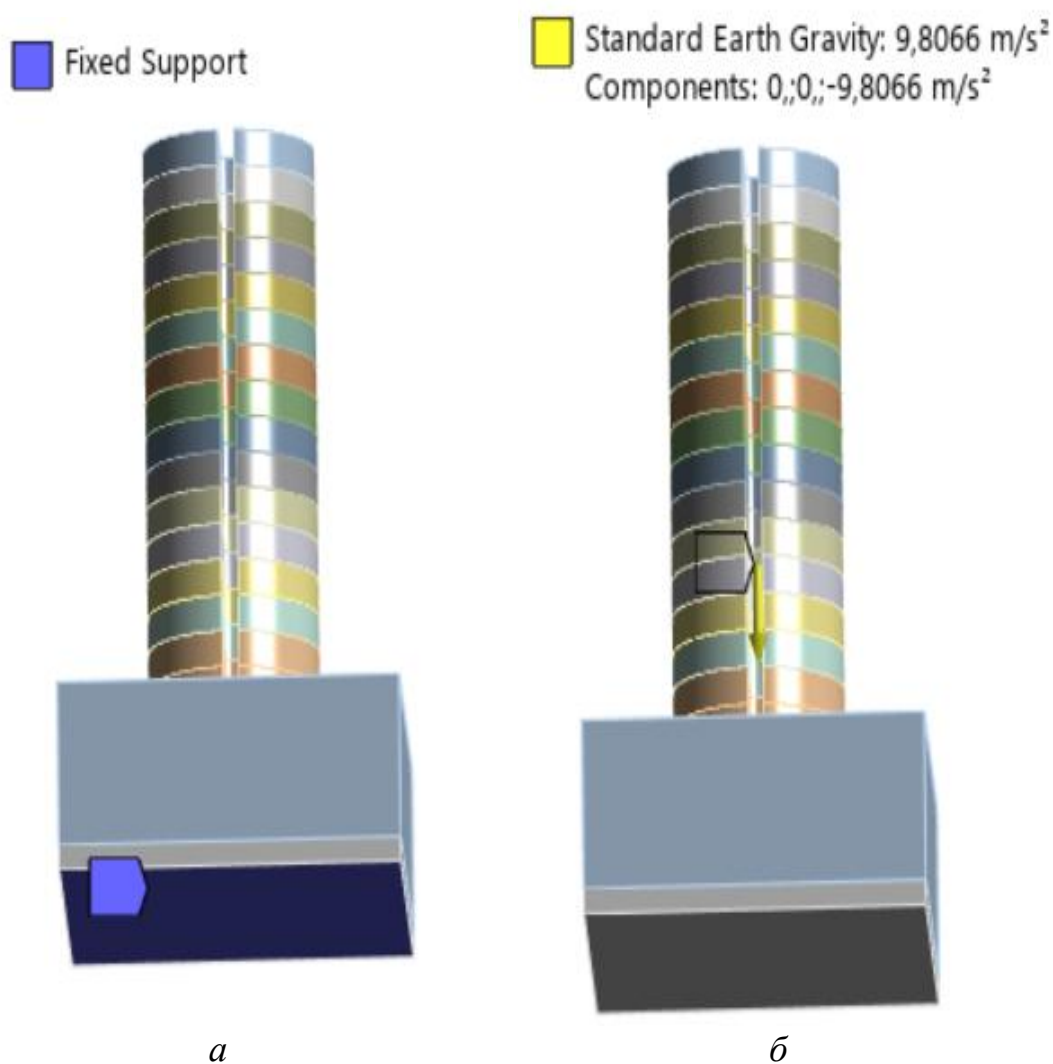


Рис. 4.13. Завдання граничних умов у математичній моделі: а – закріплення сталевій пластини з вогнезахисним шаром (фіксація нижньої поверхні, *Fixed Support*); б – прикладення сили ваги за допомогою стандартної гравітації (*Standard Earth Gravity*).

Гравітаційне навантаження моделюється за допомогою стандартного значення прискорення вільного падіння, яке діє у напрямку осі Z (вниз) зі значенням $980,66 \text{ cm/s}^2$ (рис. 4.13 б).

Це дозволяє правильно врахувати власну вагу вантажів при моделюванні їх впливу на спучений вогнезахисний шар. Застосування сили тяжіння необхідне для реалізації умов реального експерименту, де навантаження створюється масою твердих тіл.

Вогнезахисний покрив, розташований безпосередньо на пластині, контактує з нею по всій площині дотику через відповідну контактну пару.

Вантажі, моделювані як тверді циліндричні тіла, прикладаються до верхньої частини вогнезахисного покриття. Їм було надано задане вертикальне переміщення (дислокація), яке моделює поступове збільшення навантаження. Переміщення прикладається до кожного диска, розміщеного у стосі, по вертикальній осі Z . Таким чином, створюється зосереджене навантаження на центр поверхні захисного покриття.

У моделі передбачено безтертєву взаємодію між вантажами та поверхнею спученого вогнезахисного покриття. Такий підхід дозволяє уникнути впливу дотичних сил при контакті, що можуть викривити результати оцінки напружено-деформованого стану.

Відсутність тертя моделює ідеалізовані лабораторні умови, у яких забезпечується максимально локалізований розподіл навантаження лише у напрямку дії сили тяжіння. Це відповідає практичній постановці експерименту, в якому навантаження передається без додаткових зміщень, зсувів або ковзання.

Завдяки цьому можна ізолювати вплив вертикального тиску на захисний шар і точніше відтворити умови, за яких проводиться оцінка його міцності та зони можливого руйнування.

Усі симетричні умови чи обмеження по бокових поверхнях не задавались, оскільки аналіз виконувався для повної моделі з урахуванням реального граничного впливу без використання умов симетрії.

Для проведення чисельного аналізу в середовищі ANSYS Explicit Dynamics було сформовано скінченно-елементну сітку, яка відтворює геометрію моделі, включаючи металічну пластину, вогнезахисний шар і тіла вантажів (рис. 4.14).

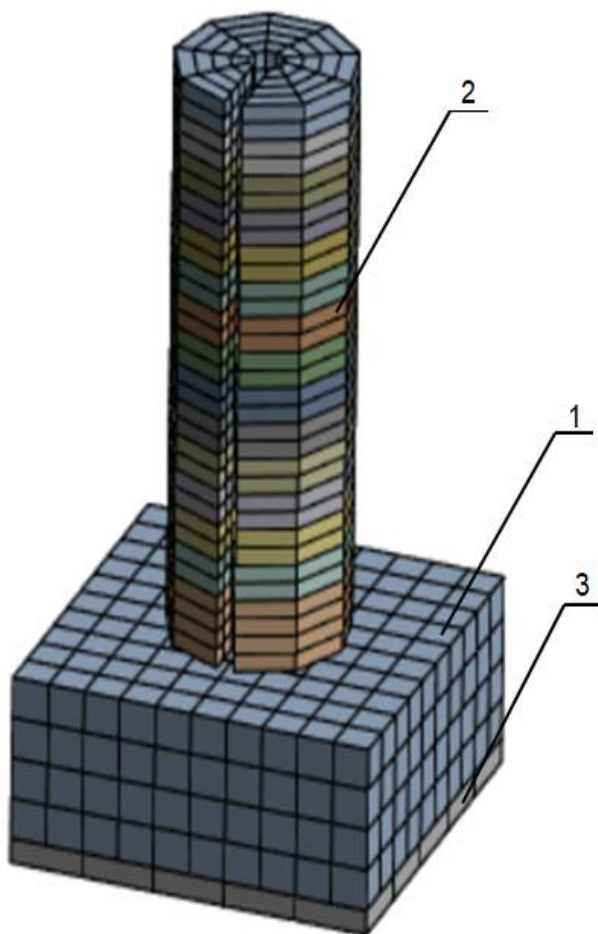


Рис. 4.14. Скінченно-елементна сітка розрахункової моделі: 1 – шар спученого вогнезахисного покриву; 2 – тверді тіла вантажів; 3 – металева пластина

При формуванні сітки було обрано трьохвимірні 8 вузлові гексаедральні елементи типу Solid, які добре адаптуються до складних форм і забезпечують прийнятну точність у розрахунках напружено-деформованого стану [149, 150].

Було встановлено різні розміри скінченних елементів залежно від геометрії та значущості окремих частин моделі. Кількість та розмір скінченних елементів моделі представлена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3.

Кількість та розмір скінченних елементів розрахункової моделі

№ п/п	Елементи моделі	Розмір скінченного елемента, мм	Кількість скінченних елементів, одиниць
1	Шар спученого вогнезахисного покриву	5	400
2	Тверді тіла вантажів (16 одиниць)	1,1	1 152
3	Металева пластина	10	25
4	Загальна кількість скінченних елементів у моделі		1 577

Для шару спученого вогнезахисного покриву для металевих конструкцій, який є основною областю вивчення, було вибрано розмір скінченних елементів 5 мм, що є доцільним з огляду на геометричні розміри пластини та вогнезахисного покриву (50 мм×50 мм). Це дозволяє з достатньою точністю відстежувати локальні напружено-деформовані стани.

Для сталеві пластина, яка виконує функцію жорсткої опори, використано більший розмір елементів – 10 мм, оскільки в цій частині конструкції не очікується значного градієнта напружень.

Адаптивна побудова сітки дала змогу досягти оптимального співвідношення між точністю чисельного аналізу та обчислювальною ефективністю. Всі елементи сітки пройшли перевірку на відповідність критеріям якості – аспектне співвідношення, ортогональність, ступінь спотворення – що є обов'язковою умовою для проведення динамічного моделювання в ANSYS.

Таким чином, сформована скінченно-елементна сітка дозволяє достовірно змоделювати локальну дію навантаження та простежити розподіл

напружень і деформацій у вогнезахисному матеріалі в умовах, наближених до реального експерименту.

У межах чисельного моделювання дослідження міцності вогнезахисного покриття, нанесеного на поверхню металеві пластини, було обрано загальний інтервал часу 2 мс (0,002 с). Такий часовий діапазон зумовлений характером прикладеного навантаження, яке реалізується через поступову дію вантажу в умовах, що моделюють реальну ситуацію.

Особливістю об'єкта дослідження є крихкий тип вогнезахисного матеріалу, який характеризується підвищеною чутливістю до локальних напружень та здатністю до деформацій навіть за порівняно невеликих впливів. У зв'язку з цим критично важливо забезпечити таку тривалість симуляції, яка дозволить дослідити накопичення напружень у часі та формування зон потенційного руйнування.

Обрана тривалість моделювання дає змогу:

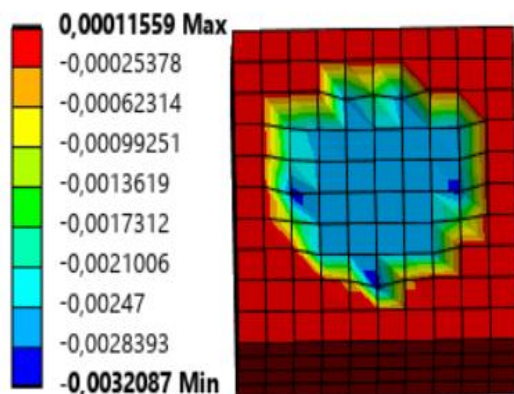
- врахувати реальні умови майбутнього практичного випробування;
- відстежити поведінку вогнезахисного покриття на всіх етапах напружено-деформованого стану – від початкового контакту до досягнення граничної міцності;
- забезпечити стабільну й коректну роботу явного динамічного методу з урахуванням особливостей обраної сітки та матеріальних моделей;
- запобігти впливу інерційних коливань, які могли б призвести до викривлення результатів у середовищі з крихкою структурою.

Таким чином, встановлений часовий інтервал є оптимальним для вивчення міцності та поведінки вогнезахисного покриття, який є головним об'єктом цього дослідження.

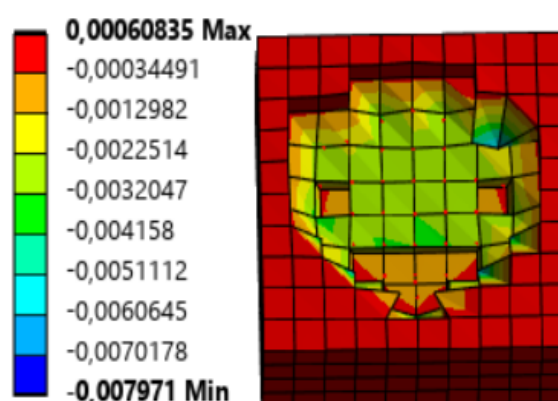
На рис. 4.15 представлено розподіл деформацій у напрямку осі Z (перпендикулярно до площини пластини) у спученому вогнезахисному шарі в різні моменти часу під дією механічного навантаження. Аналіз виконано для чотирьох контрольних точок часу: 0,00025 с; 0,00075 с; 0,0015 с; 0,0020 с, що дозволяє простежити поступовий розвиток напружено-деформованого стану.

I: strength of the fireprotection layer

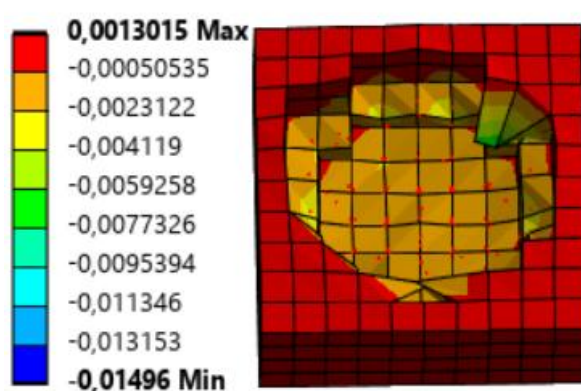
Directional Deformation 4
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 2,5009e-004 s
 Cycle Number: 1694

*a***I: strength of the fireprotection layer**

Directional Deformation 4
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 7,501e-004 s
 Cycle Number: 5077

*б***I: strength of the fireprotection layer**

Directional Deformation 4
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 1,5001e-003 s
 Cycle Number: 10151

*в***I: strength of the fireprotection layer**

Directional Deformation 4
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 2,0001e-003 s
 Cycle Number: 13534

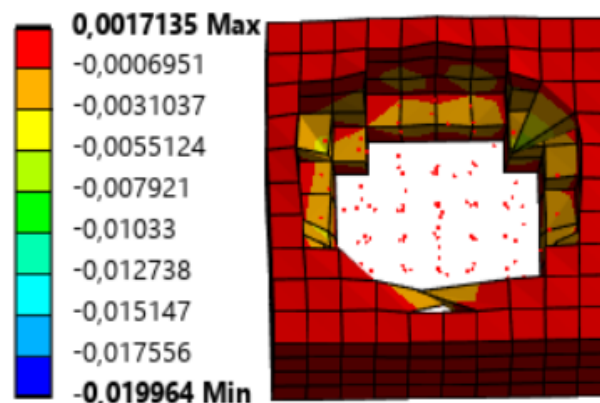
*г*

Рис. 4.15. Розподіл деформацій по осі Z спученого покриття вогнезахисного матеріалу у різні моменти часу під дією механічного навантаження: *a* – 0,00025 с; *б* – 0,00075 с; *в* – 0,0015 с; *г* – 0,0020 с.

На етапі *a* ($t = 0,00025$ с) спостерігається початкове формування локальної зони деформацій. Максимальне значення стискальної деформації

становить лише 3,2 мм, що відповідає першим фазам взаємодії вантажу з поверхнею захисного покритву. Деформації зосереджені у центральній частині моделі, форма ізоліній майже кругова, що свідчить про симетричний характер навантаження.

На етапі б ($t = 0,00075$ с) відзначається поширення деформацій у глибину покритву з одночасним збільшенням амплітуди. Контактна зона збільшується, а градієнт деформацій стає виразнішим. Відбувається розширення зони локального ущільнення, що особливо критично для крихких матеріалів, які не здатні до пластичного перерозподілу.

На етапі в ($t = 0,0015$ с) у центральній частині деформації набувають максимального розвитку та складають значення на стиск майже 15 мм. Конфігурація ізоліній свідчить про наявність чітко окреслених зон розтягнення та стиснення, що демонструє складну механічну поведінку матеріалу. Це свідчить про початок виходу захисного покритву на межу допустимого механічного опору.

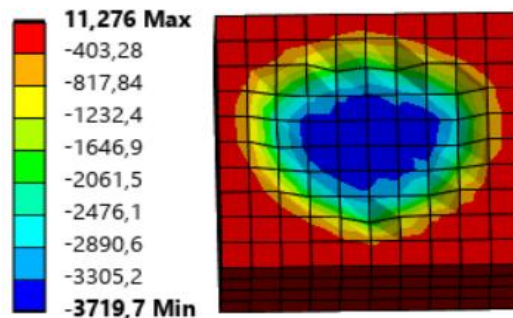
На етапі г ($t = 0,0020$ с) фіксується граничне значення стискальних деформацій, яке охоплює більшу частину центральної зони. Зафіксоване значення становить 19,964 мм, що майже відповідає початковій товщині спученого покритву вогнезахисного матеріалу (20 мм). Просторове поле деформацій характеризується радіальною симетрією з максимальною концентрацією в зоні прямої дії навантаження. Спостерігаються як стискальні, так і розтягувальні деформації по осі Z, що є типовим для крихких пористих матеріалів при локальному вдавненні.

Таким чином, отримані результати дозволяють простежити динаміку накопичення деформацій у спученому вогнезахисному матеріалі, встановити критичні зони локального зминання та оцінити ефективність захисного покритву при дії механічного навантаження, характерного для практичного випробування або експлуатаційних ситуацій. Це створює передумови для вдосконалення як матеріалу, так і умов його використання в конструкціях.

На рис. 4.16 показано розвиток нормальних напружень по осі Z у спученому вогнезахисному шарі при дії механічного навантаження у різні моменти часу.

I: strength of the fireprotection layer

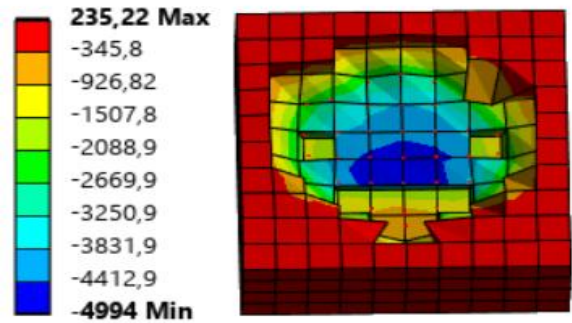
Normal Stress 6
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2,5009e-004 s
Cycle Number: 1694



a

I: strength of the fireprotection layer

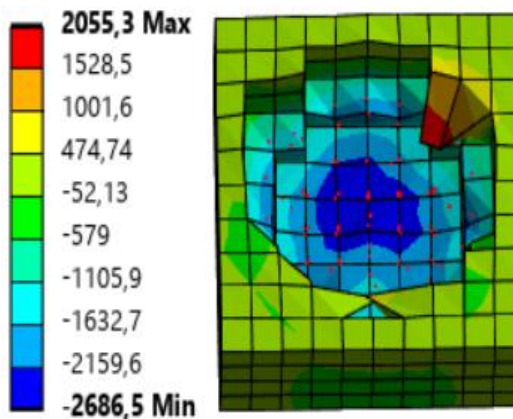
Normal Stress 6
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 7,501e-004 s
Cycle Number: 5077



б

I: strength of the fireprotection layer

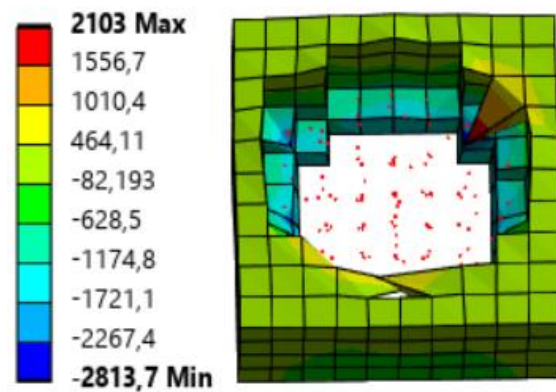
Normal Stress 6
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1,5001e-003 s
Cycle Number: 10151



в

I: strength of the fireprotection layer

Normal Stress 6
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 2,0001e-003 s
Cycle Number: 13534



г

Рис. 4.16. Розподіл напружень по осі Z спученого вогнезахисного покриття у різні моменти часу під дією механічного навантаження: *a* – 0,00025 с; *б* – 0,00075 с; *в* – 0,0015 с; *г* – 0,0020 с

Результати математичного моделювання дозволяють простежити просторово-часовий розвиток напруженого стану з урахуванням крихкої природи матеріалу. Етап а ($t = 0,00025$ с): початкове навантаження спричиняє формування зони стиснення в центрі моделі зі значенням напружень до $-3719,7$ Па, що відображає етап пружного спротиву матеріалу в перші моменти контакту. Ізолінії мають симетричний концентричний характер. Етап б ($t = 0,00075$ с): на даному етапі спостерігається різке зростання напружень у центральній зоні до значення -4994 Па, що майже досягає заданої межі міцності вогнезахисного покриву (5000 Па). Такий рівень напруженого стану вказує на граничну стійкість матеріалу до локального стискання. Водночас на графіку фіксується видалення окремих скінчених елементів, що інтерпретується як руйнування частини покриву, зокрема у верхній частині в зоні контакту з навантаженням. Це свідчить про перехід захисного покриву у фазу локального руйнування, яке є типовим для крихких пористих матеріалів, які не мають достатнього запасу пластичності.

Просторова форма напружень деформується, втрачаючи симетричність, що також підтверджує зміну механічної поведінки структури внаслідок розвитку тріщин або мікропорожнин.

Етап в ($t = 0,0015$ с): на цій стадії відзначається зниження пікових напружень до $-2686,5$ Па, що свідчить про перехід вогнезахисного матеріалу до фази часткового руйнування або про перерозподіл навантаження. Ймовірною причиною цього є втрата цілісності верхніх шарів, які, зазнавши руйнування на попередньому етапі, утворюють умовну підкладку для подальшого навантаження. Такий ефект характерний для пористих крихких матеріалів, коли зруйновані елементи частково поглинають або розсіюють енергію. Крім того, просторовий розподіл напружень демонструє розширення зон розтягувальних напружень, що свідчить про ускладнення тривимірного поля та зростання градієнтів напружень у межах досліджуваної області. Це підтверджує гіпотезу про активну взаємодію між зонами стискання та розтягування, що формує неоднорідну картину напруженого стану в матеріалі.

Етап ε ($t = 0,0020$ с): у порівнянні з попереднім етапом в, напруження дещо зростають і досягають значення – 2 813,7 Па, що свідчить про часткове відновлення реакції опору вцілілих ділянок захисного покритву. Просторовий розподіл напружень демонструє виражену радіальну симетрію, що узгоджується з характером локалізованого навантаження.

Водночас, аналогічно до рис. 3.3 г, фіксується руйнування центральної частини спученого покритву вогнезахисного матеріалу, де деформації вже досягли граничного рівня. Напруження перерозподіляються, концентруючись переважно у периферійній області, яка ще зберігає структурну цілісність.

Такий характер розподілу підтверджує прогресуюче руйнування з центру до країв, що є типовим для крихких пористих матеріалів при локальному вдавненні.

За результатами проведеного комп'ютерного моделювання встановлено залежність міцності на стискання утвореного пінококсу на поверхні спученого вогнезахисного покритву від співвідношення компонентного складу, що представлено на відповідному графіку (рис. 4.17).

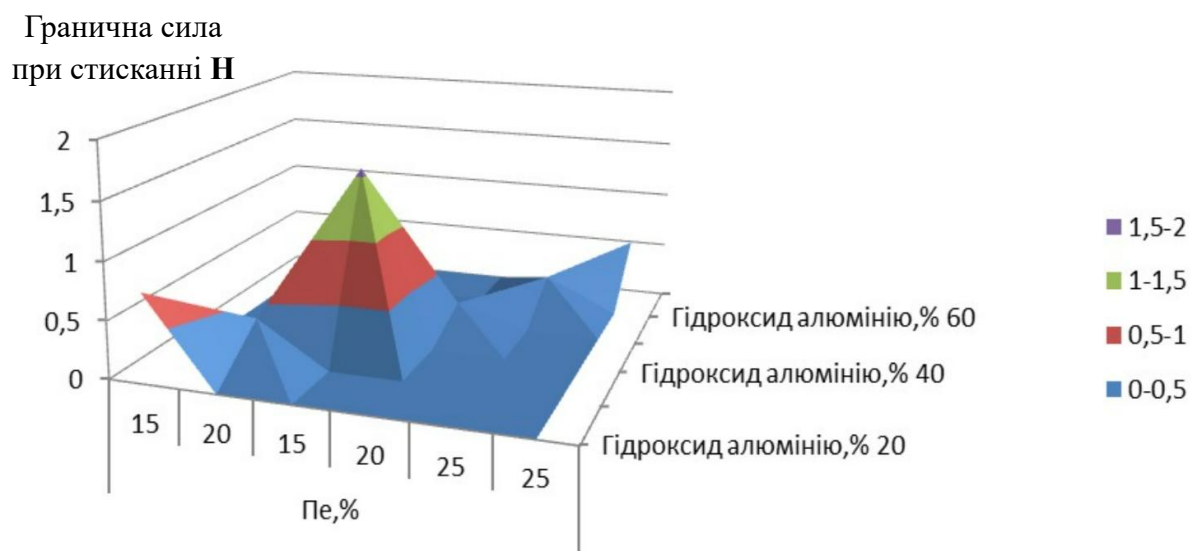


Рис. 4.17. Поверхня, яка відповідає залежності міцності на стискання утвореного пінококсу на поверхні спученого вогнезахисного покритву від співвідношення компонентного складу

Гранична сила при стисканні утвореного пінококсу на поверхні спученого вогнезахисного покриву, становить 1,57 Н, що відповідає міцності на стискання $f_{cm} = 5000 \text{ Па}$ (табл. 3.1) та відповідає критичному рівню механічного навантаження до моменту локального руйнування створеного матеріалу.

Таблиця 4.4.

Порівняння експериментально визначеної міцності спученого вогнезахисного покриву при стисканні з результатами чисельного моделювання для різних варіантів складу матеріалу

Покрив	Осно ва %	ПФА %	ПЕ %	AL (OH) ₃ %	Максимальне навантаження	Максимальне навантаження при моделюванні	Похи бка (%)
1.	100	25	15	20	80 г.	77,4 г	3,25
2.	100	25	20	20	50 г.	48,7 г	2,6
3.	100	25	15	40	160 г.	150,7 г	5,81
4.	100	25	20	40	60 г	58,3 г	2,83
5.	100	25	25	20	20 г.	19,5 г	2,5
6	100	25	25	40	40 г	39 г	2,5

У таблиці 4.4. наведено результати порівняння експериментально визначеної міцності спученого вогнезахисного покриву для металевих конструкцій при стисканні з результатами чисельного моделювання для різних варіантів складу матеріалу. Міцність оцінювалася за максимальним навантаженням, яке витримує спучений вогнезахисний покрив до втрати цілісності структури.

Аналіз отриманих результатів показує достатньо високу узгодженість між експериментальними даними та результатами моделювання. Відносна похибка визначення міцності становить від 2,5 % до 5,81 %.

При цьому встановлено, що зі збільшенням величини прикладеного навантаження спостерігається тенденція до зростання похибки між експериментальними та розрахунковими значеннями. Найбільше відхилення

(5,81 %) отримано для зразка, для якого зафіксовано найбільше експериментальне навантаження (160 г). Для зразків із меншими значеннями навантаження похибка знаходиться переважно в межах 2,5–3,25 %.

Отримані результати свідчать про те, що розроблена чисельна модель адекватно відтворює міцність спученого вогнезахисного покриття залежно від вмісту компонентів, а відносна розбіжність між експериментальними та розрахунковими значеннями не перевищує 6 %, що є прийнятним для інженерних досліджень.

Це дає можливість визначити найбільш оптимальний компонентний склад вогнезахисного покриття для металевих конструкцій на основі попередніх експериментальних даних без проведення експериментальних досліджень в повному обсязі, що значно пришвидшує даний процес та має значний економічний ефект.

У результаті чисельного моделювання напружено-деформованого стану спученого вогнезахисного покриття для металевих конструкцій на поверхні сталеві пластина у програмному середовищі ANSYS Explicit Dynamics було досягнуто таких основних результатів:

1. Створено детальну тривимірну геометричну модель захисної системи, яка враховує реальні розміри експериментального зразка, включаючи металеву пластину, вогнезахисний покрив та циліндричні вантажі. Така конфігурація дозволила максимально точно змоделювати умови локального навантаження на поверхню крихкого спученого покриття вогнезахисного матеріалу.

2. Математичні моделі матеріалів були адаптовані до особливостей експерименту: для вантажів – модель лінійно-еластичної поведінки з високим модулем пружності, для вогнезахисного покриття – модель з урахуванням крихкої поведінки, що дозволило ефективно відтворити процеси стиснення та потенційного руйнування матеріалу.

3. Граничні умови були задані з урахуванням реального експерименту – закріплення основи, гравітаційна дія вантажів та контактна взаємодія без

тертя, що забезпечує умови вільного занурення тіл у захисний шар без додаткових сил тертя.

4. Скінченно-елементна сітка була оптимізована: для вогнезахисного покритву – зменшений розмір елементів до 5 мм, що дозволило детально відстежити локальні напруження; для металевої основи – крупніші елементи (10 мм), що забезпечує баланс між точністю та ефективністю розрахунків.

5. Час моделювання (2 мс) обґрунтовано з урахуванням крихкості вогнезахисного покритву та необхідності уникнення динамічних ефектів. Це дало змогу простежити повну еволюцію напружено-деформованого стану – від моменту прикладення навантаження до досягнення граничного опору.

6. За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що вже на початковому етапі симуляції ($t = 0,00025$ с) зафіксовано формування локального осередку деформацій у центральній частині вогнезахисного покритву. У момент часу 0,00075 с спостерігається досягнення критичного рівня напружень – майже 5 000 Па, що призвело до локального руйнування верхньої зони покритву. Надалі, у процесі деформації, зафіксовано поступове зниження напружень та утворення зон розтягування, що є типовим для крихких пористих матеріалів при локальному вдавненні. На завершальному етапі ($t = 0,0020$ с) величина стискальних деформацій досягла 19,964 мм, що майже дорівнює початковій товщині покритву (20 мм), підтверджуючи повну втрату його несучої здатності в результаті дії навантаження у вигляді вантажів загальною масою 160 г.

7. Встановлено, що гранична сила при стисканні утвореного пінококсу становить 1,57 Н, що відповідає міцності на стискання $f_{cm} = 5000$ Па. Це значення є критичним для руйнування структури матеріалу, сформованого на поверхні металевої пластини під тепловим впливом.

На основі отриманих результатів визначено оптимальний компонентний склад вогнезахисного покритву для металевих конструкцій, 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 покритву. Таким чином, комп'ютерне моделювання підтвердило ефективність розробленого підходу до аналізу поведінки спученого покритву вогнезахисного матеріалу під локальним навантаженням та дало змогу визначити критичні параметри міцності, які необхідні для подальшого вдосконалення захисних покриттів для металевих конструкцій.

4.5. Порівняльний аналіз пенетраційного методу та методу розподіленого навантаження при визначенні міцності пінококсу вогнезахисного покритву для металевих конструкцій.

Оцінювання механічної міцності спученого шару реактивних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій є ключовим етапом аналізу їхньої реальної ефективності, оскільки саме збереження цілісності пінококсу визначає тривалість теплозахисної дії покритву за умов пожежного впливу.

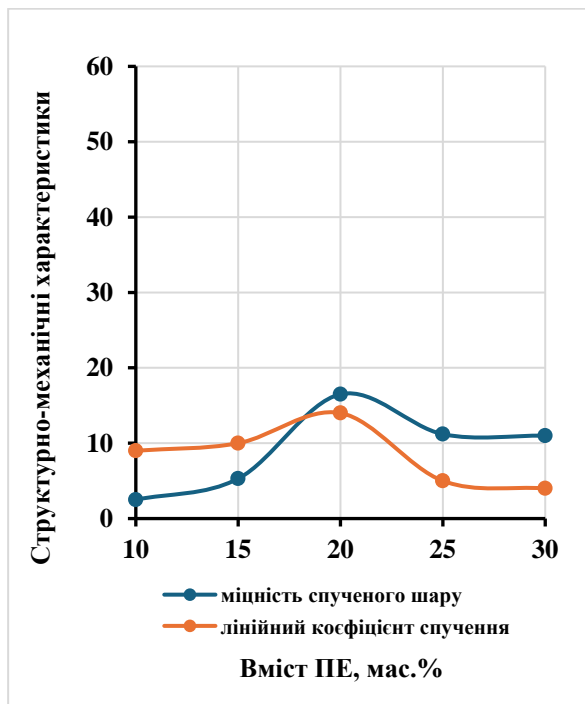
Разом з тим, результати визначення міцності істотно залежать від застосованого експериментального підходу, зокрема від характеру прикладеного навантаження та площі контакту з поверхнею спученого шару.

У даному розділі здійснено порівняльний аналіз двох принципово різних методів визначення механічної міцності пінококсу реактивних вогнезахисних покриттів: пенетраційного методу, що ґрунтується на локальному інденторному навантаженні та методу розподіленого навантаження із використанням стандартизованих щілинних вантажів.

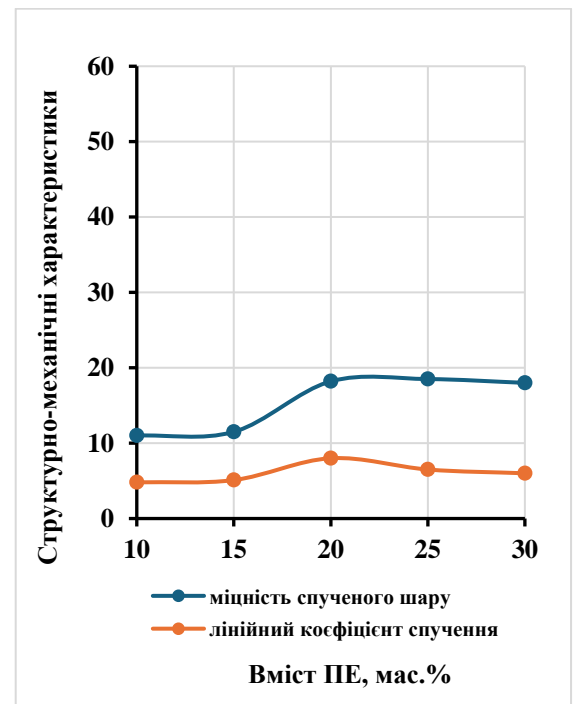
З метою об'єктивної оцінки впливу методу випробування на характер отриманих результатів проаналізовано експериментальні дані, представлені у вигляді поверхонь відгуку та графічних залежностей міцності спученого шару в функції вмісту ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ за фіксованої концентрації ПФА (25 мас.%).

Такий підхід дозволяє зіставити чутливість кожного з методів до змін компонентного складу реактивної системи, виявити принципові відмінності у характері формування механічної стійкості пінококсу та оцінити репрезентативність отриманих результатів щодо умов реальної експлуатації вогнезахисних покривів металевих конструкцій.

На рис. 4.18. - 4.19. представлено залежності механічної міцності спученого шару та лінійного коефіцієнта спучення, визначених методом пенетрації та методом із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів, від вмісту ПЕ у складі вогнезахисного покриття при концентрації гідроксиду алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$ 20 мас.% (а) та 40 мас.% (б).



а)



б)

Рис. 4.18. Залежність міцності спученого шару та лінійного коефіцієнта спучення методом пенетрації в залежності вмісту ПЕ при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 20 мас. % (а) та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас. % (б).

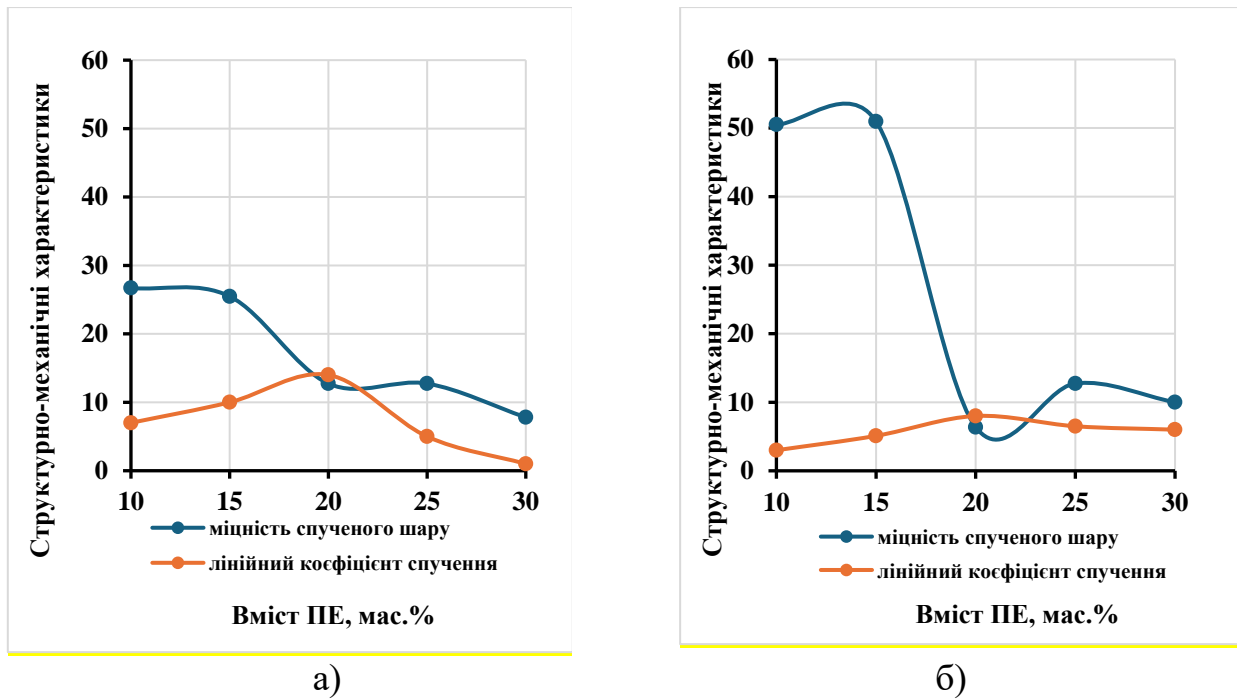


Рис. 4.19. Залежність міцності спученого шару та лінійного коефіцієнта спучення методом із застосуванням стандартизованих щільних вантажів в залежності вмісту ПЕ у складі вогнезахисного покриття при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 20 мас. % (а) та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас. % (б).

З метою об'єктивної оцінки впливу методу випробування на характер та достовірність отриманих результатів було проаналізовано експериментальні дані, представлені у вигляді поверхонь відгуку та графічних залежностей міцності спученого шару в функції вмісту ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ за фіксованої концентрації ПФА – 25 мас.%. Такий підхід дозволяє не лише порівняти абсолютні значення міцності, отримані різними методами, але й простежити принципові відмінності у чутливості методів до змін компонентного складу реактивної системи.

Аналіз графіків показує, що пенетраційний метод характеризується вираженою кореляцією між лінійним коефіцієнтом спучення та вимірною міцністю шару: зі зростанням ступеня спучення спостерігається і зростання показників міцності.

Така залежність зумовлена локальним характером навантаження, за якого індентор взаємодіє переважно з верхніми, найбільш пористими

ділянками пінококсу. У результаті пенетраційний метод фактично відображає опір локальному пробиттю, а не реальну несучу здатність усього спученого шару, що призводить до переоцінки міцності для систем із високим коефіцієнтом спучення.

Натомість метод із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів демонструє інший характер залежностей: зі збільшенням вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ міцність спученого шару суттєво зростає навіть за зменшення лінійного коефіцієнта спучення.

Це свідчить про формування більш щільного та механічно стабільного пінококсого каркасу, що рівномірно сприймає навантаження по всій площі контакту. Саме такий характер поведінки є більш наближеним до умов реальної експлуатації вогнезахисних покривів, коли спучений шар зазнає дії розподіленого тиску від власної ваги, потоків гарячих газів та механічних впливів під час пожежі.

Отже, порівняльний аналіз підтверджує, що метод пенетрації доцільно застосовувати переважно для відносної або попередньої оцінки структурної неоднорідності пінококсу, тоді як метод стандартизованих щілинних вантажів є більш репрезентативним для кількісного визначення механічної міцності спученого шару. Саме тому метод розподіленого навантаження обґрунтовано обрано як пріоритетний для подальшої стандартизації та практичного використання при оцінюванні ефективності реактивних вогнезахисних покривів металевих конструкцій.

На рис. 4.20 наведено поверхні відгуку залежності міцності спученого шару, визначеної методом пенетрації (а) та методом із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів (б), від вмісту ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ за фіксованого вмісту ПФА – 25 мас. %.

Аналіз наведених поверхонь відгуку дає змогу кількісно порівняти характер зміни міцності пінококсу залежно від складу покриву та обґрунтувати доцільність застосування кожного з досліджуваних методів.

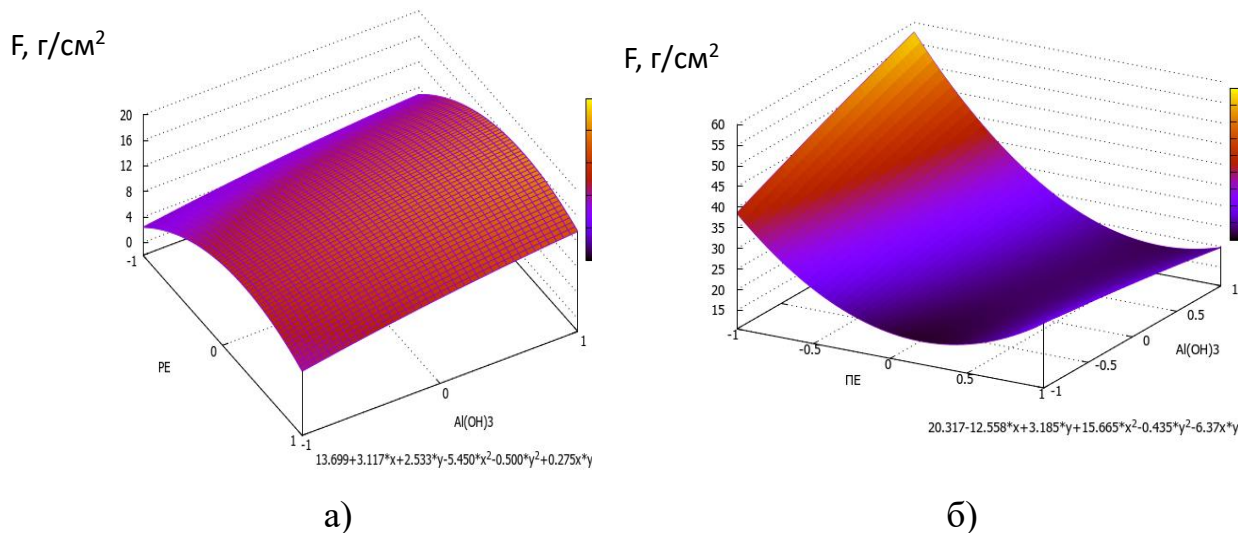


Рис. 4.20. Поверхні відгуку залежності міцності спученого шару, визначеної методом пенетрації (а) та методом із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів (б), від вмісту ПЕ та $Al(OH)_3$ за фіксованого вмісту ПФА – 25 мас. %.

Наведені експериментальні дані наочно демонструють принципову різницю між результатами визначення міцності спученого шару, отриманими пенетраційним методом та методом стандартизованих щілинних вантажів.

За результатами пенетраційних випробувань, значення міцності пінококсу перебувають у відносно вузькому діапазоні – приблизно від 5,3 до 18,5 г/см² залежно від співвідношення ПЕ та $Al(OH)_3$. Зі збільшенням вмісту $Al(OH)_3$ при фіксованому ПЕ спостерігається поступове зростання міцності, однак абсолютні значення залишаються низькими. Це пов'язано з особливістю пенетраційного методу: індентор з малою площею контакту (\varnothing 5 мм) викликає локальне пробиття верхнього шару пінококсу, не залучаючи до роботи середні та нижні зони спученої структури. У результаті вимірюється радше локальна опірність поверхневого шару, ніж інтегральна механічна міцність всього коксового каркасу.

Натомість результати, отримані методом стандартизованих щілинних вантажів, істотно відрізняються як за абсолютними значеннями, так і за характером залежностей. Міцність спученого шару, визначена за критичною

масою руйнування, змінюється в значно ширшому діапазоні – від 6,37 до 50,96 г/см². Для композицій з низьким вмістом ПЕ (15 мас. %) та підвищеним вмістом Al(OH)₃ (40 мас. %) зафіксовано максимальні значення міцності – близько 51 г/см², що у 4–7 разів перевищує результати пенетраційного методу для аналогічних складів. Це свідчить про формування жорсткого та структурно стабільного пінококсового каркасу, армованого неорганічним оксидним залишком Al₂O₃.

Кардинальна розбіжність між двома методами пояснюється принципово різною схемою навантаження. Пенетраційний тест створює точкове напруження з високою концентрацією деформацій, що робить його надзвичайно чутливим до локальних дефектів і нерівномірності спучення. Метод зі щільними вантажами, навпаки, забезпечує розподілене статичне навантаження на значну площу поверхні пінококсу, імітуючи реальні умови дії ваги продуктів горіння, осаду або механічного тиску під час пожежі. Завдяки цьому до роботи залучається вся товща спученого шару, а отримані значення відображають його реальну несучу здатність.

З метою кількісного зіставлення результатів, отриманих пенетраційним методом та методом розподіленого навантаження, доцільно використати безрозмірний коефіцієнт співвідношення методів K , який визначається як відношення більшого значення питомої міцності пінококсового шару до меншого:

$$K = \frac{\max(\sigma_{\text{розп}}, \sigma_{\text{пен}})}{\min(\sigma_{\text{розп}}, \sigma_{\text{пен}})} \quad (4.3.)$$

де $\sigma_{\text{розп}}$ – питома міцність спученого шару, визначена методом розподіленого статичного навантаження із застосуванням стандартизованих щільних вантажів, г/см²;

$\sigma_{\text{пен}}$ – питома міцність пінококсу, визначена пенетраційним методом при локальному інденторному навантаженні, г/см².

Запропонований коефіцієнт є безрозмірним параметром, що характеризує ступінь розбіжності між результатами двох методів, незалежно від того, який із них дає більше значення. Такий підхід дозволяє уникнути некоректної інтерпретації випадків, коли один із методів дає локально завищені або занижені результати. Його використання дозволяє не лише зіставити абсолютні значення міцності, але й кількісно оцінити ступінь розбіжності між методами, зумовлений відмінностями у схемі прикладання навантаження.

Фізичний зміст коефіцієнта K полягає у відображенні різниці між локальною та інтегральною реакцією пінококсової структури на механічний вплив. Пенетраційний метод створює точкове навантаження з високою концентрацією напружень у зоні контакту індентора з поверхнею матеріалу, внаслідок чого вимірюється переважно опір локальному пробиттю верхніх, найбільш пористих шарів пінококсу. Натомість метод розподіленого навантаження передбачає прикладання сили на значну площу поверхні спученого шару, що забезпечує залучення до деформації всієї товщі коксового каркасу.

У зв'язку з цим коефіцієнт K завжди набуває значень $K \geq 1$ і може змінюватися залежно від характеру структури пінококсу та співвідношення компонентів реактивної системи:

- при $K > 1$ (2–5) спостерігається помірна розбіжність, зумовлена структурною неоднорідністю та пористістю пінококсу;
- при $K \approx 1$ обидва методи дають близькі значення, що характерно для структур із відносно рівномірною щільністю та невисокою пористістю;
- при $K > 5$ значення суттєво відрізняються, що свідчить про виражену різницю між локальною та інтегральною міцністю та формування просторово неоднорідного коксового каркасу.

Таким чином, коефіцієнт співвідношення методів K є зручним інструментом для кількісної інтерпретації відмінностей між двома експериментальними підходами та дозволяє оцінити ступінь відповідності

результатів пенетраційного тесту реальній несучій здатності пінококсового шару. Використання цього параметра забезпечує можливість системного порівняння різних рецептур реактивних покривів і може бути застосоване для подальшої стандартизації методів оцінювання механічної міцності спучених теплоізоляційних шарів.

Для кількісної оцінки відмінностей між результатами визначення механічної міцності пінококсового шару, отриманими пенетраційним методом та методом розподіленого навантаження, було виконано розрахунок коефіцієнта співвідношення методів K для всіх досліджених композицій реактивного покриву (Табл. 4.5). Розрахунок здійснювали на основі експериментальних значень питомої міцності, отриманих для різних співвідношень компонентів системи ПФА-ПЕ- $Al(OH)_3$ за фіксованого вмісту поліфосфату амонію (25 мас.%).

Таблиця 4.5.

Розрахунок коефіцієнту співвідношення методів

ПЕ	$Al(OH)_3$	$\sigma_{розпод.}$ (г/см ²)	$\sigma_{пенетр.}$ (г/см ²)	K
10	20	26,7	2,5	10,68
15	20	25,478	5,3	4,81
20	20	12,739	16,5	1,29
25	20	12,739	11,2	1,14
30	20	7,8	11	1,41
10	40	5,5	11	2,00
15	40	50,955	11,5	4,43
20	40	6,3694	18,2	2,86
25	40	12,739	18,5	1,45
30	40	10	18	1,80

Отримані результати показали, що значення коефіцієнта K змінюються у досить широкому діапазоні – від 1,14 до 10,68, що свідчить про суттєву

залежність співвідношення результатів двох методів від компонентного складу реактивної системи. Середнє значення коефіцієнта для всього масиву експериментальних даних становить:

$$\bar{K} = 3,19$$

що означає, що в середньому результати визначення міцності пінококсового шару, отримані двома методами, відрізняються приблизно у 3,2 рази.

Найбільша різниця між методами зафіксована для композиції з вмістом ПЕ 10 мас.% та $\text{Al}(\text{OH})_3$ 20 мас.%, для якої коефіцієнт співвідношення становить:

$$K = 10,68,$$

що свідчить про більш ніж десятикратну різницю між значеннями міцності, отриманими різними методами. Така значна розбіжність пояснюється особливостями пенетраційного тесту, який через малу площу контакту індентора реєструє переважно локальний опір поверхневого шару пінококсу, тоді як метод розподіленого навантаження залучає до деформації весь об'єм спученого коксового каркасу.

Для композицій з підвищеним вмістом гідроксиду алюмінію (40 мас.%) значення коефіцієнта K загалом є нижчими та змінюються в межах 1,45-4,43. Це пов'язано з формуванням більш щільної неорганічно армованої структури пінококсу, в якій механічна стійкість розподіляється більш рівномірно по всій товщині шару. У таких системах різниця між локальною та інтегральною міцністю зменшується, що призводить до зближення результатів двох методів.

Загалом отримані результати підтверджують, що коефіцієнт співвідношення методів K є інформативним параметром для кількісного аналізу відмінностей між пенетраційним методом та методом розподіленого навантаження. Значні варіації цього показника відображають вплив структури

пінококсу, пористості та ступеня мінерального армування на характер механічної відповіді спученого шару. При цьому стабільно більші значення міцності, отримані методом розподіленого навантаження, свідчать про його вищу репрезентативність при оцінюванні реальної несучої здатності коксового шару в умовах пожежного впливу.

Отримані значення коефіцієнта співвідношення методів K можуть бути використані не лише для порівняння результатів різних експериментальних методик, але й для якісної оцінки структури сформованого пінококового шару (Табл. 4.6). Оскільки пенетраційний метод характеризує переважно локальну опірність поверхневого шару пінококсу, тоді як метод розподіленого навантаження відображає інтегральну несучу здатність усієї пористої структури, співвідношення між цими величинами опосередковано відображає ступінь структурної зв'язаності коксового каркасу.

Таблиця 4.6.

Розрахунок різниці між методами

ПЕ	Al	Δ (г/см ²)
10	20	24,2
15	20	20,18
20	20	3,76
25	20	1,54
30	20	3,2
10	40	5,5
15	40	39,46
20	40	11,83
25	40	5,76
30	40	8

Середня різниця: $\bar{\Delta} = 12,34$ г/см²

Тобто в середньому результати двох методів відрізняються приблизно на 12,3 г/см².

У випадку формування добре розвиненого та просторово зв'язаного пінококсового каркасу механічне навантаження передається через систему перегородок і пористих комірок по всій товщині шару. За таких умов метод розподіленого навантаження залучає до роботи значно більший об'єм матеріалу, що призводить до суттєвого зростання вимірних значень міцності. Відповідно коефіцієнт K набуває значень, що перевищують одиницю, а інколи досягає значень 4-10, як це спостерігається для композицій із низьким вмістом ПЕ та підвищеним вмістом гідроксиду алюмінію.

Таким чином, коефіцієнт K може розглядатися як узагальнений показник структурної цілісності пінококсового шару, який відображає співвідношення між локальною міцністю поверхні та інтегральною несучою здатністю пористого каркасу. Зростання значень цього параметра свідчить про підвищення різниці між локальною та інтегральною реакцією шару на механічне навантаження, тоді як значення, близькі до 1, характерні для більш однорідних систем.

Отже, використання коефіцієнта співвідношення методів дозволяє не лише кількісно зіставляти результати різних методик визначення міцності, але й отримати додаткову інформацію про характер формування та механічну стабільність пінококсової структури реактивного покриття.

Аналіз експериментальних даних дозволив встановити суттєві кількісні відмінності між результатами визначення механічної міцності пінококсового шару, отриманими пенетраційним методом та методом розподіленого статичного навантаження. Найбільша різниця між значеннями, визначеними різними методами, спостерігається для композиції з оптимальним співвідношенням компонентів реактивної системи, що відповідає вмісту пентаеритриту 15 мас.% та гідроксиду алюмінію 40 мас.%.

Для даного складу питома міцність пінококсового шару, визначена методом розподіленого навантаження із застосуванням стандартизованих

щілинних вантажів, становить $50,96 \text{ г/см}^2$, тоді як значення, отримане пенетраційним методом, становить $11,5 \text{ г/см}^2$. Відповідно коефіцієнт співвідношення методів для цієї композиції дорівнює:

$$K = 4,43$$

що свідчить про більш ніж чотириразову розбіжність між значеннями міцності, визначеними різними методами. Така різниця пояснюється тим, що при розподіленому навантаженні до деформації залучається вся товща спученого шару, тоді як пенетраційний метод фіксує лише локальний опір пробиттю поверхневих зон пінококсу.

Отримані результати демонструють, що відмінності між методами визначення міцності пінококсу можуть досягати порядку величини, що підтверджує принципову залежність результатів механічних випробувань від характеру прикладеного навантаження. Це ще раз підкреслює необхідність використання методів, які максимально наближені до реальних умов експлуатації реактивних покривів під час пожежі. У цьому контексті метод розподіленого статичного навантаження є більш репрезентативним, оскільки він відображає інтегральну несучу здатність пінококсого каркасу та його здатність протистояти механічним впливам у реальних умовах пожежного середовища.

У результаті проведеного порівняльного аналізу пенетраційного методу та методу розподіленого статичного навантаження при визначенні механічної міцності пінококсого шару реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій встановлено принципові відмінності між цими підходами як за характером отриманих результатів, так і за їх фізичною інтерпретацією.

Показано, що результати визначення міцності пінококсу суттєво залежать від схеми прикладання навантаження та площі контакту навантажувального елемента з поверхнею спученого шару. Пенетраційний метод, який базується на локальному інденторному навантаженні, характеризує переважно опір пробиттю поверхневих зон пінококсу та є

чутливим до локальних дефектів, нерівномірності спучення і неоднорідності структури. У зв'язку з цим він не завжди відображає реальну несучу здатність усього спученого шару.

Метод розподіленого навантаження із застосуванням стандартизованих щільних вантажів забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження по поверхні пінококсу та залучає до деформації весь об'єм сформованого коксового каркасу. Завдяки цьому отримані значення міцності більш адекватно характеризують інтегральну механічну стійкість спученого шару.

Кількісне порівняння результатів двох методів виконано шляхом введення безрозмірного коефіцієнта співвідношення, який дозволяє оцінити ступінь розбіжності між значеннями міцності, отриманими різними експериментальними підходами. Встановлено, що значення коефіцієнта K для досліджених композицій змінюються в широкому діапазоні 1,14-10,68, а його середнє значення становить близько 3,19. Це свідчить про те, що результати визначення міцності пінококсу можуть відрізнятися у декілька разів залежно від застосованої методики випробування.

Найбільша розбіжність між методами спостерігається для композицій із вираженою структурною неоднорідністю пінококсового каркасу, зокрема при низькому вмісті газоутворюючих компонентів (ПЕ 10 мас.% та $Al(OH)_3$ 20 мас.%), де коефіцієнт співвідношення досягає $K = 10,68$. Водночас для композицій з оптимальним співвідношенням компонентів ПФА:ПЕ: $Al(OH)_3 = 25:15:40$ мас.% встановлено значення $K = 4,43$, що свідчить про більш ніж чотириразову відмінність між результатами, отриманими різними методами, та підтверджує формування механічно стабільного пінококсового каркасу. Загалом отримані дані підтверджують суттєвий вплив структури пінококсу на характер механічної відповіді матеріалу та різну чутливість застосованих методів до оцінювання його міцності..

Отримані результати підтверджують, що пенетраційний метод доцільно використовувати переважно для попередньої або відносної оцінки структурної неоднорідності пінококсу, тоді як метод розподіленого навантаження є більш

репрезентативним для кількісного визначення механічної міцності спученого шару. Саме цей підхід дозволяє більш адекватно моделювати механічні впливи, що виникають у пінококсовому шарі під час пожежі, і тому може бути рекомендований як базовий метод оцінювання механічної стійкості реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.

4.6. Висновки до розділу 4.

Результати випробувань експлуатаційних характеристик розробленого вогнезахисного покриття для металевих конструкцій реактивного типу підтверджують його відповідність вимогам до матеріалів для захисту металевих конструкцій. Покриття характеризується слаболужним рівнем рН (8–9), швидким висиханням до ступеня 3 (40 хв) та високою адгезією до металу (1 бал за ISO 2409). Значення водопоглинання (4,1 % за 24 год) і стійкості до статичного впливу води (не менше 72 год) свідчать про достатню вологостійкість у базових умовах експлуатації. Відсутність дефектів після термічного навантаження при $+150 \pm 2$ °C підтверджує стабільність покриття за підвищених температур. Отримані значення покриттості (110 г/м^2) і фактичної витрати матеріалу ($3,51 \text{ кг/м}^2$) обґрунтовують необхідність формування товстошарового реактивного покриття для забезпечення заданої вогнезахисної ефективності.

Розроблено та експериментально апробовано відтворюваний метод оцінювання механічної міцності пінококсового шару із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів. Метод передбачає ступінчасте збільшення навантаження з кроком 10 г та витримкою 5 с на кожному етапі до моменту фіксації продавлювання або руйнування шару, з подальшим перерахунком критичного навантаження у значення питомої міцності σ (г/см^2) з урахуванням площі контакту. Запропонований підхід забезпечує кількісне визначення граничної несучої здатності пінококсу та більш адекватно відтворює характер розподіленого навантаження, притаманного умовам

реальної пожежної дії. У даній роботі зазначений метод вперше застосовано для оцінювання механічної міцності пінококсу водно-дисперсійних реактивних покривів на основі стирол-акрилової дисперсії.

Підвищення концентрації $\text{Al}(\text{OH})_3$ до 40 мас.% зумовлює зміщення балансу системи в бік зростання механічної міцності та зниження інтенсивності спучення, що пов'язано з формуванням жорсткого оксидного каркасу та ефектом структурного армування. У межах проведеного дослідження оптимальним співвідношенням компонентів визначено ПФА : ПЕ : $\text{Al}(\text{OH})_3 = 25 : 15 : 40$ мас.%.

Отримані результати підтверджують суттєву залежність оцінюваної міцності від характеру прикладеного навантаження та площі контакту, що обґрунтовує необхідність подальшого порівняльного аналізу пенетраційного методу та методу розподіленого статичного навантаження як більш репрезентативного для оцінювання механічної стійкості пінококсів шару.

Створено детальну тривимірну геометричну модель захисної системи, яка враховує реальні розміри експериментального зразка, включаючи металеву пластину, вогнезахисне покриття та циліндричні вантажі. Така конфігурація дозволила максимально точно змоделювати умови локального навантаження на поверхню крихкого спученого покриття вогнезахисного матеріалу.

За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що вже на початковому етапі симуляції ($t = 0,00025$ с) зафіксовано формування локального осередку деформацій у центральній частині вогнезахисного покриття. У момент часу $0,00075$ с спостерігається досягнення критичного рівня напружень – майже $5\,000$ Па, що призвело до локального руйнування верхньої зони покриття. Надалі, у процесі деформації, зафіксовано поступове зниження напружень та утворення зон розтягування, що є типовим для крихких пористих матеріалів при локальному вдавненні. На завершальному етапі ($t = 0,0020$ с) величина стискальних деформацій досягла $19,964$ мм, що майже дорівнює початковій товщині покриття (20 мм), підтверджуючи повну

втрату його несучої здатності в результаті дії навантаження у вигляді вантажів загальною масою 160 г.

У результаті проведеного порівняльного аналізу пенетраційного методу та методу розподіленого статичного навантаження при визначенні механічної міцності пінококсового шару реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій встановлено принципові відмінності між цими підходами як за характером отриманих результатів, так і за їх фізичною інтерпретацією.

Кількісне порівняння результатів двох методів здійснено шляхом введення безрозмірного коефіцієнта співвідношення, який визначається як відношення більшого значення питомої міцності до меншого та дозволяє оцінити ступінь розбіжності між результатами, отриманими різними експериментальними підходами. Встановлено, що значення коефіцієнта K для досліджених композицій змінюються в широкому діапазоні 1,14–10,68, а його середнє значення становить 3,19. Це свідчить про те, що результати визначення механічної міцності пінококсу можуть суттєво відрізнятися залежно від застосованої методики випробування.

Отримані результати підтверджують, що пенетраційний метод доцільно використовувати переважно для попередньої або відносної оцінки структурної неоднорідності пінококсу, тоді як метод розподіленого навантаження є більш репрезентативним для кількісного визначення механічної міцності спученого шару. Саме цей підхід дозволяє більш адекватно моделювати механічні впливи, що виникають у пінококсовому шарі під час пожежі, і тому може бути рекомендований як базовий метод оцінювання механічної стійкості реактивних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене науково-практичне завдання, яке спрямоване на підвищення достовірності оцінювання ефективності вогнезахисних покриттів 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 покриттів металевих конструкцій.

В результаті виконання поставлених у роботі наукових завдань, одержано такі основні результати:

1. В результаті аналізу сучасного стану вогнезахисту металевих будівельних конструкцій розглянуто проблематику напряму дисертаційного дослідження. Аналіз наукових джерел засвідчив відсутність уніфікованого методу, що адекватно відтворює умови реальної експлуатації, оскільки більшість підходів ґрунтується на локальних інденторних або стискальних випробуваннях і не забезпечує інтегральної оцінки міцності пінококсу. Обґрунтовано доцільність застосування методів із розподіленим статичним навантаженням, зокрема методу щілинних вантажів, як найбільш репрезентативного напряму подальших експериментальних досліджень.

2. Встановлено закономірний вплив реактивоздатних компонентів (ПФА, ПЕ, $Al(OH)_3$) на вогнезахисну ефективність і експлуатаційні властивості стирол-акрилових покриттів для металевих конструкцій. Вперше розроблено комбінована композиція складу вогнезахисного покритву ПФА:ПЕ: $Al(OH)_3$ = 25:15:40 мас.%, яка 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.

3. Встановлено оптимальне співвідношення ПФА : ПЕ : $Al(OH)_3$ = 25 : 15 : 40 мас.% для стирол-акрилових покривів для металевих конструкцій, що забезпечує збалансоване поєднання достатнього спучення та структурної стабільності шару в умовах впливу пожежі. Удосконалено склад реактивної системи шляхом комбінованого використання ПФА, ПЕ та $Al(OH)_3$, що підвищує механічну міцність 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 П1, зменшення димоутворення на 60–65 % (до групи Д2). Розроблений покрив за показниками вогнезахисної ефективності не поступається промисловим аналогам і забезпечує межу вогнестійкості R30–R40 при товщині шару 1–2 мм.

4. У результаті чисельного моделювання в ANSYS Explicit Dynamics відтворено напружено-деформований стан спученого вогнезахисного покриву для металевих конструкцій під локальним навантаженням та визначено його граничні міцнісні характеристики. Вперше розроблено модель захисної системи, 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 для металевих конструкцій при локальному навантаженні та визначити його граничні міцнісні характеристики. Встановлено, що при досягненні напружень близько 5000 Па (гранична сила 1,57 Н) відбувається локальне руйнування пінококсу, а деформації досягають 19,964 мм, що відповідає повній втраті несучої здатності шару.

5. Удосконалено метод кількісного визначення механічної міцності пінококсів шару вогнезахисних покривів для металевих конструкцій шляхом теоретичного обґрунтування та експериментального підтвердження застосування розподіленого навантаження стандартизованими щілинними вантажами, який, на відміну від існуючого пенетраційного методу, 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). Найбільша розбіжність між методами спостерігається для складу з ПЕ 10 мас.% та $\text{Al}(\text{OH})_3$ 20 мас. %, де різниця між отриманими значеннями перевищує порядок величини ($K = 10,68$). Це підтверджує, що пенетраційний метод характеризує переважно локальний опір пробиттю поверхневих шарів пінококсу, тоді як метод розподіленого навантаження відображає інтегральну несучу здатність усієї пористої структури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила з вогнезахисту. Наказ МВС України від 26.12.2018 № 1064. URL: zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-19#Text (дата звернення: 10.06.2021).
2. Коровнікова Н. І., Олійник В. В. Аналіз вогнезахисту матеріалів на основі деревини. *Пожежна безпека*. Львів. 2020. № 48. С. 71–75.
3. Терлецька І. М., Черномаз Н. Ю. Підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій. *Матеріали VII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології»*. Тернопіль. 2020. С. 197–197.
4. Okba S. H., Helmy A. I. I., Morsy K. M. M. Fire protection of reinforced concrete columns retrofitted using advanced composite materials. *10th International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering*. Cairo. 2003. P. 685–694.
5. Пазен О. Ю., Вовк С. Я., Башинський О. І., Пелешко М. З. Визначення ефективності вогнезахисного покриття на основі поліметилфенілсилоксану для сталевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*. Львів. 2018. № 32. С. 55–62.
6. Вахітова Л. Н., Калафат К. В. Вогнезахист сталевих конструкцій. Методичні рекомендації. Київ. 2013. 150 с.
7. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 162. Article 105712.
8. Артеменко В. В., Яковчук Р. С., Міллер О. В., Харчук А. І. Підвищення межі вогнестійкості металевих конструкцій вогнезахисними речовинами. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів. 2015. Т. 25. № 5. С. 178–183.
9. Трифонова О. Н. Оптимізація вогнезахисту металевих конструкцій. *Пожежовибухобезпека*. 2013. Т. 22. № 1. С. 58–62.

10. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій. Навчальний посібник. Львів. 2010. 176 с.
11. Вахітова Л. Н., Калафат К. В. Основи вогнезахисту сталевих конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. Київ. 2015. № 2. С. 23–27.
12. Пушкаренко А. С., Васильченко О. В., Квітковський Ю. В., Миргород О. В. Вогнезахисне оброблення будівельних матеріалів і конструкцій. Харків. 2011. 176 с.
13. Вахітова Л. Н., Калафат К. В. Аналітичний огляд засобів вогнезахисту сталевих конструкцій. Київ. 2020. 200 с.
14. Tramm H., Clar C., Kuhnel P., Schuff W. Intumescent composition. Пат. US 2106938. США. Опубл. 01.02.1938.
15. Vandersall H. L. Intumescent coating systems. Their development and chemistry. *Journal of Fire and Flammability*. 1971. Vol. 2. P. 97–140.
16. Pelz A., Jilek F. Fireproofing paint composition. Пат. CA1058455A. Канада. МПК C09K 21/14. Заявник Chemie Linz AG. № CA223406A. Заявл. 25.03.1975. Опубл. 17.07.1979. Пріоритет 29.03.1974.
17. Simonsen M., Abadie C. Polyisocyanate-based intumescent coating. Пат. US20160222226A1. США. МПК C09D 5/18, C09D 175/04. № US 15/018743. Заявл. 08.02.2016. Опубл. 04.08.2016.
18. Intumescent coating composition. Пат. US10131800B2. США. МПК C09D 5/18, C09D 5/185, C08L 63/00. № US 14/902615. Заявл. 11.07.2014. Опубл. 20.11.2018.
19. Intumescent ceramic fire retardant coating containing intumescent ceramic particles. Пат. US7045080B2. США. МПК C09K 21/02, C09D 5/18. Заявник Barrier Dynamics LLC. № US 10/891985. Заявл. 15.07.2004. Опубл. 16.05.2006.
20. Nguyen D. T., Veinot D. E., Foster J. Inorganic intumescent fire protective coatings. Пат. US4888057. США. МПК C09D 5/18. № US07213116. Заявл. 29.06.1988. Опубл. 19.12.1989.

21. Thewes V., Hensel R. Composition for an intumescent fire protection coating, fire protection coating, its use and manufacturing process for an intumescent fire protection coating. Пат. US20140005298A1. США. МПК C09D 5/18. № US13695521. Заявл. 17.03.2011. Опубл. 02.01.2014.

22. Intumescent fire-retardant coating with ultra-high corrosion resistance and preparation method thereof. Пат. US12077679B2. США. МПК C09D 5/18. Опубл. 03.09.2024.

23. Pelz A., Jilek F. Intumescent coating materials. Пат. GB1592946A. Велика Британія. МПК C08J 9/04, C08G 63/52, C08G 63/682, C08J 9/10, C08K 5/00, C09D 5/18, C09K 21/10, C09K 21/12. Заявник British Industrial Plastics Ltd. № 4956776. Заявл. 27.11.1976. Опубл. 15.07.1981.

24. Huckstepp V. G., Lloyd-Lucas C. Intumescent coating compositions. Пат. GB2121056. Велика Британія. МПК C08J 9/32, C09D 5/18, C09D 163/00. № 8310699. Заявл. 20.04.1983. Опубл. 25.05.1983.

25. Swan M. D., Buckingham M. R. Intumescent fire protection coatings. Пат. GB2274459. Велика Британія. МПК C09D 5/18. № 9301271. Заявл. 22.01.1993. Опубл. 17.03.1993.

26. Green J. D., Allen W. Intumescent coating compositions. Пат. WO2005000975A1. Міжнародна патентна система. МПК C09D 5/18. № PCT/GB2004/002716. Заявл. 24.06.2004. Опубл. 06.01.2005.

27. Harden A., Velin P.-E. Intumescent coating and use thereof. Пат. WO2006096112A1. Міжнародна патентна система. МПК C09D 5/18. № PCT/SE2006/000266. Заявл. 01.03.2006. Опубл. 14.09.2006.

28. Breen C., Thompson S. Water based intumescent coating formulation especially suitable for structural steel components in civil engineering. Пат. US20100209645A1. США. МПК B32B 1/00, B32B 1/08, C09D 5/00, C09K 21/00, C09K 21/02. № 12596119. Заявл. 16.04.2008. Опубл. 19.08.2010.

29. Flame-retardant clear coatings for building panels. Пат. EP3631110A1. Європейський патент. МПК C09D 5/18, E04B 1/94. № EP18810699.0. Заявл. 31.05.2018. Опубл. 08.04.2020.

30. Simonsen M., Abadie C. Polyisocyanate-based intumescent coating. Пат. US20160222226A1. США. МПК C09D 5/18. № US15/018743. Заявл. 08.02.2016. Опубл. 04.08.2016.
31. Chen D. Preparation method of intumescent fire-retardant paint. Пат. CN106147412A. Китай. МПК C09D 123/08, C09D 5/18, C09D 7/12. № 102015000157125. Заявл. 05.04.2015. Опубл. 23.11.2016.
32. Liang W. Intumescent fire-resistant coating for steel structures and method of preparation. Пат. CN106065231A. Китай. МПК C09D 125/14, C09D 133/04, C09D 7/12, C09D 5/18. № 201410654123. Заявл. 17.11.2014. Опубл. 02.11.2016.
33. Berezovskyi A., Bychenko A., Koryl B., Saienko N. Fire protection of metal structures with inflating coatings (overview). *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. № 2 (6). С. 109–116. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/140>.
34. Wierzbicki M., Fernando J., Packard K., Miller K. Intumescent material for fire protection. Пат. US20110136937A1. США. Опубл. 09.06.2011.
35. Dany F.-J., Wortmann J., Kandler J. Intumescent flame-retardant coating compositions. Пат. US4009137. США. МПК C09D 5/18. № 05527446. Заявл. 26.11.1974. Опубл. 22.02.1977.
36. Thewes V., Hensel R. Composition for an intumescent fire protection coating, fire protection coating, its use, and manufacturing process for an intumescent fire protection coating. Пат. US20140005298A1. США. МПК C09D 5/18. № US13/695521. Заявл. 17.03.2011. Опубл. 02.01.2014.
37. Butler R., Hope T. W., Kittle K. J. Intumescent coating composition. Пат. US10113071B2. США. МПК C09D 5/18. № US15/239856. Заявл. 16.07.2013. Опубл. 30.10.2018.
38. Intumescent coating composition. Пат. US20220145097A1. США. МПК C09D 5/18. Опубл. 12.05.2022.
39. Intumescent coating materials. Пат. GB1592946. Велика Британія. МПК C08J 9/04, C08G 63/52, C08G 63/682, C08J 9/10, C08K 5/00, C09D 5/18,

C09K 21/10, C09K 21/12. Заявник British Industrial Plastics Ltd. № 4956776. Заявл. 27.11.1976. Опубл. 15.07.1981.

40. Hilton S. L., Weinert R. J., Ziemer P. D. Intumescent coating compositions with improved char formation and fire resistance. Пат. WO2025063994A2. Міжнародна патентна система. МПК C09D 5/18, C09K 21/14. Заявник SWIMC LLC. № PCT/US2024/010800. Заявл. 09.01.2024. Опубл. 27.03.2025.

41. Intumescent coatings. Пат. WO2023201225A1. Міжнародна патентна система. МПК C09D 5/18, C09K 21/14. Опубл. 19.10.2023.

42. Green J. D., Allen W. Intumescent coating compositions. Пат. WO2005000975A1. Міжнародна патентна система. МПК C09D 5/18. № PCT/GB2004/002716. Заявл. 24.06.2004. Опубл. 06.01.2005.

43. Harden A., Velin P.-E. Intumescent coating and use thereof. Пат. WO2006096112A1. Міжнародна патентна система. МПК C09D 5/18. № PCT/SE2006/000266. Заявл. 01.03.2006. Опубл. 14.09.2006.

44. Composition for an intumescent fire protection coating, fire protection coating, its use and manufacturing process for an intumescent fire protection coating. Пат. US20140005298A1. США. Опубл. 02.01.2014.

45. Intumescent coating composition. Пат. SG11201600097TA. Сінгапур. МПК C09D 5/18. Заявник Akzo Nobel Coatings International B.V. № SG11201600097. Заявл. 11.07.2014. Опубл. 26.02.2016.

46. Intumescent coating compositions. Пат. EP1636318B2. Європейський патент. МПК C09D 5/18, C09D 5/185. № EP04745923.6. Заявл. 26.05.2004. Опубл. 14.03.2012.

47. Intumescent coating. Пат. WO2024171141A1. Міжнародна патентна система. МПК C09D 5/18, C09K 21/00, C09K 21/02. Заявл. 22.02.2024.

48. Intumescent coating compositions with improved char formation and fire resistance. Пат. EP4630507A2. Європейський патент. МПК C09D 5/18, C09K 21/14. Опубл. 15.10.2025.

49. Horrocks A. R., Price D. *Fire Retardant Materials*. Cambridge. 2001. 448 p.
50. Chou C. S., Lin S. H., Wang C. I. Preparation and characterisation of the intumescent fire retardant coating with a new flame retardant. *Advanced Powder Technology*. 2009. Vol. 20. P. 169–176.
51. Camino G., Costa L., Trossarelli L. Study of mechanism of intumescence in fire retardant polymers. Part II. Mechanism of action in polypropylene–ammonium polyphosphate–pentaerythritol mixtures. *Polymer Degradation and Stability*. 1984. Vol. 7. P. 25–31.
52. Pagella C., Raffaghello F., De Favery D. M. Differential scanning calorimetry of intumescent coatings. *Polymers Paint Colour Journal*. 1998. Vol. 188. № 4402. P. 16–18.
53. Вахітова Л. М., Калафат К. В., Дріжд В. Л., Таран Н. А. Хімічні рішення проблем вогнезахисту. *Наука та інновації*. Київ. 2015. Т. 11. № 6. С. 47–56.
54. Alongi J., Han Z., Bourbigot S. Intumescence. Tradition versus novelty. A comprehensive review. *Progress in Polymer Science*. 2015. Vol. 51. P. 28–73.
55. Puri R. G., Khanna A. S. Intumescent coatings. A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017. Vol. 14. № 1. P. 1–20.
56. Wang L., Dong Y., Zhang C., Zhang D. Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves. *Fire Technology*. 2015. Vol. 51. № 3. P. 627–643.
57. Калафат К., Вахітова Л. *Вогнезахисні рішення для сталевого будівництва*. Монографія. Київ. УЦСБ. 2023. 372 с.
58. Вогнезахисна фарба Ammokote MW-60 на водній основі. Офіційний сайт Ammokote. URL: <https://ammokote.com/uk/product/vognezahisna-farba-ammokote-mw-60-na-vodnij-osnovi/> (дата звернення: 10.06.2021).
59. Вогнезахисна фарба Defens. URL: <https://www.defens.ua/product/m/> (дата звернення: 10.06.2021).

60. Вогнезахисна фарба SteelMaster 600 WF. Сайт Welesgard. URL: <https://welesgard.com.ua/product/vohnezakhysna-farba-steelmaster-600wf/> (дата звернення: 10.06.2021).
61. PROMAPAINТ SC3. Вогнезахисна фарба для сталевих і бетонних конструкцій. Сайт Promat. URL: <https://www.promat.com/uk-ua/construction/produkti-ta-sistemi/produkti/intumescent-paints/promapaint-sc3/> (дата звернення: 10.06.2021).
62. Калафат К. В. Регламент робіт з вогнезахисту вогнезахисною речовиною HENSOTHERM 421 KS для сталевих будівельних конструкцій. Київ. 2020. URL: https://kovlargroup.com/wp-content/uploads/2022/11/hensotherm_421_reglament.pdf (дата звернення: 10.06.2021).
63. Вогнезахисний склад DEFENS M 120 для металоконструкцій. Сайт Euroservis. URL: <https://euroservis.com.ua/ua/ognezashchitnye-sostavy/ognezashchita-po-metallu-defens-m-120/> (дата звернення: 10.06.2021).
64. ЕНДОТЕРМ 170205. Вогнезахисне покриття на водній основі для металевих і дерев'яних конструкцій. Сайт Endoterm. URL: <https://www.endoterm.com.ua/product/endoterm-170205.php> (дата звернення: 10.06.2021).
65. Olsson E. O. L., Oğuz B., Mirzaei M., Jensen P. A., Dam-Johansen K., Dreyer J. A. Laboratory-scale screening of intumescent coatings. *Fire Safety Journal*. 2025. Vol. 156. Article 104436.
66. Oğuz B., Olsson E. O., Robson J., Dam-Johansen K., Dreyer J. A. Evaluating the impact of testing conditions on intumescent coatings fire performance. A comparison of laboratory-scale and industrial-scale experiments. *Fire Safety Journal*. 2025. Vol. 153. Article 104367.
67. Яковлєва Р. А., Попов Ю. В., Безуглий А. М., Шевцова О. Ю. Вплив фосфоровмісних антипіренів на горючість та процеси коксування вогнезахисних епоксидних композицій. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків. 2008. № 23. С. 230–236.

68. Nørgaard K. P., Dam-Johansen K., Català P., Kiil S. Investigation of char strength and expansion properties of an intumescent coating exposed to rapid heating rates. *Progress in Organic Coatings*. 2013. Vol. 76. № 12. P. 1851–1857.
69. Kandola B. K., Luangtriratana P., Duquesne S., Bourbigot S. The effects of thermophysical properties and environmental conditions on fire performance of intumescent coatings on glass fibre reinforced epoxy composites. *Materials*. 2015. Vol. 8. № 8. P. 5216–5237.
70. Scharrel B., Bartholmai M., Knoll U. Some comments on the use of cone calorimeter data. *Polymer Degradation and Stability*. 2005. Vol. 88. P. 540–547.
71. Beh J. H., Yew M. C., Yew M. K., Saw L. H. Fire protection performance and thermal behavior of thin film intumescent coating. *Coatings*. 2019. Vol. 9. № 8. Article 483.
72. Kwang Yin J. J., Yew M. C., Yew M. K., Saw L. H. Preparation of intumescent fire protective coating for fire rated timber door. *Coatings*. 2019. Vol. 9. № 11. Article 738.
73. Jeske H., Deppe B., Kruse D., Daniliuc A., Weichert C., Marutzky R. Thermomechanical behaviour of intumescent fire retardant coatings. *European Coatings Conference Fire Retardant Coatings*. 2012.
74. Vakhitova L., Kalafat K., Taran N., Bessarabov V. Порівняння амінів як газоутворювачів вогнезахисних композицій інтумесцентного типу. *Technologies and Engineering*. 2021. № 4. С. 69–80.
75. Lee J. S. *Investigation of water-based and solvent-based polymer binders on the fire protection performance and mechanical properties of intumescent coating*. Дис. ... PhD. Universiti Tunku Abdul Rahman. 2019. 118 p.
76. Vakhitov R. A., Kalafat K. V., Taran N. A., Bessarabov V. I., Vakhitova L. M. A selection of polymers for curing in industrial fire-resistant reactive coatings. *Chemical and Biopharmaceutical Technologies*. 2024. С. 106–116.

77. Hryhorenko O., Zolkina Y., Saienko N. V., Popov Y. V. Investigation of the effect of fillers on the properties of the expanded coke layer of epoxyamine compositions. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 539–546.

78. BASF. Product selection guide for architectural coatings. URL: https://www.basf.com/dam/jcr:ef3fca4b-5f26-37c8-95a7-1ce5b970c741/basf/www/global/documents/en/products-and-industries/architectural-coatings/Product_Selection_Guide_for_Architectural_Coatings.pdf (дата звернення: 10.06.2021).

79. Федін В., Твердохліб М., Гомеля М. Проблема утворення накипу в промислових системах водоохолодження та методи її запобігання. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»*. Київ. 2024. С. 215–220.

80. Владико О. О., Глоба Ю. А., Карімов Е. М., Маркуш Н. В., Кот А. Г., Гуріна Г. І. Перспективні екологічно чисті лакофарбові матеріали. *Бекетівські хімічні читання. Теорія та практика кризових ситуацій*. Харків. 2023. С. 161.

81. Правила з вогнезахисту. Наказ МВС України від 26.12.2018 № 1064. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1228-18#Text> (дата звернення: 10.06.2021).

82. Skripinets A., Gurina G., Nesterenko S., Druzhynin E. Hydrophobic coatings with predicted anti-icing properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499. P. 012020.

83. ДСТУ ISO 3696:2003. Вода для застосовування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння. Київ. Держстандарт України. 2003.

84. Saienko N., Demidov D., Popov Y., Bikov R., Butskiy V. Rheological properties of aqueous dispersion of styrene acrylate copolymer incorporating hollow microspheres and AEROSIL. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 03017.

85. Zheng P., Zhao H., Li J., Liu Q., Ai H., Yang R., Xing W. Recent advances in constructing new type of epoxy resin flame retardant system using ammonium polyphosphate. *Journal of Safety Science and Resilience*. 2024.

86. Yan J., Xu P., Zhang P., Fan H. Surface-modified ammonium polyphosphate for flame-retardant and reinforced polyurethane composites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 626. Article 127092.
87. Realinho V., Haurie L., Formosa J., Velasco J. I. Flame retardancy effect of combined ammonium polyphosphate and aluminium diethyl phosphinate in acrylonitrile-butadiene-styrene. *Polymer Degradation and Stability*. 2018. Vol. 155. P. 208–219.
88. Skripinets A., Saienko N., Hryhorenko O., Berezovskiy A. Development and evaluation of the possibility of using epoxyurethane mastic in railway transport. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 273–281.
89. Guo S., Xu J., Ni X. Synthesis, structures, and properties of a new pentaerythritol-derived flame retardant used in polyamide 66. *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. № 19. P. 12887–12897.
90. Tang B., Feng W., Guo J., Sun J., Zhang S., Gu X., Yang W. Hydrophobic modification of pentaerythritol and its application in fire-retardant coatings for steel structures. *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 138. Article 105391.
91. Yan L., Xu Z., Wang X., Deng N., Chu Z. Synergistic effects of aluminum hydroxide on improving the flame retardancy and smoke suppression properties of transparent intumescent fire-retardant coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2018. Vol. 15. P. 1357–1369.
92. Khalili P., Tshai K. Y., Hui D., Kong I. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 101–110.
93. Демідов Д. В., Саєнко Н. В., Буцька Л. М. Вдосконалення технології виробництва теплоізоляційного водно-дисперсійного полімерного покриття. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса. 2019. Вип. 76. С. 85–93.

94. Lee J. S. Investigation of water-based and solvent-based polymer binders on the fire protection performance and mechanical properties of intumescent coating. *Дис. ... PhD*. Universiti Tunku Abdul Rahman. 2019. 118 p.
95. Vakhitova L., Kalafat K., Plavan V., Bessarabov V., Taran N., Zagoriy G. Comparing the effect of nanoclays on the water-resistance of intumescent fire-retardant coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 111. № 6.
96. Білецький В. С. Факторне планування технологічних процесів на основі центрально-композиційних ротатабельних планів. Методичні вказівки. Харків. НТУ ХПІ. 2021. 35 с.
97. Bhattacharya S. Central composite design for response surface methodology and its application in pharmacy. *Response Surface Methodology in Engineering Science*. Rijeka. 2021. P. 1–19.
98. Волокита А. М., Селіванов В. Л. Основи теорії планування експерименту. Навчальний посібник. Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2022. 41 с.
99. Березовський А., Копил Б., Іщенко І., Саєнко Н. Вплив співвідношення вогнезахисних компонентів на вогнезахисну ефективність покривів металевих конструкцій на водній основі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7. № 2. С. 19–28.
100. Демідов Д. В. Вивчення впливу мінеральних наповнювачів на вогнезахисні характеристики водно-дисперсійних лакофарбових покривів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2018. № 182. С. 37–43.
101. Березовський А. І., Маладика І. Г., Гвоздь В. М. Визначення залежності коефіцієнта спучування та характеристик міцності спученого шару вогнезахисних вібростійких покривів для металевих конструкцій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. Черкаси. 2013. № 1. С. 117–122.

102. Fire resistance LOI guide. URL: <https://www.specialchem.com/plastics/guide/fire-resistance-loi> (дата звернення: 10.06.2021).
103. Horrocks A. R., Tunc M., Price D. The burning behaviour of textiles and its assessment by oxygen-index methods. *Textile Progress*. 1989. Vol. 18. P. 1–205.
104. Younis A. A. Evaluation of the flammability and thermal properties of a new flame retardant coating applied on polyester fabric. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2016. Vol. 25. № 2. P. 161–169.
105. Kwang Yin J. J., Yew M. C., Yew M. K., Saw L. H. Preparation of intumescent fire protective coating for fire rated timber door. *Coatings*. 2019. Vol. 9. № 11. Article 738.
106. Luangtriratana P., Kandola B. K., Duquesne S., Bourbigot S. Quantification of thermal barrier efficiency of intumescent coatings on glass fibre reinforced epoxy composites. *Coatings*. 2018. Vol. 8. № 10. Article 347.
107. Lim K. S., Bee S. T., Sin L. T., Tee T. T., Ratnam C. T., Hui D., Rahmat A. R. A review of application of ammonium polyphosphate as intumescent flame retardant in thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 84. P. 155–174.
108. Григоренко О. М., Саєнко Н. В., Золкіна Є. С., Липовий В. О. Оптимізація методу оцінки ефективності реактивних вогнезахисних покриттів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків. 2024. № 1 (39). С. 124–134.
109. Вахітов Р. А., Калафат К. В., Таран Н. А., Бессарабов В. І., Вахітова Л. М. Вибір полімерів для застосування в промислових вогнезахисних реактивних покриттів. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 2 (19). С. 106–116.
110. Данченко Ю. М., Обіженко Т. М., Саєнко Н. В., Андронов В. А. Дослідження вогнезахисної ефективності епоксиполімерного покриття ANTIFIRE. *Науковий вісник будівництва*. 2017. Т. 89. № 3. С. 215–223.
111. Kunze R., Scharfel B., Bartholmai M., Neubert D., Schriever R. TG-MS and TG-FTIR applied for an unambiguous thermal analysis of intumescent

coatings. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2002. Vol. 70. № 3. P. 897–909.

112. Саєнко Н. В., Березовський А. І., Копил Б. Я., Григоренко О. М., Джулай О. М. Оцінка термічної стабільності стирол-акрилових покривів інтумесцентного типу. *Municipal Economy of Cities*. 2025. № 3 (191). С. 516–524.

113. Березовський А. І. Вогнезахисне вібростійке епоксиполімерне покрив металевих будівельних конструкцій. *Дис. ... канд. техн. наук*. Черкаси. 2013. 177 с.

114. Березовський А. І., Саєнко Н. В., Копил Б. Я., Григоренко О. М. Вплив інтумесцентних компонентів на структурно-механічні властивості пінококсу вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії. *Пожежна безпека. Збірник наукових праць ЛДУБЖД*. 2025. № 47. С. 14–25.

115. Zheng P., Zhao H., Li J., Liu Q., Ai H., Yang R., Xing W. Recent advances in constructing new type of epoxy resin flame retardant system using ammonium polyphosphate. *Journal of Safety Science and Resilience*. 2024. Vol. 5. № 2. P. 179–193.

116. Tomczak M., Łopiński J., Kowalczyk A., Kowalczyk K. Thermoplastic intumescent coatings modified with pentaerythritol-occluded carbon nanotubes. *Materials*. 2021. Vol. 14. № 21.

117. Guzii S., Kurska T., Otrosh Y., Balduk P., Ivanov Y. Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1162.

118. Camino G., Costa L., Trossarelli L., Costanzi F., Landoni G. Study of the mechanism of intumescence in fire retardant polymers. *Polymer Degradation and Stability*. 1984. Vol. 8. № 1. P. 13–22.

119. Piperopoulos E., Scionti G., Atria M., Calabrese L., Valenza A., Proverbio E. Optimizing ammonium polyphosphate–acrylic intumescent coatings with sustainable fillers for naval fire safety. *Materials*. 2024. Vol. 17. № 21.
120. Ma L., Song Q., Dong F., Yang H., Xia Z., Liu J. Effect of organic-inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coatings. *Coatings*. 2024. Vol. 14. № 8.
121. Yan J., Wang L. J., Wang X. Y., Feng L. H., Weng W. S., Xie J., Zhou Z. Flame retardant and smoke suppression performance of intumescent fire-retardant coating modified by aluminum hydroxide and montmorillonite. *Nano Hybrids and Composites*. 2025. Vol. 46. P. 51–64.
122. Chen Y., Yi S., Zhang X., Shi D., Liu C., Rao P., Huang C. Study on flame retardancy of EPDM reinforced by ammonium polyphosphate. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 8684–8694.
123. Berezovskyi A., Saienko N., Kopyl B., Sidnei S., Kostenko T. Study of the influence of fillers on swelling and water absorption of reactive fire-retardant coatings of metal structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499, No. 1. P. 012031.
124. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Київ. 2019.
125. ДСТУ EN 1363-1:2023. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги. Київ. 2023.
126. ЕНДОТЕРМ 170205. Вогнезахисне покриття. URL: <https://www.endoterm.com.ua/product/endoterm-170205.php> (дата звернення: 10.06.2021).
127. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4. № 10. P. 45–54.

128. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10(14).
129. Березовський А. І., Саєнко Н. В., Копил Б. Я. Вплив інтумесцентних наповнювачів на водопоглинання вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 1(17). С. 85–92.
130. Saienko N. V., Bikov R., Skripinets A., Demidov D. Research of the influence of silicate fillers on water absorption and microstructure of styrene-acrylic dispersion coatings. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 61–67.
131. Копил Б. Я. Вогнезахисні та експлуатаційні властивості покривів реактивного типу для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2025. № 2(57). С. 114–121.
132. ДСТУ ISO 9117-1:2015. Фарби та лаки. Контроль висихання. Частина 1. Визначення стану та часу повного висихання. Київ. 2015.
133. ДСТУ ISO 2812-1:2019. Фарби та лаки. Визначення стійкості до впливу рідин. Частина 1. Метод занурення в рідини, крім води. Київ. 2019.
134. ДСТУ EN ISO 6504-3:2022. Фарби та лаки. Визначення покривності. Частина 3. Визначення покривності фарб для цегли. Київ. 2022.
135. ДСТУ EN ISO 2409:2022. Фарби та лаки. Випробування методом решітчастих надрізів. Київ. 2022.
136. Lee J. S. Investigation of water-based and solvent-based polymer binders on the fire protection performance and mechanical properties of intumescent coating. *Дис. ... PhD*. Universiti Tunku Abdul Rahman. 2019. 118 p.
137. ДСТУ 9291:2024. Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатування об'єктів вогнезахисту. Київ. 2024.
138. *Materials Journal* article. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/21/6628> (дата звернення: 10.06.2021).

139. Sidnei S., Berezovskyi A., Kasiarum S., Chastokolenko I. Revealing patterns in the behavior of a reinforced concrete slab in fire based on determining its stressed and deformed state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5. № 7 (125). P. 43–49.
140. Hvozdz V., Tishchenko E., Berezovskyi A., Sidnei S. Research of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 506–513.
141. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Lavrinenko L., Pozdieiev S. Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineral-wool cladding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5. № 1 (113). P. 24–32.
142. Сідней С. О. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності. *Дис. ... д.т.н.* Черкаси. Національний університет цивільного захисту України. 2025. 361 с.
143. Сідней С. О. Дослідження впливу параметрів скінченно-елементної сітки на точність моделювання пробиття сталеві пластини кулею. *Матеріали XI міжнародної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса. 2025.
144. Sidnei S., Nozhko I., Rotar V., Grygorian M. The influence of a finite element mesh on the reliability of the results of dynamic processes of armor penetration of a steel plate by a bullet. *Solid State Phenomena*. 2025. Vol. 381. P. 47–58.
145. Spasi D. M. Numerical modeling of the impact of projectiles on metal structures. *Vojnotehnicki Glasnik Military Technical Courier*. 2018. Vol. 66. № 1. P. 63–105.
146. Li J. Sh., Li N., Wang J., Tao Zh. G. Numerical simulation of the asymmetric bullet penetrating the perforated steel plate. *Journal of Physics Conference Series*. 2020. Vol. 1507. P. 032043.

147. Новак С., Дріжд В., Добростан О. Оцінювання вогнезахисних властивостей покривів і облицювань для сталевих конструкцій. *Науковий вісник Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ. 2021. № 2 (12). С. 43–53.
148. Цвіркун С. В. Удосконалення методу визначення вогнезахисної здатності покривів металевих конструкцій. *Дис. ... канд. техн. наук*. Київ. 2006.
149. Сідней С. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі. *Науковий вісник Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ. 2024. № 1 (17). С. 93–102.
150. Сідней С., Рудешко І., Іщенко І., Іваненко О., Степаненко В. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Надзвичайні ситуації попередження та ліквідація*. Черкаси. 2024. Т. 8. № 2. С. 121–132.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Berezovskyi A., Bychenko A., Kopyl B., Saienko N. Fire protection of metal structures with inflating coatings (overview). *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. № 2 (6). С. 109–116. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/140>
2. Березовський А. І., Копил Б. Я., Іщенко І. І., Саєнко Н. В. Вплив співвідношення вогнезахисних компонентів на вогнезахисну ефективність покривів металевих конструкцій на водній основі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. № 2 (7). С. 19–28. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/176>
3. Березовський А. І., Саєнко Н. В., Копил Б. Я. Вплив інтумесцентних наповнювачів на водопоглинання вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 1(17). С. 85–92. <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/view/236>
4. Березовський А. І., Саєнко Н. В., Копил Б. Я., Григоренко О. М. Вплив інтумесцентних компонентів на структурно-механічні властивості пінококсу вогнезахисних покривів металевих конструкцій на основі акрилової дисперсії. *Пожежна безпека. Збірник наукових праць ЛДУБЖД*. 2025. № 47. С. 14–25. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/3107>
5. Саєнко Н. В., Березовський А. І., Копил Б. Я., Григоренко О. М., Джулай О. М. Оцінка термічної стабільності стирол-акрилових покривів інтумесцентного типу. *Municipal economy of cities*. 2025. № 3 (191). С. 516–524. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/6583>
6. Копил Б. Я. Вогнезахисні та експлуатаційні властивості покривів реактивного типу для металевих конструкцій на основі стирол-акрилової дисперсії. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2025. № 2 (57). С. 114–121. <https://jdmi.donntu.edu.ua/arkhiv-zbirky/%E2%84%962-vid-2025-r/vognezahysni->

ta-eksploatacyjni-vlastyvoli-pokryviv-reaktyvnogo-tipu-dlya-metalevyh-konstrukcij-na-osnovi-styrol-akrylovoyi-dyspersiyi/

Публікації у наукових виданнях, що входять до бази даних Scopus та/або WoS:

7. Berezovskyi A., Saienko N., Kopyl B., Sidnei S., Kostenko T. Study of the influence of fillers on swelling and water absorption of reactive fire-retardant coatings of metal structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Т. 1499, № 1. С. 012031. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1499/1/012031>

Апробація матеріалів дисертації:

8. Березовський А. І., Копил Б.Я., Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття металевих будівельних конструкцій // *Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Харків : НУЦЗ України, 2022. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/16676/1/FSI-2022-collection-2.pdf>.

9. Berezovskyi A., Kopyl B. Fire protection of metal structures with inflating coatings // *Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матеріали XIII Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, 26–27 жовт. 2023 р.* Черкаси : Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Nadzvicaini_situaciyi_bezpeka_ta_zaxist.pdf

10. Березовський А. І., Копил Б. Особливості впливу компонентів на вогнезахисну ефективність покриттів металевих конструкцій на водній основі // *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф.*, 25 квіт. 2024 р. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. URL: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/TPGPNS-2024.pdf>

11. Березовський А. І., Копил Б. Я., Саєнко Н. В. Екологічно безпечні тонкошарові вогнезахисні покриття для підвищення пожежної безпеки металевих конструкцій // *Проблеми екології та енергозбереження XVI : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф.*, 23–24 жовт. 2025 р. Миколаїв, 2025. С. 443–446. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/50105/188689.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

12. Березовський А., Копил Б. Водопоглинання вогнезахисних покриттів металевих конструкцій залежно від наповнювачів // *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Львів, 13 груд. 2024 р. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 158–161. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/15234>

13. Березовський А., Копил Б. Вплив наповнювачів на водопоглинання вогнезахисних покриттів металевих конструкцій // *Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матеріали XIV Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю*, 24–25 жовт. 2024 р. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 82–85. https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/z_conf_ns_24-25_10_24.pdf

14. Березовський А., Копил Б. Вплив співвідношення компонентів на вогнезахисну ефективність покриттів металевих конструкцій // *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених*, м. Харків, 2024 р. Харків, 2024. С. 55. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2024/MNPK_2024.pdf

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Начальник Державного
 центру сертифікації ДСНС України
 полковник служби цивільного
 захисту



Андрій БОБИР

«10» _____ 2026 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертації

Копи́ла Богдана Яковича

«Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару»
 представлена на здобуття ступеня доктора філософії
 за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Комісія у складі:

голови комісії – доктор технічних наук, доцент, заступника центру –
 начальник відділу інспектування у сфері пожежної і техногенної безпеки
 ДЦС ДСНС України полковник служби цивільного захисту Козяр Назарій
 Михайлович;

членів комісії: начальник відділу сертифікації, наглядання за
 виробництвом протипожежних будівельних виробів, вогнезахисних
 матеріалів та вогнезахисних речовин Бондаренко Михайло Юрійович;

начальник випробувальної лабораторії ДЦС ДСНС України майор
 служби цивільного захисту Ромашенко Сергій Олександрович;

склала цей акт, яким підтверджується використання результатів
 дисертації Копи́ла Богдана Яковича «Підвищення ефективності реактивних
 вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій шляхом забезпечення
 міцності коксового шару» у вигляді технологічних рекомендацій та засобів
 контролю, в основу яких покладено розроблену науково обґрунтований
 метод дослідження міцності коксового шару реактивних вогнезахисних
 покриттів металевих конструкцій.

Механічна міцність коксового шару є ключовим параметром, що
 визначає реальну працездатність покриттів реактивного типу. Однак досі в
 Україні не існує стандартизованої методики оцінки цієї властивості, зокрема
 для покриттів на основі водних дисперсій стирол-акрилових полімерів.

Відповідно до цього розроблена автором науково обґрунтований метод
 може бути обрана за основу при розробці відповідної нормативної бази, а
 також рекомендацій та методів в Україні у вигляді засобів контролю та
 технологічних рекомендацій, які доповнюють нормативні документи на

Відповідно до цього розроблена автором науково обґрунтований метод може бути обрана за основу при розробці відповідної нормативної бази, а також рекомендацій та методів в Україні у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій, які доповнюють нормативні документи на дослідження вогнезахисних покриттів металевих конструкцій на стирол-акриловій основі.

Результати дисертаційних досліджень Копила Богдана Яковича дозволяють загалом підвищити протипожежний захист об'єктів з металевими конструкціями.

Голова комісії

Козяр Н.М.

Члени комісії:

Бондаренко М.Ю.

Ромащенко С.О.

роботи
 Національного університету
 цивільного захисту України
 полковник служби цивільного
 захисту
 кандидат технічних наук, доцент



Олександр ДЖУЛАЙ

04 2026

АКТ

про впровадження в навчальний процес
 Національного університету цивільного захисту України
 результатів дисертації КОПИЛА Богдана Яковича
 «Підвищення ефективності реактивних вогнезахисних покривів для
 металевих конструкцій шляхом забезпечення міцності коксового шару»
 представленої на здобуття ступеня доктора філософії
 за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Комісія у складі: начальника навчально-методичного центру, к. т. н., доцента Дядюшенко О.О., начальника навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, к. т. н., доцента Мельника В.П., заступника начальника кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій, к. т. н., доцента Афанасенка К.А. склала даний акт про те, що результати дисертації Копила Б.Я. впроваджено в навчальний процес при здійсненні підготовки фахівців для ДСНС України за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» на першому рівні вищої освіти («бакалавр») під час вивчення дисципліни «Матеріалознавство та технологія матеріалів» в лекційне зняття за темою «Полімерні будівельні матеріали» (Протокол кафедри № 17 від 19.11.2025 р.).

У дисертації представлено вирішення актуальної науково-практичної задачі спрямоване на розроблення методу визначення механічної міцності коксового шару, сформованого вогнезахисними покриттями реактивного типу на основі водних полімерних дисперсій за умов термічного впливу, з метою підвищення достовірності оцінювання їх вогнезахисної ефективності з урахуванням структурно-механічних властивостей пінококсу та забезпечення експлуатаційної надійності під час захисту металевих конструкцій.

Впровадження результатів дисертації Копила Б.Я. в навчальний процес створює передумови для підвищення якості підготовки фахівців у галузі будівництва, пожежної безпеки та цивільного захисту. Застосування

результатів наукової роботи забезпечує можливість більш глибокого вивчення процесів, пов'язаних із вогнезахистом металевих конструкцій.

Впровадження результатів дисертації забезпечує актуальний і прикладний характер освіти, дозволяє підвищити якість підготовки здобувачів вищої освіти завдяки використанню напрацювань автора у процесі викладання дисципліни. Це сприяє формуванню в здобувачів вищої освіти практичних навичок проведення розрахунків пов'язаних із оцінкою вогнестійкості конструкцій, опором матеріалів, будівельними конструкціями, пожежною безпекою будівель і споруд.

Начальник
навчально-методичного центру
кандидат технічних наук, доцент



Олександр ДЯДЮШЕНКО

Начальник навчально-наукового
інституту пожежної та техногенної
безпеки,
кандидат технічних наук, доцент



Валентин МЕЛЬНИК

Заступник начальника кафедри
пожежної і техногенної безпеки
об'єктів та технологій
кандидат технічних наук, доцент



Костянтин АФАНАСЕНКО