



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.02>

А. І. Березовський, Н. В. Саєнко, Б. Я. Копил, О. М. Григоренко
Національний університет цивільного захисту України,
м. Черкаси, Україна

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4043-1206> – А. І. Березовський
<http://orcid.org/0000-0003-4873-5316> – Н. В. Саєнко
<http://orcid.org/0000-0002-2995-3927> – Б. Я. Копил
<http://orcid.org/0000-0003-4629-1010> – О. М. Григоренко
✉ saienko_natalia@nuczu.edu.ua

ВПЛИВ ІНТУМЕСЦЕНТНИХ КОМПОНЕНТІВ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІНОКОКСУ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИВІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ АКРИЛОВОЇ ДИСПЕРСІЇ

Мета. Одним із найактуальніших завдань сучасної пожежної безпеки є підвищення ефективності інтумесцентних вогнезахисних покривів для металевих конструкцій. Проте більшість відомих систем характеризуються високим коефіцієнтом спучення за недостатньої механічної міцності сформованого пінококсу, що знижує їхню стабільність під дією полум'я та потоків гарячих газів.

Встановити вплив співвідношення основних інтумесцентних компонентів – поліфосфату амонію (ПФА), пентаеритриту (ПЕ) та гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – на коефіцієнт спучення, механічну міцність і термостійкість пінококсу з метою оптимізації складу покривів для підвищення вогнезахисної ефективності.

Експериментальні дослідження проведено з використанням термогравіметричного аналізу (ТГА), статичного навантаження щільними вантажами та визначення лінійного та об'ємного коефіцієнта спучення.

Встановлено, що збільшення вмісту ПЕ сприяє зростанню ступеня спучення, проте знижує міцність пінококсу через надмірну пористість. Оптимальний склад покриття визначено як: ПФА – 25 мас.%, ПЕ – 15 мас.%, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас.%, що забезпечує найкращий баланс між спученням і міцністю.

Висновки та пропозиції. Встановлено, що ефективність інтумесцентних систем визначається не лише коефіцієнтом спучення, а й структурною цілісністю пінококсу. Запропоноване співвідношення компонентів може бути рекомендоване для створення вогнезахисних покривів на водній основі з підвищеною вогнестійкістю металевих конструкцій.

Ключові слова: інтумесцентні компоненти, коефіцієнт спучення, термостійкість, міцність пінококсу.

А. І. Berezovskyi, N. V. Saienko, B. Ya. Kopyl, O. M. Hryhorenko
National University of Civil Protection of Ukraine,
Cherkasy, Ukraine

INFLUENCE OF INTUMESCENT COMPONENTS ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHAR LAYER IN FIRE-PROTECTIVE COATINGS FOR STEEL STRUCTURES BASED ON ACRYLIC DISPERSION

Introduction. One of the most urgent tasks in modern fire safety is to improve the efficiency of intumescent fire-protective coatings for steel structures. However, most existing systems are characterized by a high expansion ratio combined with insufficient mechanical strength of the formed char layer, which reduces their stability under the action of flame and hot gas flows.

To determine the influence of the ratio of the main intumescent components – ammonium polyphosphate (APP), pentaerythritol (PE), and aluminum hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – on the expansion coefficient, mechanical strength, and thermal stability of the char layer, in order to optimize coating formulations for enhanced fire-protective performance.

Experimental studies were carried out using thermogravimetric analysis (TGA), static loading with slotted weights, and determination of linear and volumetric expansion coefficients.

It was found that increasing the PE content promotes a higher degree of expansion but reduces the mechanical strength of the char due to excessive porosity. The optimal coating composition was determined as: APP – 25 wt.%, PE – 15 wt.%, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 wt.%, providing the best balance between expansion and mechanical stability.

The effectiveness of intumescent systems is governed not only by the expansion coefficient but also by the structural integrity of the char layer. The proposed component ratio can be recommended for the development of water-based fire-protective coatings with enhanced fire resistance for steel structures.

Key words: intumescent components, expansion coefficient, thermal stability, char strength.

Постановка проблеми. Сталеві конструкції є основними елементами багатьох промислових, житлових та громадських будівель завдяки своїм високим механічним властивостям, довговічності та здатності сприймати значні навантаження. Проте, незважаючи на ці переваги, сталь є матеріалом, чутливим до дії високих температур [1–3]. При температурі понад 500 °C за 5–10 хвилин при прямому впливі температури вона втрачає до 50 % своєї міцності, що може призвести до деформації або навіть руйнування конструктивних елементів будівлі в умовах пожежі, тому цю температуру часто використовують як критичний поріг [4–5].

У зв'язку з цим, забезпечення необхідного ступеня вогнестійкості сталевих конструкцій є критично важливим завданням для збереження несучої здатності будівель і споруд протягом необхідного часу евакуації та роботи пожежно-рятувальних підрозділів. Сучасні нормативні документи, такі як ДБН В.1.1-7:2016, встановлюють мінімальні вимоги до межі вогнестійкості конструкцій, що потребує застосування ефективних засобів вогнезахисту.

У сучасних умовах воєнного стану, збільшення кількості критичних об'єктів інфраструктури, а також розвиток енергоефективного та висотного будівництва підвищують вимоги до надійності та пожежної безпеки металевих конструкцій. Отже, удосконалення методів та засобів вогнезахисту сталевих конструкцій є актуальною науково-технічною проблемою, вирішення якої сприятиме зниженню втрат від пожеж та забезпеченню безпеки людей і матеріальних цінностей.

У системі пасивного вогнезахисту сталевих конструкцій особливе місце займають інтумесцентні (реактивні) покриття, які при дії високих температур утворюють теплоізоляційний шар, що перешкоджає швидкому нагріванню металу. Одним із ключових параметрів ефективності таких покриттів є коефіцієнт спучення, який характеризує здатність матеріалу до кратного

збільшення об'єму з утворенням теплоізоляційного шару. Однак високий коефіцієнт спучення сам по собі не гарантує ефективного вогнезахисту без належної міцності утвореного шару, зокрема його стійкості до руйнування під дією потоків гарячих газів, полум'я та механічних навантажень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що зростання коефіцієнта спучування (K_c) спричиняє зниженню густини пінококсу. Зважаючи на те, що при спучуванні з реакційної маси виходить деяка кількість речовини у вигляді газів та диму, можливо стверджувати, що при сильному спучуванні відбувається послаблення структури пінококсу. Також при великих коефіцієнтах спучування, відповідно до закону збереження маси (навіть без врахування газоподібних втрат), густина пінококсу виявиться недостатньою, аби чинити опір механічним впливам потоків газів під час реальної пожежі, тому визначення міцності пінококсу є пріоритетним завданням. Варто підкреслити, що абсолютне значення коефіцієнта спучення не є мірилом вогнезахисної ефективності, тобто, чим більший параметр K_c , тим вища ймовірність великих значень межі вогнестійкості – це не слушне твердження [6, 7]. Передусім, теплоізоляційна ефективність коксового каркасу за всіх інших однакових умов залежить від структурної цілостності коксового залишку.

Коефіцієнт спучення – важлива характеристика, що визначає здатність покриттів кратна збільшувати свій об'єм під час термічного впливу. Згідно з дослідженнями [8], основними компонентами, що формують піну, є пентаеритрит (ПЕ), який служить джерелом вуглецю, та меламін, що утворює газ. Встановлено, що K_c прямо залежить від співвідношення кислотоутворювача (наприклад, поліфосфату амонію) і карбоновмісного компонента [9–12].

Дослідження [13] показали, що оптимізація співвідношення поліфосфату амонію та

пентаеритриту сприяє утворенню стабільної піни з високим об'ємом, однак надмірне спучення без належної стабілізації може призвести до руйнування шару.

Механічна міцність спученого шару є визначальним фактором тривалості вогнезахисту, особливо в умовах інтенсивного факельного полум'я. Згідно з роботами [14–16], спучений шар повинен бути не лише товстошаровим, але й механічно стабільним, аби витримувати турбулентний потік гарячих газів. Було показано, що додавання гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$) та мінеральних наповнювачів (наприклад, каоліну, діоксиду кремнію, графену) зміцнює структуру коксового шару, зменшуючи ризик його руйнування.

Також [18] продемонстрували, що на міцність впливають умови формування піни – зокрема, швидкість нагрівання, розмір пор та рівень зшивання вуглецевої структури.

Коксовий залишок – це вуглецево-мінеральна структура, що залишається після термічного розкладу системи. Він виконує роль теплоізоляційного бар'єра та є показником вогнезахисної ефективності покривів. У працях [18] зазначається, що кількість і якість коксу безпосередньо залежать від складу рецептури та співвідношення її компонентів. Найбільший вплив має пентаеритрит (ПЕ), який забезпечує карбонізацію, та поліфосфат амонію (ПФА), який каталізує дегідратацію та зшивання залишку.

З метою кількісного аналізу ступеня втрати маси зразків залежно від температури, що є важливим параметром для оцінки ефективності вогнезахисного покриття, використовують термогравіметричний аналіз (ТГ). Метод дає змогу визначити температуру початку та завершення термічного розкладу, величину залишкової маси, а також оцінити кількість газоподібних продуктів, що виділяються під час нагрівання [19, 20].

Отримані дані є критично важливими для характеристики інтумесцентних систем, оскільки відображають послідовність хімічних реакцій, що відбуваються під час нагрівання, і дозволяють оцінити здатність композиції утворювати стабільні зшиті вуглецевмісні структури (пінококс). Саме ці структури забезпечують основну теплозахисну функцію покриття, запобігаючи нагріванню підкладки під дією високих температур. Метод ТГ є одним із базових методів оцінювання термічної стабільності та ефективності інтумесцентних вогнезахисних покривів. Його застосування дозволяє кількісно охарактеризувати процеси масової втрати зразків під час нагрівання та визначити температурні межі термічного розкладу компонентів системи.

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень, відсутня комплексна оцінка впливу співвідношення ПФА:ПЕ: $\text{Al}(\text{OH})_3$ на механічну стабільність пінококсу, що обмежує можливість оптимізації складу вогнезахисних систем.

Значна частина сучасних досліджень акцентує увагу саме на рецептурних підходах до покращення цих параметрів шляхом добору оптимального співвідношення діючих компонентів, а саме: донора кислоти, карбонізуючого агента, газотворювача, а також різноманітних наповнювачів і наноструктурованих домішок. Водночас залишається актуальним питання комплексного вивчення впливу цих компонентів не лише на коефіцієнт спучення, але й на структурну цілісність коксового залишку, що забезпечує тривалу теплозахисну дію покривів.

Метою даного дослідження є встановлення впливу інтумесцентних компонентів вогнезахисних покривів на водній основі, а саме: поліфосфату амонію, пентаеритриту та гідроксиду алюмінію на коефіцієнт спучення, механічну міцність утвореного теплоізоляційного шару та характеристики коксового залишку з метою оптимізації рецептури покривів для підвищення його вогнезахисної ефективності металевих конструкцій в умовах високих температур.

Завдання дослідження:

1. Встановити вплив співвідношення основних інтумесцентних компонентів, а саме: поліфосфату амонію, пентаеритриту та гідроксиду алюмінію на величину коефіцієнта спучення.
2. Дослідити структурно-механічні властивості утвореного пінококсу вогнезахисних покривів.
3. Визначити оптимальний склад вогнезахисних покривів для максимального ефекту вогнезахисту металевих конструкцій.

Матеріали дослідження. Як плівкоутворювач застосовано стирол-акрилову дисперсію Acronal 290 D (BASF Societas Europaea), яка призначена для виготовлення будівельних клейових матеріалів, фарб, покривів для внутрішніх і зовнішніх робіт, штукатурок із синтетичними смолами й шпаклювальних мас, де потрібна висока в'язкість і високий вміст твердої речовини. Мінімальна температура плівкоутворення (МТП) близько 20 – 23 °С дозволяє формувати плівку за помірних умов. Структура плівки характеризується достатньою міцністю на розрив ($\approx 7 \text{ Н/мм}^2$) і відносним подовженням до $\approx 500 \%$, що забезпечує стійкість до тріщин і деформацій [21].

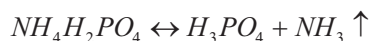
Отримання інтумесцентних покривів зазвичай досягається при використанні трьох компонентів:

джерела неорганічної кислоти, джерела вуглецю, газовиділяючого агента.

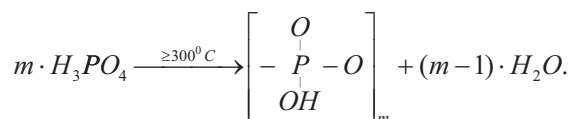
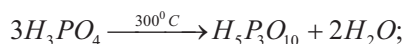
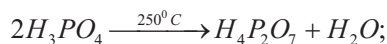
Основні інтумесцентні компоненти вогнезахисного покриття (ВЗП):

- поліфосфат амонію (ПФА) з кристалічною фазою II (ступінь полімеризації $n > 1000$). ПФА – високомолекулярна, термостійка, нерозчинна у воді сполука, що виконує функцію кислотного каталізатора. Під час термічного впливу ПФА поступово розкладається з утворенням фосфорної кислоти (H_3PO_4) та її полімеризованих форм (полі- або метафосфорних кислот). Утворені кислоти каталізують реакції дегідратації вуглецевмісних поліолів (зокрема пентаеритриту), що призводить до інтенсивного карбонізаційного процесу та формування стійкого вуглецевого (кокового) залишку, який є основою теплоізоляційного шару реактивних покриттів [22, 23].

Процес утворення фосфорних кислот при піролізі фосфорвмісних антипіренів описується рівнянням:



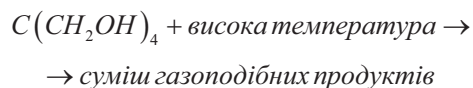
При подальшій термічній деструкції амонійних солей ортофосфорної кислоти утворюються дифосфорна, трифосфорна та поліметафосфорна кислоти, які забезпечують кислотне каталізування реакцій дегідратації, сприяючи інтенсифікації процесу утворення захисного кокового шару:



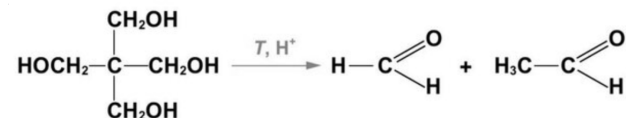
- пентаеритрит (ПЕ) – поліфункціональний чотирьохатомний спирт, який виконує роль джерела вуглецю в інтумесцентних вогнезахисних системах. Під час термічного впливу, у присутності фосфорної кислоти (H_3PO_4) та її полімеризованих форм, що утворюються внаслідок термічної деструкції поліфосфату амонію, пентаеритрит піддається кислотно-каталізованій дегідратації [24].

Хоча пентаеритрит ($C(CH_2OH)_4$) є стабільною сполукою за звичайних умов, він розкладається при нагріванні до високих температур. Цей процес не є простим і протікає з утворенням суміші продуктів, а не за однією конкретною формулою. При термічному розкладанні пентаеритрит виділяє водяну пару, а також розпадається на інші гази, включаючи формальдегід, вуглекислий газ, акролеїноподібні сполуки та воду. Тому немає єдиної формули розкладання для пентаеритриту,

оскільки це складний процес із різними кінцевими продуктами. Натомість, цей процес розкладання можна описати наступною схемою:



Варто зазначити, що якщо нагрівання відбувається в кислому середовищі, пентаеритрит може розкладатися на формальдегід і ацетальдегід [14]:



Гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$) – компонент реактивної системи, що виконує функції газовиділяючого агента. При термічному нагріванні в інтервалі температур 200 – 300 °C гідроксид алюмінію зазнає ендотермічного розкладу з утворенням оксиду алюмінію (Al_2O_3) та виділенням значної кількості водяної пари:



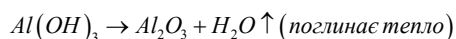
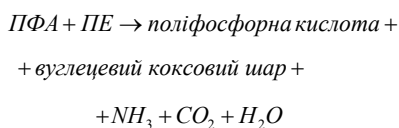
Виділення водяної пари супроводжується поглинанням тепла, що сприяє зниженню температури нагрівання покриття та уповільненню термічних і горючих процесів. Водяна пара виконує роль інертного газу, який зменшує концентрацію кисню біля поверхні матеріалу, тим самим пригнічуючи інтенсивність горіння [25, 26].

Крім того, утворений у результаті термічного розкладу оксид алюмінію підвищує механічну міцність і термостійкість кокового залишку, виконуючи роль армувального мінерального наповнювача. Його присутність сприяє стабілізації структури пінококсу та підвищенню ефективності теплоізоляційного шару при дії високих температур.

Узагальнена реакція термічного розкладу та взаємодії основних компонентів реактивного вогнезахисного покриття відображає послідовність ключових фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час дії високих температур. Вона характеризує механізм утворення газо- і теплоізоляційного спіненого шару, який формується внаслідок термічної деструкції та взаємодії активних інгредієнтів системи.

Під час термічного впливу поліфосфату амонію (ПФА) розкладається з утворенням поліфосфорної кислоти, яка каталізує дегідратацію пентаеритриту (ПЕ), сприяючи утворенню карбонізованого (кокового) шару. Одночасно відбувається виділення газоподібних продуктів – аміаку, вуглекислого газу та водяної пари, що забезпечують спінення шару. Гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$) розкладається з утворенням оксиду алюмінію

та водяної пари, при цьому поглинається значна кількість тепла, що додатково знижує температуру поверхні покриву та підсилює його вогнезахисну дію:



Методи дослідження. Сутність методу вимірювання лінійного коефіцієнту спучення полягає в зіставленні розмірів шару покриву до та після термічного впливу. Для цього зразки покриття наносили на сталеві пластини розміром $50 \times 50 \pm 1$ мм і товщиною $2,0 \pm 0,2$ мм. Початкову товщину шару вимірювали штангенциркулем у чотирьох точках і визначали середнє арифметичне значення. Після висихання зразки піддавали нагріванню у лабораторній муфельній печі при температурі 500°C протягом 5 хвилин. Така температура вибрана як більш наближена до критичної температури втрати несучої здатності сталевих конструкцій, порівняно зі стандартними 340°C за ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. Після охолодження товщину спученого шару вимірювали глибиноміром штангенциркуля у п'яти фіксованих точках: одна в центрі зразка, чотири — на рівних відстанях по діагоналях, на 0,25 довжини діагоналі від центру. Лінійний коефіцієнт спучення K_L визначали за формулою (1):

$$K_L = \frac{h_{c1} + h_{c2} + h_{c3} + h_{c4} + h_{c5}}{d_c}, \quad (1)$$

де $h_{c1}, \dots, h_{c5}$ — отримані дані з вимірювання товщини шару інтумесцентного покриву в заданих місцях, мм;

d_c — товщина шару нанесеного покриву, виміряна до проведення випробування, розрахована штангенциркулем як середнє арифметичне з чотирьох вимірювань.

Для кожного складу проводили не менше трьох повторних випробувань, після чого обчислювали середнє значення коефіцієнта спучення.

Міцність сформованого теплоізоляційного шару (пінококсу), отриманого після спучування вогнезахисного покриву, визначали за методикою, запропонованою Lee Jin Sheng (Universiti Tunku Abdul Rahman) [27]. Метод базується на визначенні критичного навантаження, за якого структура пінококсу втрачає цілісність під дією постійного тиску.

Після спучення та охолодження зразків (до температури $25 \pm 2^\circ\text{C}$) поверхню пінококсу навантажували за допомогою щільних вантажів

стандартних розмірів (зовнішній діаметр — 20 мм, товщина — 4,4 мм, внутрішній отвір — 6,4 мм). Початкове навантаження становило 10 г, до якого через підвіску послідовно додавали вантажі по 10 г із короткочасною витримкою (5 с) після кожного кроку. Руйнування або пролом шару фіксували візуально, після чого фіксували критичну масу навантаження (m_k).

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

$$\sigma = \frac{m_{kp}}{S} \quad (2)$$

$$F = m_{kp} \cdot g$$

де m_{kp} — критична маса навантаження, г,

S — площа зони контакту навантаження, см².

Площу контакту визначали за формулою площі кола:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3)$$

де d — діаметр навантажувального елемента, см.

Отримані значення питомої міцності (σ , г/см²) характеризують механічну стійкість, структурну цілісність та щільність теплоізоляційного шару, який формується внаслідок спучування вогнезахисного покриву.

Термостабільність і залишкову масу досліджували методом термогравіметричного аналізу (ТГА) на приладі Linseis STA PT1600. Вимірювання проводили в атмосфері повітря при швидкості нагрівання $10^\circ\text{C}/\text{хв}$ у температурному інтервалі $25 - 800^\circ\text{C}$, з точністю визначення температури $\pm 1^\circ\text{C}$. Як еталон використовували $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Таким чином, запропоновані методики дозволяють комплексно оцінити ступінь спучення, механічну стійкість та термостабільність покриттів реактивного типу, що дає можливість кількісно порівнювати їх вогнезахисну ефективність.

Виклад основного матеріалу. Для кількісного аналізу термічної стабільності та визначення ступеня втрати маси зразків залежно від температури, що є одним із ключових показників ефективності вогнезахисних покриттів, застосовано термогравіметричний аналіз (ТГ). Отримані результати є критично важливими для характеристики інтумесцентних систем, оскільки дозволяють встановити їхню здатність до формування стабільних вуглецевмісних (кокових) структур, які забезпечують теплоізоляційні та вогнезахисні властивості покриттів.

На рис. 1 наведено термогравіметричні криві (ТГ) основних компонентів інтумесцентної

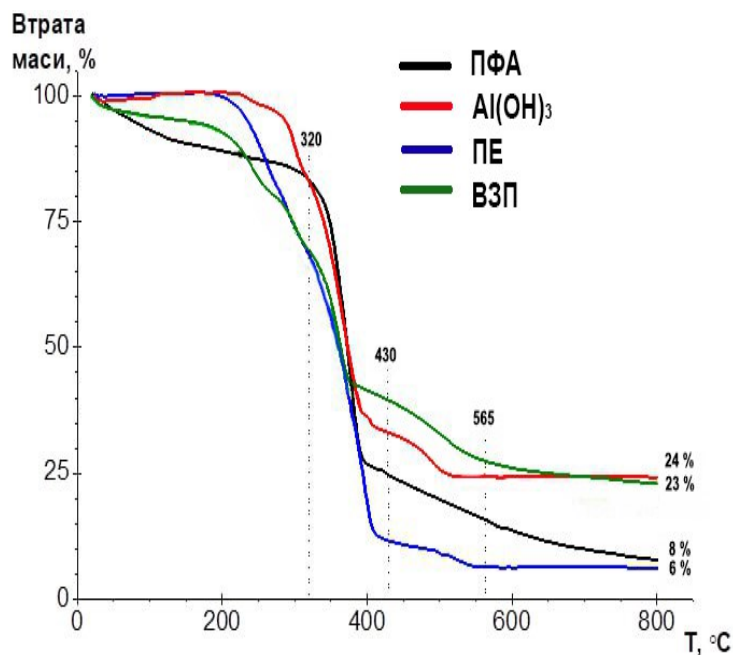


Рис. 1. Термогравіметричні криві зразків покриттів на основі стирол-акрилової дисперсії, наповненої ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та їх спільного використання (ВЗП)

системи: ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ та їх спільного використання у складі вогнезахисного покриття (ВЗП).

Дані термогравіметричного аналізу (рис.1.) свідчать, що всі зразки характеризуються багатостадійною термодеструкцією, проте швидкість втрати маси та величина коксового залишку істотно залежать від складу.

ПФА демонструє плавну втрату маси з початком розкладу близько 320°C і формує лише $\approx 8\%$ залишку, що вказує на обмежену здатність до утворення стабільного вуглецевого шару. ПЕ розкладається різко при $260 - 320^\circ\text{C}$, залишаючи мінімальний залишок ($\approx 6\%$) і проявляючи слабку коксоутворювальну здатність. Натомість $\text{Al}(\text{OH})_3$ вирізняється високою термостійкістю: після дегідратації ($\approx 270 - 320^\circ\text{C}$) утворюється беміт ($\gamma\text{-AlOOH}$) і, за вищих температур, оксид алюмінію (Al_2O_3), що забезпечує значний масовий залишок ($\approx 24\%$).

Дослідження поведінки і комплексного впливу інтумесцентних компонентів ВЗП на величину масового залишку демонструють синергічний

ефект – у досліджуваному температурному інтервалі втрата маси становить близько 23% , що перевищує сумарні показники окремих компонентів. Це підтверджує підвищену здатність системи до формування термостійкого ізоляційного шару завдяки поєднанню кислотного каталізатора (ПФА), джерела вуглецю (ПЕ) та газовиділяючого агента ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

У табл. 1 наведено узагальнені результати експериментальних досліджень основних компонентів інтумесцентної системи, що характеризують залежність об'ємного коефіцієнта спучення (K_c , $\text{см}^3/\text{г}$), втрати маси зразків (Δm , %) та температури термічної деструкції ($T_{\text{дестр.}}$, $^\circ\text{C}$) за даними термогравіметричного аналізу вогнезахисних покриттів на основі стирол-акрилової дисперсії.

Отримані результати свідчать, що індивідуальні компоненти інтумесцентної системи – ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – проявляють різний вплив на процес термодеструкції та спучування вогнезахисних покриттів.

Таблиця 1

Термічні характеристики основних компонентів інтумесцентної системи

Склад покриттів	K_c , $\text{см}^3/\text{г}$	Δm , % при 600°C	$T_{\text{дестр.}}$, $^\circ\text{C}$
ПФА	0,9	13,5	320
ПЕ	2,81	5,5	250
$\text{Al}(\text{OH})_3$	0	25,5	270
ВЗП	3,2	28,8	260

Покрив, що містить лише ПФА, характеризується низькою здатністю до спучування (коефіцієнт $0,9 \text{ см}^3/\text{г}$) та утворює $13,5 \%$ коксового залишку. У той час ПЕ, що є основним джерелом вуглецю, демонструє помірні показники спучення ($2,81 \text{ см}^3/\text{г}$), що пояснюється наявністю газоподібних продуктів під час його термічного розкладання. Також для покриття, що складається тільки з плівкоутворювача та ПЕ, спостерігається найменше значення коксового залишку ($5,5 \%$), адже за температур більше 500°C пентаеритрит повністю розкладається та сублімується на газоподібні продукти, а коксовий залишок покриття переважно складається із недеструктованих решток плівкоутворювача.

При додаванні до плівкоутворювача гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$) не спостерігається схильності покриття до спучування, однак спостерігається утворення значної кількості залишку ($25,5 \%$), що зумовлено утворенням термостійких оксидів алюмінію, здатних виконувати армувальну функцію та підвищувати термостійкість шару.

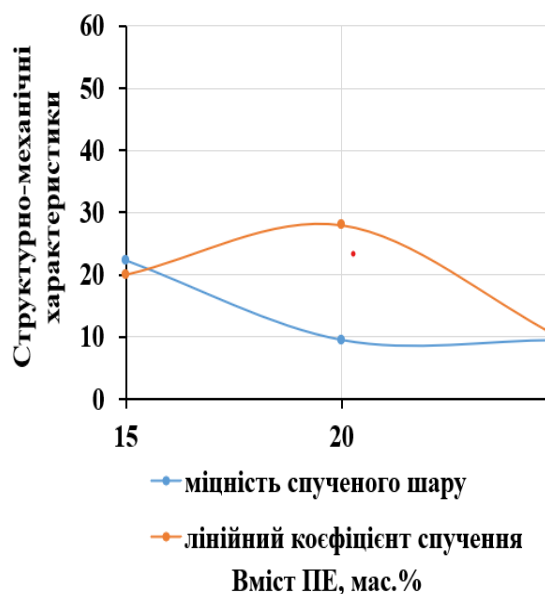
Найвищі показники отримано при спільному поєднанні інтумесцентних компонентів (ВЗП), у якій коефіцієнт спучення сягає $3,2 \text{ см}^3/\text{г}$, а маса коксового залишку – $28,8 \%$. Це свідчить про синергійний ефект між кислотним каталізатором (ПФА), джерелом вуглецю (ПЕ) та газовиділяючим агентом ($\text{Al}(\text{OH})_3$), що забезпечує інтенсивне формування стійкої теплоізоляційної піни.

Така система може бути рекомендована як оптимальний склад інтумесцентного вогнезахисного покриття на основі стирол-акрилової дисперсії.

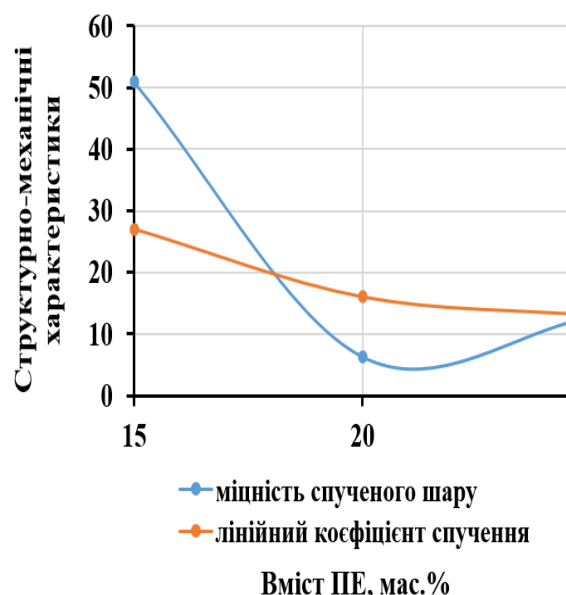
Також отримані результати свідчать, що температура початку деструкції інтумесцентної системи ВЗП становить $\approx 260^\circ\text{C}$, що є нижчою за температуру деградації окремого компоненту гідроксиду алюмінію ($\approx 270^\circ\text{C}$). Така поведінка пояснюється каталітичною дією фосфорних кислот, що утворюються з ПФА, а також реакційною взаємодією між компонентами, зокрема ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$. Синергічна дія усіх трьох компонентів системи забезпечує швидше формування теплоізоляційного шару, що є критично важливим для своєчасного захисту металевої конструкції під час впливу високих температур.

З метою встановлення впливу інтумесцентних компонентів на структурно-механічні характеристики вогнезахисного покриття було проаналізовано зміну лінійного коефіцієнта спучення (K_s , мм) та міцності сформованого спученого шару (σ , $\text{г}/\text{см}^2$) за фіксованого вмісту поліфосфату амонію (ПФА) – $25 \text{ мас. } \%$ та різного вмісту гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$). На рис. 2 наведено залежність зазначених параметрів при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $20 \text{ мас. } \%$, а (рис. 2, а) та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $40 \text{ мас. } \%$ (рис. 2, б).

Отриманні залежності при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $20 \text{ мас. } \%$ (рис. 2, а) свідчать, що при збільшенні



а)



б)

Рис. 2. Залежність міцності спученого шару та лінійного коефіцієнта спучення від вмісту ПЕ у складі вогнезахисного покриття при вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $20 \text{ мас. } \%$ (а) та $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $40 \text{ мас. } \%$ (б)

вмісту ПЕ від 15 до 20 мас. % спостерігається суттєве зниження міцності спученого шару, після чого при подальшому зростанні до 25 мас. % зміни стають незначними. Це свідчить, що надлишок ПЕ, який активно генерує газову фазу та сприяє інтенсивному спученню, призводить до утворення більш пористої, менш щільної структури пінококсу, що знижує його механічну стійкість. Лінійний коефіцієнт спучення зростає від 15 до 20 мас. % ПЕ, досягаючи максимуму, після чого знижується при 25 мас.%. Таким чином, при середньому вмісті ПЕ (20 мас. %) спостерігається оптимальна інтенсивність газоутворення, що забезпечує максимальне розширення шару. Подальше збільшення кількості ПЕ призводить до надлишкового спучення, втрати цілісності й часткового руйнування каркасу.

При підвищеному вмісті $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас. % (рис. 2, б) та зниженню ПЕ до 15 мас. % спостерігається найвища міцність спученого шару (55 г/см^2), яка різко знижується при підвищенні частки ПЕ до 20 мас. %, а потім незначно зростає при 25 мас. %. Така поведінка свідчить, що збільшення кількості ПЕ призводить до надмірного газоутворення, формування пористої структури й ослаблення механічного каркасу. Водночас $\text{Al}(\text{OH})_3$ забезпечує певну стабілізацію завдяки утворенню оксидного залишку, тому при 25 мас. % ПЕ відбувається часткове відновлення міцності. При підвищенні частки $\text{Al}(\text{OH})_3$ до 40 мас.% зменшується і загальний ступінь спучення, але значно підвищується міцність шару при малих концентраціях ПЕ, що свідчить про зміцнення пінококсу за рахунок утворення неорганічної оксидної матриці (Al_2O_3).

З метою встановлення взаємозв'язку між ступенем спучення та механічною міцністю пінококсу було досліджено вплив вмісту ПЕ та $\text{Al}(\text{OH})_3$ при фіксованому значенні ПФА на структурно-механічні характеристики вогнезахисного покриття. Отримані результати свідчать, що міцність пінококсу не зростає пропорційно до коефіцієнта спучення, хоча останній безпосередньо впливає на вогнезахисну ефективність металевих конструкцій. Однак високий коефіцієнт спучення сам по собі не гарантує надійного вогнезахисту, якщо утворений шар не має достатньої механічної міцності та стійкості до руйнування під дією потоків гарячих газів, полум'я й механічних навантажень.

Підвищення вмісту гідроксиду алюмінію з 20 до 40 мас.% сприяє збільшенню механічної міцності спученого шару завдяки формуванню термостійкого оксидного каркасу, який зменшує пористість і стабілізує структуру пінококсу. Водночас надлишок $\text{Al}(\text{OH})_3$ обмежує ступінь спучення, знижуючи коефіцієнт розширення.

Таким чином, оптимальне співвідношення компонентів досягається при ПФА(25):ПЕ(15): $\text{Al}(\text{OH})_3$ (40) мас. % та забезпечує найкращий баланс між інтенсивністю спучення та механічною міцністю сформованого коксового шару.

Виявлена обернена кореляція між міцністю пінококсу та коефіцієнтом спучення підтверджує, що зі збільшенням частки ПЕ посилюються процеси газоутворення і, відповідно, спучення, але це супроводжується зниженням механічної стійкості шару. Отже, оптимальний вміст ПЕ близько 15 мас. % забезпечує необхідний компроміс між ступенем спучення та міцністю коксового каркасу, що визначає ефективність і довговічність вогнезахисного покриття під час дії високих температур.

Висновки. За результатами проведених досліджень впливу інтумесцентних компонентів: поліфосфату амонію (ПФА), пентаеритриту (ПЕ) та гідроксиду алюмінію ($\text{Al}(\text{OH})_3$), на структурно-механічні властивості вогнезахисних покриттів на водній становлено:

1. Закономірності впливу співвідношення основних інтумесцентних компонентів (ПФА, ПЕ, $\text{Al}(\text{OH})_3$) на процеси термічного розкладу та спучення. Максимальний коефіцієнт спучення ($K_c \approx 3,2 \text{ см}^3/\text{г}$) досягається при спільному використанні трьох діючих компонентів, що підтверджує їх синергічну дію як кислотного каталізатора, джерела вуглецю та газоутворювального агента.

2. Механічна міцність сформованого пінококсу визначається не лише ступенем спучення, а й кількістю неорганічного залишку. Показано, що збільшення частки ПЕ підвищує інтенсивність газоутворення та коефіцієнт спучення, проте супроводжується зниженням міцності шару через підвищену пористість. Зростання вмісту $\text{Al}(\text{OH})_3$ до 40 мас.% сприяє утворенню стабільного оксидного каркасу (Al_2O_3), який підвищує структурну цілісність і міцність пінококсу.

3. Оптимальний склад інтумесцентного покриття для забезпечення максимальної ефективності вогнезахисту металевих конструкцій встановлено як: ПФА – 25 мас.%, ПЕ – 15 мас.%, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 40 мас.%. За цього співвідношення досягається найкращий баланс між коефіцієнтом спучення та механічною міцністю утвореного коксового шару.

Встановлено, що міцність пінококсу не залежить прямо від величини коефіцієнта спучення. Надмірне розширення шару не забезпечує підвищення його захисних властивостей, якщо знижується структурна щільність і стійкість до механічного руйнування.

Отримані дані мають практичну цінність для розроблення та оптимізації інтумесцентних систем на водній основі, що поєднують високу термостійкість і структурно-механічні властивості при впливі високих температур. Розроблені рекомендації щодо співвідношення компонентів можуть бути використані для створення вогнезахисних покривів із підвищеною довговічністю та ефективністю захисту металевих конструкцій у реальних експлуатаційних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gordon J. A., Bozeman S. C., Fischer E. C., Isgor O. B., Tucker J. D. Heating duration effects on post-fire structural steel mechanical properties. *Fire Safety Journal*. 2023. Vol. 140. 103848. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103848>.
2. Kumar W., Sharma U. K., Shome M. Mechanical properties of conventional structural steel and fire-resistant steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 181. 106615. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106615>.
3. Afanasenko K., Klyuchka Y., Lypovyi V., Harbuz S. The Thermal Destruction and Coke Formation Intensity Influence on the Delamination and Destruction of Fiber Reinforced Plastics with a Unidirectional Filler under High Temperature Conditions. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 137–143. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.137>.
4. 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. 105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>.
5. Новак С. В., Добростан О. В., Долішній Ю. В., Ратушний О. В. Оцінювання збіжності результатів експериментального визначення тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 2. С. 67–72. http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcpfs_2017_2_11.
6. Цапко Ю., Бондаренко О., Цапко О., Горбачова О., Мазурчук С. Механізм структуроутворення спученого шару пінококсу при впливі мінеральних речовин. *Технічні науки та технології*. 2023. № 2. Вип. 32. С. 379–388. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-379-388](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-379-388).
7. Березовський А., Копил Б., Іщенко І., Саєнко Н. Вплив співвідношення вогнезахисних компонентів на вогнезахисну ефективність покриттів металевих конструкцій на водній основі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. №7(2). С. 19–28. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.19.28>.
8. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of fire sciences*. 2016. Vol. 34(2). P. 120–163. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>.
9. Berezovskyi A., Saienko N., Kopyl B., Sidnei S., Tetiana K. Study of the Influence of Fillers on Swelling and Water Absorption of Reactive Fire-Retardant Coatings of Metal Structures. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499 (1). P. 012031. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012031>.
10. Li H., Chen X., Sun M., Wu H., Tang L. Synergistic fire retardancy of melamine resin modified with pentaerythritol and ammonium polyphosphate in PP. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2024. Vol. 30(1). P. 244–262. <https://doi.org/10.1002/vnl.22045>.
11. Wang G., Yang J. Thermal degradation study of fire resistive coating containing melamine polyphosphate and dipentaerythritol. *Progress in Organic Coatings*. 2011. Vol. 72(4). P. 605–611. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.07.001>.
12. Григоренко О. М., Золкіна Є. С., Попов Ю. В., Саєнко Н. В. Дослідження впливу наповнювачів на властивості спученого коксового шару епоксидних композицій. *Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків, 20 травня 2021 р.). Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2021. С. 28–30. http://pesconf.nuczu.edu.ua/images/2021/PES_2021.pdf.
13. Wang J., Xue L., Zhao B., Lin G., Jin X., Liu D., Shang K. (2019). Flame retardancy, fire behavior, and flame retardant mechanism of intumescent flame retardant EPDM containing ammonium polyphosphate/pentaerythritol and expandable graphite. *Materials*. 2019. Vol. 12(24). 4035. <https://doi.org/10.3390/ma12244035>.
14. Guzii S., Kurska T., Otrosh Y., Balduk P., Ivanov Y. Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1162, No. 1, P. 012003. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.
15. Gusii S., Kurska T., Ivanov Y. Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1162. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.
16. Hryhorenko O., Zolkina Y., Saienko N., Popov Y. Investigation of the Effect of Fillers on the Properties of the Expanded Coke Layer of Epoxy-amine Compositions. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 539–546. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.539>.
17. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison fire resis-

tance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4(10). P. 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>.

18. Vakhitova L., Kalafat K., Taran N., Bessarabov V. Порівняння амінів як газотворювачів вогнезахисних композицій інтумесцентного типу. *Technologies and Engineering*. 2021. № 4.С. 69–80. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.7>.

19. Nazrun T., Hassan M. K., Hasnat M. R., Hos-sain M. D., Ahmed B., Saha S. A. Comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues. *Fire*. 2025. Vol. 8(4). 155. <https://doi.org/10.3390/fire8040155>.

20. Саєнко Н. В., Березовський А. І., Копил Б. Я., Григоренко О. М., Джулай О. М. Оцінка термічної стабільності стирол-акрилових покриттів інтумесцентного типу. *Municipal economy of cities*. 2025. №3(191). С. 516–524. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-516-524>.

21. Saienko N. V., Demidov D. V., Bikov R. A., Younis B. N. Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708(1). P. 012103. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012103>.

22. Hansen–Bruhn I., Craig J. L., Hinge M., Hull T. R. Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application. *European Polymer Journal*. 2024. 113644. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113644>.

23. 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), 179–193. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.03.002>.

24. Tomczak M., Łopiński J., Kowalczyk A., Kowalczyk K. Thermoplastic intumescent coatings modified with pentaerythritol-occluded carbon nanotubes. *Materials*. 2021. Vol. 14(21). 6284. <https://doi.org/10.3390/ma14216284>.

25. 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. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0069-0>.

26. Khalili P., Tshai K. Y., Hui D., Kong I. J. C. P. B. E. 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. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.049>.

27. Lee J. S. Investigation of Water-based and Solvent-based Polymer Binders on the Fire Protection Performance and Mechanical Properties of Intumescent Coating: doctor's thesis. Universiti Tunku Abdul Rahman, 2019. 118 p. <http://eprints.utar.edu.my/id/eprint/3454>.

REFERENCES

1. Gordon, J. A., Bozeman, S. C., Fischer, E. C., Isgor, O. B., & Tucker J. D. (2023). Heating duration effects on post-fire structural steel mechanical properties. *Fire Safety Journal*, 140, 103848. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103848>.

2. Kumar, W., Sharma, U. K., & Shome, M. (2021). Mechanical properties of conventional structural steel and fire-resistant steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106615. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106615>.

3. Afanasenko, K., Klyuchka, Y., Lypovyi, V., & Harbuz, S. (2021). The Thermal Destruction and Coke Formation Intensity Influence on the Delamination and Destruction of Fiber Reinforced Plastics with a Unidirectional Filler under High Temperature Conditions. *In Materials Science Forum*, 1038, 137–143. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.137>.

4. Lucherini, A., & Maluk, C. (2019) Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>.

5. Novak, S. V., Dobrostan, O. V., Dolishniy, Yu. V., & Ratushnyy, O. V. (2017). Otsenka skhodimosti rezul'tatov eksperimental'nogo opredeleniya prodolzhitel'nosti ognevogo vozdeystviya do dostizheniya kriticheskoy temperatury stali [Assessment of the convergence of the results of experimental determination of the duration of fire exposure until the critical temperature of steel is reached]. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety* 2, 67–72. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcps_2017_2_11 [in Ukrainian].

6. Tsapko, Yu., Bondarenko, O., Tsapko, O., Gorbacheva, O., & Mazurchuk, S. (2023) Mekhanizm strukturoobrazovaniya vspuchennogo sloya penokoksi pri vozdeystvii mineral'nykh veshchestv [Mechanism of structure formation of a swollen layer of foam coke under the influence of mineral substances]. *Technical sciences and technologies*, 2, 379–388. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-379-388](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-379-388) [in Ukrainian].

7. Berezovskiy, A., Kopyl, B., Ishchenko, I., & Saienko N. (2023). Vliyanie sootnosheniya ognezashchitnykh komponentov na ognezashchitnyuyu effektivnost' pokrytiy metallicheskih konstruktsey na vodnoy osnove [The influence of the ratio of fire-retardant components on the fire-retardant efficiency of water-based coatings for metal structures]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia*, 7(2), 19–28. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-379-388](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-379-388) [in Ukrainian].

doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.19.28 [in Ukrainian].

8. Mariappan, T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of fire sciences*, 2016, 34(2), 120-163. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>.

9. Berezovskyi, A., Saienko, N., Kopyl, B., Sidnei, S., & Tetiana K. (2025). Study of the Influence of Fillers on Swelling and Water Absorption of Reactive Fire-Retardant Coatings of Metal Structures. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1499(1), 012031. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012031> [in Ukrainian].

10. Li, H., Chen, X., Sun, M., Wu, H., & Tang, L. (2024). Synergistic fire retardancy of melamine resin modified with pentaerythritol and ammonium polyphosphate in PP. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 30(1), 244–262. <https://doi.org/10.1002/vnl.22045>.

11. Wang, G., & Yang, J. (2011). Thermal degradation study of fire resistive coating containing melamine polyphosphate and dipentaerythritol. *Progress in Organic Coatings*, 72(4), 605–611. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.07.001>.

12. Grigorenko, Ye. M., Zolkina, Ye. S., Popov, Yu. V., & Saienko, N. V. (2021). Issledovaniye vliyaniya napolniteley na svoystva vspuchennogo koksovogo sloya epoksiaminnykh kompozitsiy [Study of the influence of fillers on the properties of the swollen coke layer of epoxyamine compositions]. *Problems of Emergency Situations: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. (28–30). May 20, 2021. Kharkiv: National University of Civil Defense of Ukraine. 28–30. Retrieved from: http://pesconf.nuczu.edu.ua/images/2021/PES_2021.pdf [in Ukrainian].

13. Wang, J., Xue, L., Zhao, B., Lin, G., Jin, X., Liu, D., & Shang, K. (2019). Flame retardancy, fire behavior, and flame retardant mechanism of intumescent flame retardant EPDM containing ammonium polyphosphate/pentaerythritol and expandable graphite. *Materials*. 2019. Vol. 12(24). 4035. <https://doi.org/10.3390/ma12244035>.

14. Guzii, S., Kurska, T., Otrosh, Y., Balduk, P., & Ivanov, Y. (2021). Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1162, 1, 012003. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.

15. Gusii, S., Kurska, T., & Ivanov, Y. (2021). Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1162, 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012003>.

16. Hryhorenko, O., Zolkina, Y., Saienko, N., & Popov, Y. (2021). Investigation of the Effect of Fillers on the Properties of the Expanded Coke Layer

of Epoxyamine Compositions. *In Materials Science Forum*, 1038, 539-546. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.539>.

17. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., & Vakhitova, L. (2020). Comparison fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10), 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>.

18. Vakhitova, L., Kalafat, K., Taran, N., & Bessarabov, V. (2021). Comparison of amines as blowing agents of flame retardant intumescent type compositions. *Technologies and Engineering*, 4, 69–80. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.7>.

19. Nazrun, T., Hassan, M. K., Hasnat, M. R., Hossain, M. D., Ahmed, B., & Saha, S. A. (2025). Comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues. *Fire*, 8(4), 155. <https://doi.org/10.3390/fire8040155>.

20. Saienko, N., Berezovskyi, A., Kopyl, B., Hryhorenko, O., Dzhulai, O. (2025). Otsinka termichnoyi stabil'nosti styrol-akrylovykh pokryviv intumescentnoho typu [Evaluation of the thermal stability of styrene-acrylic intumescent coatings]. *Municipal economy of cities*, 3(191), 516–524. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-516-524> [in Ukrainian].

21. Saienko, N. V., Demidov, D. V., Bikov, R. A., & Younis, B. N. (2019). Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708(1), 012103. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012103>.

22. Hansen–Bruhn, I., Craig, J. L., Hinge, M., & Hull, T. R. (2024). Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application. *European Polymer Journal*, 113644. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113644>.

23. Zheng, P., Zhao, H., Li, J., Liu, Q., Ai, H., Yang, R., & Xing, W. (2024). Recent advances in constructing new type of epoxy resin flame retardant system using ammonium polyphosphate. *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(2), 179–193. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.03.002>.

24. Tomczak, M., Łopiński, J., Kowalczyk, A., & Kowalczyk, K. (2021). Thermoplastic intumescent coatings modified with pentaerythritol-occluded carbon nanotubes. *Materials*, 14(21), 6284. <https://doi.org/10.3390/ma14216284>.

25. Yan, L., Xu, Z., Wang, X., Deng, N., & Chu, Z. (2018). 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*, 15, 1357–1369. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0069-0>.

26. Khalili, P., Tshai, K. Y., Hui, D., & Kong, I. J. C. P. B. E. (2017). Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*, 114, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.049>.

27. Lee, J. S. (2019). Investigation of Water-based and Solvent-based Polymer Binders on the Fire Protection Performance and Mechanical Properties of Intumescent Coating: doctor's thesis. Universiti Tunku Abdul Rahman, 118 p. Retrieved from: <http://eprints.utar.edu.my/id/eprint/3454>.

© А. І. Березовський, Н. В. Саєнко, Б. Я. Копил, О. М. Григоренко

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2025

Стаття прийнята 26.09.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025