



*Р. Б. Веселівський, Д. В. Смоляк*

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-578X> – Веселівський Р.Б.

✉ [roman\\_veselivskuy@yahoo.com](mailto:roman_veselivskuy@yahoo.com)

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ПОЛІСИЛОКСАНУ ТА АЛЮМІНІЮ ОКСИДУ ДЛЯ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Постановка проблеми.** Сьогодні металеві будівельні конструкції набули широкого використання у зведенні будівель і споруд різного призначення, у реконструкції, переоснащенні тощо. Застосування металевих будівельних конструкцій та елементів можливе тільки при відповідності їх технічному регламенту будівельних виробів, особливо в частині забезпечення необхідної нормованої межі вогнестійкості та класу вогнестійкості. На жаль попри значну перевагу у своїх міцнісних властивостях, металеві будівельні конструкції мають низьку межу вогнестійкості, що обмежує їх застосування у тих чи інших будівельних конструкціях відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва». Тому, щоб використання металевих будівельних конструкцій було можливим, актуальним залишається їх вогнезахист.

**Метою роботи** є визначення вогнезахисної здатності високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій.

**Методи досліджень та основні результати.** Для визначення вогнезахисної здатності композиції високотемпературного та вогнезахисного покриття використано методи регламентовані ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання». Ці методи поширюються на випробування вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу). Зокрема використано метод визначення об'ємного коефіцієнта спучення та метод визначення лінійного коефіцієнта спучення.

Проведено огляд досліджень та публікацій стосовно тенденцій захисту сталевих будівельних конструкцій реактивними вогнезахисними покриттями, їх застосування та основних складів. Виконано експериментальні дослідження, щодо визначення лінійного та об'ємного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття за стандартизованим методом. Експериментально досліджено залежність товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару. Встановлено, що вказаний у стандарті діапазон товщини шару покриття не дозволяє визначити найбільш ефективну товщину покриття при проведенні досліджень з двома товщинами шару.

**Висновки.** Ґрунтуючись на проведених експериментальних дослідженнях визначено показники вогнезахисної ефективності покриття, а саме: об'ємний коефіцієнт спучення покриття становить 10442,75 мм<sup>3</sup>/г, коефіцієнт умовно-лінійного спучення – 1,717, лінійний коефіцієнт спучення покриття – 38. Визначено залежність товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару та встановлено, що найбільше спучення відбувається при товщині сухого покриття 0,6 мм, а зі збільшенням чи зменшенням товщини нанесення, показник спучення зменшується, цілісність покриття порушується а відповідно і коефіцієнт лінійного спучення.

**Ключові слова:** металева будівельна конструкція, вогнезахисна ефективність, високотемпературне та вогнезахисне покриття, об'ємний коефіцієнт спучення, лінійний коефіцієнт спучення.

*R. B. Veselivskyy, D. V. Smolyak*

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

### EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FIRE PROTECTION ABILITY OF FIRE PROTECTION COATING BASED ON POLYSILOXANE AND ALUMINUM OXIDE FOR STEEL BUILDING STRUCTURES

**Formulation of the problem.** Today, metal constructions are widely used in the construction of buildings and structures for various purposes, in reconstruction, re-equipment, etc. The use of metal building structures and elements is possible only if

they comply with the technical regulations of construction products, especially in terms of ensuring the necessary standardised limit of fire resistance and fire resistance class. Unfortunately, despite the great advantage in their strength properties, metal building structures have a low limit of fire resistance, which limits their use in the form of certain building structures following DBN V.1.1-7:2016 "Fire safety objects of construction. General requirements." Therefore, the possibility of using metal building structures, and their fire protection remains relevant.

**The aim** of the work is to a determination of the fire-retardant ability of high-temperature and fire-resistant coatings based on polysiloxane and aluminium, titanium, and chromium oxides for metal building structures.

**Research methods and main results.** The methods regulated by DSTU-N-P B V.1.1-29:2010 «Fire retardant treatment of building constructions. General requirements and methods of controlling» were used to determine the fire retardant ability of the composition of high-temperature and fire-resistant coatings. These methods apply to the testing of flame retardants that swell (increase their volume during heat exposure). In particular, the method of determining the volume coefficient of swelling and the method of determining the linear coefficient of swelling was used.

A review of research and publications on the trends in the protection of steel building structures with reactive fire retardant coatings, their application and main compositions was carried out. Experimental studies were performed to determine the linear and volume coefficient of swelling of high-temperature and fire-resistant coatings according to a standardised method. The dependence of the swelling thickness of the fireproof coating on the thickness of the applied layer was experimentally investigated. It was established that the range of coating layer thickness specified in the standard does not allow determining the most effective thickness of the applied coating when conducting studies with two-layer thicknesses.

**Conclusions.** Based on the conducted experimental studies, the indicators of the fire-resistant effectiveness of the coating were determined, namely: the volume coefficient of swelling of the coating is 10442,75 мм<sup>3</sup>/g, coefficient of conventional linear swelling – 1,717, linear coefficient of swelling of the coating – 38. The dependence of the swelling thickness of the fireproof coating on the thickness of the applied layer was determined, and it was established that the largest swelling value is at a dry coating thickness of 0.6 mm, and with an increase or decrease in the application thickness, the swelling index decreases, the integrity of the coating is violated and, accordingly, the coefficient of linear swelling.

**Keywords:** metal building structure, fire retardant efficiency, high temperature and fire protection coating, volumetric expansion coefficient, linear expansion coefficient.

**Постановка проблеми.** Сьогодні металеві будівельні конструкції широко використовують у зведенні будівель і споруд різного призначення, під час реконструкції, переоснащення тощо. Застосування металевих будівельних конструкцій та елементів можливе лише за відповідності їх технічному регламенту будівельних виробів [1], особливо в частині забезпечення необхідної нормованої межі вогнестійкості та класу вогнестійкості. На жаль попри велику перевагу у своїх міцнісних властивостях, металеві будівельні конструкції мають низьку межу вогнестійкості, що обмежує їх застосування у вигляді тих чи інших будівельних конструкцій у відповідності до [2]. Тому, для можливості використання металевих будівельних конструкцій, актуальним залишається їх вогнезахист.

**Мета роботи.** Визначення вогнезахисної здатності високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій [3].

**Огляд досліджень та публікацій.** Згідно з [4], вогнезахисні засоби, залежно від складу та властивостей, поділяються на: просочувальні вогнезахисні речовини, вогнезахисні фарби, вогнезахисні лаки, вогнезахисні пасти (обмазки), вогнезахисні штукатурки, облицювальні вогнезахисні засоби, вогнезахисні вироби, що залежно від методів захисту поділяються на пасивні та реактивні. Основні способи вогнезахисту металевих будівельних

конструкцій, їх переваги, недоліки та особливості застосування представлено у [5].

Впродовж останніх років все більшого застосування набувають реактивні вогнезахисні покриття. Авторами та дослідниками розробляються нові склади, які ефективно захищають металеві будівельні конструкції від впливу пожежі, а відповідно і від руйнування. Основні тенденції захисту сталевих будівельних конструкцій реактивними вогнезахисними покриттям, дія антипіренів і вогнезахисних покриттів з точки зору принципів, типів, механізмів і властивостей, представлені у [6, 7]. Високотемпературні вогнезахисні покриття розробляються на основі силіційорганічних сполук [8, 9], поліалюмосилоксанів [10], поліметилфенілсилоксанів [11], метилолімерних смол [12], полімерних складових та нанокомпозитів [13, 14, 15].

Для оцінки вогнезахисної здатності розробленого покриття [3] для сталевих конструкцій на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану та хрому, пропонується використовувати метод визначення об'ємного та лінійного коефіцієнта спучення [16].

**Методи досліджень.** Для визначення вогнезахисної здатності композиції високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для сталевих будівельних конструкцій (далі покриття) використано методи, регламентовані п. 7.3.2 та 7.3.3 ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи

контролювання». Ці методи поширюються на випробування вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу).

Сутність методу визначення об'ємного коефіцієнта спучення полягає у визначенні об'єму вогнезахисного засобу, що утворився з певної маси засобу після впливу температури 340 °С. Застосовується для вогнезахисних покривів і однорідних матеріалів та сумішей (фарби, лаки тощо). За результатами випробувань за методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення розраховується об'ємний коефіцієнт спучення  $K_{об}$  за формулою:

$$K_{об} = 0,125 \pi d^2 (h_{c1}/m_1 + h_{c2}/m_2) [\text{мм}^3/\text{г}] \quad (1)$$

де  $d$  - діаметр скляного стакану, мм;

$h_{c1}, h_{c2}$  - висота спученого шару першої та другої наважки матеріалу, мм;

$m_1, m_2$  - маса першої та другої наважки матеріалу, г.

Сутність методу визначення лінійного коефіцієнта спучення полягає у визначенні

співвідношення товщини вогнезахисного матеріалу, нанесеного на сталеву пластину, до та після впливу температури 340 °С. Метод застосовують для матеріалів, які постачаються із фіксованими розмірами (стрічки, рулони, пластини тощо). За результатами випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення розраховується коефіцієнт спучення на пластинах Кл за формулою:

$$K_{л} = 0,5 (h_{c1} / h_{п1} + h_{c2} / h_{п2}) \quad (2)$$

де  $h_{c1}, h_{c2}$  – середні значення товщини спученого шару матеріалу на першій та другій пластинах, мм;

$h_{п1}, h_{п2}$  – середні значення товщини початкового шару матеріалу на першій та другій пластинах, мм.

У таблиці 1 наведено технічні характеристики повірених вимірювальних приладів, що використані при проведенні експериментальних досліджень.

Таблиця 1

Технічні характеристики вимірювальних приладів

| № з/п | Найменування приладу чи пристрою | Заводський номер | Границя вимірювання | Клас точності або похибка вимірювання |
|-------|----------------------------------|------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 1     | Електропіч СНОЛ 2.5              | б/н              | Від 20 до 1100 °С   | -                                     |
| 2     | Регулятор-вимірювач РТ 0102      | 05.387           | Від 0 до 1200 °С    | ± 2°С                                 |
| 3     | Термопара ТХА                    | 5                | Від 0 до 1200 °С    |                                       |
| 4     | Секундомір СОПрр                 | 8625             | Від 0 до 1800 с     | ± 1с                                  |
| 5     | Ваги ВТУ 210/ СЗ                 | 1826             | Від 0,001 до 210 г  | Кл. точн. 3                           |
| 6     | Лінійка вимірювальна             | б/н              | Від 0 до 1000 мм    | ± 0,5 мм                              |
| 7     | Штангенциркуль ШЦ-I-200-0,02     | 0805174          | Від 0 до 200 мм     | ± 0,02 мм                             |
| 8     | Товщиномір Profiline TG-8855-fn  | 04864            | Від 0 до 1250 мкм   | ± 1мкм                                |

**Виклад основного матеріалу.** Склад композиції досліджуваного високотемпературного та вогнезахисного покриття включає полісилоксан і алюмінію оксид, як полісилоксановий компонент – містить поліметилфенілсилоксановий лак і додатково титану (IV) та хрому (III) оксиди у співвідношенні компонентів, що детально описано у [3].

Для дослідження вогнезахисної здатності покриття методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення було виготовлено корзинку з алюмінієвої фольги розміром 160x60x10 мм, яку заповнили шаром покриття середньою висотою 2,07 мм, що виміряно у п'яти точках рівномірно по довжині зразка із вогнезахисного матеріалу після його висушування.

З отриманого матеріалу покриття утворили дві наважки з гранул розміром не більше

2 мм та вагою 2,96 та 2,04 відповідно, які помістили у склянки з термостійкого скла діаметром 50 мм.

Для дослідження вогнезахисної здатності покриття ці склянки було поміщено у електропіч, що прогрівалась протягом однієї години до заданої температури 340 °С, на 20 хв. Після випробування та охолодження досліджуваного зразка покриття, штангенциркулем визначили середнє значення висоти спученого шару матеріалу у кожній склянці, вимірявши висоту у п'яти точках: у центрі склянки і на серединах чотирьох радіусів. Висота спученого шару становила 13,48 та 2,42 мм у першій та другій склянках відповідно (рис. 1).



**Рисунок 1** – Зразки спученого покриття після проведення випробувань

Використовуючи результати експериментальних досліджень розраховуємо об'ємний коефіцієнт спучення покриття:

$$K_{об} = 0,125 \pi d^2 (h_{c1}/m_1 + h_{c2}/m_2) \text{ [мм}^3/\text{г]},$$

$$K_{об} = 0,125 \times 3,14 \times 50^2 \times (13,48/2,96 + 12,42/2,04) = 10442,75 \text{ мм}^3/\text{г}.$$

Додатково розраховуємо умовний лінійний коефіцієнт спучення  $K_{ул}$  за формулою:

$$K_{ул} = 0,125 \cdot 10^{-4} \pi \cdot d^2 \cdot \rho_{п} \cdot (h_{c1}/m_1 + h_{c2}/m_2) \quad (3)$$

$$\rho_{п} = 103 \cdot m / (l \cdot a \cdot h) \text{ [г/см}^3\text{]},$$

$$\rho_{п} = 10^3 \cdot 32,7 / (160 \cdot 60 \cdot 2,07) = 1,645 \text{ [г/см}^3\text{]},$$

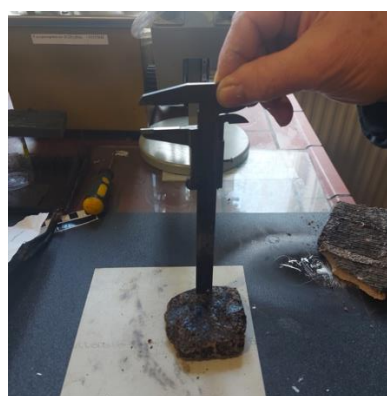
$$K_{ул} = 0,125 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 50^2 \cdot 1,645 \cdot (13,48/2,96 + 12,42/2,04) = 1,717$$

Згідно з результатами експериментальних досліджень та відповідних розрахунків, визначено, що об'ємний коефіцієнт спучення покриття становить 10442,75 мм<sup>3</sup>/г, коефіцієнт умовно-лінійного спучення – 1,717.

Для дослідження вогнезахисної здатності покриття методом визначення лінійного коефіцієнта спучення було виготовлено дві сталеві квадратні пластини зі стороною 50 мм та товщиною 2 мм, на які нанесли шар покриття середньою товщиною в сирому стані 0,8 та 1 мм, після висихання середня товщина сухого шару становила 0,53 та 0,68 мм на 1-ій та 2-ій пластині відповідно.

Два зразки сталевих пластин з покриттям було поміщено у електропіч, що попередньо прогрівалась протягом однієї години до температури 340 °С, на 20 хв.

Через 30 хв після випробування та охолодження досліджуваного зразка покриття, штангенциркулем визначили середню висоту спученого шару матеріалу на кожній пластині, вимірявши висоту у п'яти точках: у центрі пластини і в середніх точках між центром та кутами пластини. Висота спученого шару становила 22,5 та 23,2 мм на 1-ій та 2-ій пластині відповідно (рис. 2).



**Рисунок 2** – Зразки сталевих пластин з покриттям після проведення випробувань

Використовуючи результати експериментальних досліджень розраховуємо лінійний коефіцієнт спучення покриття:

$$K_{л} = 0,5 (h_{c1} / h_{п1} + h_{c2} / h_{п2}),$$

$$K_{л} = 0,5 (22,5 / 0,53 + 23,5 / 0,68) = 38$$

Згідно з результатами експериментальних досліджень та відповідних розрахунків, визначено, що лінійний коефіцієнт спучення покриття становить 38.



Наступним етапом досліджень було визначення залежності товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару. Це дослідження вогнезахисної здатності покриття виконувалось методом визначення лінійного коефіцієнта спучення, що описано вище у роботі. Досліджуване покриття наносилося на сталеві пластини, згідно з методикою [16], групами. Товщина шару покриття пластин після

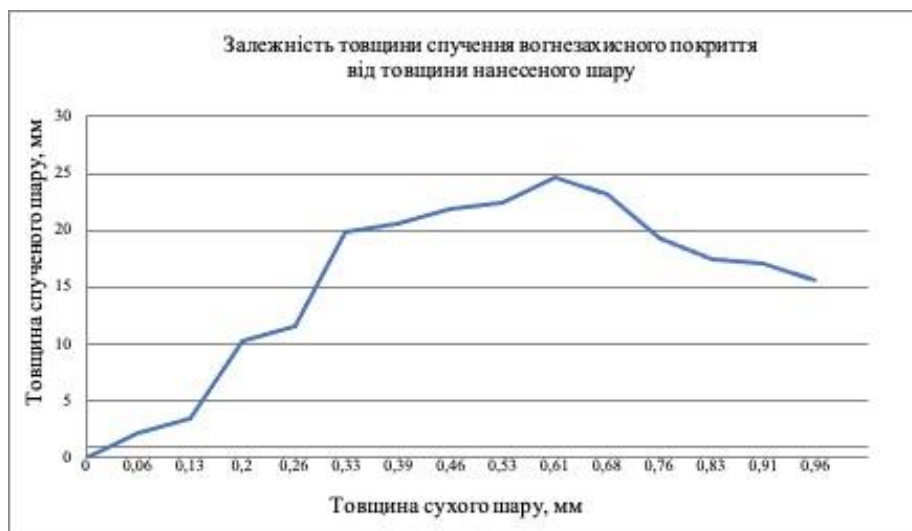
висихання становила: група 1 (0,06 мм та 0,13 мм); група 2 (0,2 мм та 0,26 мм); група 3 (0,33 мм та 0,39 мм); група 4 (0,46 мм та 0,53 мм); група 5 (0,61 мм та 0,68 мм); група 6 (0,76 мм та 0,83 мм), група 7 (0,91 мм та 0,96 мм). Виконавши експерименти та розрахунки за формулою (2) ми отримали лінійні коефіцієнти спучення покриття для досліджуваних груп. Зведені результати представлено у таблиці 2.

**Таблиця 2**

Зведені результати експериментальних досліджень залежності товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару експериментальних досліджень.

| Показники                                     | Група 1                   | Група 2   | Група 3   | Група 4   | Група 5   | Група 6   | Група 7   |
|---|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Колір і зовнішній вигляд покриття             | білий, матова поверхня    |           |           |           |           |           |           |
| Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм  | 1,65 кг/м <sup>2</sup> мм |           |           |           |           |           |           |
| Сталева квадратна пластина розмір сторони, мм | 50                        |           |           |           |           |           |           |
| Товщина сталеві квадратної пластини, мм       | 2                         |           |           |           |           |           |           |
| Середня товщина сирого шару, мм               | 0,1/0,2                   | 0,3/0,4   | 0,5/0,6   | 0,7/0,8   | 0,9/1,0   | 1,1/1,2   | 1,3/1,4   |
| Середня товщина сухого шару, мм               | 0,06/0,13                 | 0,2/0,26  | 0,33/0,39 | 0,46/0,53 | 0,61/0,68 | 0,76/0,83 | 0,91/0,96 |
| Середня товщина спученого шару, мм            | 2,1/3,4                   | 10,3/11,6 | 19,9/20,6 | 21,9/22,5 | 24,6/23,2 | 19,3/17,5 | 17,0/15,7 |
| Коефіцієнт лінійного спучення, мм             | 30,05                     | 48,05     | 56,55     | 45,02     | 37,2      | 23,23     | 17,5      |

Відповідно до отриманих даних будуємо залежність товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару (рис. 3).



**Рисунок 3** – Залежність товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару

Як видно із наведеної залежності, найбільшого значення спучення набуває при товщині сухого покриття 0,6 мм, зі збільшенням товщини нанесення показник спучення зменшується, а відповідно і коефіцієнт лінійного спучення.

Слід зауважити, що вказаний у стандарті [16] діапазон товщини шару покриття після висихання, що має становити (1,0±0,5) мм, не дає змоги визначити найбільш ефективну товщину нанесеного покриття. Так, при проведенні

стандартних досліджень з двома товщинами шару сухого покриття, що перебувають в регламентованому діапазоні від 0,5 до 1,5 мм, коефіцієнт лінійного спучення буде варіювати від 45 до 17,5, а товщина спученого шару 24,6 до 15,7 мм. При цьому експериментальні дослідження залежності товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару, показали, що найбільш ефективною товщиною сухого шару покриття буде значення 0,61 мм, при якому товщина спучення буде становити 24,6 мм. При подальшому

збільшенні товщини нанесення покриття, при нагріванні, воно розтріскується, стікає, а товщина спучення зменшується.

**Висновок та перспективи подальших досліджень.** Грунтуючись на проведених експериментальних дослідженнях визначено показники вогнезахисної ефективності покриття, а саме:

1. Об'ємний коефіцієнт спучення покриття, що становить 10442,75 мм<sup>3</sup>/г, коефіцієнт умовно-лінійного спучення – 1,717;

2. Лінійний коефіцієнт спучення покриття, що становить 38;

3. Визначено залежність товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару та встановлено, що найбільшого значення спучення набуває при товщині сухого покриття 0,6 мм, а зі збільшенням чи зменшенням товщини нанесення, показник спучення зменшується, цілісність покриття порушується, а відповідно і коефіцієнт лінійного спучення.

Враховуючи отримані результати, перспективними та цікавими будуть і наступні дослідження вогнезахисної ефективності покриття для сталевих будівельних конструкцій за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі.

#### Список літератури:

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Технічного регламенту будівельних виробів, будівель та споруд»: затверджена 20 грудня 2006 р. № 1764. Офіційний вісник України. 2006. С. 145.

2. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний від 31.10.2016]. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 39 с.

3. Композиція для високотемпературного та вогнезахисного покриття: пат. 71300 Україна: С09D 5/18. № u 2011 15337; заявл. 26.12.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

4. Правила з вогнезахисту: НАПБ Б.01.012-2019 [Чинний від 05.04.2019] Київ: Міністерство внутрішніх справ України, 2018.

5. Веселівський Р.Б., Смоляк Д.В. Способи вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій. Пожежна безпека. 2021. № 39. С. 63–76.

6. Mohd Sabee, M., Itam, Z., Beddu, S., Zahari, N. M., Mohd Kamal, N. L., Mohamad, D., Zulkepli, N. A., Shafiq, M. D., & Abdul Hamid, Z. A. (2022). Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers. *Polymers*, 14(14), 2911. <https://doi.org/10.3390/polym14142911>.

7. Muhammad Yasir, Faiz Ahmad, Puteri Sri Melor Megat Yusoff, Sami Ullah &

Maude Jimenez (2020) Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review, *Surface Engineering*, 36:4, 334-363, DOI: 10.1080/02670844.2019.1636536.

8. Гивлюд М.М., Коцій Я.Й., Лоїк В.Б., Артеменко В.В. Вогнезахист будівельних конструкцій речовинами на основі наповнених силіційорганічних сполук. Пожежна безпека. 2012. № 21. С. 32–38.

9. Гивлюд М.М., Артеменко В.В., Яковчук Р.С., Веселівський Р.Б. Вогнезахисні речовини на основі наповнених силіційелементорганічних зв'язок для металевих конструкцій. Науковий вісник НЛТУ України. 2016. № 26.1. С. 217–222.

10. Артеменко В.В., Яковчук Р.С., Міллер О.В., Харчук А.І. Підвищення межі вогнестійкості металевих конструкцій вогнезахисними речовинами. Науковий вісник НЛТУ України. 2015. № 25.5. С. 178–183.

11. 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. 2018. № 32. С. 55–62.

12. Березовський А.І., Маладика І.Г., Яковлев Р.А. Захист металевих конструкцій від впливу високих температур вогнезахисними покриттями, що спучуються. Вісник ЧДТУ. 2010. № 2. С. 127-131

13. Weil E.D. Fire-Protective and Flame-Retardant Coatings - A State-of-the-Art Review. *Journal of Fire Sciences*. 2011; 29(3): 259-296. DOI: 10.1177/0734904110395469.

14. Калафат К.В., Таран Н.А., Плаван В.П., Вахітова Л.М. Термодеструкція нанокомпозитів полімер-наогилина у вогнезахисних інтумесцентних покриттях. *Advanced Polymer Materials and Technologies: conference proceedings of the III International scientific conference, dedicated to the 90th anniversary of KNUTD, Kyiv, 14-15 April 2020 / red.: V. P. Plavan, I. O. Liashok, M. K. Koliada. – Kyiv: KNUTD, 2020. – P. 104-114.*

15. Ahmed, L., Zhang, B., Hatanaka, L. C., & Mannan, M. S. (2018). Application of polymer nanocomposites in the flame retardancy study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55, 381-391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.005>.

16. Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання: ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 [Чинний від 30-12-2010]. Київ: Міністерства регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 15 с.

## References:

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Technical regulations of building products, buildings and structures from 20 December 2006, № 1764. (2006). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*. p. 145 [in Ukrainian].
2. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva [Fire safety objects of construction. General requirements]. (2016). DBN V.1.1-7: 2016 from 31st October 2016. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. [in Ukrainian].
3. Hyvliud M.M., Smolyak D.V. (2012) Kompozytsiia dlia vysokotemperaturnoho ta vohnezakhysnoho pokryttia [Composition for high temperature and flame retardant coating]. Patent UA, no. 71300.
4. Pravyla z vohnezakhystu [Fire protection rules]. (2018). NAPB B. 01.012-2019 from 5 st April 2019. Kyiv: Ministry of Internal Affairs of Ukraine [in Ukrainian].
5. Veselivskyy R. B., Smolyak D.V. (2021) Sposoby vohnezakhystu metalevykh budivnykh konstrukttsii [Methods of fire protection of metal building structures]. *Pozhezhna bezpeka*, 39, 63–76 [in Ukrainian].
6. Mohd Sabee, M., Itam, Z., Beddu, S., Zahari, N. M., Mohd Kamal, N. L., Mohamad, D., Zulkepli, N. A., Shafiq, M. D., & Abdul Hamid Z. A. (2022). Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers. *Polymers*, 14(14), 2911. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14142911>.
7. Muhammad Yasir, Faiz Ahmad, Puteri Sri Melor Megat Yusoff, Sami Ullah & Maude Jimenez (2020) Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review, *Surface Engineering*, 36:4, 334-363, DOI: 10.1080/02670844.2019.1636536.
8. Hyvliud M.M., Kotsii Ya.Yo., Loik V.B., Artemenko V.V. (2012) Vohnezakhyst budivnykh konstrukttsii rehovynamy na osnovi napovnenykh sylitsiiorhanichnykh spoluk [Fire protection of building construction by substance on the basis of filled silicium organic composition]. *Pozhezhna bezpeka*, 39, 63–76 [in Ukrainian].
9. Hyvlyud M.M., Artemenko V.V., Yakovchuk R.S., Veselivskyy R.B. (2016) Vohnezakhysni rehovyny na osnovi napovnenykh sylitsiielementoorhanichnykh zviazok dlia metalevykh konstrukttsii [Fireproof Substances Based on the Silicon-Filled and Organic Element Ligaments for Metallic Constructions]. *Naukovyi visnyk NLTU*. 26.1. P. 217–223 [in Ukrainian].
10. Artemenko V.V., Yakovchuk R.S., Miller O.V., Kharchuk A.I. (2015) Pidvyshchennia mezhi vohnestiikosti metalevykh konstrukttsii vohnezakhysnymy rehovynamy [Fire Resistance by Fire Protective Substances of Metal Structures]. *Naukovyi visnyk NLTU*. 25.5. P. 178–183 [in Ukrainian].
11. Pazen O.Yu., Vovk S.Ya., Bashynskiy O.I., Peleshko M.Z. (2018). Vyznachennia efektyvnosti vohnezakhysnoho pokryttia na osnovi polimetylfenilsyloksanu dlia stalevykh budivnykh konstrukttsii [Definition of efficiency of polymethylphenylsiloxane-based fire protective coatings for steel building structures]. *Pozhezhna bezpeka*, 32, 55–62 [in Ukrainian].
12. Berezovskyy A.I., Maladyka I.G., Yakovlev R.A. (2010). Zakhyst metalevykh konstrukttsii vid vplyvu vysokykh temperatur vohnezakhysnymy pokryttiamy, shcho spuchuiutsia [Protection of metal structures from exposure to high temperatures with intumescent fireproof coatings]. *Visnyk ChDTU*, 2, 127–131 [in Ukrainian].
13. Weil E.D. Fire-Protective and Flame-Retardant Coatings - A State-of-the-Art Review. *Journal of Fire Sciences*. 2011;29(3):259-296. doi:10.1177/0734904110395469.
14. Kalafat K.V., Taran N.A., Plavan V.P., Vakhitova L.M. Thermal destruction of polymer-nanoclay nanocomposites in fire-resistant intumescent coatings. *Advanced Polymer Materials and Technologies: conference proceedings of the III International scientific conference, dedicated to the 90th anniversary of KNUTD, Kyiv, 14-15 April 2020 / red.: V. P. Plavan, I. O. Liashok, M. K. Koliada. – Kyiv: KNUTD, 2020. – P. 104-114.*
15. Ahmed, L., Zhang, B., Hatanaka, L. C., & Mannan, M. S. (2018). Application of polymer nanocomposites in the flame retardancy study. *Journal of Loss Prevention in the Process industries*, 55, 381-391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.005>.
16. Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysne obroblennia budivnykh konstrukttsii. Zahalni vymohy ta metody kontroliuvannia [Fire retardant treatment of building constructions. General requirements and methods of controlling]. (2010). DSTU N-P B V.1 .1-29:2010 from 30st December 2010. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. [in Ukrainian].

© Р. Б. Веселівський, Д. В. Смоляк, 2022.

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 16.11.2022.

Прийнято до публікації 12.12.2022.