

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Смоляк Дмитро Володимирович

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПРОГНОЗУВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК
ІЗ РЕАКТИВНИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ
НА ОСНОВІ ПОЛІСИЛОКСАНУ**

Спеціальність – 261 Пожежна безпека

Галузь знань – 26 Пожежна 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.

_____ Д.В. Смоляк

Науковий керівник: **Веселівський Роман Богданович**
кандидат технічних наук, доцент

Львів – 2024

АНОТАЦІЯ

Смоляк Д.В. Прогнозування вогнестійкості сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів, 2024.

Зміст анотації.

Актуальність теми дослідження. У відсотковому співвідношенні близько 30 % від загальної кількості пожеж виникають та поширюються у будівлях і спорудах виробничого, громадського та житлового призначення. Очевидним є той факт, що найважливіше значення та вплив на розвиток і поширення пожеж в будівлях і спорудах має вогнестійкість будівельних конструкцій, яка повинна враховуватись на етапі проектування. Будівельними нормами як в Україні, так і у світі передбачено, що усі будівельні конструкції, котрі застосовують при зведенні будівель і споруд, повинні мати визначені межі (класи) вогнестійкості. Особливу увагу при застосуванні у будівництві необхідно приділяти саме сталевим конструкціям, оскільки їх межа вогнестійкості становить близько 15 хв залежно від профілю та перерізу конструкції, а це, зі свого боку, обмежує їх застосування у будівлях і спорудах, де передбачено клас вогнестійкості конструкцій > REI 15.

Способами підвищення класу вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій є їх вогнезахист, що може бути реалізований з використанням спеціальних засобів, які захищають сталеву конструкцію від впливу високих температур пожежі. До даних засобів відносять реактивні (інтумесцентні) вогнезахисні покриття та так званий пасивний вогнезахист, що реалізовується шляхом облицювання чи штукатурення будівельних конструкцій негорючими вогнестійкими матеріалами. При застосуванні вогнезахисних речовин та матеріалів ключову роль відіграє їх вогнезахисна здатність (ефективність). Тому дослідження спрямовані на обґрунтування ефективності вогнезахисних речовин (матеріалів) та дослідження

закономірностей часу досягнення критичної температури у вогнезахищеному елементі сталевій конструкції залежно від товщини вогнезахисного покриття, температури нагріву сталевих елементів конструкції та коефіцієнту перерізу вогнезахищеної сталевій конструкції є актуальним завданням.

Ідея роботи полягає у прогнозуванні вогнестійкості стандартних профілів сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану шляхом дослідження впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих балок.

Мета роботи є розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану на межі їх вогнестійкості як наукового підґрунтя формування та обґрунтування технічних параметрів вогнезахисного покриття для стандартних профілів сталевих конструкцій.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз способів вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій та методів визначення вогнезахисної здатності реактивних вогнезахисних матеріалів.
2. Розробити склад вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій на основі наповненого полісилоксану та дослідити співвідношення компонентів розробленої вогнезахисної композиції.
3. Розробити методику проведення експериментальних досліджень визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих будівельних конструкцій.
4. Провести експериментальні дослідження з виявлення впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на критичну температуру прогріву сталевій конструкції.
5. Визначити теплофізичні характеристики реактивного вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та встановити закономірності зміни коефіцієнта

теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахищеному елементі сталевій конструкції залежно від товщини вогнезахисного покриття, температури нагріву сталевих елементів конструкції та коефіцієнту перерізу вогнезахищеної сталевій конструкції.

6. Сформулювати та обґрунтувати технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій.

Об’єкт дослідження – вогнестійкість сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та процес її оцінювання.

Предмет дослідження – вплив конструктивних параметрів стандартних профілів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих конструкцій.

Методи дослідження. В роботі було використано комплексний метод дослідження, який включав: аналіз сучасного стану та способів підвищення межі вогнестійкості сталевих конструкцій шляхом їх вогнезахисту; аналіз складів композицій вогнезахисних покриттів для захисту будівельних конструкцій; аналіз методів та методик оцінки вогнезахисної здатності реактивних покриттів для сталевих конструкцій. Методи фізико-хімічного аналізу вогнезахисного покриття на основі полісилоксану. Експериментальний метод досліджень вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисного покриття, регламентований вимогами ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. Дослідження впливу елементів конструкцій на вогнестійкість здійснювалось у відповідності до ДСТУ EN 13501-2:2023 та ДСТУ EN 13381-8:2022. Для дослідження процесів теплообміну між факелом пожежі та будівельними конструкціями, використано розрахунково-теоретичний метод, заснований на числовому розв’язку нестационарного диференціального рівняння теплопровідності. Під час проведення експериментальних досліджень застосовувалось метрологічно атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання. Обробка результатів досліджень здійснювалась із використанням програмного забезпечення Microsoft Office Excel. Також для обробки результатів

експериментальних та теоретичних досліджень використані методи математичної статистики та методи планування експерименту.

Наукова новизна полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів стандартних профілів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих конструкцій. При цьому:

- *уперше* встановлена залежність часу досягнення критичної температури у вогнезахисних сталевих балках залежно від товщини вогнезахисного покриття на основі полісилоксану (d_p), температури нагріву сталевих елементів конструкції (θ_{SC}) та коефіцієнту перерізу вогнезахисного сталевих елементів (A_m/V), у вигляді:

$$t = -137.706 + 52.25 \cdot d_p + 0.417 \cdot d_p / (A_m/V) - 0.553 \theta_{SC} + 0.310 \cdot d_p \cdot \theta_{SC} - 8 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{SC} / (A_m/V) - 6 \cdot 10^{-4} \theta_{SC} / (A_m/V) - 0.032 / (A_m/V);$$

- *уперше* встановлено закономірності часу прогріву до критичної температури квадратних сталевих пластин (зі стороною (500 ± 5) мм залежно від товщини покриття на основі полісилоксану (0,3 мм, 0,45 мм, 0,6 мм, 0,8 мм) та товщини сталевих пластин (3 мм, 5 мм, 8 мм);

- *удосконалено* метод визначення лінійного коефіцієнта спучення новоствореного вогнезахисного покриття, шляхом збільшення діапазону товщин шару досліджуваного покриття для визначення залежності товщини спучення покриття від товщини нанесеного шару;

- *набула подальшого розвитку* сфера застосування розрахунково-теоретичного методу для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів вогнезахисних сталевих конструкцій при підборі товщини вогнезахисного покриття для забезпечення необхідних класів вогнестійкості.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні технічних параметрів вогнезахисного покриття на основі полісилоксану і алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих балок. Впроваджена в діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 02 травня 2024 року) методика проведення експериментальних досліджень з

визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. Впроваджено у практичну діяльність ТзОВ «Гефест Л» технологічний регламент нанесення складу вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для стандартних профілів сталевих будівельних конструкцій (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 07 травня 2024 року). Методика розрахунку вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття для забезпечення нормованих класів вогнестійкості сталевих балок впроваджена в освітній процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності при підготовці здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 261 «Пожежна безпека» на кафедрі наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 08 травня 2024 року).

У вступі наведено загальну характеристику дисертації, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Представлено: зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами; особистий внесок здобувача; дані про апробацію дисертаційної роботи; кількість публікацій за темою дисертаційної роботи; структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі на підставі аналізу наукових праць встановлено, що для підвищення межі вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій шляхом їх вогнезахисту, актуальним науково-технічним завданням є розроблення нових вогнезахисних покриттів та дослідження їх ефективності. Аналіз складів існуючих вогнезахисних покриттів показав, що для підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій ефективними є вогнезахисні речовини, де основним органічним в'язучим є полісилоксан.

Встановлено, що для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) реактивних вогнезахисних матеріалів для сталевих будівельних конструкцій застосовують методи та методики, що базуються на проведенні експериментальних

досліджень вогнезахисних систем, з подальшою обробкою отриманих експериментальних даних.

Огляд наукових праць та стандартів, в яких представлені методи та методики оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій, показав, що основними показниками, які необхідно встановити під час дослідження ефективності покриттів є залежність часу прогріву сталевих вогнезахищених конструкцій до критичної температури від товщини нанесеного вогнезахисного покриття та перерізу сталевих конструкцій, що підлягає вогнезахисту. Існуючі підходи показали ефективність використання дослідних зразків у вигляді сталевих вогнезахищених пластин при проведенні експериментальних досліджень вогнезахисної здатності нанесених на них вогнезахисних покриттів.

На основі результатів виконаного аналізу сформульовано мету та основні завдання роботи.

У другому розділі обґрунтовано алгоритм проведення досліджень для виявлення впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих конструкцій, зокрема:

- для розроблення та дослідження складу високотемпературного та вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій;
- для дослідження вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисного покриття;
- для оцінювання показників системи вогнезахисту для сталевих будівельних конструкцій при встановленні співвідношення між проміжком часу до досягнення критичної температури сталі, товщиною вогнезахисного матеріалу та коефіцієнтом поперечного перерізу;
- для визначення теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів та виявлення закономірностей зміни коефіцієнта теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахищених сталевих конструкціях стандартного профілю залежно від товщини вогнезахисного покриття та температури нагріву;

- для дослідження температурних показників у перерізах сталевих балок стандартного профілю із вогнезахисним покриттям при впливі пожежі.

У третьому розділі наведено результати розроблення складу вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій на основі наповненого полісилоксану та досліджено співвідношення компонентів розробленої вогнезахисної композиції.

Експериментально встановлено, що об'ємний та лінійний коефіцієнт спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для сталевих будівельних конструкцій складає 10442,75 мм³/г та 38 відповідно. Досліджено залежність товщини спучення вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому від товщини нанесеного шару. Найбільш ефективною товщиною сухого шару покриття є значення 0,61 мм, при якому товщина спучення буде становити 24,6 мм.

Досліджено закономірності часу прогріву до критичної температури квадратних сталевих пластин (зі стороною (500 ± 5) мм залежно від товщини покриття на основі полісилоксану (0,3 мм, 0,45 мм, 0,6 мм, 0,8 мм) та товщини сталевієї пластини (3 мм, 5 мм, 8 мм).

Результати прогріву дослідних зразків сталевієї пластини товщиною 3 мм, показують, що критична температура з необігрівної поверхні була досягнута при товщині вогнезахисного покриття 0,3 мм – на 23 хв, при товщині покриття 0,45 мм – на 34 хв, при товщині покриття 0,6 мм – на 46 хв. При товщині покриття 0,8 мм середня температура прогріву сталевієї пластини товщиною 3 мм на 48 хвилину становила 284 °С, що значно нижче критичної. Отримані результати дають підстави стверджувати про високу вогнезахисну ефективність розробленого покриття.

Також експериментальні дослідження прогріву дослідних зразків сталевих пластин свідчать про те, що товщина пластини не суттєво впливає на час досягнення критичної температури на необігрівній поверхні. Так, при збільшенні товщини пластини від 3 мм до 8 мм при однакових значеннях товщини вогнезахисного покриття час досягнення критичної температури збільшується орієнтовно на 1 хв.

В четвертому розділі виконано дослідження щодо виявлення закономірностей зміни коефіцієнта теплопровідності та часу досягнення критичної температури у

вогнезахисних сталевих конструкціях залежно від товщини вогнезахисного покриття та температури нагріву.

Запропонована методика та виконані експериментальні дослідження вогнезахисної здатності реактивного вогнезахисного покриття на основі полісилоксану для сталевих конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі у діапазоні товщини покриття $0.3 \div 0.8$ мм та коефіцієнта перерізу сталевих конструкцій $125 \div 333 \text{ м}^{-1}$. Отримано та досліджено на основі експериментальних даних залежності коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому та виявлено, що значення коефіцієнта теплопровідності при сталих теплофізичних характеристиках, знаходяться у діапазоні $0.3 \div 0.00015 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Виявлено, що коефіцієнт теплопровідності на початку має більші значення, а потім при температурах більше 200 °C починає суттєво зменшуватися, що свідчить про ініціацію процесу спучування. Показано, що отримані дані щодо коефіцієнта теплопровідності є адекватними, оскільки задовольняють стандартні критерії прийнятності.

Встановлена закономірність залежності часу досягнення критичної температури у вогнезахисних сталевих балках залежно від товщини вогнезахисного покриття (d_p), температури нагріву сталевих елементів конструкції (θ_{SC}) та коефіцієнту перерізу вогнезахисного сталевих елементів (A_m/V), у вигляді $t = -137.706 + 52.25 \cdot d_p + 0.417 \cdot d_p / (A_m/V) - 0.553 \theta_{SC} + 0.310 \cdot d_p \cdot \theta_{SC} - 8 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{SC} / (A_m/V) - 6 \cdot 10^{-4} \theta_{SC} / (A_m/V) - 0.032 / (A_m/V)$.

Обґрунтовано технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану і алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій, що представлено у вигляді таблиць підбору товщини вогнезахисного покриття для забезпечення класів вогнестійкості R 15 – R 90.

У п'ятому розділі методом числового інтегрування диференціального нестационарного рівняння теплопровідності виконано теоретичне дослідження

температурних показників у перерізах сталевих балок стандартного профілю із вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому.

Використовуючи узагальнений теоретичний підхід на основі числового розв'язку нестационарного диференціального рівняння теплопровідності методом кінцевих різниць було визначено середнє значення температури у сталевих балках стандартного двотаврового перерізу.

Шляхом порівняльного аналізу було показано прийнятність отриманих результатів розрахунків за визначеними характеристиками. Середня відносна похибка складає 9.9 % а середньоквадратичне відхилення складає 23.51 °С, що у свою чергу вказує на прийнятну адекватність отриманих розрахункових даних та підтверджує обґрунтовані технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану і алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій при підборі товщини вогнезахисного покриття для забезпечення класів вогнестійкості R 15 – R 90.

Ключові слова: пожежна безпека, вогнезахист, вогнезахисна здатність (ефективність), реактивне (інтумесцентне) покриття, протипожежний захист, експериментальні дослідження, стандартний температурний режим, вогнестійкість, математична модель, коефіцієнт теплопровідності, нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності, розрахунковий метод.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Gyvlyud M.M., Demidchuk L.B., **Smolyak D.V.** Silicium organic coatings for thermal and fireprotection of reinforced concrete. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2014. № 781. С. 46 – 49.
2. **Смоляк Д.В.** Вплив поверхневого захисного покриття на вогнестійкість залізобетонних конструкцій. *Пожежна безпека*. 2015. № 27. С. 121–126.

3. Веселівський Р.Б., Смоляк Д.В. Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*. 2021. № 39. С. 63–76. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.08>.

4. Веселівський Р.Б., Смоляк Д.В. Експериментальні дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 31–37. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.04>.

5. Веселівський Р.Б., Яковчук Р.С., Смоляк Д.В., Петровський В.Л. Методика дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому для сталевих будівельних конструкцій. *Комунальне господарство міст: Серія: Технічні науки та архітектура*. 2024. Том 1 № 182. С. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-171-179>.

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази «Web of Science Core Collection»

6. Veselivskyi R.B., Yakovchuk R.S., Petrovskyi V.L., Havrys A.P., Smolyak D.V., Kahitin O.I. Environmentally safe installation for determining the fire resistance of coatings and fire resistance tests of small fragments building structures. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and-technical collected articles*. 2024. Issue 112. С. 248–257. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.248-257>.

Патенти

Композиція для високотемпературного та вогнезахисного покриття : пат. 71300 Україна: С09D 5/18. № у 201115337; заявл. 26.12.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

Список публікацій, які засвідчують апробацію дисертації

7. Веселівський Р.Б., Смоляк Д.В. Вогнезахист металевих будівельних конструкцій. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) (Черкаси, 26 травня 2022 р.)*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 62–63.

8. Смоляк Д.В., Веселівський Р.Б. Вогнезахист металевих будівельних конструкцій шляхом фарбування/лакування. *Актуальні проблеми пожежної безпеки*

та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Львів, 1 жовтня 2022 р.). Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 20–22.

9. Веселівський Р.Б., **Смоляк Д.В.**, Придатко В.В. Вогнезахист металевих будівельних конструкцій шляхом штукатурення. *Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»)*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 12 жовтня 2022 р.). Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 67–69.

10. **Смоляк Д.В.**, Веселівський Р.Б. Експериментальні дослідження об'ємного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття. *Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності*: збірник наукових праць XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів (Львів, 30-31 березня 2023 р.). Львів: ЛДУБЖД, 2023. С. 127–130.

11. Веселівський Р.Б., **Смоляк Д.В.** Вогнезахист металевих будівельних конструкцій шляхом облицювання. *«Problems of emergency situations»*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 19 травня 2023 р.). Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 24–25.

12. Y. Starodub, R. Veselivsky, D. **Smolyak, R.**, Hushchak. Ecology-geophysical environment eexperimental studies of the coating based on polysiloxane for steel building structures. *«Challenges in Science of Nowadays» Physics and Maths*: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference (Washington, USA, December 6-8, 2023). Washington, USA, Scientific Collection «InterConf», 2023. № 181. P 354-360.

13. Веселівський Р.Б., Яковчук Р.С., **Смоляк Д.В.** Експериментальні дослідження вогнезахисної здатності реактивного вогнезахисного покриття на сталевій пластині розміром 500x500 мм товщиною 0,3 см. *Проблеми пожежної безпеки 2024 («Fire Safety Issues 2024»)*: матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 27 березня 2024 р.). Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 121–123.

SUMMARY

Smolyak D.V. Prediction of steel beams fire resistance with a reactive fire retardant coating based on polysiloxane. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 261 "Fire Safety". – Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2024.

Abstract content.

Relevance of the research topic. As a percentage, about 30% of the total number of fires originate and spread in industrial, public and residential buildings and structures. It is obvious that the fire resistance of building structures has the most important importance and influence on the development and spread of fires in buildings and structures, which must be taken into account at the design stage. Building regulations both in Ukraine and in the world provide that all building structures used in the construction of buildings and structures must have defined limits (classes) of fire resistance. Special attention should be paid to steel structures when used in construction, since their fire resistance limit is about 15 minutes depending on the profile and cross-section of the structure, and this, in turn, limits their use in buildings and structures where the fire resistance class of structures is provided $> REI 15$.

Ways to increase the fire resistance class of steel building structures are their fire protection, which can be implemented using special means that protect the steel structure from the effects of high fire temperatures. These means include reactive (intumescent) fire-resistant coatings and the so-called passive fire protection, which is implemented by lining or plastering building structures with non-combustible fire-resistant materials. When using flame retardant substances and materials, their flame retardant ability (efficiency) plays a key role. Therefore, research focused on the substantiation of the effectiveness of fire-retardant substances (materials) and the study of the patterns of the time it takes to reach the critical temperature in a fire-resistant element of a steel structure depending on the thickness of the fire-resistant coating, the heating temperature of the steel element of

the structure, and the cross-section ratio of the fire-resistant steel structure is an urgent task.

The idea of the work is to predict the fire resistance of standard profiles of steel beams with a reactive fire retardant coating based on polysiloxane by studying the influence of steel structures structural parameters with a reactive fire retardant coating based on polysiloxane and the value of the minimum thickness of the fire retardant coating on the steel beams fire resistance limit.

The purpose of the work is to reveal the laws of influence of steel structures structural parameters with a reactive fire-resistant coating based on polysiloxane at the limit of their fire resistance as a scientific basis for the formation and justification of the technical parameters of the fire-resistant coating for standard profiles of steel structures.

Objectives of the study:

1. To conduct an analysis of fire protection methods of steel building structures and methods of determining the fire protection ability of reactive fire retardant materials.
2. To develop the composition of a fire-resistant coating for steel structures based on filled polysiloxane and to investigate the optimal ratio of the components of the developed fire-resistant composition.
3. Develop a methodology for conducting experimental studies to determine the fire-resistant ability (efficiency) of fire-resistant coatings for steel building structures.
4. To conduct experimental studies to identify the influence of steel structures structural parameters with a reactive fire-resistant coating based on polysiloxane and the value of the fire-resistant coating minimum thickness on the steel structure critical heating temperature.
5. To determine the thermophysical characteristics of the reactive fire-resistant coating based on polysiloxane and establish the patterns of changes in the coefficient of thermal conductivity and the time to reach the critical temperature in the fire-resistant element of the steel structure depending on the thickness of the fire-resistant coating, the heating temperature of the structure steel element and the cross-section coefficient of the fire-resistant steel structure.

6. To form and justify the technical parameters of fire-resistant coating based on polysiloxane for the design of fire-resistant systems of steel structures standard profiles.

The object of the study is the steal beam fire resistance with a reactive fire retardant coating based on polysiloxane and the process of its evaluation.

The subject of the study is the influence of the design parameters of standard profiles of steel structures with a reactive fire-resistant coating based on polysiloxane and the value of the minimum thickness of the fire-resistant coating on the fire resistance limit of steel structures.

Research methods. In the work, a complex research method was used, which included: analysis of the current state and methods of increasing the fire resistance limit of steel structures by means of their fire protection; analysis of compositions' ingredients of fire-resistant coatings for the protection of building structures; analysis of methods and techniques for evaluating the fire-resistant ability of reactive coatings for steel structures. Methods of physico-chemical analysis of polysiloxane-based flame retardant coating. The experimental method of researching the fire-resistant ability (efficiency) of the fire-resistant coating, regulated by the requirements of DSTU-N-P B V.1.1-29:2010 (National Standards of Ukraine). The study of the effect of structural elements on fire resistance was carried out in accordance with DSTU EN 13501-2:2023 (National Standards of Ukraine) and DSTU EN 13381-8:2022 (National Standards of Ukraine). To study the processes of heat exchange between the fire torch and building structures, a calculation-theoretical method based on the numerical solution of the non-stationary differential equation of heat conduction was used. During the experimental studies, metrologically certified equipment and certified measuring tools were used. Research results were processed using Microsoft Office Excel software. Also, methods of mathematical statistics and methods of experiment planning were used to process the results of experimental and theoretical research.

The scientific novelty consists in revealing the regularities of the influence of steel structures structural parameters with a reactive fire-resistant coating based on polysiloxane and the value of the minimum thickness of the fire-resistant coating on the fire resistance limit of steel structures. With:

- *for the first time*, the dependence of the time to reach the critical temperature in fire-resistant steel beams was established depending on the thickness of the fire-resistant coating based on polysiloxane (d_p), the heating temperature of the steel structural element (θ_{SC}) and the section coefficient of the fire-resistant steel element (A_m/V), in the form:

$$t = -137.706 + 52.25 \cdot d_p + 0.417 \cdot d_p / (A_m/V) - 0.553 \theta_{SC} + 0.310 \cdot d_p \cdot \theta_{SC} - 8 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{SC} / (A_m/V) - 6 \cdot 10^{-4} \theta_{SC} / (A_m/V) - 0.032 / (A_m/V);$$

- *for the first time*, the regularities of the heating time to the critical temperature of square steel plates (with side (500 ± 5) mm depending on the thickness of the coating based on polysiloxane (0,3 mm, 0,45 mm, 0,6 mm, 0,8 mm) and the thickness steel plate (3 mm, 5 mm, 8 mm);

- *the method of determining* the linear coefficient of swelling of the newly created fire-resistant coating was improved by increasing the range of thicknesses of the investigated coating layer to determine the dependence of the thickness of the coating swelling on the thickness of the applied layer;

- *the field of application* of the calculation-theoretical method for the design of fire-resistant systems of standard profiles of fire-resistant steel structures during the selection of the thickness of the fire-resistant coating to ensure the required classes of fire resistance has gained further development.

The practical significance of the obtained results lies in the substantiation of the technical parameters of the fire-resistant coating based on polysiloxane and aluminum oxide for the design of fire-resistant systems of standard profiles of steel beams. The method of conducting experimental studies to determine the fire-resistant ability (effectiveness) of fire-resistant coatings for steel structures has been implemented in the activities of the Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection (the act on the implementation of the results of the dissertation work dated 02 May 2024). The technological regulations for the application of a fire-resistant coating composition based on polysiloxane and aluminum oxide for standard profiles of steel building structures have been implemented into the practical activities of "Gefest L" LLC (the act on the implementation of the results of the dissertation work dated 07 May 2024). The methodology for calculating the fire-resistant ability of a fire-resistant coating to

ensure the standardized fire resistance classes of steel beams is implemented in the educational process of the Lviv State University of Life Safety in the preparation of students of the first (bachelor) degree of higher education in the specialty 261 "Fire Safety" at the Department of Supervisory and Preventive Activities and Fire Automation (Act on the implementation of the dissertation results from 08 May 2024).

In the introduction, the general characteristics of the dissertation are given, the relevance of the research topic is justified, the goal and task of the research are formulated, the object and subject of the research are defined, the scientific novelty and practical significance of the obtained results are given. Presented: connection of work with scientific programs, plans and topics; personal contribution of the acquirer; data on the approval of the dissertation work; the number of publications on the topic of the dissertation; structure and scope of the dissertation.

In the first chapter, on the basis of the analysis of scientific works, it was established that in order to increase the fire resistance limit of steel building structures by means of their fire protection, an urgent scientific and technical task is the development of new fire protection coatings and the study of their effectiveness. The analysis of the compositions of the existing fire-resistant coatings showed that fire-resistant substances, where the main organic binder is polysiloxane, are effective for increasing the fire resistance limit of building structures.

It has been established that methods and techniques based on conducting experimental studies of fire protection systems, with further processing of the obtained experimental data, are used to determine the fire protection ability (efficiency) of reactive fire protection materials for steel building structures.

A review of scientific works and standards, which present methods and techniques for assessing the fire-resistant ability of coatings for steel structures, showed that the main indicators that must be established during the study of the effectiveness of coatings are the dependence of steel fire-resistant structures heating time to the critical temperature on the thickness of the applied fire-resistant coating and section of a steel structure subject to fire protection. Existing approaches have shown the effectiveness of using test samples in the

form of steel fire-resistant plates when conducting experimental studies of the fire-resistant ability of the fire-resistant coatings applied to them.

Based on the results of the performed analysis, the goal and main tasks of the work were formulated.

The second chapter substantiates the algorithm for identifying the impact of structural parameters of steel structures with a reactive fire-resistant coating based on polysiloxane and the value of the minimum thickness of the fire-resistant coating on the fire resistance limit of steel structures, in particular:

- to develop and research the composition of high-temperature and fire-resistant coating for steel structures;
- to study the fire-resistant ability (efficiency) of the fire-resistant coating;
- to evaluate the indicators of the fire protection system for steel building structures when establishing the relationship between the time interval until the critical temperature of the steel is reached, the thickness of the fire protection material and the coefficient of the cross section;
- to determine the thermophysical properties of fire-resistant materials and identify patterns of changes in the thermal conductivity coefficient and the time it takes to reach the critical temperature in fire-resistant steel structures of a standard profile depending on the thickness of the fire-resistant coating and the heating temperature;
- for the study of temperature indicators in cross-sections of steel beams of a standard profile with a fire-resistant coating under the influence of fire.

In the third section, the results of the development of the fire-resistant coating composition for steel structures based on filled polysiloxane are given, and the optimal ratio of the ingredients of the developed temperature and fire-resistant composition is investigated.

It was experimentally established that the volumetric and linear coefficient of high-temperature expansion and fire-resistant coating based on polysiloxane and oxides of aluminum, titanium, chromium for steel building structures is $10442.75 \text{ mm}^3/\text{g}$ and 38, respectively. The dependence of the swelling thickness of the fireproof coating based on polysiloxane and aluminum, titanium, chromium oxides on the thickness of the applied

layer was studied. The most effective thickness of the dry coating layer is a value of 0.61 mm, at which the swelling thickness will be 24.6 mm.

The regularities of the warm-up time to the critical temperature of square steel plates (with side (500 ± 5) mm depending on the thickness of the coating based on polysiloxane (0.3 mm, 0.45 mm, 0.6 mm, 0.8 mm) and the thickness of the steel plate were studied (3 mm, 5 mm, 8 mm).

The results of heating test samples of a steel plate with a thickness of 3 mm show that the critical temperature from the unheated surface was reached with a thickness of 0.3 mm fireproof coating in 23 minutes, with a coating thickness of 0.45 mm in 34 minutes, with a coating thickness of 0.6 mm - for 46 minutes. With a coating thickness of 0.8 mm, the average heating temperature of a steel plate with a thickness of 3 mm for 48 minutes was 284 °C, which is significantly below the critical temperature. The obtained results give grounds for asserting the high fire protection efficiency of the developed coating.

Also, experimental studies of the heating of steel plates test samples show that the thickness of the plate does not significantly affect the time of reaching the critical temperature on the unheated surface. Thus, when the thickness of the plate increases from 3 mm to 8 mm, with the same values of the thickness of the fire-resistant coating, the time to reach the critical temperature increases by approximately 1 minute.

In the fourth chapter, a study was carried out to identify patterns of changes in the thermal conductivity coefficient and the time to reach the critical temperature in fire-resistant steel structures depending on the thickness of the fire-resistant coating and the heating temperature.

The method is proposed and experimental studies of the fire-resistant ability of a reactive fire-resistant coating based on polysiloxane for steel structures under the conditions of thermal exposure of the standard fire temperature regime in the range of coating thickness $0.3 \div 0.8$ mm and the cross-section ratio of the steel structure $125 \div 333$ m⁻¹ have been carried out. It was obtained and investigated on the basis of experimental data on the dependence of thermal conductivity coefficient of a fire-resistant coating based on polysiloxane and oxides of aluminum, titanium and chromium, and it was found that

the value of the thermal conductivity coefficient at stable thermophysical characteristics is in the range of $0.3 \div 0.00015 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$.

It was found that the coefficient of thermal conductivity initially has larger values, and then at temperatures above 200 °C it begins to decrease significantly, which indicates the initiation of the swelling process. It is shown that the obtained data on the coefficient of thermal conductivity are adequate, as they satisfy the standard acceptance criteria.

The regularity of the time dependence of reaching the critical temperature in fire-resistant steel beams depending on the thickness of the fire-resistant coating (d_p), the heating temperature of the steel structural element (θ_{SC}) and the section coefficient of the fire-resistant steel element (A_m/V), is established, in the form $t = -137.706 + 52.25 \cdot d_p + 0.417 \cdot d_p / (A_m/V) - 0.553 \theta_{SC} + 0.310 \cdot d_p \cdot \theta_{SC} - 8 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{SC} / (A_m/V) - 6 \cdot 10^{-4} \theta_{SC} / (A_m/V) - 0.032 / (A_m/V)$.

The technical parameters of the fire-resistant coating based on polysiloxane and aluminum oxide for the design of fire-resistant systems of steel structures standard profiles are substantiated, which is presented in the form of tables for selecting the thickness of the fire-resistant coating to ensure fire resistance classes R 15 – R 90.

In the fifth chapter, by the method of numerical integration of the differential non-stationary equation of thermal conductivity, a theoretical study of temperature parameters in cross-sections of steel beams of a standard profile with a fire-resistant coating based on polysiloxane and aluminum, titanium, chromium oxides was performed.

Using a generalized theoretical approach based on the numerical solution of the non-stationary differential equation of thermal conductivity by the finite difference method, the average temperature value in steel beams of standard I-beam section was determined.

By means of a comparative analysis, the acceptability of the obtained calculation results according to the specified characteristics was shown. The average relative error is 9.9% and the root mean square deviation is 23.51 °C , which in turn indicates the acceptable adequacy of the calculated data and confirms the well-founded technical parameters of the fire-resistant coating based on polysiloxane and aluminum oxide for the

design of fire-resistant systems of steel structures standard profiles when selecting the thickness of the fire-resistant coating to ensure fire resistance classes R 15 – R 90.

Key words: fire safety, fire protection, fire protection ability (efficiency), reactive (intumescent) coating, fire protection, experimental studies, standard temperature regime, fire resistance, mathematical model, thermal conductivity coefficient, non-stationary differential equation of thermal conductivity, calculation method.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine

1. Gyvlyud M.M., Demidchuk L.B., Smolyak D.V. Silicon organic coatings for thermal and fire protection of reinforced concrete. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University*. 2014. № 781. P. 46–49.

2. Smolyak D.V. Effect of surface protective coating on fire resistance of reinforced concrete structures. *Fire Safety*. 2015. № 27. P. 121–126.

3. Veselivskyi R.B., Smolyak D.V. Methods of fire protection of metal building structures. *Fire Safety*. 2021. № 39. P. 63–76. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.08>.

4. Veselivskyi R.B., Smolyak D.V. Experimental studies of the fire-resistant ability of a fire-resistant coating based on polysiloxane and aluminum oxide for steel building structures. *Fire Safety*. 2022. № 41. P. 31–37. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.04>.

5. Veselivskyi R.B., Yakovchuk R.S., Smolyak D.V., Petrovskyi V.L. Methodology for researching the fire-resistant ability of a fire-resistant coating based on polysiloxane and aluminum, titanium, and chromium oxides for steel building structures. *Communal management of cities: Series: Technical sciences and architecture*. 2024. Volume 1 № 182. P. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-171-179>.

Articles in the issues included in the international scientometric database

«Web of Science Core Collection»

6. Veselivskyi R.B., Yakovchuk R.S., Petrovskyi V.L., Havrys A.P., Smolyak D.V., Kahitin O.I. Environmentally safe installation for determining the fire resistance of

coatings and fire resistance tests of small fragments building structures. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and-technical collected articles*. 2024. Issue 112. C. 248–257. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.248-257>.

Patents

Composition for high-temperature and fire-resistant coating: pat. 71300 Ukraine: C09D 5/18. No. u 201115337; statement 26.12.2011; published 10.07.2012, Bull. № 13.

List of articles that certify the approval of the dissertation

7. Veselivskyi R.B., Smolyak D.V. Fire protection of metal building structures. *The science of civil defense as a way of developing young scientists*: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference of cadets, students, adjuncts (aftergraduate students) (Cherkasy, May 26, 2022). Cherkasy: CHIFS named after Heroes of Chernobyl National Center of Ukraine, 2022. P. 62–63.

8. Smolyak D.V., Veselivskyi R.B. Fire protection of metal building structures by painting/lacquering. *Actual problems of fire safety and prevention of emergency situations in today's conditions*: a collection of scientific works of the All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation (Lviv, October 1, 2022). Lviv: LDUBZHD, 2022. P. 20–22.

9. Veselivskyi R.B., Smolyak D.V., Prydatko V.V. Fire protection of metal building structures by means of plastering. *Fire Safety Issues 2022 ("Fire Safety Issues 2022")*: materials of the International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, October 12, 2022). Kharkiv: NUTSZU, 2022. P. 67–69.

10. Smolyak D.V., Veselivskyi R.B. Experimental studies of the swelling volume coefficient of high-temperature and fire-resistant coatings. *Problems and prospects of the development of life safety systems*: a collection of scientific works of the XVIII International scientific and practical conference of young scientists, cadets and students (Lviv, March 30-31, 2023). Lviv: LDUBZHD, 2023. P. 127–130.

11. Veselivskyi R.B., Smolyak D.V. Fire protection of metal building structures by cladding. *«Problems of emergency situations»*: Materials of the International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, May 19, 2023). Kharkiv: NUCPU, 2023. P. 24–25.

12. Y. Starodub, R. Veselivskyy, D. Smolyak, R. Hushchak. Ecology-geophysical environment eexperimental studies of the coating based on polysiloxane for steel building structures. «*Challenges in Science of Nowadays*» *Physics and Maths*: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference (Washington, USA, December 6-8, 2023). Washington, USA, Scientific Collection «InterConf», 2023. № 181. P 354-360.

13. Veselivskiy R.B., Yakovchuk R.S., Smolyak D.V. Experimental studies of the fire protection ability of a reactive fire protection coating on a steel plate measuring 500x500 mm with a thickness of 0.3 cm. *Fire safety issues 2024 («Fire Safety Issues 2024»)*: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, March 27, 2024). Kharkiv: NUCPU, 2024. P. 121–123.

Зміст

ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	37
1.1. Способи вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій..	37
1.2. Аналіз складів вогнезахисних покриттів для сталевих будівельних конструкцій	51
1.3. Методи розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість.....	58
1.3.1. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість захищених вогнезахисними матеріалами.....	61
1.3.2. Метод визначення вогнезахисної здатності реактивних вогнезахисних матеріалів для сталевих будівельних конструкцій.....	64
1.4. Альтернативні методи та методики оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій.....	74
1.5. Висновки з розділу, мета та задачі дослідження.....	83
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ.....	86
2.1. Дослідження високотемпературного та вогнезахисного покриття	86
2.2. Дослідження вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисного покриття.....	89
2.2.1. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення	89
2.2.2. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення лінійного коефіцієнта спучення.	92
2.2.3. Визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з	

металу.....	94
2.3. Оцінювання показників системи вогнезахисту для сталевих будівельних конструкцій.....	97
2.3.1. Визначення теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів.....	101
2.4. Висновки за розділом.....	105

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	106
3.1. Розроблення складу високотемпературного та вогнезахисного покриття	106
3.1.1. Визначення базової рецептури вихідних композицій для вогнезахисного покриття методом математичного планування експерименту.....	108
3.2. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення	115
3.3. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення лінійного коефіцієнта спучення.	118
3.4. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з металу.....	125
3.5. Висновки за розділом.....	134

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАНДАРТНИХ КЛАСІВ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК.....	136
4.1. Загальна постановка задачі і основні положення розрахунку.....	136
4.2. Температурний режим пожежі.....	137
4.3. Модель теплопередачі сталевих конструкцій.....	137

4.4. Методика розрахунку теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття.....	139
4.5. Методика для визначення експериментальних значень температур.....	140
4.6. Результати розрахунку коефіцієнта теплопровідності.....	144
4.7. Результати розрахунку критеріїв прийнятності.....	153
4.8. Результати розрахунку товщини вогнезахисного покриття для сталевих балок із проектними параметрами досліджуваного діапазону.....	154
4.9. Висновки за розділом.....	160
РОЗДІЛ 5 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ БАЛОК СТАНДАРТНОГО ПРОФІЛЮ ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ ПРИ ВПЛИВІ ПОЖЕЖІ	162
5.1. Математична модель теплопередачі у сталевих балках із вогнезахисними покриттями із стандартним двотавровим перерізом.....	162
5.2. Метод числового інтегрування диференціального нестационарного рівняння теплопровідності.....	166
5.3. Результати розрахунків сталевих балок стандартного профілю із вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану.	172
5.4. Висновки за розділом.....	176
ВИСНОВКИ.....	178
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	181
ДОДАТКИ.....	197
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	198
ДОДАТОК Б. Патент на корисну модель ua 71300: Композиція для високотемпературного та вогнезахисного покриття	201
ДОДАТОК В. Технічні умови ТУ У 24.3-08571340-2024 (дослідної	208

партії): Речовина температуро- та вогнезахисна на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій.....

ДОДАТОК Г. Технологічний регламент нанесення складу вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій	224
ДОДАТОК Д. Протоколи експериментальних досліджень вогнезахисної здатності композиції високотемпературного вогнезахисного покриття.....	239
ДОДАТОК Е. Методика проведення експериментальних досліджень з визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій	260
ДОДАТОК Ж. Акти впровадження результатів досліджень	273

ВСТУП

В умовах сучасного науково-технічного прогресу та розвитку економіки стрімко зростає будівництво промислових, житлових, складських та інших будівель і споруд. Архітектори впроваджують нові конструктивно-планувальні рішення складного та нетипового планування. Дуже широко під час зведення будівель використовують сталеві будівельні конструкції або їх поєднання з традиційними будівельними матеріалами, такими як бетон, цегла, різні теплоізоляційні матеріали тощо. Сталеві конструкції є основними елементами, які сприймають навантаження, що діють на будівлі та споруди. Прикладами таких конструкцій є балки, ферми колони, прогони, мостові конструкції, споруди для ліній електропередач та інші. Останніми роками набуває широкого застосування зведення будівель та споруд каркасного типу, де одними з основних будівельних матеріалів є саме сталеві конструкції. Безперечно, що до переваг використання сталевих конструкцій необхідно віднести їх високу міцність, невелику вагу, надійність, непроникність, легкість при компонуванні та зборі, можливість надання таким конструкціям різноманітних складних форм тощо.

Але попри свої значні переваги, одним з основних недоліків сталевих конструкцій є невелика межа вогнестійкості, що становить близько 15 хв, відповідно при виникненні пожежі, ці конструкції дуже швидко втратять свої несучі та фізичні властивості, що в свою чергу призведе до катастрофічних наслідків та великих матеріальних збитків.

Враховуючи вищевикладене, актуальним науково-технічним завданням, є розроблення нових вогнезахисних речовин та матеріалів для сталевих будівельних конструкцій та дослідження їх ефективності.

Актуальність теми. В роботах М. М. Гивлюда, Р. С. Яковчука, С. В. Жартовського, А. І. Ковальова, Л. М. Вахітової, С. В. Новака, С. В. Поздєєва, Ю. А. Отроша, Т. М. Шналя, П. Г. Круковського, В. В. Ніжника, М. Autiero, D. De Silva, D. Barder, B. Bartelemini, J. Brozzetti, та ін. широко висвітлені та обговорені питання розроблення вогнезахисних речовин та досліджень їх ефективності. Аналіз наукових

праць, показав, що для підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій ефективними є реактивні вогнезахисні речовини, де основним органічним в'язучим є полісилоксан. Авторами обґрунтовано склади композицій вогнезахисних покриттів на основі наповнених поліметилфенілсилоксанів для захисту бетону, залізобетону, алюмінієвих сплавів, нікелевих сталей, проте для сталевих конструкцій вогнезахисну ефективність не було досліджено. Також недостатньо уваги приділено дослідженням закономірностей часу досягнення критичної температури у вогнезахищеному елементі сталевій конструкції залежно від товщини вогнезахисного покриття, температури нагріву сталевого елемента конструкції та коефіцієнту перерізу вогнезахищеної сталевій конструкції.

З огляду на зазначене, розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану за стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості є науковим підґрунтям формування та обґрунтування технічних параметрів вогнезахисного покриття для стандартних профілів сталевих конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р "Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року", Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2020-2025 роки, плану науково-дослідної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2022-2023 роки в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення ефективності протипожежного захисту будівельних конструкцій» (державний реєстраційний номер 0122U202032), де здобувач був виконавцем.

Ідея роботи полягає у прогнозуванні вогнестійкості стандартних профілів сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану шляхом дослідження впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення

мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих балок.

Мета роботи є розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану на межі їх вогнестійкості як наукового підґрунтя формування та обґрунтування технічних параметрів вогнезахисного покриття для стандартних профілів сталевих конструкцій.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз способів вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій та методів визначення вогнезахисної здатності реактивних вогнезахисних матеріалів.

2. Розробити склад вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій на основі наповненого полісилоксану та дослідити співвідношення компонентів розробленої вогнезахисної композиції.

3. Розробити методику проведення експериментальних досліджень визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих будівельних конструкцій.

4. Провести експериментальні дослідження з виявлення впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на критичну температуру прогріву сталевих конструкцій.

5. Визначити теплофізичні характеристики реактивного вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та встановити закономірності зміни коефіцієнта теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахищеному елементі сталевих конструкцій залежно від товщини вогнезахисного покриття, температури нагріву сталевих елементів конструкцій та коефіцієнту перерізу вогнезахищеної сталевих конструкцій.

6. Сформулювати та обґрунтувати технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій.

Об’єкт дослідження – вогнестійкість сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та процес її оцінювання.

Предмет дослідження – вплив конструктивних параметрів стандартних профілів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих конструкцій.

Методи дослідження. В роботі було використано комплексний метод дослідження, який включав: аналіз сучасного стану та способів підвищення межі вогнестійкості сталевих конструкцій шляхом їх вогнезахисту; аналіз складів композицій вогнезахисних покриттів для захисту будівельних конструкцій; аналіз методів та методик оцінки вогнезахисної здатності реактивних покриттів для сталевих конструкцій. Методи фізико-хімічного аналізу вогнезахисного покриття на основі полісилоксану. Експериментальний метод досліджень вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисного покриття, регламентований вимогами ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. Дослідження впливу елементів конструкцій на вогнестійкість здійснювалось у відповідності до ДСТУ EN 13501-2:2023 та ДСТУ EN 13381-8:2022. Для дослідження процесів теплообміну між факелом пожежі та будівельними конструкціями, використано розрахунково-теоретичний метод, заснований на числовому розв’язку нестационарного диференціального рівняння теплопровідності. Під час проведення експериментальних досліджень застосовувалось метрологічно атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання. Обробка результатів досліджень здійснювалась із використанням програмного забезпечення Microsoft Office Excel. Також для обробки результатів експериментальних та теоретичних досліджень використані методи математичної статистики та методи планування експерименту.

Наукова новизна полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів стандартних профілів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих конструкцій. При цьому:

- *уперше* встановлена залежність часу досягнення критичної температури у вогнезахисних сталевих балках залежно від товщини вогнезахисного покриття на основі полісилоксану (d_p), температури нагріву сталевих елементів конструкції (θ_{SC}) та коефіцієнту перерізу вогнезахисного сталевих елементів (A_m/V), у вигляді:

$$t = -137.706 + 52.25 \cdot d_p + 0.417 \cdot d_p / (A_m/V) - 0.553 \theta_{SC} + 0.310 \cdot d_p \cdot \theta_{SC} - 8 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{SC} / (A_m/V) - 6 \cdot 10^{-4} \theta_{SC} / (A_m/V) - 0.032 / (A_m/V);$$

- *уперше* встановлено закономірності часу прогріву до критичної температури квадратних сталевих пластин (зі стороною (500 ± 5) мм залежно від товщини покриття на основі полісилоксану (0,3 мм, 0,45 мм, 0,6 мм, 0,8 мм) та товщини сталевих пластин (3 мм, 5 мм, 8 мм);

удосконалено метод визначення лінійного коефіцієнта спучення новоствореного вогнезахисного покриття, шляхом збільшення діапазону товщин шару досліджуваного покриття для визначення залежності товщини спучення покриття від товщини нанесеного шару;

набула подальшого розвитку сфера застосування розрахунково-теоретичного методу для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів вогнезахисних сталевих конструкцій при підборі товщини вогнезахисного покриття для забезпечення необхідних класів вогнестійкості.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені результатами аналізу літературних джерел і нормативно-правових вимог щодо методів визначення вогнезахисної здатності реактивних вогнезахисних матеріалів та їх впливу на вогнестійкість сталевих будівельних конструкцій; відповідністю методів дослідження поставленим в роботі меті та задачам; застосуванням сучасних експериментальних та розрахунково-теоретичних методів досліджень ефективності вогнезахисних покриттів для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій; достовірністю та адекватністю отриманих результатів експериментальних та теоретичних досліджень; апробацією та практичним впровадженням результатів проведених досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні технічних параметрів вогнезахисного покриття на основі полісилоксану і алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих балок. Впроваджена в діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 02 травня 2024 року) методика проведення експериментальних досліджень з визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. Впроваджено у практичну діяльність ТзОВ «Гефест Л» технологічний регламент нанесення складу вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для стандартних профілів сталевих будівельних конструкцій (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 07 травня 2024 року). Методика розрахунку вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття для забезпечення нормованих класів вогнестійкості сталевих балок впроваджена в освітній процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності при підготовці здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 261 «Пожежна безпека» на кафедрі наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 08 травня 2024 року).

Особистий внесок здобувача. Основні експериментальні, теоретичні та розрахункові результати дисертаційного дослідження отримано здобувачем самостійно. Наукові положення та висновки дисертації належать автору.

Особистий внесок здобувача висвітлений в наукових публікаціях, що відповідають тематиці дисертаційного дослідження:

- в науковій праці «Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій» [5] – виконано аналіз способів підвищення межі вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій шляхом їх вогнезахисту, визначено переваги і недоліки різних способів вогнезахисту враховуючи конструктивні особливості будівельних конструкцій;

- в науковій праці «Silicium organic coatings for thermal and fireprotection of reinforced concrete» [78] – описано закономірності процесів взаємодії органічних

сполук з наповнювачами при нагріванні, що дозволяє використовувати їх для високотемпературного та вогнезахисного захисту залізобетону;

- в науковій праці «Вплив поверхневого захисного покриття на вогнестійкість залізобетонних конструкцій» [79] – досліджено вплив захисного покриття на основі наповненого оксидними компонентами полісилоксану на вогнестійкість залізобетонних конструкцій;

- в науковій праці «Експериментальні дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій» [136] – встановлено, що об'ємний та лінійний коефіцієнт спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для сталевих будівельних конструкцій складає $10442,75 \text{ мм}^3/\text{г}$ та 38 відповідно. Методом визначення лінійного коефіцієнта спучення новоствореного вогнезахисного покриття експериментально досліджено залежність товщини спучення вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому від товщини нанесеного шару;

- в науковій праці «Методика дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому для сталевих будівельних конструкцій» [137] – експериментально досліджено закономірності часу прогріву до критичної температури квадратних сталевих пластин (зі стороною (500 ± 5) залежно від товщини покриття на основі полісилоксану (0,3 мм, 0,45 мм, 0,6 мм, 0,8 мм) та товщини сталевієї пластини (0,3 см, 0,5 см, 0,8 см);

- в науковій праці «Environmentally safe installation for determining the fire resistance of coatings and fire resistance tests of small fragments building structures» [126] – експериментально досліджено температурно-часову залежність установки для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів та випробувань на вогнестійкість малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дослідження доповідалися на всеукраїнських, міжнародних, науково-практичних конференціях, таких як:

- Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених» (м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.);

- Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів: ЛДУБЖД, 2022 р.);

- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»))» (м. Харків: НУЦЗУ, 2022 р.).

- XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності» (м. Львів: ЛДУБЖД, 2023 р.);

- Міжнародна науково-практична конференція «Problems of emergency situations» (м. Харків, НУЦЗУ, 2023 р.)

- 12th International Scientific and Practical Conference «Challenges in Science of Nowadays» Physics and Maths» (Washington, USA, Scientific Collection «InterConf», 2023).

- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2024 («Fire Safety Issues 2024»))» (м. Харків: НУЦЗУ, 2024 р.).

Кількість публікацій за темою дисертаційної роботи. Результати досліджень, що висвітлені у дисертації було опубліковано у 6 наукових працях, а саме 5 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України, 1 стаття опублікована у виданні, що індексується в наукометричній базі «Web of Science Core Collection» та 7-ми тезах доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

Структура дисертації та її обсяг. Робота містить анотацію, зміст, вступ, має п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг дисертації становить 276 сторінки, з них основного тексту 196 сторінок, 37

таблиць, 63 рисунки, список використаних джерел містить 153 найменування та займає 16 сторінок, а також 7 додатків на 78 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Способи вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій

Відповідно до [1 – 3] вогнезахисні засоби, залежно від методу захисту, розділяють на реактивні та пасивні.

До пасивних належать засоби, які під час температурного впливу не змінюють своїх розмірів і вогнезахисна ефективність яких забезпечується їх теплофізичними властивостями. Ці засоби застосовують шляхом просочування, облицювання, штукатурення, обмазування тощо, будівельних конструкцій, що захищаються.

До реактивних належать засоби, які під час температурного впливу внаслідок хімічних реакцій збільшуються (спучуються) у розмірах та утворюють пористий теплоізолювальний шар, який захищає об'єкт вогнезахисту від високотемпературного впливу. Реактивні засоби застосовуються шляхом нанесення на будівельну конструкцію фарби, лаку, пасти, обмазки тощо.

До способів вогнезахисту будівельних матеріалів відноситься вогнезахисне просочування, вогнезахисне оброблення та вогнезахисне заповнення, що визначається залежно від властивостей вогнезахисного засобу, об'єкта вогнезахисту та умов його експлуатації.

Також слід відмітити, що, згідно з [4] вогнезахисні матеріали поділені на типи, залежно від конструкції, що захищається, зокрема це:

- горизонтальні захисні екрани;
- вертикальні захисні екрани;
- матеріали для захисту несучих бетонних конструкцій;
- матеріали для захисту несучих сталевих конструкцій;
- матеріали для захисту сталезалізобетонних конструкцій;
- матеріали для захисту несучих сталевих колон, заповнених бетоном;
- матеріали для захисту несучих дерев'яних конструкцій;

- матеріали, що підвищують межу вогнестійкості протипожежних перешкод для яких не регламентовано значення несучої здатності;
- матеріали, що підвищують межу вогнестійкості інженерних систем будівель і споруд.

Вибір вогнезахисного засобу необхідно здійснювати з врахуванням факторів, що будуть впливати на його термін придатності та експлуатаційної надійності. До таких факторів відносяться: температура експлуатації, поперемінне заморожування і відтавання, вологість (водяна пара), рідкі атмосферні опади, вплив ультрафіолетових променів, забруднення середовища експлуатації (біологічне, комунальне, промислове тощо).

Розглянемо основні способи вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій [5]. Беручи до уваги фізичні властивості сталевих конструкцій та умови їх використання, регламентованими способами їх вогнезахисту буде вогнезахисне обробляння (фарбування/лакування, штукатурення, облицювання, обмотування). Також спосіб та засіб вогнезахисту сталевих конструкцій буде залежати від таких чинників:

- необхідна межа вогнестійкості будівельної конструкції;
- розмір та форма будівельної конструкції;
- навантаження на конструкцію;
- особливості розташування об'єкта захисту;
- умови експлуатації вогнезахисного матеріалу тощо.

Слід зазначити, що вибір вогнезахисного матеріалу прямо залежить від умов його експлуатації. Так [6 – 8] визначено чотири категорії використання вогнезахисних матеріалів залежно від умов навколишнього середовища: X, Y, Z₁, Z₂.

Категорією X визначено, що вогнезахисні матеріали можуть використовуватись за будь-яких умов (всередині приміщень, частково захищені простори і приміщення та відкритий простір). Категорія Y передбачає використання вогнезахисних матеріалів всередині приміщень та у частково захищених просторах і приміщеннях, де можлива температура нижче 0 °С, але без впливу дощу та з обмеженим впливом ультрафіолетового випромінювання, при цьому ефект впливу ультрафіолету не

оцінюється. До категорії Z_1 та Z_2 відносять вогнезахисні матеріал, що призначені для використання всередині приміщень за відносної вологості повітря не нижче ніж 85% та нижче 85% відповідно, за винятком випадків, коли температура навколишнього середовища є від'ємною.

Документом також визначено відповідність та взаємозамінність категорій виробів та матеріалів (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Відповідність та взаємозамінність категорій виробів та матеріалів залежно від умов навколишнього середовища

Категорія	X	Y	Z_1	Z_2
Відповідність/ взаємозамінність	тільки X	X, Y	X, Y, Z_1	X, Y, Z_1 , Z_2

Вогнезахист сталевих будівельних конструкцій шляхом фарбування/лакування.
Для реалізації цього способу вогнезахисту будівельних сталевих конструкцій найбільш розповсюдженим є застосування реактивних (інтумесцентних) вогнезахисних покриттів. Інтумесцентні вогнезахисні покриття являють собою матеріал, що нанесений тонким шаром на сталеву конструкцію для підвищення її межі вогнестійкості при пожежі. Ці покриття під дією високих температур утворюють пористий теплоізоляційний шар завдяки спучуванню та збільшенню у розмірах, що і сприяє зниженню теплопровідності на поверхні сталевій конструкції. Відповідно критична температура, за якої текучість сталі знижується на 40 – 50 %, не досягається [9 – 12].

Основні характеристики інтумесцентних фарб наведено у таблиці 1.2 [13]

Таблиця 1.2

Характеристики основних видів інтумесцентних фарб

Властивості	Водні	Органорозчинні	Епоксидні	З терморозшире- ним графітом
-------------	-------	----------------	-----------	------------------------------------

Продовження табл. 1.2

Умови нанесення	Вище 5 °С, вологість не впливає	Вище 0 °С, вологість до 80%	Вище 5 °С, вологість до 80%	Вище 0 °С, вологість до 80%
Експлуатація	Всередині приміщень	Всередині приміщень	Всередині і зовні приміщень	Всередині і зовні приміщень
Леткі органічні сполуки	Практично відсутні	До 35%	До 20%	До 65%
Час висихання	8 год	8 год	24 год	10 год
Токсикологічні фактори	Мінімальний вплив	Шкідливо для здоров'я і навколишнього середовища	Середній рівень впливу	Шкідливо для здоров'я і навколишнього середовища
Режим пожежі	Стандартний	Стандартний	Стандартний і вуглеводневий	Стандартний і короткочасний вуглеводневий

У [6] визначено, що система реактивного покриття складається з ґрунтовки, самого реакційноздатного покриття та верхнього (фінішного) покриття. У деяких випадках використовується армувальна сітка. Ґрунтовка наноситься безпосередньо на сталеву поверхню для захисту від корозії та забезпечує адгезію реакційноздатного покриття. На ґрунтову поверхню наноситься реакційноздатне покриття, що забезпечує хімічну реакцію (спучування) при нагріванні. Фінішне покриття наноситься на реакційноздатне покриття для захисту від впливу навколишнього середовища.

Вигляд будівельної сталеві конструкції з нанесеним вогнезахисним інтумесцентним покриттям схематично представлено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Вигляд будівельної сталеві конструкції з нанесеним вогнезахисним інтумесцентним покриттям до та після пожежі

На сучасному ринку як України, так і світу представлена велика кількість фарб та лаків, що призначені для підвищення межі вогнестійкості будівельних сталевих конструкцій. Перелік та основні характеристики сертифікованих в Україні реактивних (інтумесцентних) вогнезахисних покриттів представлено в таблиці 1.3 [14].

Таблиця 1.3
Вогнезахисні фарби (лаки), що сертифіковані в Україні

Власник сертифіката/ Виробник	Вогнезахисне покриття	Тип вогнезахисного покриття	Клас вогне- стійкості	Термін експлуа- тації покриття
ТОВ «КОВЛАР ГРУП» (Україна)	Вогнезахисна речовина Ammokote MS-90	Інтумесцентна фарба на органічному розчиннику	R120	25 років

Продовження табл. 1.3

«TREMCO ILLBRUCK COATINGS LIMITED» (Великобританія)	Вогнезахисна речовина NULLIFIRE - SC801 intumescent bastcoat	Інтумесцентна фарба на водній основі	R150	20 років
БАТ «Інтер Балтік Груп» (Україна) / Фірма «International Paint Limited» (Великобританія)	Вогнезахисна речовина «Interchar 2060»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на органічному розчиннику	R30-R90	15 років
«J.F. Amonn SpA / AG» (Італія)	Вогнезахисна речовина «Amotherm Steel SB»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на органічному розчиннику	R90	20 років
	Вогнезахисна речовина «Amotherm Steel WB»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі	R30-R90	20 років в приміщ., 10 років при дії навкол.сер.
«SVT Brandschutz Vertriebsgesellschaft mbH International» / (Німеччина)	Вогнезахисна речовина «Pyro-safe Flammoplast SP-A2» с лаком захисним «SP-2»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі	R45-R90	25 років
БАТ «Бритиш Ритейл» (Україна) illbruck Limited» / «Tremco Coatings» (Великобританія)	Вогнезахисна речовина «Nullifire-S 707-60 Waterborne Base»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі	R30-R120	10 років
«Dunamenti Tuzvedelem Zrt.» / (Угорщина)	Вогнезахисна речовина «Polylack А»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на органічному розчиннику	R30-R90	12 років

Продовження табл. 1.3

	Вогнезахисна речовина «Polylack W»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі	R30-R90	15 років
ВАТ «Базис Україна» (Україна) / ВАТ «Спектр» (РФ)	Вогнезахисна речовина «ВД-АК-502 OB NEO»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі	R30-R60	20 років
ВАТ «Файер Протекшн» / (Україна)	Вогнезахисна речовина «Терапласт 146М»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі	R30-R60	не менше 10 років
ВАТ «Науково-виробниче підприємство «Спецматеріали» / (Україна)	Вогнезахисна речовина «Ендотерм 400202»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на органічному розчиннику	R30-R90	не менше 10 років
	Вогнезахисна речовина «Ендотерм ХТ- 150»	Інтумесцентна фарба з термографітом	R30-R60	не менше 12 років
	Система вогнезахисних покриттів «Ендотерм» 170205/Ендотерм 210104	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі /суха будівельна суміш	R30-R90	не менше 10 років
	Вогнезахисна речовина «Ендотерм 170205»	Інтумесцентна поліфосфатна фарба на водній основі		

До переваг інтумесцентних вогнезахисних покриттів слід віднести простоту нанесення на будівельну конструкцію і універсальність. Вони мають широку сферу умов застосування (температура, вологість, вплив навколишнього середовища), досить тривалий термін експлуатації та довговічність. Нанесене покриття не

потребує додаткової обробки, має хороші адгезійні властивості та не впливає на загальний естетичний та архітектурний вигляд захищеної сталевих конструкції.

Основним недоліком інтумесцентних покриттів є наявність у їх складі комплексу хімічних речовин, які при впливі на них пожежі можуть мати негативний вплив на організм людини та навколишнє природне середовище.

Вогнезахист сталевих будівельних конструкцій шляхом штукатурення. Вогнезахисна штукатурка являє собою будівельну суміш, яка складається з цементного (гіпсового) складу із спеціальними добавками для підвищення теплоізоляційних та адгезійних властивостей. [1, 13]. При нанесенні вогнезахисної штукатурки на сталеву будівельну конструкцію вона утворює захисний теплоізоляційний шар. Цей вогнезахисний склад, як правило, використовують для забезпечення меж вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій від 60 хв і більше. Вогнезахисні штукатурки представляють собою, як правило, цементно-вермикулітовий склад з комплексом спеціальних добавок, який утворює покриття з високою адгезійною здатністю до сталевих поверхонь. Склади поставляються у вигляді сухих будівельних сумішей, які наносяться на поверхню сталевих конструкцій товщиною 10-40 мм залежно від необхідного класу вогнестійкості, що досягає R240.

Основні характеристики вогнезахисних штукатурок наведено у таблиці 1.4 [14].

Таблиця 1.4

Характеристики основних видів вогнезахисних штукатурок

Властивості	Цементні	Гіпсові
Умови нанесення	Вище 5 °С, вологість не впливає	Вище 0 °С, вологість не впливає
Експлуатація	Всередині і зовні приміщень	Всередині приміщень (без захисного шару)
Леткі органічні сполуки	Ні	Ні
Час первинного висихання	24 год	3 год

Продовження табл. 1.4

Час набору основних характеристик міцності	28 діб з періодичним зволоженням поверхні	7 діб
Токсикологічні фактори	Мінімальний вплив	Мінімальний вплив
Режим пожежі	Стандартний	Стандартний

Одним з основних способів нанесення вогнезахисних штукатурок є напівсухе торкретування та механічний набрызк [15]. Перед нанесенням вогнезахисних штукатурних покриттів поверхні очищують від іржі, бруду, фарби, пилу, масел, жирових та бітумних плям, солей, залишків бетону та розчину.

Поверхні, що оштукатурюються методом набрызку, обов'язково змочуються водою для кращого зчеплення штукатурки із основою. Вогнезахист сталевих будівельних конструкцій шляхом штукатурення також передбачає використання армувальної сітки, що як правило розташована на відстані 5...15 мм від поверхні, що обробляється. Віддаленість армувальної сітки від конструкції, що захищається залежить від товщини вогнезахисного покриття. При використанні вогнезахисних штукатурок слід здійснювати контроль за такими основними технологічними параметрами: якість в'язучого, об'ємна маса, зерновий склад і вологість заповнювачів, точність дозування компонентів суміші і тривалість їх перемішування, об'ємна маса готової суміші, тиск повітря, витрати зволожувальної рідини, товщина нанесеного шару і якість опорядження його поверхні.

На рисунку 1.2 представлено вогнезахисне штукатурне покриття Protherm Light [16] до та після впливу пожежі.



Рисунок 1.2 – Вигляд вогнезахисного штукатурного покриття до та після впливу пожежі

Перелік та основні характеристики сертифікованих в Україні штукатурних вогнезахисних покриттів представлено в таблиці 1.5 [14].

Таблиця 1.5

Вогнезахисні штукатурки, що сертифіковані в Україні

Власник сертифіката/ Виробник	Вогнезахисний матеріал	Тип вогнезахисного матеріалу	Клас вогне- стійкості	Термін експлуа- тації покриття
ТОВ «КОВЛАР ГРУП» «Аmmokote GP- 240» (Україна)	Вогнезахисне покриття Аmmokote GP- 240	Суха будівельна суміш	R150	≥ 10 років
«PRIISO» Вогнезахисна штукатурна суміш FIBROGAINE (Франція)	Речовина вогнезахисна (суміш)	Суха будівельна суміш	EI30-180	≥ 10 років

Продовження табл. 1.5

ВАТ «Меркор Україна» / «Tecresa Protec- tion Pasiva S.L.» (Іспанія)	Вогнезахисна речовина «Tecswoll F»	Суша будівельна суміш	R60 – R210	≥ 10 років
ПП «ДСС ГРУП»(Україна)/ «Protection pasiva 2000, S.L.» (Іспанія)	Вогнезахисне покриття «Vermiplaster»	Суша будівельна суміш	R120 – R210	≥ 10 років
ВАТ «Науково- Вогнезахисне виробниче під- приємство / «Ендотерм «Спецматеріали» 210104» (Україна)	Вогнезахисне покриття «Ендотерм 210104»	Суша будівельна суміш	R75 – R240	≥ 10 років

До переваг штукатурних вогнезахисних покриттів відноситься універсальність їх застосування для різних конструкцій та виробів. Цей вид вогнезахисту, завдяки екологічно-безпечним складникам, не має шкідливих впливів на людину та довкілля, не піддається гниттю та зараженню грибками. Вони також мають широку сферу застосування, тривалий термін експлуатації та довговічність. Навантаження на конструкцію внаслідок застосування штукатурного покриття не є значним, враховуючи щільність сухого покриття, що становить 400-600 кг/м³.

При суттєвих перевагах, існує і ряд недоліків при застосуванні вогнезахисних штукатурних покриттів, зокрема це: трудомісткість робіт, складність використання для захисту конструкцій складних форм (зв'язків будівельних конструкцій та елементів), обмеження застосування при підвищеній вологості. Цей спосіб вогнезахисту також буде впливати на загальний естетичний вигляд захищеної конструкції. На рисунку 1.3 зображено сталеві конструкції, що оброблені штукатурним вогнезахисним покриттям.



Рисунок 1.3 – Сталеві будівельні конструкції оброблені штукатурним вогнезахисним покриттям

Вогнезахист сталевих будівельних конструкцій шляхом облицьовування. Вогнезахисне облицьовування здійснюється із застосуванням одиничних виробів або листових (рулонних) матеріалів, які закріплюються (монтуються) на поверхні об'єкта вогнезахисту за допомогою кріпильних елементів, клейових розчинів тощо. [1]. Вогнезахисне облицьовування є способом конструктивного вогнезахисту, що забезпечує нормований клас вогнестійкості до R 300. На рисунку 1.4 показано приклад захисту сталевих конструкцій цегляною кладкою.

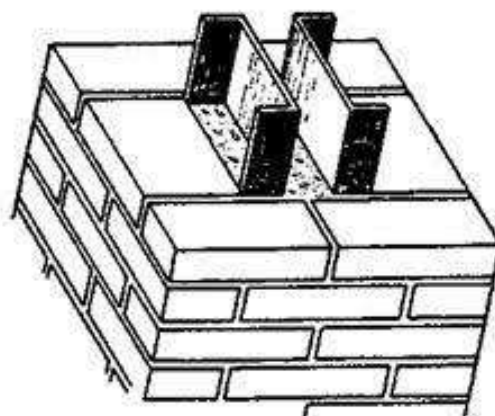


Рисунок 1.4 – Сталеві будівельні конструкції, захищені цегляною кладкою

Облицьовування цегляною кладкою чи іншими кам'яними матеріалами застосовується, як правило, для сталевих колон чи подібних за функціональними

призначенням будівельних конструкцій. При цьому для облицювання необхідно застосовувати цеглу марки не нижче М75, а для цегляної кладки рекомендується застосовувати цементно-піщаний розчин марки не нижче М50. Недоліком цього виду вогнезахисту є велика трудомісткість і вартість, значне збільшення навантаження на фундаменти та основи, неможливість застосування для горизонтальних конструкцій.

Вогнезахисні плити (рулони) являють собою цілісні, придатні для застосування вироби із відповідними технічними характеристиками. Основними складовими вогнезахисних облицювальних виробів є силікатні, магнезитові, керамзитові, перлітові, азбоцементні, вермикулітові, мінераловатні, гіпсоволокнисті матеріали.

Існує два основні способи монтажу вогнезахисних плит:

1. Складання самонесучого короба з плит;
2. Облицювання з використанням додаткового каркаса.

На рисунку 1.5 представлено способи монтажу вогнезахисних плит.

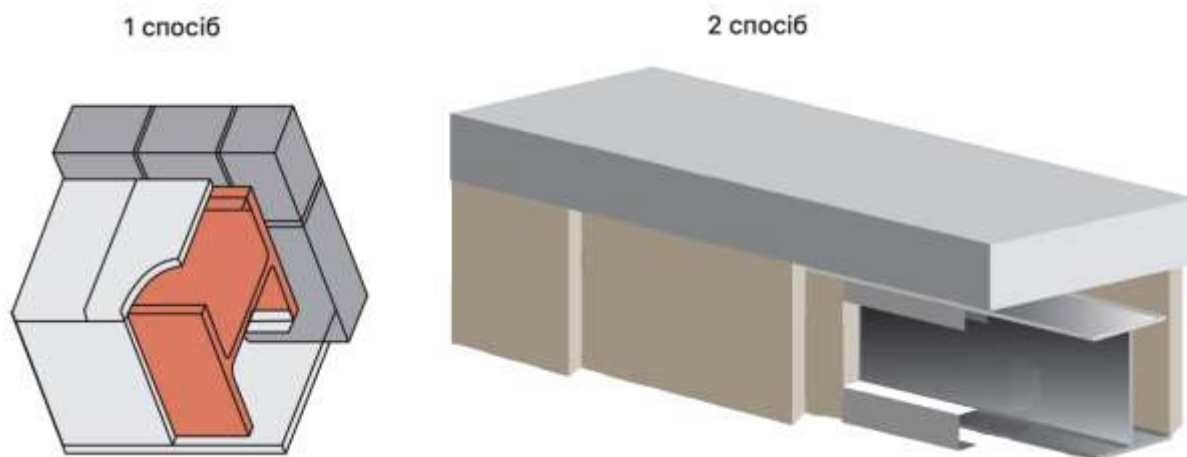


Рисунок 1.5 – Способи монтажу вогнезахисних плит

Також для вогнезахисту шляхом облицювання використовують плити з пористих (легких) бетонів [17, 18]. Це обґрунтовано низькою теплопровідністю пористих бетонів, простим механічним обробленням, невеликою вагою (порівняно з цегляною кладкою або бетоном, у 1,5 – 2 рази легше, оскільки об'ємна частка

повітря може досягати 85 %), негорючістю, довговічністю та надійністю в експлуатації.

Перелік та основні характеристики сертифікованих в Україні вогнезахисних конструктивних матеріалів представлено в таблиці 1.6 [14].

Таблиця 1.6

Вогнезахисні конструктивні матеріали, сертифіковані в Україні

Власник сертифіката/ Виробник	Вогнезахисний матеріал	Тип вогнезахисного матеріалу	Клас вогне- стійкості	Термін експлуа- тації
БАТ «ПТК А+В Україна» Фірма «Promat GmbH» (Німеччина)	Система для вогнезахисту «Promatect- L500»	Силікатні теплоізоляційні плити	R60 - R240	≥ 50 років
БАТ «Завод теп- лоізоляційних матеріалів ТЕХНО» (Україна)	Плити мінера- ловатні «Техноніколь»	Вогнезахисна плита	R60 – R120	≥ 15 років
БАТ «Кнауф Гіпс Київ» (Україна)	Плити гіпсо- картонні «Кнауф»	Гіпсокартонна плита	R60 - R180	≥ 15 років
БАТ «ОБИО» (Україна)	Вогнезахист сталевих кон- струкцій «Izovat»	Плити тепло- ізоляційні з мінеральної вати	R60 - R120	≥ 15 років
БАТ «Роквул Україна» (Україна) / «Rockwool Polska Sp.z o.o.» (Польща)	Система вогнезахисна «Conlit 150»	Листові вироби з кам'яної вати	R60 - R150	30 років
БАТ «Науково- виробниче підприємство «Спецматеріали» (Україна)	Плити «Ендотерм 210104»	Вогнезахисна плита	R45 – R240	≥ 25 років

Однією з найбільших переваг плитних облицювальних вогнезахисних матеріалів є їх екологічні властивості. Слід відмітити, що згідно з даними виробника, цей спосіб вогнезахисту має набагато більший термін експлуатації порівняно з вогнезахисним штукатуренням та реактивними покриттями. Використання плитних матеріалів є технологічно простим, без застосування додаткових заходів з їх оброблення, сушіння тощо.

Недоліком цього способу вогнезахисту є його вразливість та обмеження використання при підвищеній вологості. Необхідність улаштування спеціальних кріпильних систем і елементів також обмежує застосування плитних матеріалів.

На рисунку 1.6 зображено сталеві конструкції, захищені вогнезахисними плитами.



Рисунок 1.6 – Сталеві будівельні конструкції, захищені вогнезахисними плитами

1.2. Аналіз складів вогнезахисних покриттів для сталевих будівельних конструкцій

Одним з ефективних та широко розповсюджених способів вогнезахисту сталевих конструкцій є застосування інтумесцентних реактивних покриттів. Наукові праці та дослідження щодо застосування таких покриттів зосереджені на пошуку нових ефективних складів речовин, які під дією температур пожежі будуть захищати сталеву конструкцію а відповідно і підвищувати її межу вогнестійкості до

нормованого класу. У праці [19] дослідження спрямовані на вивчення впливу поліфосфату амонію і графіту, що розширюється на склад та поведінку спучуваного покриття. Стабільність розробленого покриття перевірялась при 950 °C протягом 1 години. Результати показали, що покриття стабільне і добре зчіплюється зі сталеною основою. У роботі [20] описується вплив доломітової глини на теплозахисні характеристики пасивного вогнезахисного покриття. Вогнезахисну ефективність покриття, посиленого доломітовою глиною, оцінювали за допомогою випробування на вогнестійкість з використанням пальника Бунзена, відповідно до ASTM E-119 [21]. Результати показали, що після 1 години впливу вогню доломітове армування в рецептурі IFRC знижувало температуру сталеної основи до 180 °C. У статті [22] автори представили детальний огляд наповнювачів, які можна використовувати в інтумесцентних реактивних покриттях на основі органічних смол. У [23] висвітлені нові тенденції захисту сталевих конструкцій із застосуванням силіконових смол у фарбах, що спучуються. Представлено вплив структури силіконової смоли та типу наповнювача на властивості обуглення, що утворюється під час термічного розкладання інтумесцентного покриття. Sami Ullah та ін. розробили та випробували вогнезахисні інтумесцентні покриття з такими складниками: поліфосфат амонію, тригідрат алюмінію, графіт, що розширюється, меламін, борна кислота, змішана з епоксидною смолою бісфенолу А та поліамідним затверджувачем. Особливістю проведених досліджень було те, що розробленим покриттям захищали сталеві конструкції різних геометричних форм: Т-подібні з'єднання, двотаврові балки та труби [24].

У працях [25 – 32] представлені дослідження інтумесцентних реактивних покриттів, а саме: атмосферостійкість, експлуатаційні властивості, співвідношення наповнювачів, вплив добавок на ефективність покриттів, стійкість до агресивних середовищ, термічна деградація, водостійкість, димоутворення, вивітрювання тощо.

Основні тенденції захисту сталевих будівельних конструкцій реактивними вогнезахисними покриттями, дія антипіренів і вогнезахисних покриттів з точки зору принципів, типів, механізмів і властивостей, представлені у [33, 34]. Високотемпературні вогнезахисні покриття розробляються на основі

силіційорганічних сполук [35, 32], поліалюмосилоксанів [36], поліметилфенілсилоксанів [37], метилополімерних смол [38], полімерних складових та нанокомпозитів [39 – 41].

Сучасний стан наукових досліджень розробки вогнезахисних покриттів інтумесцентного типу, наведено у працях [42 – 44]. Автори [45, 46] акцентують увагу на двох типах інтумесцентних вогнезахисних покриттів: ті, що спучуються під час нагрівання, і ті, в яких спучення відбувається за рахунок добавок в складі композиції покриття.

Також у працях [47 – 52] наголошено на важливості вибору плівкоутворювача, що впливає на рівномірний розподіл компонентів композиції вогнезахисного покриття, адгезію з поверхнею, що захищається, процес спучування та карбонізації.

При вогнезахисному штукатуренні особливу увагу необхідно приділити складу нанесеного штукатурного покриття та умовам його експлуатації. У [53] як пасивні системи протипожежного захисту досліджувалися легкі розчини, активовані лугом, отримані активацією вугільної золи при кімнатній температурі. Фізичні, механічні та термічні властивості досліджували як функцію молярного співвідношення Si/Al та кількості легкого заповнювача і піноутворювача. Результати показали, що оптимізовані легкі розчини, активовані лугом, здатні перевершувати альтернативні комерційні розчини на основі цементу. Kiele A. та інші [54] досліджували вогнезахисну штукатурку, яка складалася з активованого лугом подрібненого гранульованого доменного шлаку з додаванням фосфогіпсу, наповнювача з піску та поліпропіленового волокна. Покриття піддавалось впливу температури 1000 °C. Після впливу температури волокна розплавився, залишивши мережу каналів, які дають змогу водяній парі виходити, відповідно внутрішній тиск зменшувався та не відбувалось руйнування покриття. Вогнезахисні штукатурні покриття використовують для захисту сталевих балок, колон різного перерізу, повітроводів тощо [55 – 57].

Також одним з розповсюджених способів вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій є використання облицювальних матеріалів. Широкого застосування набули гіпсократонні листи, магнезитові, гіпсоволокнисті та вермикулітові плити,

композитні панелі, плити з базальтовими волокнами тощо. Дослідження вогнезахисних властивостей цих облицювальних матеріалів викладено у [58 – 62].

У роботах [63 – 66] розроблено та показано ефективність температуровогнезахисного покриття для алюмінієвих сплавів, яке містить полісилоксан і алюмінію оксид. Автор встановив залежність між складом покриття та його властивостями та визначив, що основою для отримання вогнезахисного покриття для алюмінієвих сплавів є композиція на основі поліметилфенілсилоксанового лаку з вмістом основних компонентів таких як Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 та мінеральна вата.

Результати досліджень виконаних автором, показали, що розроблений склад покриття характеризується високими захисними теплоізоляційними властивостями, та у 3,2-4,3 раза збільшують вогнестійкість алюмінієвого сплаву. Результати досліджень прогріву сплаву АМг 6, що представлені на рисунку 1.7, свідчать про можливість використання розробленого температуровогнезахисного покриття для підвищення вогнестійкості та довговічності будівельних конструкцій з алюмінієвих сплавів, при дії високих температур та вогню.

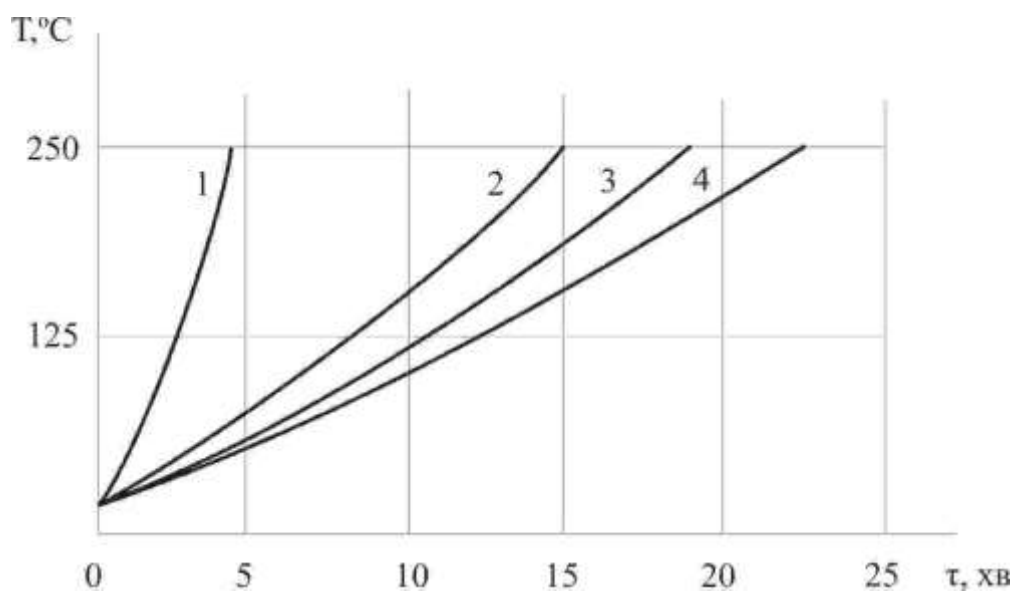


Рисунок 1.7 – Залежність прогріву сплаву АМг 6 від товщини нанесеного покриття: 1 – незахищено; 2 – 0,6 мм; 3 – 0,8 мм; 4 – 1,0 мм

Роботи [67 – 70] розроблено та показано ефективність температуровогнезахисного покриття для захисту бетонних конструкцій від дії високих температур та вогню. Автор дослідив залежність між складом покриття та його властивостями та визначив, що основою для отримання вогнезахисного покриття для захисту бетонних конструкцій є композиція на основі поліметилфенілсилоксанового лаку з вмістом основних компонентів таких як магнію оксид, алюмінію оксиду, силіцію оксид та каолінова вата.

Дослідження виконані авторами, показали, що обробка поверхні бетону шляхом нанесення на його поверхню вогнезахисних речовин сприяє підвищенню вогнестійкості та тріщиностійкості бетону. Це забезпечується створенням нових вогнестійких кристалічних фаз у формі кордієриту та муліту, які утворюють захисний керамічний теплоізоляційний матеріал на поверхні бетону. Досліджено, що в системах на основі поліметилфенілсилоксану наповненого магнію оксидом, алюмінію оксидом та кварцовим піском можливий синтез кордієриту ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$), муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) та алюмомагнезійної шпінелі ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) при певному співвідношенні оксидних складових. Встановлено, що використання захисного покриття значно підвищує вогнестійкість залізобетонної плити перекриття (до 182 хв), тобто в два рази завдяки утворенню на поверхні сильно поризованого вогнезахисного шару.

Розроблені склади вогнезахисного покриття [71 – 76], призначені для підвищення межі вогнестійкості сталевих та залізобетонних конструкцій за рахунок утворення у процесі нагрівання нових температуростійких фаз, які при нагріванні є вогнестійкими. Склад композиції для вогнестійкого захисного покриття: карборансилоксановий лак, алюмінію (III) оксид, додатково фосфору (V) оксид та каолін. Розрахунковим методом встановлено, що межа вогнестійкості сталевій конструкції з нанесеним шаром розробленого вогнезахисного покриття за досягненням критичного значення температури поверхні сторони, що не обігрівається (480°C), має 45 хв.

Досліджено залежність впливу товщини вогнезахисних покриттів на межу вогнестійкості сталевих та залізобетонних конструкцій (рис. 1.8).

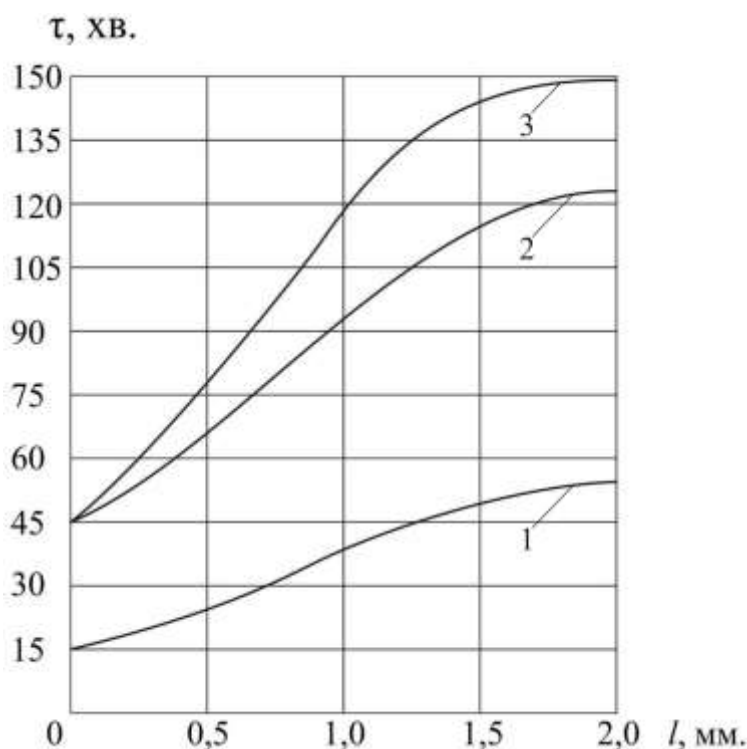


Рисунок 1.8 – Залежність межі вогнестійкості сталевих та залізобетонних конструкцій від товщини покриття: 1 – метал; 2 – залізобетон на основі портландцементу; 3 – залізобетон на основі шлакопортландцементу

Авторами встановлено, що при збільшенні товщини покриття від 0,8 до 2,0 мм межа вогнестійкості для сталевих конструкцій зростає від 32 до 52 хв, для залізобетонних від 88 до 122 хв та від 102 до 150 хв відповідно. Доведено, що для досягнення максимальної межі вогнестійкості найефективнішою є товщина покриття 2 мм.

Вогнетривке покриття [77] розроблено з метою вогнезахисту сталевих конструкцій. Композиція для вогнетривкого покриття містить: оксид алюмінію, діоксид цирконію та силіційвмісний компонент. Це забезпечує в процесі термообробки утворення з поліметилфенілсилоксану високодисперсного аморфного SiO_2 , який покращує процеси спікання, тобто утворення фаз муліту та циркону і сприяє утворенню щитої керамічної структури, що в свою чергу, призводить до покращення захисних властивостей. Встановлено, що при введенні до даного складу покриття мінералізатора – оксиду хрому (1-3мас.% від маси оксидів наповнювачів, в даному випадку Al_2O_3 , ZrO_2) процеси термоокисної деструкції

поліметилфенілсилоксанового лаку зміщаються в сторону вищих температур на 120-150°C, а це значно підвищує суцільність покриттів (зменшує втрати маси при нагріванні) в інтервалі температур 750-1000°C і збільшує значення адгезійної міцності. Таке покриття є менш пористим, що позитивно впливає на технічні характеристики. Доведено, що мінералізатор CrO_3 в процесі нагріву забезпечує більш повний вихід вогнетривкої та термостійкої фази циркону.

У роботі [78] досліджено процеси взаємодії міжкремнієвих органічних сполук на основі збагаченого поліметилфенілсилоксану з наповнювачами оксидів, а також можливості їх використання в умовах високої температури та для вогнезахисту конструкцій із залізобетону. Встановлено, що введення до складу обмазки каоліну на 50-60 градусів знижує температуру мулиту. При збільшенні товщини покриття від 300 до 800 мкм показник пористості зростає в 3,2-5,3 рази, а при швидкості нагріву від 20 до 60 град/хв. - у 8,2-9,4 рази. Межа вогнестійкості залізобетону з нанесеним вогнезахисним кремнійорганічним покриттям після становить 108-126 хв, що в 1,8-2,1 рази вище, ніж у незахищених.

Автором [79] запропоновано склади вихідних композицій для захисних покриттів та вивчено їх вплив на вогнестійкість та довговічність залізобетонних конструкцій в умовах високотемпературного нагрівання та пожежі. Експериментально встановлено вплив товщини захисного покриття на показник його загальної пористості в температурному інтервалі (573 – 873 K) термоокисної деструкції полісилоксану. Встановлено ефективність вогнезахисту залізобетонних конструкцій розробленими складами вогнезахисних покриттів. При їх використанні межа вогнестійкості залізобетонних конструкцій за теплоізолювальною здатністю зростає у 1,86 – 2,03 рази. Найбільш ефективним при вогнезахисті залізобетонних конструкцій є склад, з вмістом компонентів, мас %: KO-08 – 35, Al_2O_3 – 30, ZnO_2 – 19, каолін – 10, каолінове волокно – 4,5, бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) – 1,5, що підвищує межу вогнестійкості захищених залізобетонних зразків за втратою теплоізолювальної здатності до 122 хв.

1.3. Методи розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість

Відповідно до [80 – 82] аналіз несучої сталеві конструкції з точки зору протипожежного захисту слід проводити з застосуванням встановлених для заданих розрахункових ситуацій моделей термічних та механічних впливів, а також параметрів несучої конструкції при підвищених температурах. Сталеві конструкції необхідно проектувати так, щоб вони зберігали свою несучу здатність протягом часу дії пожежі.

Вогнестійкість сталеві будівельної конструкції підтверджується виконанням наступних умов: у часових параметрах – $t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$, у міцнісних параметрах – $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$, у температурних параметрах – $\theta_d < \theta_{cr,d}$. Дані умови враховують: розрахункову межу вогнестійкості, нормативну межу вогнестійкості, розрахункову несучу здатність елемента при пожежі у момент часу t , розрахунковий результат впливу при пожежі у момент часу t , розрахункову температуру матеріалу, розрахункову критичну температуру матеріалу [82].

Розрахунок вогнестійкості сталеві конструкції включає наступні етапи:

- проектні сценарії пожежі;
- визначення відповідних температурних режимів пожежі;
- теплотехнічний розрахунок підвищення температури в конструкціях;
- статичний розрахунок механічних характеристик конструкції.

Для розрахунку вогнестійкості сталеві будівельної конструкції необхідно використати температурно-часову залежність.

Відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 розрізняють номінальні та параметричні температурні режими пожежі. Для проектування сталевих конструкцій використовують номінальні температурні режими. Сценарії реальної (параметричної) пожежі використовують при розробці заходів із протипожежного захисту будівель та споруд, враховуючи пасивні та активні заходи вогнезахисту.

До номінальних температурно-часових залежностей пожежі відносять: стандартний температурний режим, температурний режим зовнішньої пожежі та вуглеводневий температурний режим.

Стандартний температурний режим описується залежністю:

$$\Theta_g = 20 + 345 \lg (8t + 1) \quad (1.1)$$

Температурний режим зовнішньої пожежі описується залежністю:

$$\Theta_g = 660 (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (1.2)$$

Вуглеводневий температурний режим пожежі описується залежністю:

$$\Theta_g = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (1.3)$$

де: Θ_g – температура газового середовища (°C);

t – час розвитку пожежі (хв).

Параметричні температурно-часові режими пожежі застосовують для пожежних відсіків де в розрахунку враховують параметри приміщення, питоме пожежне навантаження, умови вентиляції, теплофізичні параметри будівельних матеріалів.

Параметричний температурно-часовий режим враховує дві стадії: нагрівання та охолодження.

На стадії нагрівання описується залежністю:

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (1.4)$$

де: Θ_g – температура навколишнього газового середовища в протипожежному відсіку (°C);

$t^* = t \cdot \Gamma$ (год), (t – час розвитку пожежі (год); Γ – коефіцієнт, що включає в себе параметри протипожежного відсіку – теплопоглинальну здатність, питому теплоємність, теплопровідність, густину огорожувальних конструкцій, їх площу та площу вертикальних прорізів, висоту вікон, а також розрахункове питоме пожежне навантаження).

На стадії охолодження параметричний температурно-часовий режим визначається за формулами:

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625 \cdot (t^* - t_{\max}^* x), \text{ якщо } t_{\max}^* < 0,5, \quad (1.5a)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 \cdot (3 - t_{\max}^*) \cdot (t^* - t_{\max}^* x), \text{ якщо } 0,5 < t_{\max}^* < 2; \quad (1.5b)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 \cdot (t^* - t_{\max}^* x), \text{ якщо } t_{\max}^* > 2, \quad (1.5c)$$

де: Θ_g – температура навколишнього газового середовища в протипожежному відсіку ($^{\circ}\text{C}$);

$\Theta_{\max}$ – максимальна температура ($^{\circ}\text{C}$);

$t^* = t \cdot \Gamma$ (час);

t – час розвитку пожежі (год);

Γ – коефіцієнт що включає в себе параметри протипожежного відсіку;

$t_{\max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d}/O) \cdot \Gamma$ ($^{\circ}\text{C}$);

$q_{t,d}$ – розрахункове пожежне навантаження, віднесене до площі поверхні ($\text{МДж}/\text{м}^2$);

$x = 1,0$, якщо $t_{\max} > t_{\lim}$, або $x = t_{\lim} \cdot \Gamma / t_{\max}^*$, якщо $t_{\max} = t_{\lim}$;

$t_{\lim}$ – час досягнення максимальної температури параметричної пожежі, що визначається пожежним навантаженням (год).

У залежності від розрахункової моделі та температурного режиму пожежі застосовують наступні підходи до розрахунку:

- розрахунок вогнестійкості за табличними даними;
- спрощені методи розрахунку;
- уточнені методи розрахунку;
- випробування.

1.3.1. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість захищених вогнезахисними матеріалами

Відповідно до частини 1-2 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3 та даних представлених у [81], розрахувати вогнестійкість сталевих елементів захищених вогнезахисними матеріалами можна враховуючи їх теплофізичні характеристики. Умовою застосування вогнезахисних матеріалів є збереження їх цілісності та надійності зчеплення з сталевими конструкціями під час впливу пожежі.

Теплофізичні характеристики та ефективність вогнезахисних матеріалів, оцінюють шляхом проведення відповідних випробувань згідно [84 – 88].

Приріст температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt для рівномірного розподілу температури в поперечному перерізі захищеної сталеві конструкції визначають за формулою:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho (1 + \phi / 3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta_{g,t} \quad (1.6)$$

при $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$, якщо $\Delta\theta_{g,t} > 0$,

де:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V \quad (1.7)$$

де: A_p/V – коефіцієнт перерізу сталевих конструкцій, вкритих вогнезахисними матеріалами, m^{-1} ;

A_p – площа поверхні вогнезахисного матеріалу на одиницю довжини;

V – об'єм конструкцій на одиницю довжини;

c_a – питома теплоємність сталі, Дж/кгК;

c_p – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, не залежна від температури, Дж/кгК;

d_p – товщина вогнезахисного матеріалу, м;

Δt – проміжок часу, при цьому $\Delta t \leq 30$ сек;

$\theta_{a,t}$ – температура сталі в момент часу t , °C;

$\theta_{g,t}$ – температура середовища у момент часу t , °C;

$\Delta\theta_{g,t}$ – приріст температури середовища у момент часу Δt , °C;

ρ_a – густина сталі, що приймається 7850 кг/м³;

λ_p – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи, Вт/мК;

ρ_p – густина вогнезахисного матеріалу, кг/м³.

Вираз визначення приросту температури $\Delta\theta_{a,t}$ захищеної сталевій конструкції перетворюється:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} \left[\frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \Delta t \right] - (e^{\phi/10} - 1) \theta_{g,t} \quad (1.8)$$

Коефіцієнт ϕ може бути прийнятий рівним 0, що призведе до модифікації коефіцієнта перерізу:

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \quad (1.9)$$

Цей коефіцієнт є характеристичною величиною вогнезахисної системи.

У таблиці 1.7 представлено характеристики вогнезахисних матеріалів, що можуть бути використані для розрахунку коефіцієнта теплового перерізу.

Таблиця 1.7

Характеристики вогнезахисних матеріалів

Матеріал	Густина, ρ_p , кг/м ³	Коефіцієнт теплопро- відності, λ_p , Вт/мК	Питома теплоємність, c_p , Дж/кгК
----------	--	---	---

Продовження табл. 1.7

Напилювальні суміші:			
- мінеральне волокно	350	0,12	1200
- цементно-вермикулітові	350	0,12	1200
- перліт	350	0,12	1200
Напилювальні суміші з високою густиною:			
- вермикулітові (перлітові) з цементом	550	0,12	1100
- вермикулітові (перлітові) з гіпсом	650	0,12	1100
Плити:			
- вермикулітові (перлітові) з цементом	800	0,2	1200
- фібросилікатні	600	0,15	1200
- фіброцементні	800	0,15	1200
- гіпсові	800	0,2	1700
Бетон	2300	1,6	1000
Легкий бетон	1600	0,8	840
Бетонні блоки	2200	1	1200
Цегла з отворами	1000	0,4	1200
Цегла повнотіла	2000	1,2	1200

Залежності температури сталевих конструкцій з різними термічними коефіцієнтами перерізу $A_p \lambda / V d_p$ від часу пожежі при стандартному температурному режимі наведені на рисунку 1.9.

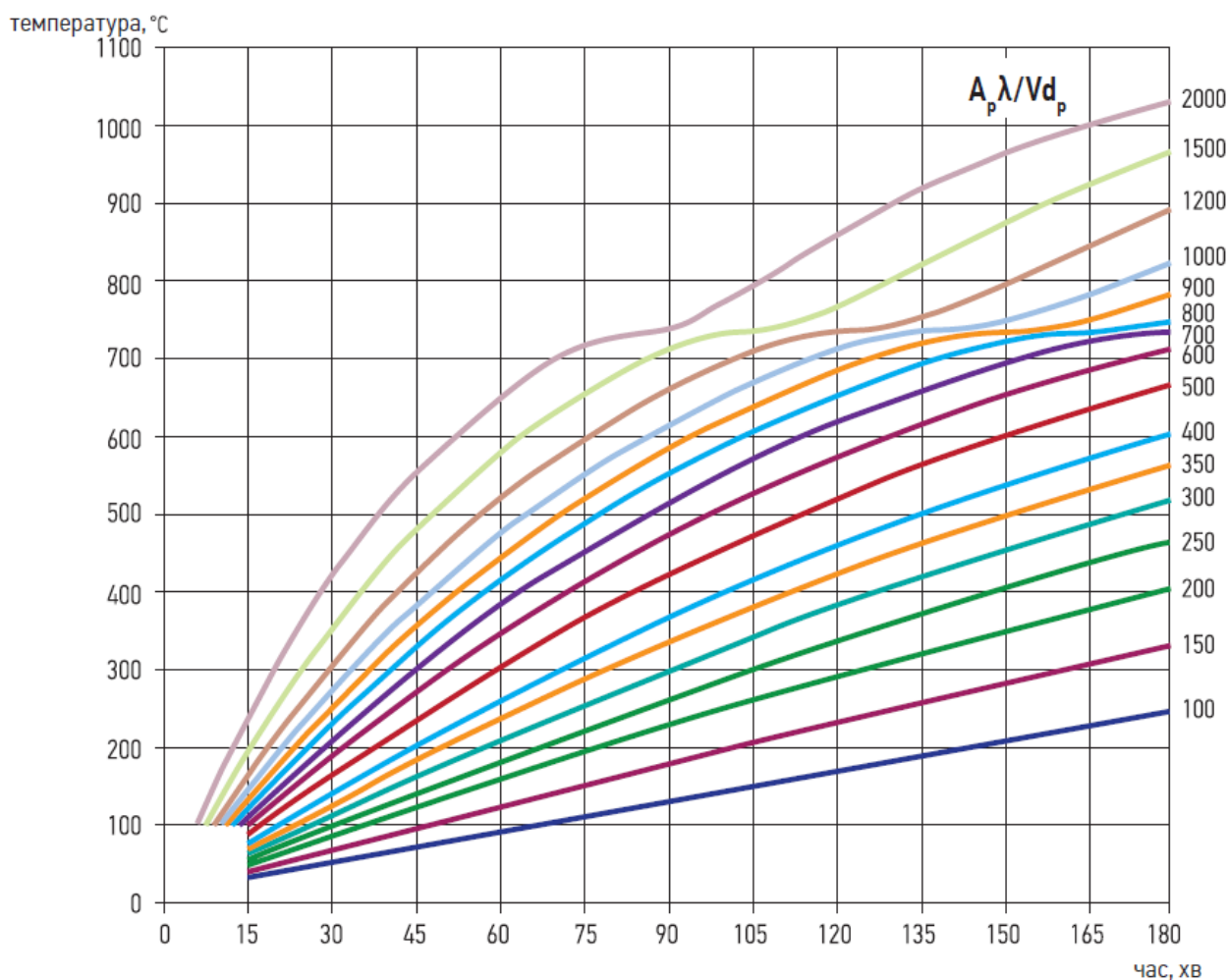


Рисунок 1.9 – Залежності температури сталевих конструкцій з різними термічними коефіцієнтами перерізу $A_p \lambda / V d_p$ від часу пожежі при стандартному температурному режимі

Визначальними факторами для обрання способу вогнезахисту сталевих конструкцій є необхідний клас вогнестійкості конструкцій, коефіцієнт перерізу конструкцій та розрахована критична температура сталевих елементів.

1.3.2. Метод визначення вогнезахисної здатності реактивних вогнезахисних матеріалів для сталевих будівельних конструкцій

Залежно від типу вогнезахисного матеріалу та способу вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій для оцінювання вогнезахисної здатності використовують методи та настанови регламентовані стандартами [88, 6]. Так, даними стандартами встановлено методи випробування з визначення впливу застосовуваних систем

реактивного вогнезахисту на вогнестійкість сталевих будівельних конструкцій, що можуть використовуватись як балки або колони.

Згідно даного стандарту при оцінюванні вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів встановлюється діапазон значень товщини нанесеного вогнезахисного матеріалу, діапазону значень площі поперечного перерізу сталевих конструкцій, що характеризується коефіцієнтами поперечного перерізу, діапазон значень проектної температури та діапазон забезпечуваних класів за вогнестійкістю.

Визначену кількість коротких сталевих двотаврових або пустотілих конструкцій для випробування, які захищено системою вогнезахисту, нагрівають в печі згідно з методикою, описаною в EN 1363-1 [90].

Набір зразків для проведення випробувань складається з навантажених та ненавантажених конструкцій. Підбір зразків для випробування залежить від обсягів оцінювання, що представлено в таблиці 1.8, де набір зразків відповідає мінімальній кількості зразків для випробування, необхідних для проведення оцінювання в заданому обсязі. Параметри зразків для випробування вибирають з табличних даних, представлених у додатку F [88].

Таблиця 1.8

Набір зразків для проведення випробувань

Обсяг випробування	Кількість зразків для випробування	$LB_{min} + LB_{max}$	$LC_{min} + LC_{max}$	TC_{max}	LHB_{max}	LHB_{min}	LHC_{max}	LHC_{min}	RB	SIB	SIC	TCHS	TRHS	SHB	SHC	Загальна кількість коротких зразків
Балки двотаврового профілю “I” I Beams	1	✓								13						13
Колони двотаврового профілю “I” I Columns	2		✓								13					13
Балки та колони двотаврового профілю “I” I Beams + I Columns	3	✓		✓						13	13					26
Балки та колони двотаврового профілю “I” I Beams + I Columns	3A	✓		✓					2		13					15

де: I – двотаврові профілі “I” та “H”;
LB – навантажена балка;
LC – навантажена колона;
TC – висока колона двотаврового профілю “I” або “H”;
LHB – навантажена пустотіла балка;
LHC – навантажена пустотіла колона;
SIB – короткі балки двотаврового профілю “I”;
SIC – короткі колони двотаврового профілю “I”;
TCHS – високі пустотілі колони круглого профілю;
TRHS – високі пустотілі колони прямокутного профілю;
SHB – коротка пустотіла балка;
SHC – коротка пустотіла колона;
RB – балка для порівняння.

Набір сталевих конструкцій (табл. 1.8) забезпечує можливість проведення оцінювання за частиною показників або за всіма показниками. Кожний набір зразків для випробування відповідає мінімальній кількості зразків для випробування, необхідних для проведення оцінювання в заданому обсязі.

Оцінювання даних температур, отриманих під час випробування навантажених і ненавантажених конструкцій, використовують для встановлення співвідношення між проміжком часу до досягнення заданого значення температури сталі, товщиною вогнезахисного матеріалу та коефіцієнтом поперечного перерізу. Аналіз даних здійснюється при умові, що значення параметрів відповідають критеріям прийнятності.

Для аналізу обробки отриманих експериментальних даних використовують такі методи: графічний спосіб; методологія аналізування диференційної формули, що передбачає змінне значення λ ; методологія аналізування диференційної формули, що передбачає стале значення λ ; числовий регресійний аналіз.

Графічний спосіб. Для кожної конструкції, на яку нанесено реактивний вогнезахисний матеріал однакової номінальної товщини у сухому стані, потрібно

визначити кориговане значення проміжку часу до досягнення конструкцією заданої проектної температури за номінальної товщини матеріалу.

Для кожної конструкції, підданої випробуванням за кожного діапазону номінальної товщини вогнезахисного матеріалу і за кожного значення проектної температури будується графік залежності оберненого коефіцієнта поперечного перерізу (V/Am) від коригованого проміжку часу до досягнення проектного значення температури сталі, як показано на рисунку 1.10. Додатковою відомою “віртуальною” точкою даних, що має координати $V/Am = 0,0$ м і проміжку часу до досягнення кожного зі значень проектної температури, визначеною за кривою стандартного температурного режиму, поданою в EN 1363-1, можна користуватися для всіх значень проектної температури і номінальної товщини матеріалу в сухому стані.

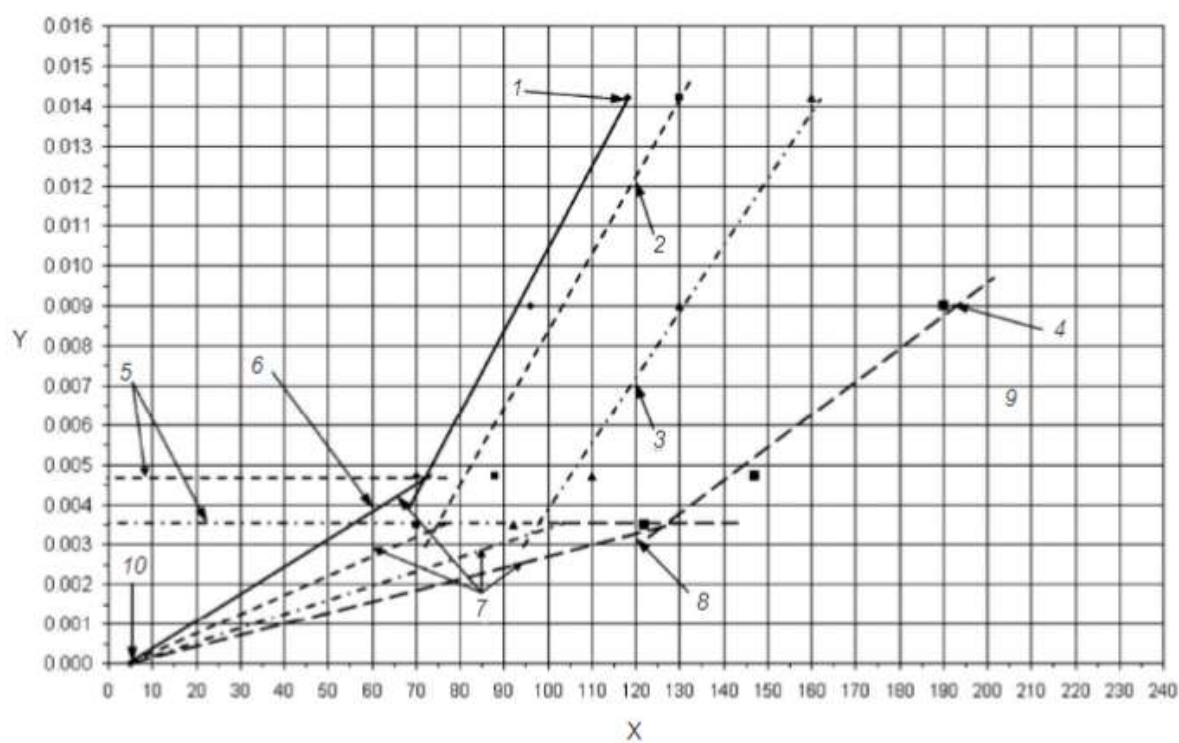


Рис 1.10 - графік залежності оберненого коефіцієнта поперечного перерізу (V/Am) від коригованого проміжку часу до досягнення проектного значення температури сталі для температури сталі 550 °C, де:

X – коригований проміжок часу, хв;

Y – обернене значення коефіцієнта поперечного перерізу (V/Am), м;

1 – лінію для товщини $d_{\min}$ неможна екстраполювати до 120 хв. Відрізок на осі визначають будуючи графік залежності часу від товщини за сталого значення площі поперечного перерізу та здійснюючи інтерполяцію до 120 хв;

2 – відрізок на осі за d_1 для моменту 120 хв, тобто 82 м^{-1}

3 – відрізок на осі за d_2 для моменту 120 хв, тобто 137 м^{-1}

4 – не більше ніж 15 % для всіх точок;

5 – горизонтальна лінія, проведена для найменшого значення оберненого коефіцієнта поперечного перерізу для кожної лінії, що відповідає номінальній товщині, до перетину з лінією, що відповідає номінальній товщині;

6 – відрізок на осі для моменту часу 60 хв;

7 – прямі лінії, проведені з точок перетину до віртуальної точки даних

8 – відрізок на осі за $d_{\max}$ в момент часу 120 хв, тобто 286 м^{-1} ;

9 – для побудови графіку у вигляді прямої лінії, що проходить найближче до всіх точок, потрібно враховувати всі точки даних і користуватися методом найменших квадратів;

10 – “віртуальна точка даних” для $V/A = 0,0 \text{ м і } 4,5 \text{ хв}$ (проміжок часу до досягнення температури в печі 550°C);

◆ $d_{\min}$ ▲ $d_{\max}$ ■ d_1 ▲ d_2 .

Далі будують графіки у вигляді прямої лінії, що проходить найближче до всіх точок, або просто у вигляді лінії, що з'єднує всі точки.

Для кожного значення проектної температури застосовують три критерії відповідності та будують графік залежності оберненого коефіцієнта поперечного перерізу від прогнозованого проміжку часу, а також “коригованого проміжку часу” для “середнього значення товщини з діапазону її номінальних значень” за певної проектної температури. Ці дані подаються в табличній формі, де зазначається: точка даних, коефіцієнт поперечного перерізу, обернений коефіцієнт поперечного перерізу та проміжок часу до досягнення проектної температури. Якщо критерії не виконуються, то необхідно проводити зміщення ліній залежності, доки критерій не буде виконано.

Далі для кожного значення проектної температури й графіка, побудованого для кожного значення номінальної товщини вогнезахисного матеріалу, потрібно визначити граничні значення оберненого коефіцієнта поперечного перерізу для кожного заданого проміжку часу забезпечення вогнестійкості.

Шляхом лінійної інтерполяції визначаються значення коефіцієнтів поперечного перерізу за значень номінальної товщини. Кількість кроків змінювання товщини матеріалу, необхідну для значень, проміжних між його максимальним і мінімальним значеннями, представлено у таблиці 1.9.

Таблиця 1.9

Кількість кроків змінювання товщини матеріалу, необхідна для визначення значення коефіцієнтів поперечного перерізу за значень номінальної товщини

Максимальна товщина. Мінімальна товщина (мм)	Кількість кроків змінювання товщини
До 40	4
> 40 до 75	5
> 75	6

Методологія аналізування диференційної формули, що передбачає змінне значення λ . Даний підхід передбачає реалізацію наступних етапів:

- застосування базової диференційної формули для визначення температури сталі у проміжок часу Δt ;
- складання вихідних даних: проектних температур, значенню температур сталі, значень коефіцієнта поперечного перерізу конструкцій, середня товщина вогнезахисного матеріалу в сухому стані;
- визначення окремих значень змінного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу для кожної короткої конструкції;
- визначення температури вогнезахисного матеріалу;
- перетворення значень коефіцієнта теплопровідності;
- визначення середнього значення змінного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу;

- перевірка критеріїв прийнятності;
- коригування характеристичних значень змінного коефіцієнта теплопровідності;
- звіт за результатами.

Методологія аналізування диференційної формули, що передбачає сталі значення λ . Даний підхід передбачає реалізацію наступних етапів:

- вихідні дані: кориговані проміжки часу до досягнення проектних температур, розрахунковий коефіцієнт поперечного перерізу сталевих конструкцій; середня товщина вогнезахисного матеріалу;
- визначення величини λ для заданого значення температури сталі;
- побудова лінійної регресії;
- перевірка критеріїв прийнятності;
- коригування c_0 ;
- звіт за результатами.

Числовий регресійний аналіз. Вихідними даними для аналізу є: проектні температури, кориговані проміжки часу до досягнення проектних температур; розрахункові значення коефіцієнта поперечного перерізу для сталевих конструкцій; середня товщина самого реактивного вогнезахисного матеріалу в сухому стані.

Багатоетапний лінійний числовий регресійний аналіз проводять, користуючись формулою (1.10):

$$t = a_0 + a_1 d_p + a_2 \frac{d_p}{A_m/V} + a_3 \theta_a + a_4 d_p \theta_a + a_5 d_p \frac{\theta_a}{A_m/V} + a_6 \frac{\theta_a}{A_m/V} + a_7 \frac{1}{A_m/V} \quad (1.10)$$

де: t (хв) – проміжок час до досягнення проектної температури θ_a ;

t (хв) – проміжок час до досягнення проектної температури θ_a ;

d_p (мм) – товщина вогнезахисного матеріалу (самого реактивного покриття);

A_m / V (м^{-1}) – визначена величина коефіцієнта поперечного перерізу;

θ_a – температура сталі ($^{\circ}\text{C}$).

На першому етапі визначають значення констант $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ та a_7 , розв'язуючи рівняння регресії для всіх результатів випробувань за проектних температур, значення яких змінюються з мінімального до максимального значення, що відповідають необхідному аналізу, з кроком 50 °C.

Користуючись значеннями констант, розраховують проміжок часу, необхідний для досягнення проектної температури за різних значень товщини вогнезахисного матеріалу та різних значень коефіцієнта поперечного перерізу.

Порівнюють прогнозовані значення проміжку часу до досягнення кожного із значень проектної температури з коригованими виміряними проміжками часу, і перевірити, чи відповідають результати критеріям, викладеним прийнятності

Коригованими значеннями коефіцієнтів регресії користуються для визначення інформації, що має бути подана в протоколі оцінювання. Для цього необхідне перетворення формули (1.10) з метою визначення товщини матеріалу, необхідної за заданого значення коефіцієнта поперечного перерізу для кожної межі вогнестійкості і кожного значення температури сталі. Для визначення товщини матеріалу користуються формулою (1.11).

$$d_p = \frac{t - a_0 - a_3\theta_a - \left(\frac{a_6\theta_a}{A_m/V}\right) - \left(\frac{a_7}{A_m/V}\right)}{a_1 - a_4\theta_a - \left(\frac{a_2}{A_m/V}\right) - \frac{5\theta_a}{A_m/V}} \quad (1.11)$$

де: t (хв) – проміжок час до досягнення проектної температури;

d_p (мм) – товщина вогнезахисного матеріалу (самого реактивного покриття);

A_m/V (м⁻¹) – визначена величина коефіцієнта поперечного перерізу;

$a_0 - a_7$ – коефіцієнти регресії;

θ_a (°C) – температура сталі (°C).

Для обробки використовують лише один метод оцінювання даних, що отримані під час випробувань.

Наступним етапом є визначення коефіцієнтів перерахунку для діапазону значень товщини, за якого проводили випробування, з метою коригування проміжку часу до досягнення проектної температури усіма короткими конструкціями. Для цього виконують лінійну інтерполяцію [91].

Оцінювання теплових показників виконують враховуючи кориговані проміжки часу до досягнення проектних температур кожною з коротких конструкцій, причому їх значення повинні відповідати критеріям прийнятності та обмеженням визначених стандартом.

Якщо критерії прийнятності виконуються, то застосованим методом визначають значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, яке забезпечує нормований клас вогнестійкості для конструкцій з різною зведеною товщиною (коефіцієнта перерізу). У загальному розглядають нормовані значення класу вогнестійкості 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 і 240 хв, критичні температури 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C, 700 °C, 750 °C, коефіцієнти перерізу від 40 до 400 м⁻¹ з кроком 20 м⁻¹.

Результати оцінки вогнезахисної здатності повинні бути прийнятними для діапазонів товщини вогнезахисного матеріалу ($d_{\min}$ - $d_{\max}$) та профільного коефіцієнта з урахуванням допустимих відхилень відповідних методів оцінювання показників системи вогнезахисту.

Беручи до уваги трудомісткість та вартість проведення стандартизованих випробувань набору зразків сталевих конструкцій, доцільною є попередня оцінка вогнезахисної ефективності вогнезахисних покриттів на зразках зменшених розмірів. Отримані значення температур прогріву сталевих пластин дадуть можливість визначити теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття та встановити залежність цих характеристик від товщини покриття, товщини пластини та критичної температури сталевих конструкцій.

1.4. Альтернативні методи та методики оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій

У роботі [92] авторами представлено методику попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій розрахунково-експериментальним методом в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Запропонована методика передбачає проведення експериментів з визначення температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям та передбачає наступні етапи:

1. Проведення експериментів по визначенню температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі;
2. Визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності;
3. Визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття – залежності мінімальної товщини покриття від товщини сталеві пластини, тривалості вогневого впливу та значення критичної температури сталі, шляхом розв'язання прямих задач теплопровідності.

Запропоновану методику автори апробували при оцінці вогнезахисної здатності покриття на водній основі «Amotherm Steel Wb», що спучується за температурного режиму вуглеводневої пожежі та за стандартного температурного режиму (для порівняння часу досягнення критичної температури сталі).

Експериментальна частина була проведена із застосуванням сталевих пластин зі сталі Ст. 3 розмірами 500 мм × 500 мм × 5 мм з середньою товщиною вогнезахисного покриття 0,42 мм. На рисунку 1.11 представлено отримані залежності температури з необігрівної поверхні сталеві пластини від часу вогневого впливу при різних температурних режимах пожежі.

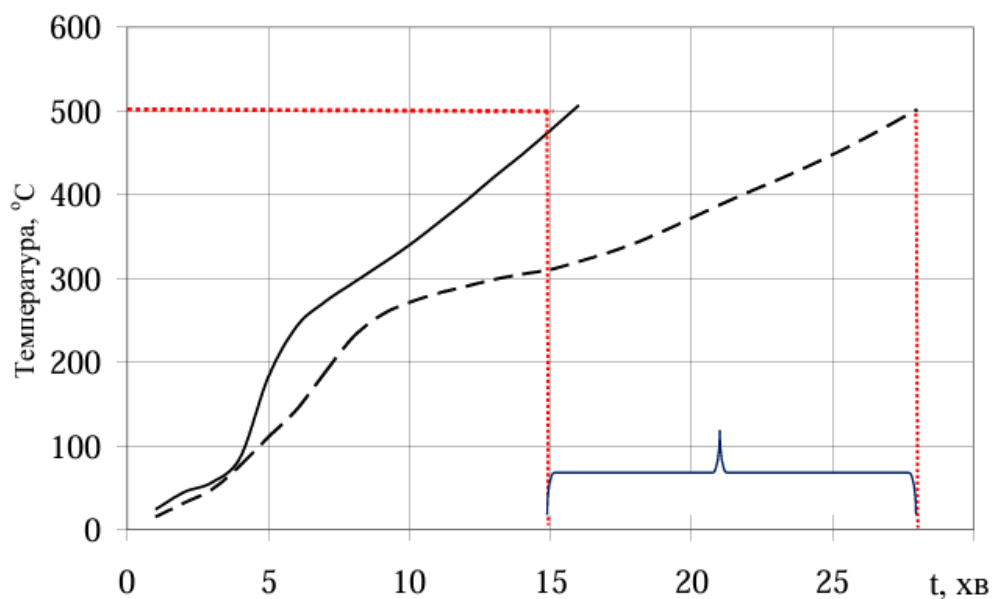


Рисунок 1.11 – Залежність температури з необігрівної поверхні сталевій пластини від часу вогневого впливу при різних температурних режимах пожежі: суцільна крива – при стандартному температурному режимі пожежі; пунктирна крива – при температурному режимі вуглеводневої пожежі

Порівнюючи час прогріву сталевій пластини з вогнезахисним покриттям, автори встановили, що при товщині покриття 0,42 мм час, за який стальова пластина товщиною 5 мм прогрівається до критичної температури 500 °C при стандартному температурному режимі в 1,9 разів більший, ніж при температурному режимі вуглеводневої пожежі.

Далі шляхом розв'язання серії прямих задач теплопровідності визначили залежність мінімальної товщини покриття від товщини сталевій пластини для критичної температури сталі 500 °C і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хв, що наведену на рисунку 1.12.

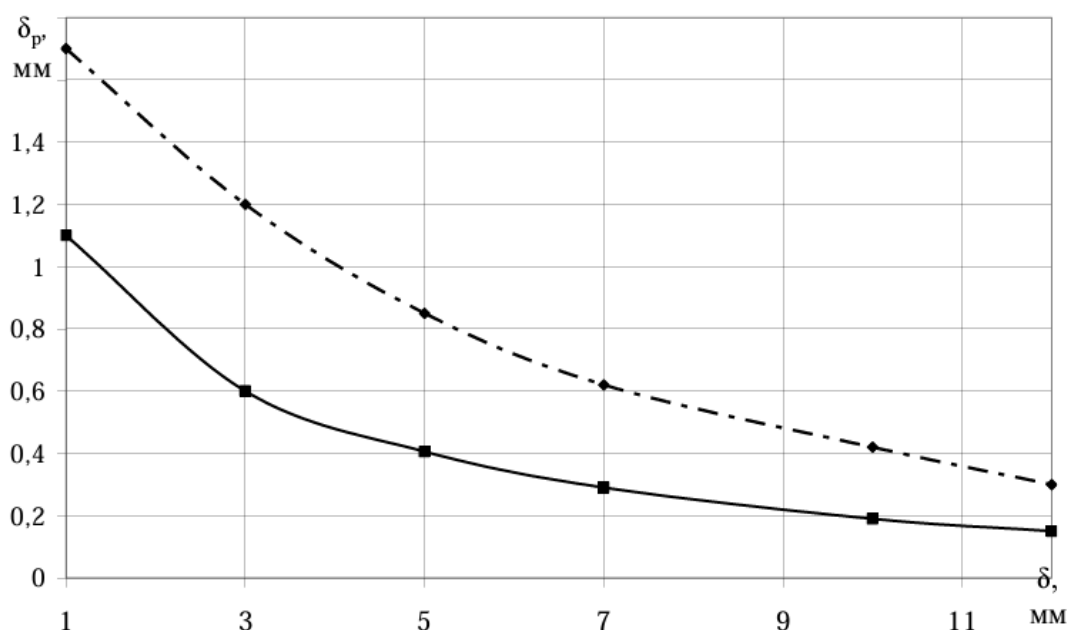


Рисунок 1.12 – Залежність мінімальної товщини вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb» від товщини сталевих пластин для критичної температури сталі 500 °C і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хв, де: суцільна крива – при стандартному температурному режимі пожежі; пунктирна крива – при температурному режимі вуглеводневої пожежі

Провівши дані дослідження, автори показали, що запропонована ними методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій розрахунково-експериментальним методом дає можливість дослідити основні теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття, що будуть відігравати ключову роль при встановленні залежності мінімальної товщини покриття від товщини сталевих пластин, тривалості вогневого впливу та значення критичної температури сталі.

Автором [93] обґрунтовано параметри зразків для експериментального визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. У роботі встановлено, що експерименти на зразках зменшених розмірів доцільно проводити із застосуванням сталевих пластин, які мають дві товщини (мінімальну 5 мм та

максимальну 10 мм), і шару вогнезахисного покриття на них, який має три значення товщини: мінімальне, середнє та максимальне.

Метою проведених досліджень у даній роботі є розв'язання теплотехнічної задачі для визначення мінімальної кількості і товщини сталевих пластин, а також значень товщини вогнезахисного покриття, які необхідно застосовувати під час проведення експериментів на зразках зменшених розмірів. Для досягнення поставленої мети автори використали метод, заснований на проведенні обчислювального експерименту, що імітує випробування в вогневої печі зразків захищених сталевих конструкцій шляхом розв'язання теплотехнічної задачі. Теплотехнічну задачу розв'язували методом кінцевих різниць з використанням неявної схеми апроксимації.

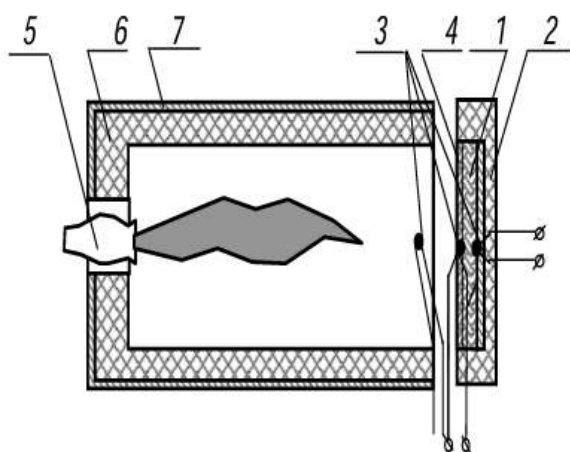
З отриманих розрахункових даних встановлено, що на інтенсивність прогріву зразків (тобто на значення часу досягнення критичної температури) значно впливає як зведена товщина сталевого профілю, так і товщина вогнезахисного покриття. В ході досліджень, встановлено, що для варіанта з малими теплофізичними характеристиками при однаковій товщині вогнезахисного покриття значення часу досягнення критичної температури сталі 500 °C змінюється від 31,75 хв до 71,80 хв і максимальна відмінність у цьому часі становить 55,8%. Для варіанта з великими теплофізичними характеристиками тих же зразків значення часу досягнення критичної температури сталі 500 °C змінюється від 55,00 хв до 86,77 хв і максимальна відмінність у часі досягнення критичної температури сталі 500 °C становить 36,6%, що трохи нижче, ніж для варіанта з малими теплофізичними характеристиками. Це свідчить про лінійну залежність часу досягнення критичної температури сталі від зведеної товщини сталевого профілю при однаковій товщині вогнезахисного покриття. Також встановлено, що при однаковій зведеній товщині сталевого профілю залежність часу досягнення критичної температури сталі від товщини вогнезахисного покриття є монотонною і має нелінійний характер.

В загальному, комплекс проведених досліджень, дав змогу авторам, належним чином обґрунтувати параметри зразків для експериментального визначення

температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі.

У роботі [94] проведено серію експериментальних досліджень з визначення температури прогріву вогнезахиснених сталевих конструкцій. Авторами було запропоновано та розроблено нові склади вогнезахисних речовин для підвищення вогнестійкості сталевих конструкцій. Для дослідження ефективності розроблених складів покриттів, були виготовлені сталеві пластини (дослідні зразки) прямокутної форми розмірами 70×100 мм з листової сталі товщиною 1 мм.

Вогневі випробування дослідних зразків з нанесеним вогнезахисним покриттям, проводили на установці для визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів, схема роботи якої показана на рисунку 1.13.



а)



б)

Рисунок 1.13 – Схема установки (а) та установка для визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів (б): 1 – сталеві пластина; 2 – теплоізоляція; 3 – термопара; 4 – вогнезахисне покриття; 5 – пальник; 6 – футеровка; 7 – корпус печі

Виконавши експериментальні дослідження, автори встановили температуру з необігрівної поверхні досліджуваної сталеві пластини з вогнезахисним покриттям, що в подальшому була використана для знаходження теплофізичних характеристик новоствореного вогнезахисного покриття розв'язанням обернених задач теплопровідності [95, 96]. Використовуючи комп'ютерну чисельну модель (метод

кінцевих різниць), автори визначили теплофізичні характеристики розробленого вогнезахисного покриття за даними експериментальних досліджень.

Порівняння експериментальних та розрахункових результатів (рис. 1.14), показало задовільну збіжність, при цьому, значення критерію середньоквадратичного відхилення між ними, склало $15,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

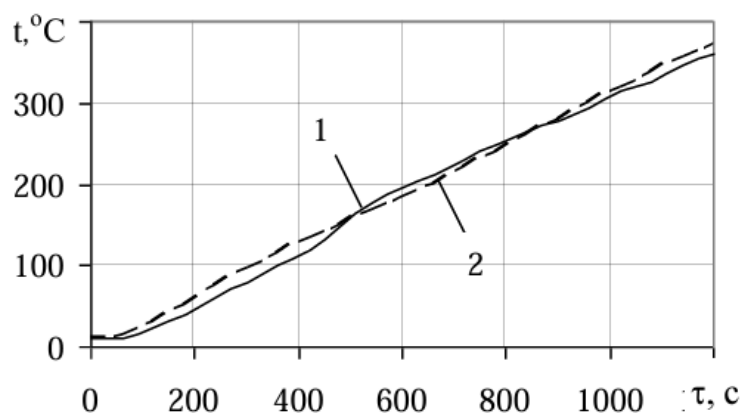


Рисунок 1.14 – Залежність температури від часу в місцях вимірювання температур з необігрівної поверхні вогнезахисної сталеві пластини: 1 – точна крива з необігрівної поверхні; 2 – розрахункова крива з необігрівної поверхні

Дані дослідження, показали ефективність застосування експериментально-розрахункового методу при оцінюванні вогнезахисної ефективності вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. Слід зазначити, що дослідні зразки сталеві конструкції мали незмінні геометричні характеристики, тому, дослідження впливу товщини (коефіцієнта перерізу) конструкції та товщини вогнезахисного покриття потребує подальшого обґрунтування.

Авторами [97, 98] з використанням електричної печі проведено серію високотемпературних дрібномасштабних випробувань, спрямованих на дослідження впливу гальванізації на температуру сталевих пластин зі змінними коефіцієнтами перерізу (A_m/V). Як дослідні зразки, що піддавались стандартному температурному впливу, були використані квадратні сталеві пластини, розміром 50x50 мм.

Експериментальні випробування проводили в електричній печі, піддаючи нагріванню лише верхню поверхню зразків, тоді як інші частини були захищені ізоляційним матеріалом, щоб зменшити теплообмін. Дослідні зразки розміщувались в середині короба, що складається з п'яти плит силікату кальцію товщиною 12,7 мм. Плити встановлювались на шарі мінеральної вати та вогнетривкій цеглі. Квадратні дослідні зразки мали розміри 50x50 мм зі змінною товщиною, з метою отримання різних коефіцієнтів перерізу A_m/V в діапазоні в діапазоні від 20 до 200 м⁻¹. Для кожного коефіцієнта перерізу, один не оцинкований (NG) і три оцинковані (G) зразки були випробувані для прямого порівняння їх температур. Схема роботи установки для випробувань представлена на рисунку 1.15.



Рисунок 1.15 – Схема роботи установки

На основі експериментальних результатів було проведено моделювання випробувань на оцинкованих зразках шляхом реалізації аналітичного методу розрахунку температури сталі за стандартом [99], вплив оцинкування моделювався відповідно до двоступеневої залежності випромінювальної здатності запропонованому в [100].

Для того, щоб проаналізувати вплив оцинкування на поведінку всієї сталеві конструкції, було представлено застосування оцинкування на прикладі розширеного термомеханічного аналізу одноповерхової сталеві будівлі.

Модельована сталеві конструкція обрана відповідно до [101]. Для перевірки моделі було проведено кілька термомеханічних аналізів за допомогою програмного забезпечення SAFIR [102].

Конструкції модельованої будівлі складаються з подвійних сталевих рам з балками та колонами, виготовленими з Н-подібних профілів, як показано на рисунку 1.16. Один і той самий каркас був проаналізований для оцинкованих та неоцинкованих сталевих елементів.

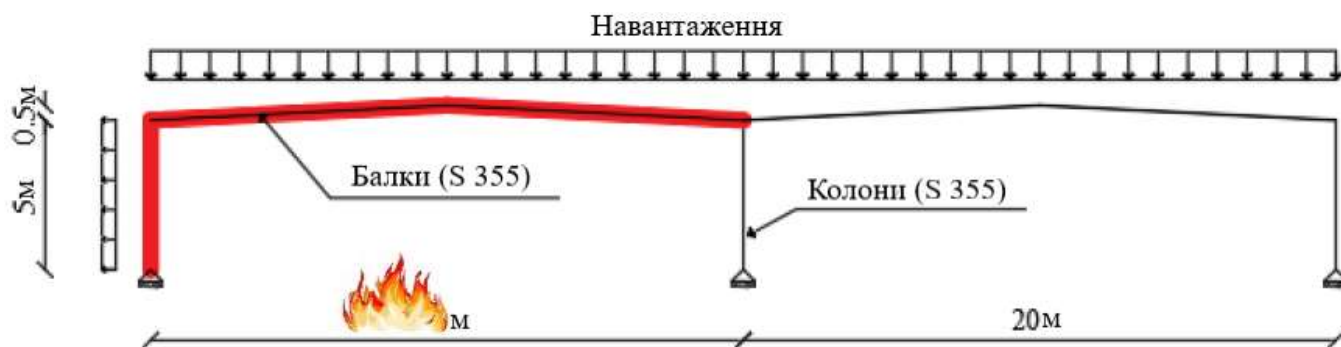


Рисунок 1.16 – Схема роботи сталеві рами з балками та колонами

Динамічний аналіз проводився з урахуванням того, що пожежа локалізована лише в одному відсіку, теплофізичні та механічні властивості матеріалів приймалися відповідно до [99].

Термомеханічний аналіз проводився з урахуванням впливу стандартної кривої пожежі за ISO 834 [103] та трьох параметричних кривих пожежі P 0.02, P 0.04, P0.09 (рис. 1.17).

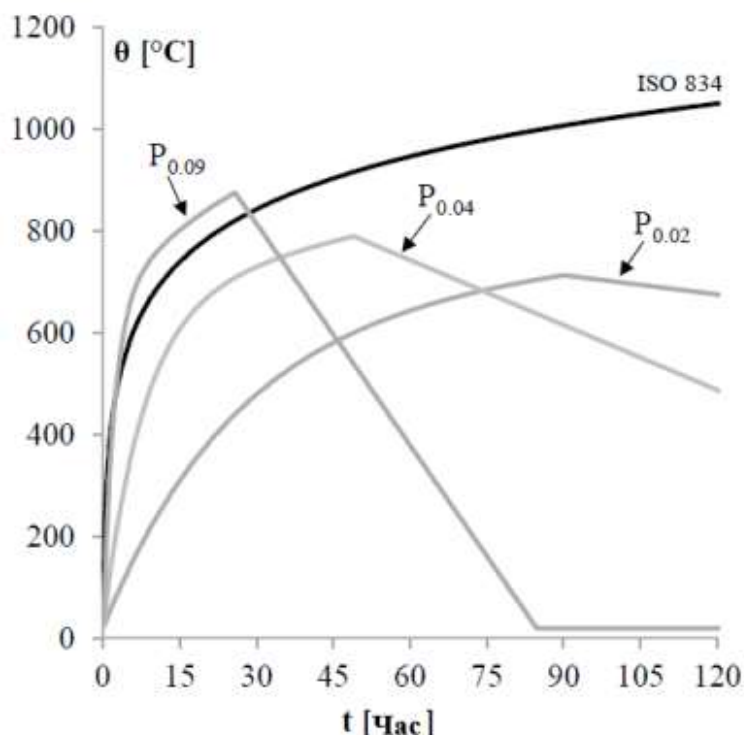


Рисунок 1.17 – Порівняння стандартної кривої пожежі за ISO 834 та параметричних кривих пожежі

Проведений авторами, розширений термомеханічний аналіз сталевих одноповерхових каркасів за допомогою програмного забезпечення SAFIR, з використанням експериментально встановлених теплофізичних характеристик на зразках сталевих пластин з вогнезахистом у вигляді цинкування, показав можливість оцінки межі вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій шляхом варіювання кривої вогневого впливу і коефіцієнтів перерізу конструкції.

У роботі [104] проведено вогневі випробування двох сталевих пластин розмірами 500x500x5 мм із нанесеним вогнезахисним складом, що спучується, та досліджено вплив помилок у вимірюванні температур на необігрівній поверхні сталевієї пластини з вогнезахисним покриттям на похибку визначення теплофізичних характеристик.

В роботі [105] обґрунтовано методику попередньої оцінки вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій на зразках зменшених розмірів. Встановлено, що для ефективної реалізації стандартизованих методів визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів для несучих сталевих

конструкцій є доцільним попередньо проводити експериментальне визначення значень температури сталевих пластин, на які нанесено вогнезахисне покриття (реактивний вогнезахисний матеріал, штукатурка, плита, панель, мат), для різної тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі на зразках зменшених розмірів. Результати цих експериментів дозволять визначити обґрунтовані значення мінімальної і максимальної товщини вогнезахисного матеріалу, які необхідно використовувати під час випробувань за стандартизованими методами.

1.5. Висновки з розділу, мета та задачі дослідження

Ґрунтуючись на проведеному аналізі способів підвищення межі вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій шляхом їх вогнезахисту, встановлено, що розроблення нових вогнезахисних покриттів та дослідження їх ефективності є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз складів існуючих вогнезахисних покриттів показав, що для підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій ефективними є вогнезахисні речовини, де основним органічним в'язучим є полісилоксан. Проте ефективність вогнезахисних речовин на основі наповнених поліметилфенілсилоксанів для сталевих будівельних конструкцій є не дослідженою.

Встановлено, що для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) реактивних вогнезахисних матеріалів для сталевих будівельних конструкцій застосовують методи та методики, що базуються на проведенні експериментальних досліджень вогнезахисних систем, з подальшою обробкою отриманих експериментальних даних. Обробка результатів здійснюється графічним способом, підходом, що передбачає аналіз диференційної формули зі змінними та сталими значеннями коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу та числовим регресійним аналізом.

Огляд наукових праць, в яких представлені альтернативні методи та методики оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій, показав, що основними показниками, які необхідно встановити під час дослідження

ефективності покриттів є залежність часу прогріву сталевих вогнезахищених конструкцій до критичної температури від товщини нанесеного вогнезахисного покриття та перерізу сталевих конструкцій, що підлягає вогнезахисту. Існуючі підходи показали ефективність використання дослідних зразків у вигляді сталевих вогнезахищених пластин при проведенні експериментальних досліджень вогнезахисної здатності нанесених на них вогнезахисних покриттів.

Поєднання експериментально-розрахункових методів та моделювання, дає змогу дослідити ефективність та вплив вогнезахисного покриття на поведінку всієї сталевих конструкції під час пожежі.

На підставі отриманих висновків формулюємо мету досліджень, яка полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану на межі їх вогнестійкості як наукового підґрунтя формування та обґрунтування технічних параметрів вогнезахисного покриття для стандартних профілів сталевих конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз способів вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій та методів визначення вогнезахисної здатності реактивних вогнезахисних матеріалів.
2. Розробити склад вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій на основі наповненого полісилоксану та дослідити співвідношення компонентів розробленої вогнезахисної композиції.
3. Розробити методику проведення експериментальних досліджень визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих будівельних конструкцій.
4. Провести експериментальні дослідження з виявлення впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на критичну температуру прогріву сталевих конструкцій.
5. Визначити теплофізичні характеристики реактивного вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та встановити закономірності зміни коефіцієнта

теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахищеному елементі сталевій конструкції залежно від товщини вогнезахисного покриття, температури нагріву сталевих елементів конструкції та коефіцієнту перерізу вогнезахищеної сталевій конструкції.

6. Сформулювати та обґрунтувати технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

Дисертаційні дослідження проводились за алгоритмом, схематичне зображення якого наведено на рисунку 2.1.

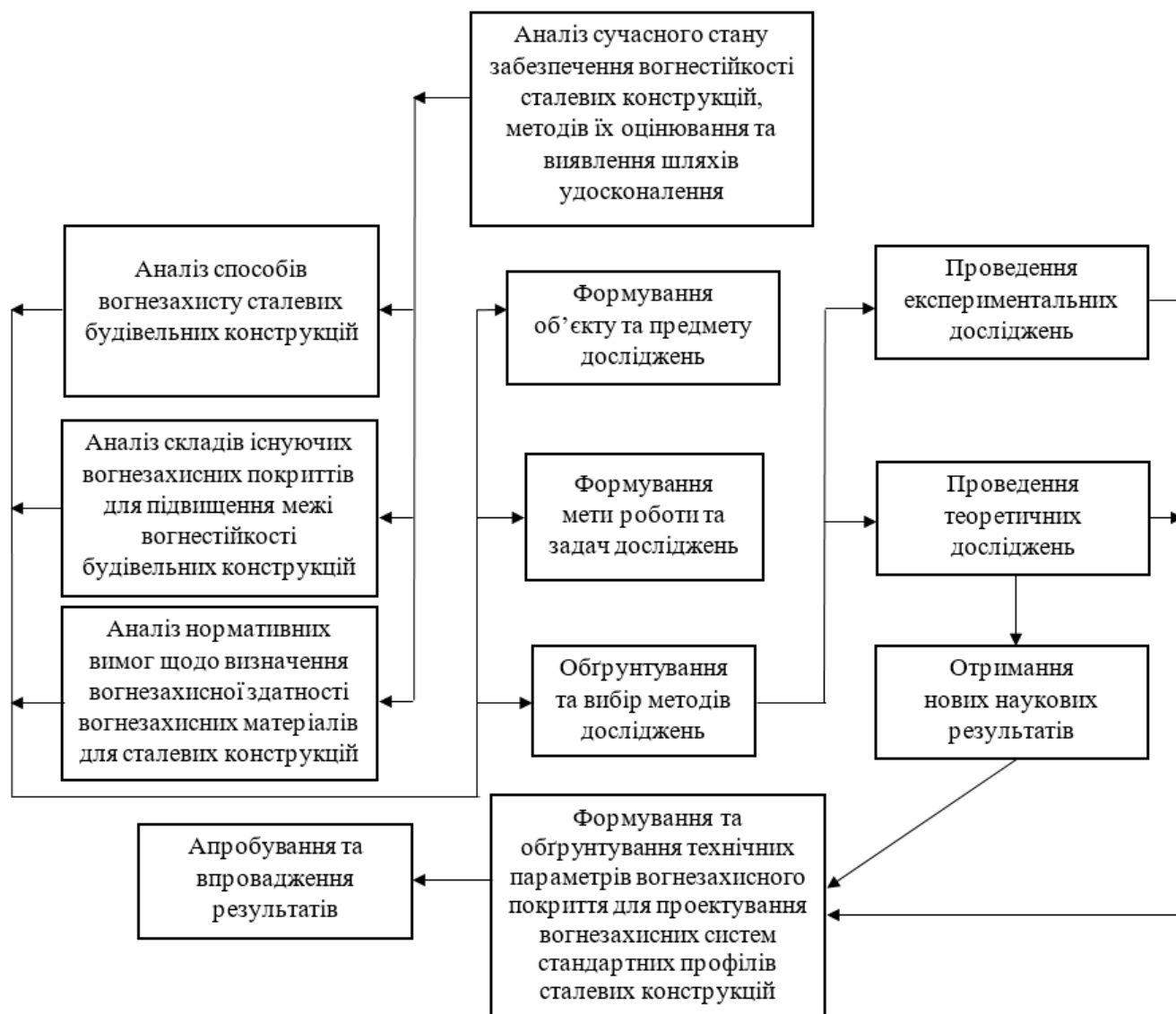


Рисунок 2.1 – Алгоритм проведення дисертаційних досліджень

2.1. Дослідження високотемпературного та вогнезахисного покриття

Щоб отримати високотемпературне та вогнезахисне покриття, яке буде захищати сталеві будівельні конструкції при впливі високих температур, необхідно підібрати вихідні матеріали та склад покриття. Вимогами до основних складників та

наповнювачів є терmostійкість в умовах нагрівання до 1100 °С.

Складники композиції вогнезахисного покриття повинні забезпечувати високу адгезійну міцність зчеплення, створювати захисну непроникну оболонку, а також хорошу технологічність виготовлення і нанесення на матеріали.

Для проведення досліджень захисних покриттів для сталевих конструкцій використовують методи фізико-хімічного аналізу – рентгенофазовий, електронну мікроскопію, ідентифікацію, інфрачервону спектроскопію, рентгенівський спектральний мікроаналіз, комплексний термічний аналіз фізико-механічні та теплофізичні дослідження.

Фазовий склад матеріалів вивчається за допомогою рентгенофазового аналізу, де здійснюється ідентифікація фаз в продуктах термообробки матеріалів і композицій. Рентгенофазовий аналіз проводиться за методом порошків (методом Шеррера) [106, 107] на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 при $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні з рентгенівською трубкою типу БСВ-11 при напрузі 30 кВ і анодному струмі 12 мА. Зразки і проби матеріалів для проведення аналізу розмелюються до повного проходження залишку через сито. Отриманий порошок помішують у стандартну кювету, яка встановлюється на гоніометричний пристрій ГУР-5, забезпечений приставкою ГП-4 для знімання полікристалічних речовин з обертанням у власній площині зі швидкістю 66 об/хв. В якості детектора рентгенівського випромінювання застосовується сцинтиляційний лічильник із швидкістю рахунку 500 імп./с. Гоніометр забезпечує обертання лічильника зі швидкістю 1 град/хв.

Ідентифікація матеріалів здійснюється шляхом порівняння міжплощинних відстаней та інтенсивностей максимумів дифрактограм зразка з даними картотеки ASTM (Сполучені Штати Америки) та інших джерел [108]. На основі існуючої залежності інтенсивності дифракційного максимуму від концентрації кожної кристалічної фази оцінюється вміст мінералів у зразку.

При вивченні мікроструктури матеріалів підкладів і покриттів застосовують методи оптичної і електронної мікроскопії [109, 110]. Електронно-мікроскопічні дослідження проводять на растровому електронному мікроскопі TESLA-BS 300.

Дослідження взаємопроникнення проводять з допомогою скануючої мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу на базі растрового мікроскопа електронного мікроаналізатора РЕММА-102-02.

Для інфрачервоної спектроскопії зразків використовують спектрофотометр “SPECORD-75-IR”. Зразки готують методом нанесення на кристали NaCl суспензії, одержаної шляхом подрібненого матеріалу в ізопропіловому спирті [111, 112].

Вивчення ендо- та екзотермічних процесів у матеріалах при їх нагріванні здійснюється з використанням комплексного термічного аналізу.

За допомогою диференціально-термічного аналізу встановлюють напрям і величину зміни ентальпії, пов’язаної з хімічними реакціями, що проходять під дією тепла. За допомогою термогравіметричних вимірювань визначають зміну маси проби при нагріванні. [113 – 116].

Час висихання покриття досліджується згідно з ДСТУ ISO 9117-5:2015 [117].

Адгезійну міцність покриттів до металевих поверхонь визначають методом відриву двох циліндрів діаметром 2,5 см, нагрітих до вказаної температури на розривній машині МР-0-05. Суцільність покриття оцінюють за результатами мікроскопічних досліджень. Втрату маси зразка після нагрівання визначають за [118 – 120].

Корозійна стійкість при впливі агресивного середовища досліджується у відповідності до [121].

Дослідження впливу захисних покриттів на міцність зразків сталі при нагріванні виконують згідно з [63]. Короткотривалу і довготривалу міцність оцінюють на приладі ІМАШ-5С-69 при різних швидкостях і режимах навантаження [122].

Механічні властивості визначають за результатами випробувань на розтяг при підвищених температурах [122, 123]. Якість покриттів і ефективність їх захисної дії оцінюють візуально і за показниками водопоглинання, товщини, відкритої пористості, хімічної стійкості [124].

2.2. Дослідження вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисного покриття

2.2.1. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення

Згідно п. 7.3.2. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне обробляння будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання» [125] встановлено метод визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покривів для будівельних конструкцій з деревини, металу або бетону.

Метод поширюється на випробування вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу). Випробування проводять за методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення вогнезахисного матеріалу.

Для досліджень використовують такі засоби випробувань:

- електрична піч з пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури, об'ємом робочої камери не менше 30 дм³ та температурою нагріву не менше ніж 340 °С (нерівномірність температури за об'ємом робочої камери печі не більше ± 10 °С), загальний вигляд електропечі СНОЛ 2.5, представлено на рисунку 2.1;

- секундомір класу не нижче 2;
- штангенциркуль з ціною поділки 0,05 мм;
- ваги з похибкою вимірювання не більше $\pm 0,1$ г;
- два скляні стакани з термостійкого скла діаметром 45 мм ± 5 мм;
- корзинка з алюмінієвої фольги довжиною 160 мм ± 2 мм, шириною 60 мм ± 2 мм та висотою 10 мм ± 2 мм.

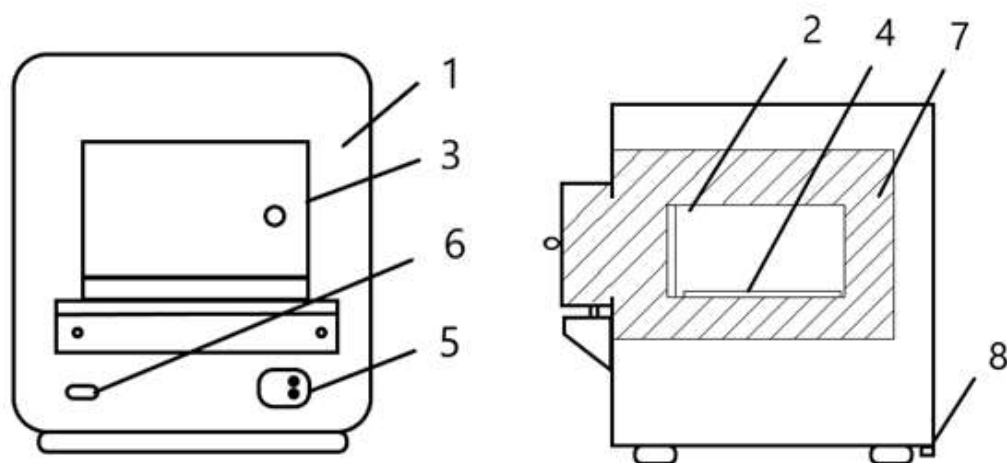


Рисунок 2.1 – Схема електропечі СНОЛ 2.5, де: 1 – кожух; 2 – кордиритова камера; 3 – двері; 4 – керамічна підкладка; 5 – регулятор температури; 6 – кнопка включення; 7 – несучий каркас; 8 – мережевий кабель з вилкою

Як зразки використовують дві наважки вогнезахисного матеріалу масою від 1 г до 3 г у сухому стані.

Сутність методу визначення об'ємного коефіцієнта спучення полягає у визначенні об'єму вогнезахисного засобу, що утворився з певної маси засобу після впливу температури $340\text{ }^{\circ}\text{C}$. Метод застосовують для вогнезахисних покривів і однорідних матеріалів та сумішей (фарби, лаки).

Корзинку з алюмінієвої фольги заповнюють матеріалом, що випробовують, шаром товщиною $(2,5 \pm 1,0)$ мм (сирий стан) та висушують за температури $(20 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 48 год та за температури $(70 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 3 год. Після охолодження до температури навколишнього середовища засіб відділяють від фольги, вимірюють товщину шару матеріалу h , його довжину l , ширину та масу m . Вимірювання товщини, довжини та ширини виконують у п'яти точках рівномірно по довжині зразка із вогнезахисного матеріалу.

З висушеного матеріалу утворюють дві наважки у вигляді дисків (циліндрів), діаметр яких на $(3,0 \pm 1,0)$ мм менше за діаметр скляних стаканів, або дві наважки із гранул з розміром частинок не більше 2,0 мм.

Із матеріалів, що надійшли на випробування у сухому стані, готують наважки у вигляді гранул. Кожну наважку розміщують у скляному стакані. Пристроєм

регулювання, підтримання та контролю температури у печі задають температуру $(340 \pm 5)^\circ\text{C}$ та доводять її до сталої температури протягом не менше 1 год.

Два скляних стакани з наважками вносять до печі за час не більше 20 с. Після закриття печі вмикають секундомір. Через 20 хв стакани виймають із печі та встановлюють на пластину з негорючого матеріалу для охолодження. Через 30 хв штангенциркулем визначають середнє значення висоти спученого шару матеріалу h_c у кожному стакані, для чого вимірюють висоту у п'яти точках у центрі стакану і на середині чотирьох радіусів.

За результатами випробувань за методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення розраховується об'ємний коефіцієнт спучення $K_{об}$ за формулою:

$$K_{об} = 0,125\pi d^2(h_{c1}/m_1 + h_{c2}/m_2) [\text{мм}^3/\text{г}], \quad (2.1)$$

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.

Додатково може бути розрахований умовний лінійний коефіцієнт спучення $K_{ул}$ за формулою:

$$K_{ул} = 0,125 \cdot 10^{-4} \pi d^2 \rho_{п} (h_{c1}/m_1 + h_{c2}/m_2), \quad (2.2)$$

де $\rho_{п}$ - густина засобу в сухому стані, г/см³.

Густина $\rho_{п}$ приймається з паспортних даних

$$\rho_{п} = 10^3 \times m / (l \cdot a \cdot h) [\text{мм}^3/\text{г}], \quad (2.3)$$

де m - середнє значення маси зразка із вогнезахисного засобу, г;

l - довжина зразка із вогнезахисного засобу, мм;

a - ширина зразка із вогнезахисного засобу, мм;

h - товщина зразка із вогнезахисного засобу, мм.

2.2.2. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення лінійного коефіцієнта спучення

Згідно п. 7.3.3. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне обробляння будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання» [125] встановлено метод визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з деревини, металу або бетону.

Метод поширюється на випробування вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу). Випробування проводять за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисного матеріалу.

Для досліджень використовують такі засоби випробувань:

- електрична піч з пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури, об'ємом робочої камери не менше 30 дм³ та температурою нагріву не менше ніж 340 °С (нерівномірність температури за об'ємом робочої камери печі не більше ± 10 °С), загальний вигляд електропечі СНОЛ 2.5, представлено на рисунку 2.1;

- секундомір класу не нижче 2;
- штангенциркуль з ціною поділки 0,05 мм.

Сутність методу визначення лінійного коефіцієнта спучення полягає у визначенні співвідношення товщини вогнезахисного матеріалу, що нанесений на сталеву пластину, до та після впливу температури 340 °С. Метод застосовують для матеріалів, які постачаються із фіксованими розмірами (стрічки, рулони, пластини). Для випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисні покриття (фарби, лаки) наносять згідно з технологією підприємства-виробника на дві сталеві квадратні пластини зі стороною (50 ± 1) мм та товщиною $(2,0 \pm 0,2)$ мм. Товщина шару покриття після висихання має становити $(1,0 \pm 0,5)$ мм. Допускається нанесення шару іншої товщини, якщо це передбачено технологією підприємства-виробника. З вогнезахисних матеріалів, що постачаються у вигляді стрічок, пластин тощо, вирізають зразки довжиною (50 ± 1) мм та фактичною

шириною, але не більше (50 ± 1) мм, які накладають або наклеюють на сталеві пластини згідно з технологією підприємства-виробника.

Підготовлені зразки висушують за температури (20 ± 5) °С протягом 48 год та за температури (70 ± 5) °С протягом 3 год. Після охолодження до температури навколишнього середовища вимірюють товщину шару покриття із вогнезахисного матеріалу h_n за формулою:

$$h_n = h_z - h_m, \quad (2.4)$$

де h_z - товщина зразка (разом із сталевую пластиною), мм;

h_m - товщина сталеві пластини, мм.

Пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури у печі задають температуру (340 ± 5) °С та доводять її до сталої температури протягом не менше 1 год.

Два зразки вносять до печі за час не більше 20 с. Після закриття печі вмикається секундомір. Через 20 хв пластини виймають із печі та встановлюють на пластину з негорючого матеріалу для охолодження. Через 30 хв штангенциркулем визначається середня висота спученого шару матеріалу h_c на кожній пластині.

Для визначення середнього значення висоти вимірюють висоту у п'яти точках у центрі пластини і в середніх точках між центром та кутами пластини.

За результатами випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення розраховується коефіцієнт спучення на пластинах $K_{\text{л}}$ за формулою:

$$K_{\text{л}} = 0,5 (h_{c1} / h_{п1} + h_{c2} / h_{п2}), \quad (2.5)$$

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.

2.2.3. Визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з металу

Згідно п. 7.4. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання» [125] встановлено метод визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з металу.

Сутність методу випробувань полягає у визначенні проміжку часу від початку температурного впливу за температурним режимом згідно з [90] на сталеву пластину з нанесеним засобом вогнезахисту (вогнезахисні фарби, штукатурки та облицювання) до підвищення її температури на 480 °C від початкового значення (критична температура).

Попередньо, під час сертифікаційних, типових чи періодичних випробувань (під час розроблення технічних умов на вогнезахисний засіб) визначається час прогріву двох сталевих пластин (контрольні зразки) до критичної температури. Значення часу прогріву може зазначатися підприємством-виробником у технологічному регламенті на відповідний вогнезахисний засіб. Товщина нанесення засобу вогнезахисту на одну сталеву пластину має бути менша на 10 % від середньої товщини нанесення засобу відповідно до технічних умов, а на другій сталевій пластині на 10 % більша (замість середньої товщини може бути вибрана інша товщина засобу, за умови відповідного обґрунтування). За отриманими даними прогріву контрольних зразків будується лінійна залежність:

$$t_K = a_0 + a_1 \cdot d_K \quad (2.6)$$

де t_K - час досягнення критичної температури на контрольних зразках, хв;

d_K - товщина засобу вогнезахисту контрольних зразків, мм;

a_0, a_1 - коефіцієнти.

Для одного зразка (зразок, що перевіряється) сталевій пластині з нанесеним засобом вогнезахисту (товщина нанесення d_{II} повинна бути у діапазоні товщин d_K)

визначають час досягнення критичної температури t_{II} .

Порівнюють значення часу досягнення критичної температури нагріву контрольних зразків із часом досягнення критичної температури нагріву зразка, що перевіряється (для значення товщини засобу d_{II}). Якщо, значення t_{II} менше на 10 % значення t_K , то вогнезахисні властивості засобу вогнезахисту зразка, що перевіряється, втрачені чи не відповідають встановленим вимогам.

У разі відсутності технологічного регламенту та технічних умов на вогнезахисне покриття доцільним є визначення часу прогріву до критичної температури дослідних зразків різної товщини сталеві пластини та різної товщини вогнезахисного покриття.

Температурний режим в установці для випробувань та умови навколишнього середовища повинні відповідати вимогам [90].

Як зразки для випробувань застосовують квадратні сталеві пластини зі стороною (500 ± 5) мм, завтовшки $(5,0 \pm 0,2)$ мм. З однієї сторони по ґрунту (якщо він передбачений) згідно з технологією виробника наноситься шар вогнезахисного засобу завтовшки d_K або d_{II} . З іншого боку по центру сталеві пластини встановлюють термопару типу ТХА. З необігрівної сторони сталеві пластини закриваються теплоізоляційною плитою. Теплоізоляційна плита повинна складатися мінімум з двох шарів. Нижній шар, що примикає до сталеві пластини, виготовляють із керамічної вати завтовшки (20 ± 5) мм (наприклад, два шари мулітокремнеземистого фетру), а верхній з базальтової плити завтовшки (100 ± 10) мм та густиною (100 ± 20) кг/м³. Пластину встановлюють на отвір опорної конструкції через теплоізоляційну вставку з керамічної вати завтовшки (10 ± 2) мм.

Засоби випробувань:

- випробувальна піч (установка);
- засоби вимірювальної техніки;
- опорна конструкція для зразків.

Для проведення експериментальних досліджень вогнезахисного покриття було використано установку для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів, принцип роботи якої полягає у нагріванні внутрішнього

простору камери установки електричних нагрівальними елементами [126]. Схематичне зображення установки представлено на рисунку 2.2.

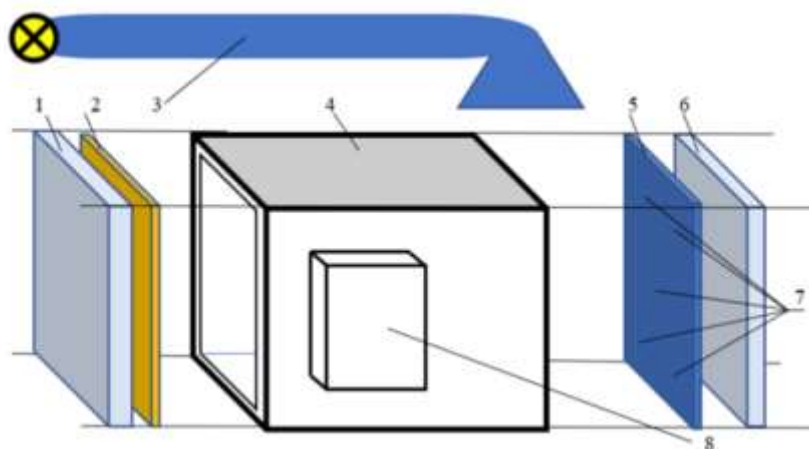
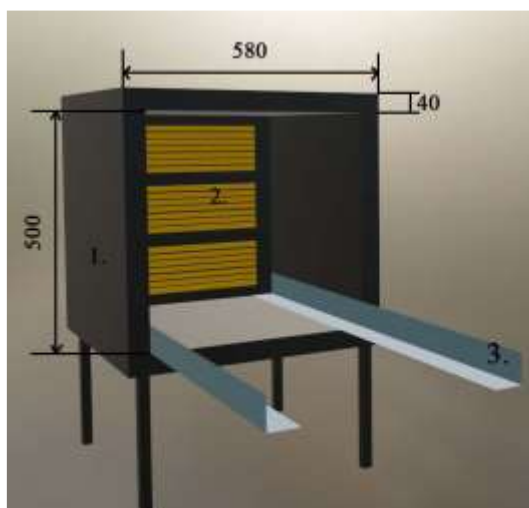


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення установки для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів, де: 1 – теплоізоляція радіаційної панелі, 2 – радіаційна панель, 3 – вентиляційна система, 4 – випробувальна камера з теплоізоляцією, 5 – дослідний зразок, 6 – теплозахисний матеріал для захисту від втрат температури, 7 – місця встановлення термоперетворювачів ТХА для контролю температури на дослідному зразку, 8 – блок керування нагрівом радіаційної панелі.

Дана випробувальна установка забезпечує дотримання стандартного температурного режиму пожежі з додатковою можливістю пониження чи підвищення температури, у разі її відхилення під час проведення експерименту. Особливістю установки для випробувань є можливість збільшувати чи зменшувати температуру на обігрівній поверхні дослідного зразка, не тільки за допомогою регулятора температури нагріву, а й в ручному режимі, шляхом наближення чи віддалення дослідного зразка до радіаційної панелі по напрямним (рис. 2.4).

Конструктивна схема та натурний вигляд випробувальної установки показано на рисунку 2.3.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Конструктивна схема та натурний вигляд випробувальної установки, де: а) 1 – корпус теплоізоляційний з вермикулітових плит (товщ. 40 мм) обшитих сталевими листами, 2 – радіаційна нагрівна панель, 3 – напрямні для встановлення та руху дослідного зразка; б) Випробувальна установка із встановленим зразком підготовлена до випробувань.

2.3. Оцінювання показників системи вогнезахисту для сталевих будівельних конструкцій

Дані щодо температури, одержані під час випробування навантажених і ненавантажених конструкцій, використовують як підґрунтя для встановлення співвідношення між проміжком часу до досягнення заданого значення температури сталі, товщиною вогнезахисного матеріалу та коефіцієнтом поперечного перерізу.

Коефіцієнт поперечного перерізу і товщина вогнезахисного матеріалу в сухому стані, яке наносять на конструкції для порівняння, мають відрізнятися від відповідних величин для навантажених або високих конструкцій з аналогічними параметрами не більше ніж на 10 %. Аналіз даних потрібно здійснювати виходячи з оцінювання результатів, одержаних в результаті випробування, за умови що очікувані значення параметрів відповідають критеріям прийнятності.

Метод аналізування потрібно вибирати з числа методів, описаних у додатку Е [88].

Для оцінювання в повному обсязі потрібно застосовувати тільки один метод оцінювання даних, одержаних під час випробування виробу, тобто для оцінювання різних частин результатів випробувань користуватися різними методами не допускається.

Під час користування методами оцінювання показників системи вогнезахисту потрібно приймати розрахункове значення коефіцієнта поперечного перерізу зразків для випробування.

Для кожного методу оцінювання результати потрібно подавати у вигляді товщини вогнезахисного матеріалу в сухому стані, яке потрібно застосовувати для сталевих конструкцій, як функції коефіцієнта поперечного перерізу, проектної температури сталі та межі вогнестійкості.

Вихідними даними мають бути проміжки часу до досягнення проектної температури сталі для всіх конструкцій.

Оцінювання теплових показників потрібно проводити виходячи з коригованих проміжків часу до досягнення проектних температур кожною сталевих конструкцією, причому їх значення має відповідати критеріям прийнятності та обмеженням.

Прийнятність результатів аналізу в діапазоні температур сталевих конструкцій і тривалості випробування потрібно приймати для максимальної температури, за якої проведено випробування, виходячи з таких міркувань:

1. Для кожної короткої конструкції прогнозований проміжок часу до досягнення проектної температури у хвилинах, розрахований з точністю до однієї десятої, не повинен перевищувати коригованого проміжку часу більше ніж на 15 %;
2. Середнє значення усіх відсоткових відмінностей, розрахованих згідно з 1, має бути меншим за нуль;
3. Більшим за нуль мають бути не більше ніж 30 % окремих значень усіх відсоткових відмінностей, розрахованих згідно з 1;
4. Результати аналізу, що відповідають вимогам, викладеним в 1 – 3, мають задовольняти також таким правилам за умови, що решта таких параметрів залишаються незмінними;

5. Товщина вогнезахисного матеріалу збільшується зі збільшенням межі вогнестійкості;

6. Зі збільшенням коефіцієнта поперечного перерізу межа вогнестійкості зменшується;

7) Зі збільшенням межі вогнестійкості температура підвищується;

8) Зі збільшенням товщини матеріалу температура знижується;

9) Зі збільшенням коефіцієнта поперечного перерізу температура підвищується;

10) Зі збільшенням коефіцієнта поперечного перерізу товщина матеріалу збільшується;

Критерії прийнятності потрібно застосовувати окремо до всіх проектних температур, які входять в сферу оцінювання, з кроком 50 °С, починаючи з температури, яка на 50 °С нижча за мінімальну температуру, що входить у діапазон, або 350 °С залежно від того, яке з цих значень більше, і завершуючи максимальним значенням температури, що входить в обсяг оцінювання. Обсяг оцінювання має містити принаймні три кроки температури величиною 50 °С.

Коригувати результати аналізу потрібно до моменту досягнення критеріїв прийнятності.

Результати, одержані при випробуванні, застосовні для системи вогнезахисту в усьому діапазоні товщини вогнезахисного матеріалу, для якого проведено випробування, значень коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V , за якого було проведено випробування, та максимальних температур, зареєстрованих під час випробування.

Для того, щоб результат оцінювання був застосовним для будь-якої межі вогнестійкості, навантажені конструкції, на які нанесено вогнезахисний матеріал максимальної товщини, мають досягати граничного стану за ознакою втрати несучої здатності у проміжок часу, що дорівнює 85 % від цього значення.

Максимальна дозволена товщина вогнезахисного матеріалу: до величини, що до 5 % більша за максимальну товщину вогнезахисного матеріалу, який наносили на навантажену сталеву конструкцію, піддану випробуванню. Мінімальна дозволена товщина вогнезахисного матеріалу: до величини, що до 5 % менша за мінімальну

товщину вогнезахисного матеріалу, який наносили на навантажену сталеву конструкцію, піддану випробуванню.

Максимальна дозволена товщина вогнезахисного матеріалу: до величини, що до 5 % більша за максимальну товщину вогнезахисного матеріалу, який наносили на навантажену сталеву конструкцію, піддану випробуванню.

Мінімальна дозволена товщина вогнезахисного матеріалу: до величини, що до 5 % менша за мінімальну товщину вогнезахисного матеріалу, який наносили на навантажену сталеву конструкцію, піддану випробуванню (якщо таке випробування проводили). Якщо це не так, то за мінімальну дозволена товщину приймають відповідне значення для короткої ненавантаженої сталеві конструкції.

Максимальний дозволений коефіцієнт поперечного перерізу: до величини, що перевищує максимальну величину коефіцієнта поперечного перерізу випробуваної конструкції на величину до 10 %.

Мінімальний дозволений коефіцієнт поперечного перерізу: до величини, що менша мінімальної величини коефіцієнта поперечного перерізу усіх випробуваних балок, на які нанесено вогнезахисний матеріал мінімальної допустимої товщини, на величину до 10 %. Якщо коефіцієнт поперечного перерізу менший за кориговане мінімальне значення, то для вогнезахисного матеріалу потрібно застосовувати ті ж товщини, що й у випадку коригованого мінімального значення коефіцієнта поперечного перерізу.

Максимальний дозволений коефіцієнт поперечного перерізу: до величини, що перевищує максимальну величину коефіцієнта поперечного перерізу випробуваної колони на величину до 10 %.

Мінімальний дозволений коефіцієнт поперечного перерізу: до величини, що менша мінімальної величини коефіцієнта поперечного перерізу усіх випробуваних сталевих конструкцій, на які нанесено вогнезахисний матеріал мінімальної допустимої товщини, на величину до 10 %. Якщо коефіцієнт поперечного перерізу менший за збільшене мінімальне значення, то для вогнезахисного матеріалу потрібно застосовувати ті ж товщини, що й у випадку збільшеного мінімального значення коефіцієнта поперечного перерізу.

2.3.1. Визначення теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів

Для визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття необхідно реалізувати методологію аналізування диференційного рівняння [88], базова диференційна формула якого має вигляд:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_{p,t}}{d_p} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot \frac{1}{c_a \rho_a} \cdot (\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t \quad (2.7)$$

де: $\theta_{a,t}$ – підвищення температури сталі у проміжок часу Δt в градусах Кельвіна;

θ_t – підвищення температури в печі у проміжок часу в градусах Кельвіна;

d_p – товщина реактивного вогнезахисного матеріалу в сухому стані в метрах;

c_a – питома теплоємність сталі, що залежить від температури, за температури θ_a в Джоулях на кілограм – Кельвін;

ρ_a – густина сталі в кілограмах на кубічний метр;

$\frac{A_p}{V}$ – коефіцієнт поперечного перерізу сталевих конструкцій в m^{-1} ;

θ_t – температура в печі в градусах Цельсія;

$\theta_{a,t}$ – температура сталі в градусах Цельсія;

Δt – крок часу в секундах;

$\lambda_{p,t}$ – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного матеріалу в момент часу t за товщини вогнезахисного матеріалу d_p у ватах на квадратний метр – градус Кельвіна. В умовах, коли $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ і $\Delta t \leq 30$ с.

Якщо розрахункове значення Δt перевищує 30 с, то потрібно приймати величину 30 с.

Для виконання критерію стабільності числових значень потрібно приймати значення кроку часу Δt , що не перевищує 80 % від критичного значення цієї величини, його визначають за формулою:

$$\Delta t = 0,8 \cdot \frac{c_a \rho_a}{\lambda_{p,t} / d_p} \cdot \frac{V}{A_p} \quad (2.8)$$

де: A_p/V – відома геометрична властивість зразка для випробування, яку потрібно визначати виходячи з фактичних розмірів сталевих конструкцій;

c_a і ρ_a – відомі властивості сталі згідно з EN 1993-1-2;

d_p – початкова товщина тільки реактивного вогнезахисного матеріалу в сухому стані.

Якщо замовник не надав дані, то для вогнезахисного матеріалу потрібно приймати такі значення: $c_p = 1000$ Дж/(кг·К), $\rho_p = 100$ кг/м³.

Вихідними даними для правильного проведення оцінювання необхідні використовувати:

- проектні температури, які повинні мати принаймні три значення з кроком 50 °C;
- кориговані проміжки часу до досягнення проектних температур;
- кориговані середні значення температури сталі;
- розрахункові значення коефіцієнта поперечного перерізу сталевих конструкцій;
- середня товщина самого реактивного вогнезахисного матеріалу в сухому стані, тобто без урахування ґрунтовки і верхнього покриття.

Для кожного із зразків середнє значення температури між двома моментами часу зменшуватись не повинне. У випадку, якщо воно знижується, потрібно відкинути менше проміжне значення температури і прийняти замість нього температуру, визначену шляхом лінійної інтерполяції між температурою в

початковий момент першого проміжку часу, і температурою в кінцевий момент другого проміжку часу.

Визначення початкових значень змінного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу для кожної короткої конструкції за формулою (2.9) визначають окремі значення змінного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу залежно від тривалості вогневого впливу:

$$\lambda_{p,t} = d_p \frac{V}{A_p} c_a \rho_a \frac{1}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t} \Delta \theta_{a,t} \quad (2.9)$$

Визначення температури вогнезахисного матеріалу для кожної конструкції і кожного проміжку часу розраховують за формулою:

$$\theta_{p,t} = \frac{\left[\frac{(\theta_{t-1} + \theta)}{2} + \frac{(\theta_{a,t-1} + \theta_{a,t})}{2} \right]}{2} \quad (2.10)$$

Перетворення значень коефіцієнта теплопровідності з величини (λ_p за t) $\lambda_{p,t}$ у значення (λ_p за $\theta_{p,t}$) $\lambda_{p,\theta p}$.

Оскільки теплопровідність може залежати від товщини вогнезахисного матеріалу, потрібно визначити відповідно два значення коефіцієнта теплопровідності для мінімальної та максимальної товщини вогнезахисного матеріалу.

Передбачається використання принаймні трьох конструкцій з номінальною мінімальною товщиною вогнезахисного матеріалу, а також трьох конструкцій з номінальною максимальною товщиною вогнезахисного матеріалу.

Для кожного значення номінальної товщини потрібно виконати такі дії:

– з окремих значень змінного коефіцієнта теплопровідності потрібно визначити його середнє значення;

– після цього потрібно визначити середнє значення змінного коефіцієнта теплопровідності і відповідне стандартне відхилення.

Для конструкцій, на які нанесено вогнезахисний матеріал мінімальної товщини, середнє значення змінної теплопровідності і відповідне стандартне відхилення потрібно розраховувати для кожного діапазону температур шириною 50 °С.

Користуючись значеннями коефіцієнта теплопровідності, потрібно розрахувати криві змінювання температури для кожної конструкції, а розрахункові проміжки часу до досягнення проектних температур необхідно порівняти з вимірними проміжками часу.

Для кожної конструкції потрібно повторно розрахувати температуру сталі, користуючись формулою (2.11) і значеннями коефіцієнта теплопровідності для температур з діапазону від 0 °С до 1000 °С з кроком 50 °С.

$$\theta_{a,t} = \frac{1}{c_a \rho_a} \cdot \frac{\lambda_{ave}(\theta_p)}{d_p} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot (\theta_t - \theta_{a,t}) \cdot \Delta t \quad (2.11)$$

Значення коефіцієнта теплопровідності пов'язане з товщиною вогнезахисного покриття потрібно визначати лінійною інтерполяцією між значеннями, розрахованими для мінімального та максимального значень товщини вогнезахисного матеріалу.

З кожного перерахованого значення температури сталі ненавантаженої конструкції потрібно визначити проміжки часу до досягнення проектних температур сталі. Потрібно порівняти всі значення проміжків часу за критеріями прийнятності.

Якщо критерії виконуються, то середні значення змінного коефіцієнта теплопровідності для значень температур в діапазоні від 0 °С до 1000 °С з інтервалом в 50 °С, визначені для мінімальної та максимальної товщини вогнезахисного матеріалу, відповідно, можна вважати такими, що відображають захисні властивості реактивного вогнезахисного матеріалу.

Якщо це не так, то потрібно змінити середні значення коефіцієнта теплопровідності з таким розрахунком, щоб забезпечити виконання критеріїв відповідності.

2.4. Висновки за розділом

Обґрунтовано алгоритм проведення досліджень для виявлення впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих конструкцій, зокрема:

- для розроблення та дослідження складу високотемпературного та вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій;
- для дослідження вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисного покриття;
- для оцінювання показників системи вогнезахисту для сталевих будівельних конструкцій при встановленні співвідношення між проміжком часу до досягнення критичної температури сталі, товщиною вогнезахисного матеріалу та коефіцієнтом поперечного перерізу;
- для визначення теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів та виявлення закономірностей зміни коефіцієнта теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахищених сталевих конструкціях стандартного профілю залежно від товщини вогнезахисного покриття та температури нагріву;
- для дослідження температурних показників у перерізах сталевих балок стандартного профілю із вогнезахисним покриттям при впливі пожежі.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1. Розроблення складу високотемпературного та вогнезахисного покриття

Використання та поєднання нових видів матеріалів і рецептур, як правило змінює структуру, фазовий склад, фізико-механічні та термічні властивості матеріалу. Вивчення впливу додатків до в'язучих речовин дозволяє встановити фазовий склад і структуру утвореної сполуки та дослідити взаємозв'язок з властивостями матеріалу.

Серед в'язучих речовин хорошими термофізичними характеристиками володіють силіційорганічні сполуки. Перевагу над іншими сполуками, їм надають такі властивості як еластичність, термостабільність, вологостійкість, гідрофобність, висока реакційна здатність [127]. Перевагою силіційорганічних сполук перед органічними є утворення в процесі термоокисної деструкції високодисперсного силіцію (IV) оксиду, що розширює температурний діапазон використання захисних покриттів.

Також покриття на основі силіційорганічних сполук і оксидних наповнювачів в ході хімічної взаємодії компонентів утворюють захисний керамічний матеріал, який приймає на себе впливи агресивного середовища в умовах високих температур [128, 67].

В процесі вибору матеріалів для проведення досліджень необхідно оцінити стійкість композиційних покриттів до дії агресивних середовищ в умовах високотемпературного нагріву на сталевих поверхнях. Високу хімічну, термо- та жаростійкість покриття можуть забезпечити оксидні матеріали, які можна використати як наповнювачі для одержання композицій високотемпературного та вогнезахисного покриття.

Використання відомих складів покриттів для сталевих конструкцій [129,

130] є неприйнятним, тому, що присутній високий показник відкритої пористості та низька стійкість компонентів до дії високих температур при нагріванні в інтервалі температур термостійкої деструкції зв'язки (500-900 °С).

Аналізом складів покриттів [65, 131 – 134] встановлено, що для захисту будівельних конструкцій основним в'язучим є поліметилфенілсилоксан (КО-08). Основними складовими що додаються до композицій проаналізованих покриттів є оксиди магнію, силіцію, титану, хрому, цирконію діоксид, оксид мангану, каолін, глинозем, мінеральне волокно, зола в різних співвідношеннях мас.

КО-08 є ефективним при його вмісті у складі покриттів від 30 до 40 %, при зменшенні чи збільшенні вмісту спостерігається зниження адгезійної міцності та суцільності покриття для різних будівельних матеріалів (бетон, алюмінієві сплави, залізобетон, металеві сплави, нікелеві сталі).

Зменшення алюмінію оксиду призводить до зниження вмісту вогнестійких керамічних фаз у складі покриття, а перевищення - до зменшення адгезійної міцності та суцільності покриття.

Титан та хром оксид при захисті алюмінієвих сплавів підвищує суцільність, адгезійну міцність і жаростійкість у температурному інтервалі 300 - 600 °С.

Додавання компонентів таких як каолінове та мінеральне волокно зменшує жаростійкість при незначному збільшенні адгезійної міцності, а це відповідно погіршує експлуатаційні властивості захисного покриття.

Вихідні склади композицій для покриттів обирали виходячи із аналізу існуючих покриттів на основі поліметилфенілсилоксану та алюмінію оксиду та умов одержання вогнестійких та вогнезахисних складів покриттів.

Як в'язуче у захисних композиціях був використаний поліметилфенілсилоксан (КО-08), який при нагріванні утворює реакційноздатний аморфний кремнезем, який вступає в твердофазові реакції з оксидними компонентами, утворюючи кристалічні фази, які є базою для одержання стійкого керамічного матеріалу (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Характеристика силіцій органічного зв'язного
(поліметилфенілсилоксан)

Маркування	Склад структурної одиниці	R/Si	Вміст елементів, мас. %		
			C	H	Si
КО-08	$\{[C_6H_5SiO_{1,5}] [(CH_3)_2SiO]_{0,5} \cdot [(CH_3)(C_6H_5)SiO_{0,5}]\} n$	1,5	47	5,1	24,8

3.1.1. Визначення базової рецептури вихідних композицій для вогнезахисного покриття методом математичного планування експерименту

З метою забезпечення ефективного вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій проведено дослідження складу захисного покриття за допомогою методу статистичної математичної обробки результатів.

Суть планування експериментів з використанням цього методу полягає у встановленні математичної залежності між заданими властивостями і складом чи витратою матеріалів.

Завданням методу математичного планування експерименту в даній роботі є оцінка ступеня впливу керуючих факторів і встановлення їх взаємодії та умов протікання процесів.

Даний метод дає можливість математично описати процес рівнянням регресії:

$$P = a_0 + a_1k + a_2t + a_3x + a_4kt + a_5kx + a_6tx + a_7ktx \quad (3.1)$$

де k, t, x – відсоткове масове значення факторів, що змінюються.

Коефіцієнти регресії розраховуються за наступними формулами:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i; \quad a_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 \tau_i; \quad a_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 \tau_i; \\ a &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 \tau_i; \quad a_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 \tau_i; \\ a_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 \tau_i; \quad a_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 \tau_i; \quad a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 \tau_i. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Інтервали варіювання параметрів відсоткового масового значення поліметилфенілсилоксану (k), титану (IV) оксиду (t) та хрому (III) оксиду (x) наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Інтервали варіювання параметрів відсоткового масового значення факторів, що змінюються

Поліметилфенілсилоксан, k			Титан (IV) оксид, t			Хром (III) Оксид, x		
Найменше значення,	Середнє значення,	Найбільше значення	Найменше значення,	Середнє значення,	Найбільше значення	Найменше значення	Середнє значення,	Найбільше значення
30 %	35 %	40 %	10 %	15 %	20 %	10 %	15 %	20 %

При плануванні експерименту вибрані наступні контрольні параметри (функції відгуку): P, S – адгезійна міцність та суцільність покриття відповідно.

Матриця повнофакторного математичного планування експерименту наведена в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі

Номер експерименту	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Результати повнофакторного експерименту наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Результати повнофакторного експерименту

Номер експерименту	Адгезія, Р (МПа)	Суцільність S (%)
1	600	100
2	800	95
3	300	97
4	600	88
5	800	96
6	600	90
7	300	100
8	300	88

Розрахунок коефіцієнтів регресії для отриманих результатів проведених за формулами 3.2.

Отримані результати розрахунку коефіцієнтів регресії для адгезії (Р) приведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Коефіцієнти регресії для визначення адгезії (Р)

Коефіцієнт	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Р	488,1	-86,8	-36,8	11,8	-61,8	136,8	-13,1	-138,1

Отримані результати розрахунку коефіцієнтів регресії для суцільності (S) приведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Коефіцієнти регресії для визначення суцільності (S)

Коефіцієнт	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
S	93,3	3,8	0,3	-1,8	0,8	1,1	2,1	15,9

З врахуванням отриманих коефіцієнтів регресії, залежності впливу відсоткового масового значення поліметилфенілсилоксану (k), титану (IV) оксиду (t) та хрому (III) оксиду (x) на адгезійну міцність та суцільність матимуть вигляд:

$$P = 488,1 - 86,8k - 36,8t + 11,8x - 61,8kt + 136,8kx - 13,1tx + 138,1ktx \quad (3.3)$$

$$S = 93,3 + 3,8k + 0,3t - 1,8x + 0,8kt + 1,1kx + 2,1tx + 15,9ktx \quad (3.4)$$

Розв'язок отриманих залежностей (3.3) та (3.4), наведено графічно на рис 3.1.

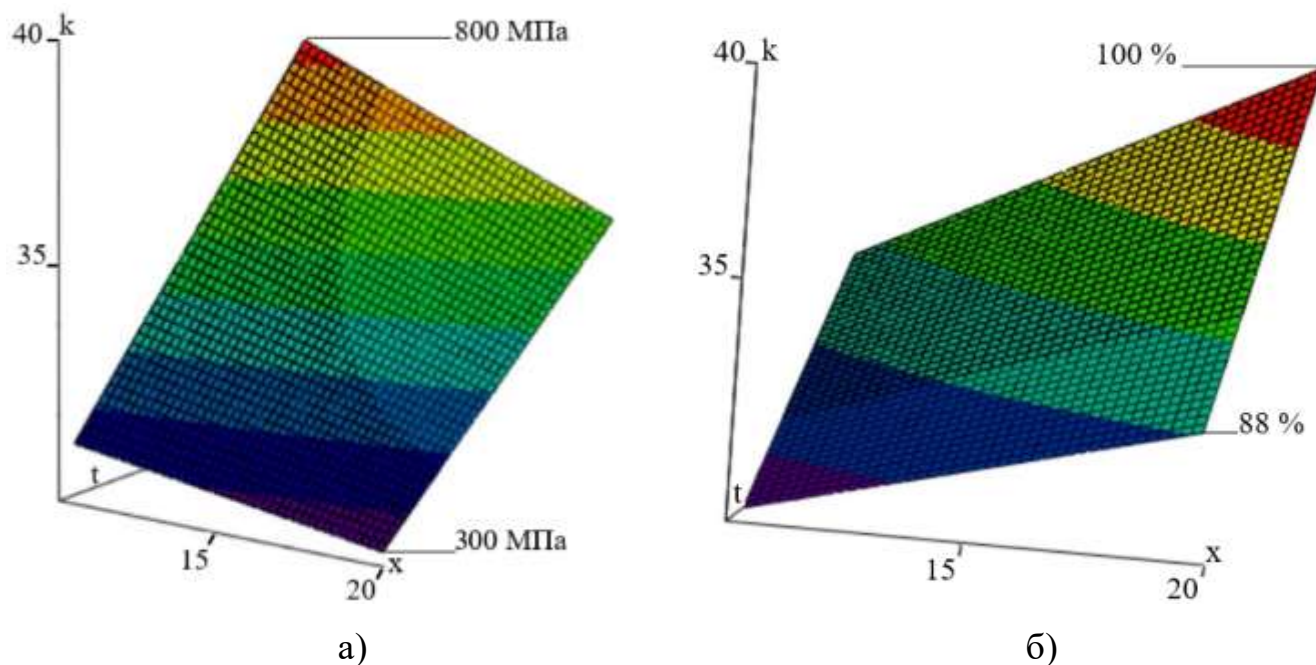


Рисунок 3.1 – Поверхня значень впливу відсоткового масового значення поліметилфенілсилоксану (k), титану (IV) оксиду (t) та хрому (III) оксиду (x) на: а) – адгезійну міцність; б) – суцільність

Отже, проведеними дослідженнями підтверджено правильність вибору компонентного складу захисних покриттів для сталевих конструкцій. Для досліджень у якості базового складу покриття рекомендовано (мас. %): КО-08 (30-40); титан (IV) оксид (11 - 20); хром (III) Оксид (10 - 20) і додатково алюмінію (III) оксид (30-40).

Склади вихідних композицій наведені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Склади вихідних композицій
високотемпературного та вогнезахисного покриття

№ складу покриття	Вміст компонентів, мас.%			
	КО-08	Алюміній (III) оксид	Титан (IV) оксид	Хром (III) оксид
1	40	30	20	10
2	35	35	15	15
3	30	40	10	20

Склади для високотемпературно-вогнестійкого захисного покриття готували шляхом сумісного диспергування оксидного наповнювача у середовищі карборансилоксану в кульовому млині. Методом занурення, пульверизації або валиком покриття наносили на поверхню матеріалу товщиною 0,6-0,8 мм. Приклади складів покриттів та результати випробувань зразків на сталі КП 6 наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Результати випробувань зразків на сталі КП 6

Складу покриття		Температура вогневої камери, °С	Адгезійна міцність, МПа	Суцільність, %	Втрата маси зразка, %
1	Поліметил-фенілсилоксан	300	10,1	100	0
	Алюміній (III) оксид	600	7,4	95	0
	Титан (IV) оксид	800	3,8	87	2,4
	Хром (III) оксид				
2	Поліметил-фенілсилоксан	300	10,2	100	0
	Алюміній (III) оксид	600	7,5	95	0
	Титан (IV) оксид				
	Хром (III) оксид	800	3,9	88	2,3
3	Поліметил-фенілсилоксан	300	9,9	100	0
	Алюміній (III) оксид	600	7,3	96	0
	Титан (IV) оксид	800	3,8	90	2,2
	Хром (III) оксид				

Встановлено, що при впливі терміну диспергування на структуру алюмінію, титану оксидів та поліметилфенілсилоксану характерним є поглинання в інтервалі

950-1100 cm^{-1} , що належить до Si-O-Si-зв'язків, а також чітко виражено поглинання в області 500, 695, 730, 1120, 1435, 1590, 1740 cm^{-1} (Si-C₆H₅ - зв'язки).

ІЧ-спектри механічної суміші до помолу характеризуються поглинанням поліметилфенілсилоксану, алюмінію оксиду та титану оксиду.

ІЧ-спектроскопічні дослідження підтверджують, що процес диспергування алюміній (III) оксиду і титан (IV) оксиду у розчині поліметилфенілсилоксану супроводжується руйнуванням кристалічної ґратки та розривом поліметилфенілсилоксанового ланцюга.

Вплив наповнювача алюміній (III) оксиду полягає у здатності відтягувати від атома силіцію електронну пару, що послаблює зв'язок Si-C₆H₅ та полегшує її розрив.

Підтвердженням незворотного прививання поліметилфенілсилоксану до наповнювача є поява відмитого матеріалу смуг 1050-1130 і 1440 cm^{-1} характерних для зв'язків C₆H₅ і 820-840, 1270-1290, 1415-1485 cm^{-1} для CH₃ зв'язків.

Введення до складу композиції хром (III) оксиду не змінює поглинання ІЧ-спектрів завдяки наявності аналогічних з композицією зв'язків (Al-O та Si-O).

Для формування надійності захисного покриття необхідно забезпечити високу адгезію, яка залежить від складу вихідних композицій та умов затвердіння. Встановлено, що оптимальна робоча в'язкість вихідних композицій (23-25 с за ВЗ-4), сухого залишку після затверднення 73-78 мас. %). Визначено мікротвердість (239,4-257,4 МПа), як критерій ступеня затвердіння, яка досягається при витримуванні покриття за кімнатної температури протягом 24 годин, та покривну здатність при товщині покриття 0,6-0,8 мм. Всі розроблені склади захисних покриттів володіють високою міцністю на згин (1мм) та міцністю на удар (4,5-5,0 Дж).

Первинна структура захисного покриття формується при затвердінні, а вторинна – при дії високих температур. Гази, що утворюються при дії високих температур на покриття, спучують захисний шар та змінюють мікроструктуру покриття.

Встановлено, що при нагріванні коефіцієнт спучення залежить як від товщини, так і від швидкості нагрівання. Збільшення значення товщини покриття приводить до зростання коефіцієнта спучення у 4...4,3 рази, а збільшення значення швидкості – у 2...2,2 рази, яке залежить від товщини покриття. Збільшення товщини покриття у порівнянні з підвищенням температури менше впливає на спучення.

Визначене значення коефіцієнта спучення становить 12 для складів покриттів № 2 та №3 при товщині 800 мкм і швидкості нагрівання 120 град/ хв.

Розроблена композиція може застосовуватись як високотемпературне та вогнестійке захисне покриття, що забезпечується утворенням за рахунок твердо фазових реакцій між продуктами термоокисної деструкції поліметилфенілсилоксану та наповнювачем нових жаростійких керамічних фаз. Встановлено, що введення до складу покриття титану та хрому оксидів збільшує його адгезійну міцність і суцільність відповідно на 40-60 % та 4-9 %, а втрата маси зразка зменшиться у 3,2-3,5 рази.

При випробуванні складів покриттів із граничними співвідношеннями компонентів були отримані незадовільні результати. Зменшення вмісту поліметилфенілсилоксану веде до зниження адгезійної міцності та суцільності при нагріванні вище від 600 °С на 5-20 % і збільшує втрату маси зразка на 7-12 %. Перевищення вмісту поліметилфенілсилоксану, титану (IV) та хрому (III) оксидів зростає масова доля чисто оксидних фаз, які негативно впливають на адгезійну міцність та суцільність покриттів.

Проведеними дослідженнями встановлено співвідношення компонентів розробленої вогнезахисної композиції для покриття, яке включає полісилоксан і алюмінію оксид, додатково містить титан (IV) і хром (III) оксиди, як полісилоксан містить поліметилфенілсилоксановий лак:

- поліметилфенілсилоксановий лак (за сухим залишком) - 30-40 % мас;
- алюміній (III) оксид - 30-40 % мас;
- титан (IV) оксид - 10-20 % мас;
- хром (III) оксид - 10-20 % мас.

3.2. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення

Досліджуваний склад композиції високотемпературного та вогнезахисного покриття [135, 136] 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 розділі 3.1.

Технічні характеристики високотемпературного вогнезахисного покриття наведено у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Технічні характеристики високотемпературного
вогнезахисного покриття

Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня
Масова частка нелетучих речовин, % мас	80 %
Термін служби покриття	20-25 років
Гарантійний термін збереження при температурі від +5 °С до +40 °С	1 рік
Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм (без обліку технологічних утрат)	1,6 кг/м ² •мм

У таблиці 3.10 наведено технічні характеристики повірених вимірювальних приладів, що використані при проведенні експериментальних досліджень.

Таблиця 3.10

Технічні характеристики вимірювальних приладів

№ п/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	± 2°С
4	Секундомір СОПпр	8625	Від 0 до 1800 с	±1с
5	Ваги ВТУ 210/ С3	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

Для дослідження вогнезахисної здатності покриття методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення було виготовлено корзинку з алюмінієвої фольги розміром 160x60x10 мм (рисунок 3.2), яку заповнили шаром покриття середньою висотою 2,07 мм, що виміряна у п'яти точках рівномірно по довжині зразка із вогнезахисного матеріалу після його висушування.



Рисунок 3.2 – Корзинка з алюмінієвої фольги із шаром покриття у сирому стані

З отриманого матеріалу покриття утворили дві наважки з гранул (рисунок 3.3) розміром не більше 2 мм та вагою 2,96 та 2,04 відповідно, які помістили у стакани з термостійкого скла діаметром 50 мм.



Рисунок 3.3 – Наважки покриття з гранул

Дані стакани 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 кожному стакані, вимірявши висоту у п'яти точках у центрі стакану і на серединах чотирьох радіусів. Висота спученого шару становила 13,48 та 12,42 мм у першому та другому стакані відповідно (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Зразки спученого покриття після проведення випробувань

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

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

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

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

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

$$\rho_{п} = 10^3 \cdot m / (l \cdot a \cdot h) [\text{г}/\text{см}^3],$$

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

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

Згідно результатів експериментальних досліджень та відповідних розрахунків визначено, що об'ємний коефіцієнт спучення покриття становить 10442,75 мм³/г, коефіцієнт умовно-лінійного спучення – 1,717.

Результати експериментальних досліджень методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для сталевих будівельних конструкцій наведено у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

Результати експериментальних випробувань

Показники	1	2
Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня	білий, матова поверхня
Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм	1,65 кг/м ² мм	1,65 кг/м ² мм
Діаметр склянки, мм	50,0	50,0
Маса зразка, г	2,96	2,04
Середня товщина спученого шару, мм	13,48	12,42
Коефіцієнт об'ємного спучення	10442,75	10442,75
Маса матеріалу в корзині, г	32,7	32,7
Довжина корзини, мм	160	160
Ширина корзини, мм	60	60
Середня висота матеріалу в корзині, мм	2,07	2,07
Коефіцієнт умовно-лінійного спучення	1,717	1,717

3.3. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття методом визначення лінійного коефіцієнта спучення

Досліджуваний склад композиції високотемпературного та вогнезахисного покриття [135, 136] 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 розділі 3.1.

Технічні характеристики досліджуваного високотемпературного вогнезахисного покриття представлено у таблиці 3.2. Технічні характеристики повірених вимірювальних приладів, що використані при проведенні експериментальних досліджень представлено у таблиці 3.5.

Для дослідження вогнезахисної здатності покриття методом визначення лінійного коефіцієнта спучення було виготовлено дві сталеві квадратні пластини зі стороною 50 мм та товщиною 2 мм (рисунок 3.5), 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.



Рисунок 3.5 – Сталеві пластини із нанесеним вогнезахисним покриттям

Два зразки сталевих пластин з покриттям було поміщено у електропіч, що попередньо прогрівалась протягом однієї години до температури 340 °С на 20 хв (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Розміщення зразків сталевих пластин з покриттям у електропіч СНОЛ 2.5

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. 3.7).



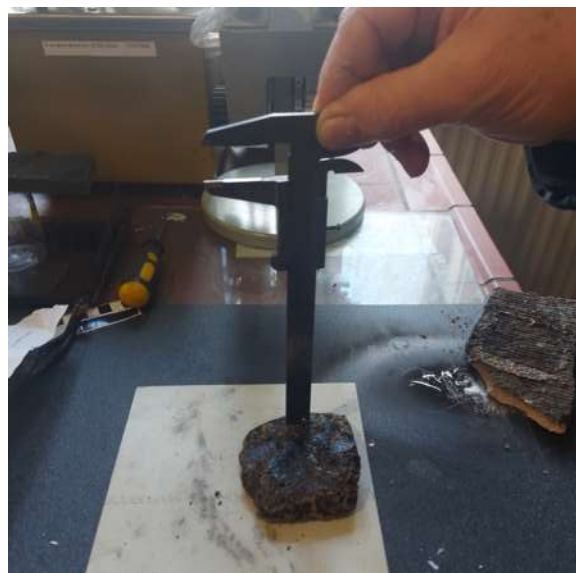


Рисунок 3.7 – Зразки сталевих пластин з покриттям після проведення випробувань

Використовуючи результати експериментальних досліджень розраховуємо лінійний коефіцієнт спучення покриття:

$$K_{\text{л}} = 0,5 (h_{\text{с1}} / h_{\text{п1}} + h_{\text{с2}} / h_{\text{п2}}),$$

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

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

Результати експериментальних досліджень методом визначення лінійного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для сталевих будівельних конструкцій наведено у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Результати експериментальних випробувань

Показники	1	2
Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня	білий, матова поверхня

Продовження табл. 3.13

Сталева квадратна пластина розмір сторони, мм	50						
Товщина сталевій 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. 3.8).

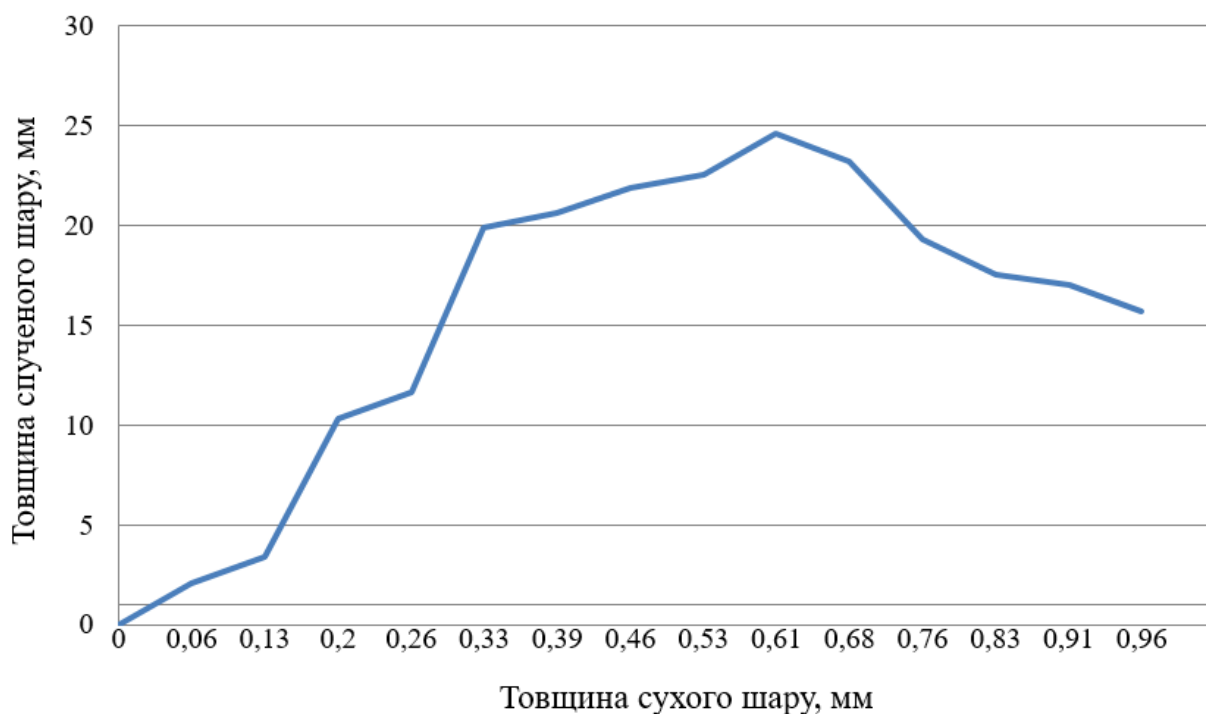


Рисунок 3.8 – Залежність товщини спучення вогнезахисного покриття від товщини нанесеного шару

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 [125] діапазон товщини шару покриття після висихання, що має становити $(1,0 \pm 0,5)$ 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.

3.4. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з металу

Для визначення вогнезахисної здатності композиції високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому [135] для сталевих будівельних конструкцій (далі – покриття) використано метод, регламентований п. 7.4 ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне обробляння будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання».

Сутність методу випробувань полягає у визначенні проміжку часу від початку температурного впливу за стандартним температурним режимом згідно з [90] на квадратну сталеву пластину зі стороною (500 ± 5) мм з нанесеним засобом вогнезахисту (вогнезахисні фарби, штукатурки та облицювання) до підвищення її температури на $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ від початкового значення (критична температура).

Для проведення експериментальних досліджень покриття було використано установку для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів, принцип роботи якої полягає у нагріванні внутрішнього простору камери установки з використанням електричних нагрівальних елементів. Схему установки представлено на рис. 3.9.

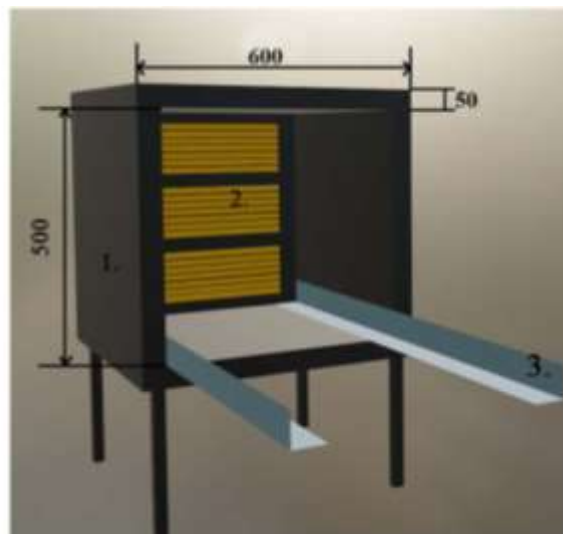


Рисунок 3.9 – Конструктивна схема випробувальної установки, де: 1 – корпус теплоізоляційний з вермикулітових плит (товщ. 50 мм), обшитих сталевими листами; 2 – радіаційна нагрівна панель; 3 – напрямні для встановлення та руху дослідного зразка

Температура у внутрішньому просторі камери контролюється термопарами із фіксацією результатів за допомогою контрольно-вимірвального пристрою. Цей пристрій дозволяє регулювати потужність нагрівальних елементів залежно від температури, забезпечуючи відповідність температурного режиму нагрівання камери установки відповідно до стандартного температурного режиму пожежі. Для контролю температури всередині камери використано дві термопари, одна з яких розташована на відстані 10 – 15 см від електричних нагрівальних елементів, а друга – на такій ж відстані від дослідного зразка.

Дослідний зразок для випробування закріплюється за допомогою спеціальних кронштейнів, що у сукупності утворюють кріпильну систему. Зразок для випробування являє собою сталеву квадратну пластину (розмір сторони 500 мм) із вогнезахисним покриттям [135] з боку теплового впливу випробувальної камери. З іншого боку зразок ізолюється шарами теплоізолювальних матеріалів згідно зі схемою, поданою на рис. 3.10.

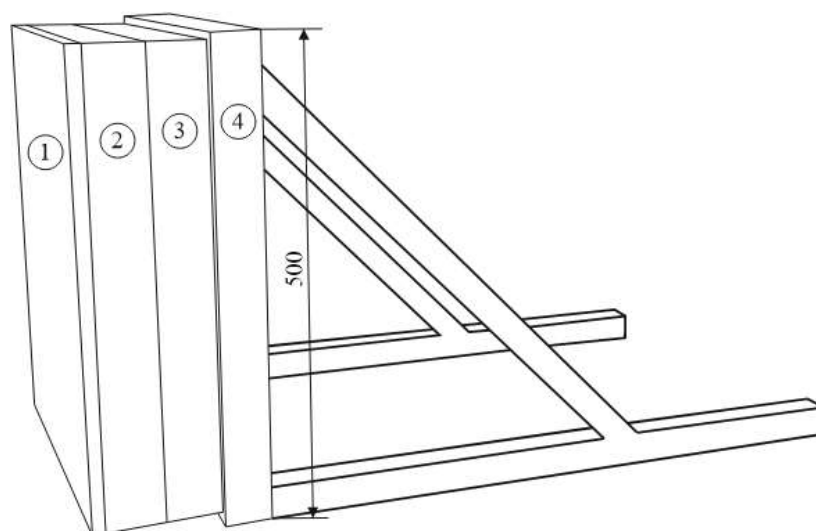


Рисунок 3.10 – Конструктивна схема зразка для випробувань, де: 1 – сталева пластина (товщ. 3–8 мм); 2 – перлітова плита (товщ. 50 мм); 3 – плита з мінеральної вати (товщ. 40 мм); 4 – каркас напямної шахти (товщ. 38 мм)

Для контролю температури з боку необігрівної сторони зразка для випробування встановлені п'ять термопар. На рис. 3.11 наведено схему розташування термопар (Т1–Т5 – номер термопари).

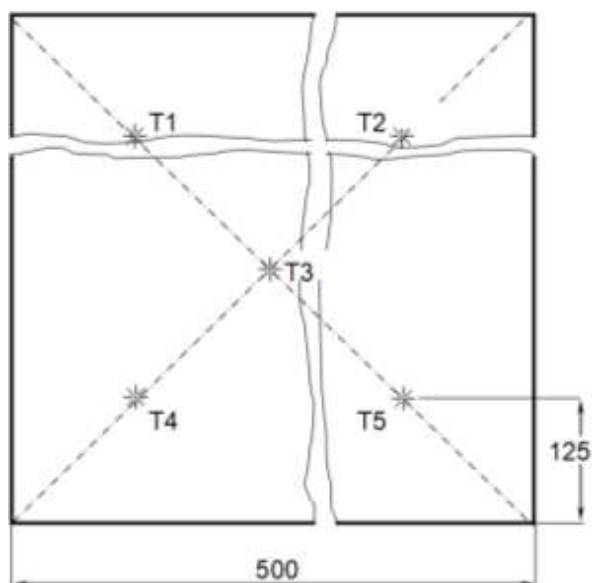


Рисунок 3.11 – Схема розташування термопар

Експериментальні дослідження проведено із дослідними зразками різної товщини сталевий пластины та товщини вогнезахисного покриття [137]. Виготовлено 11 типів зразків (по два однакових), параметри та характеристики яких наведено у табл. 3.14.

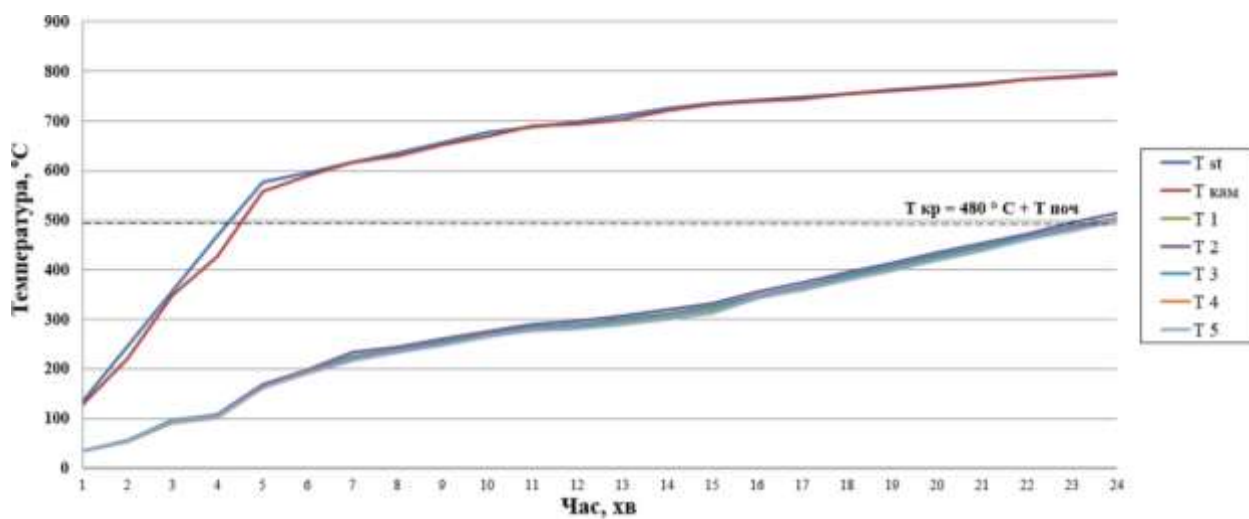
Таблиця 3.14

Номенклатура дослідних зразків

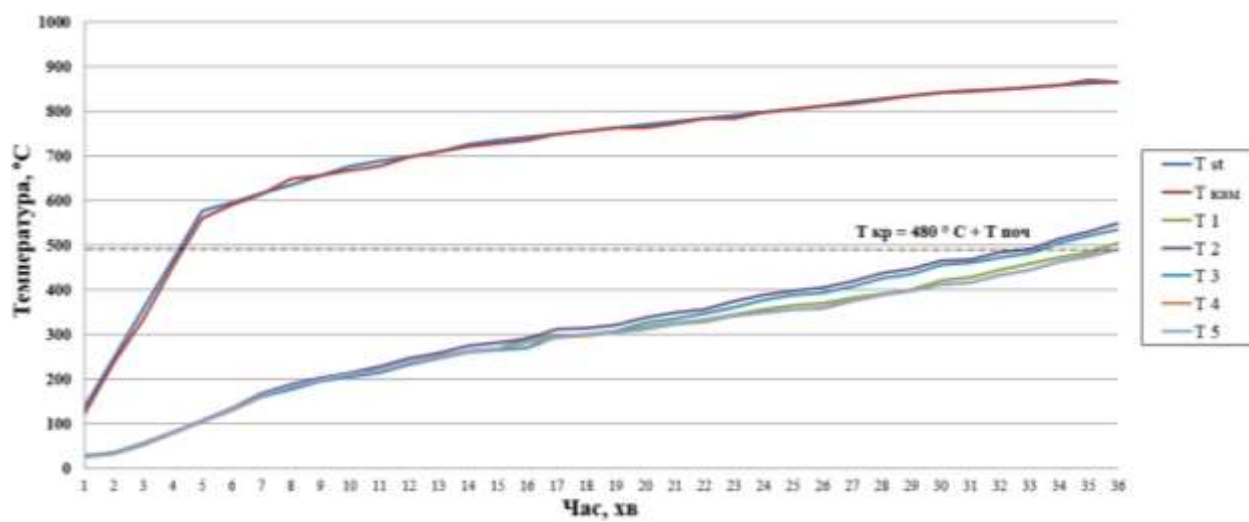
№ зразка Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Товщина сталевій пластини, мм	3				5				8		
Товщина покриття, мм	0,3	0,45	0,6	0,8	0,3	0,45	0,6	0,3	0,45	0,6	0,8

Нанесення вогнезахисного покриття на сталеві пластини проводилось з використанням валика та здійснювалось в опалювальному приміщенні при температурі повітря 18–20 °С. На оброблювальній поверхні пластини була відсутня волога чи конденсат. Досліджуване покриття наносилось пошарово та рівномірно, при цьому товщина мокрого шару складала до 0,5 мм. Час сушіння вогнезахисного покриття перед нанесенням наступного шару становив не менше 1 доби. Повне висихання покриття відбувалось протягом 10 діб. Контроль рівномірності товщини нанесеного покриття на сталеві пластини, здійснювався інструментальними методом у 10 рівновіддалених точках, що рекомендовано НАПБ Б.01.012-2019 «Правила з вогнезахисту».

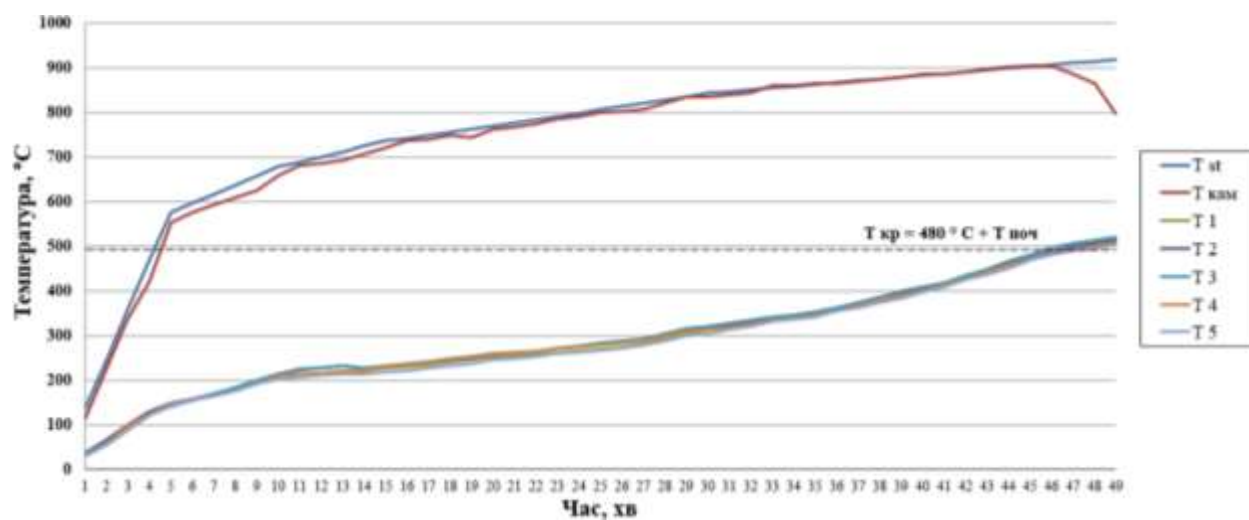
Згідно вищезазначеної методики та номенклатури дослідних зразків (табл. 3.9) було проведено 22 експерименти та встановлено час прогріву сталевих пластин (близнюків) до їх критичної темпера-тури прогріву – 480 °С від початкового значення (температура навколишнього середовища – 15 – 18 °С). Результати експериментів представлено на рис. 3.12 – 3.14.



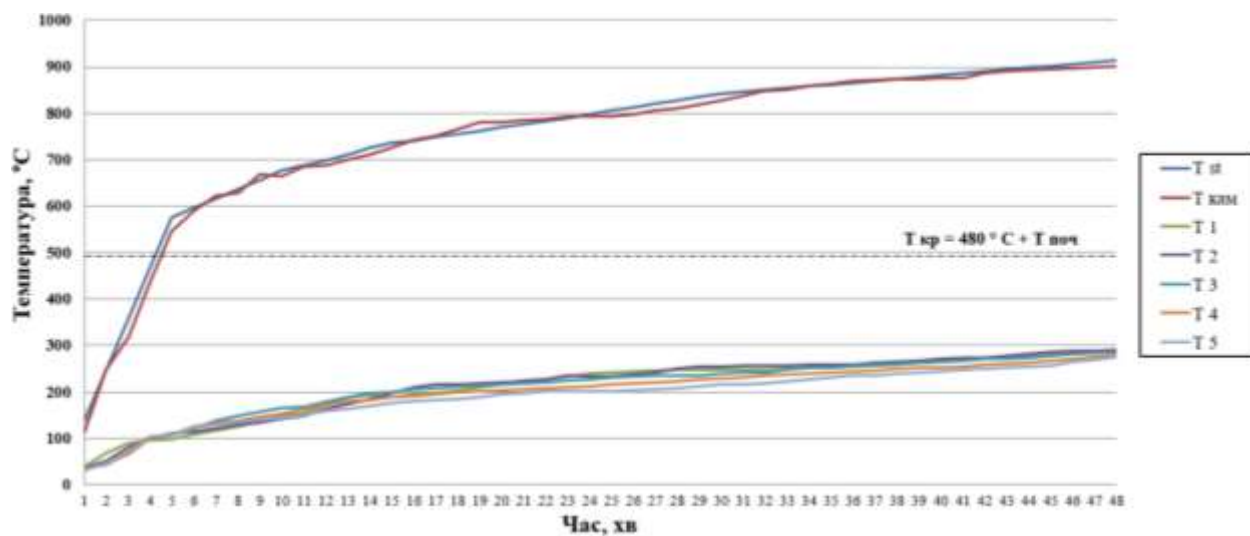
а)



б)

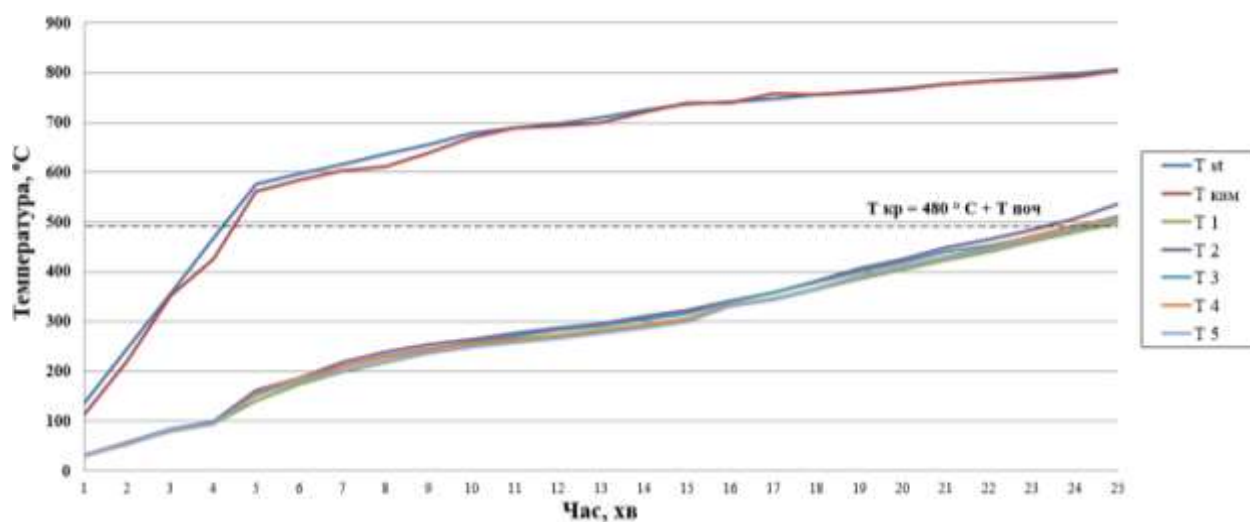


в)

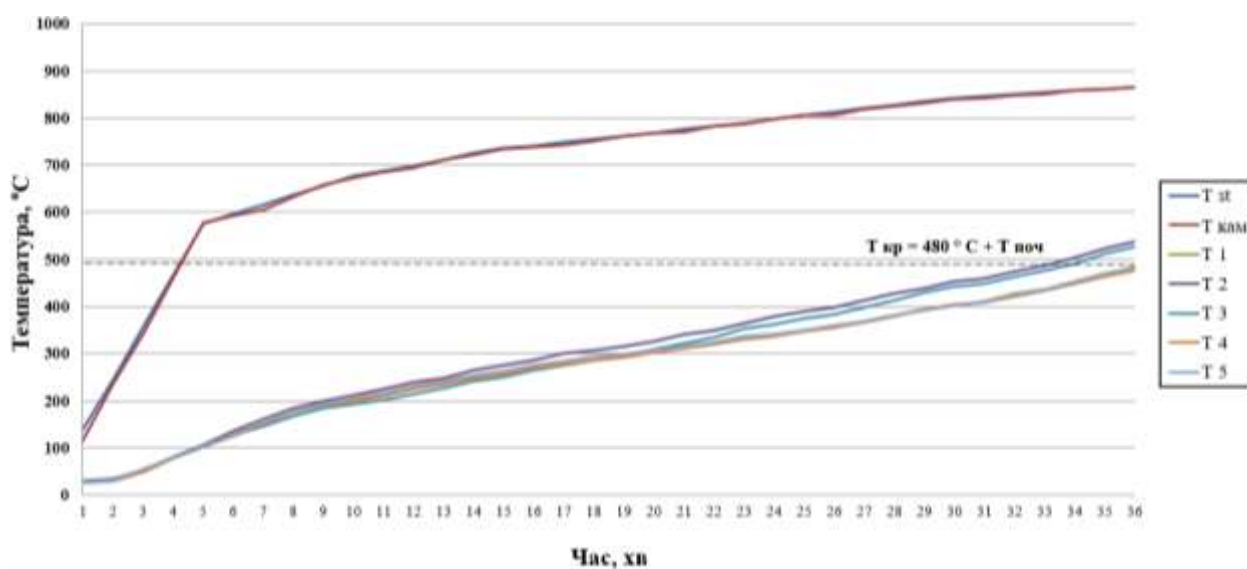


г)

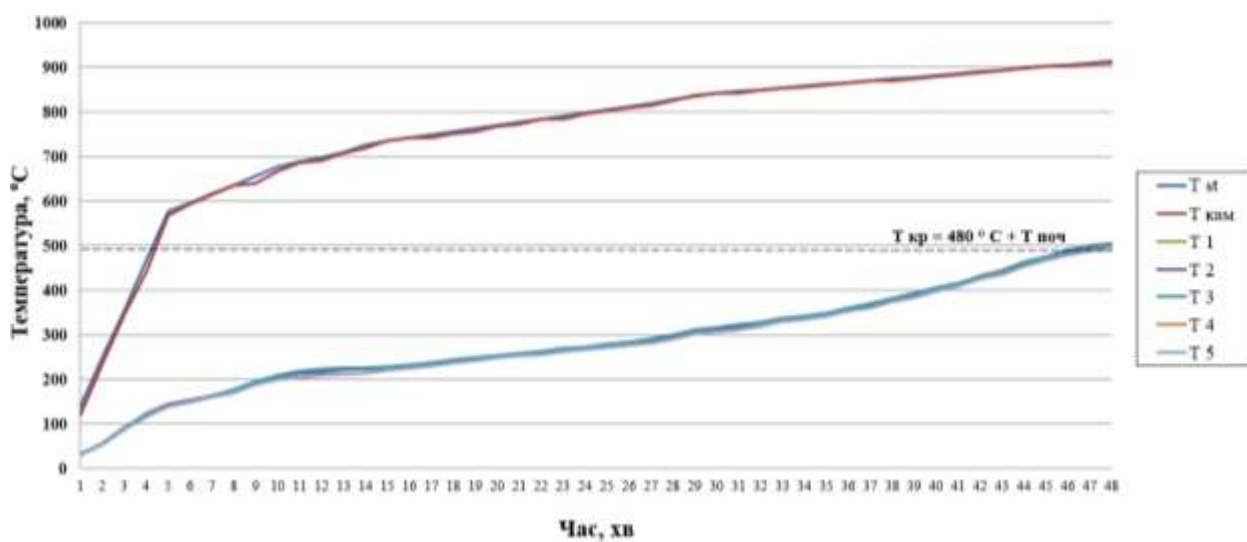
Рисунок 3.12 – Розподіли температури по сталевій пластині товщиною 3 мм, де:
 а) – при товщині вогнезахисного покриття 0,3 мм; б) – при товщині вогнезахисного покриття 0,45 мм; в) – при товщині вогнезахисного покриття 0,6 мм; г) – при товщині вогнезахисного покриття 0,8 мм



а)

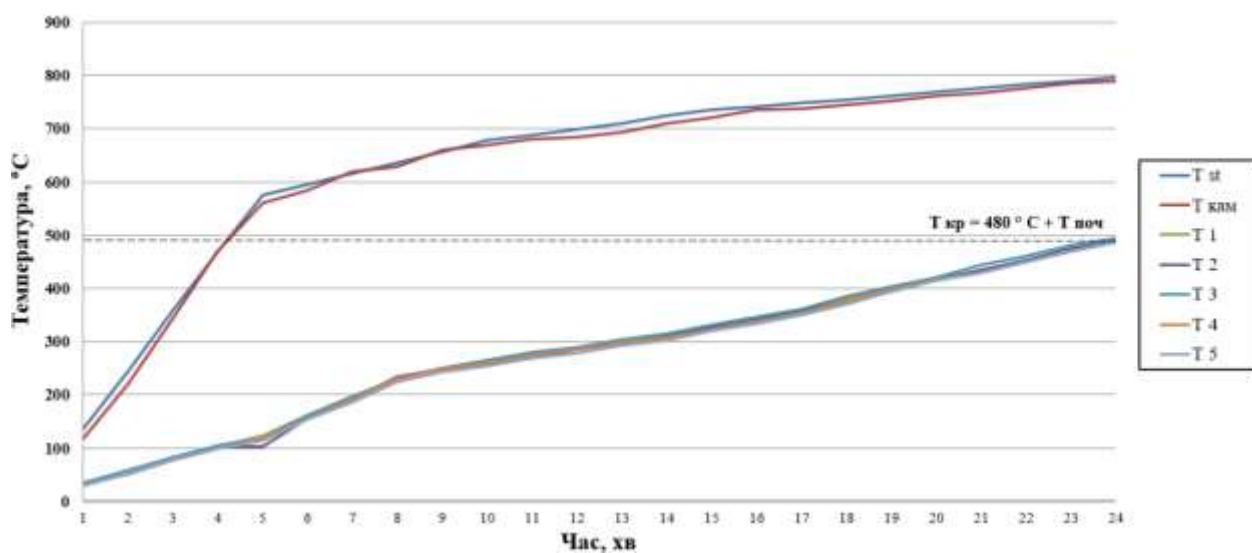


б)

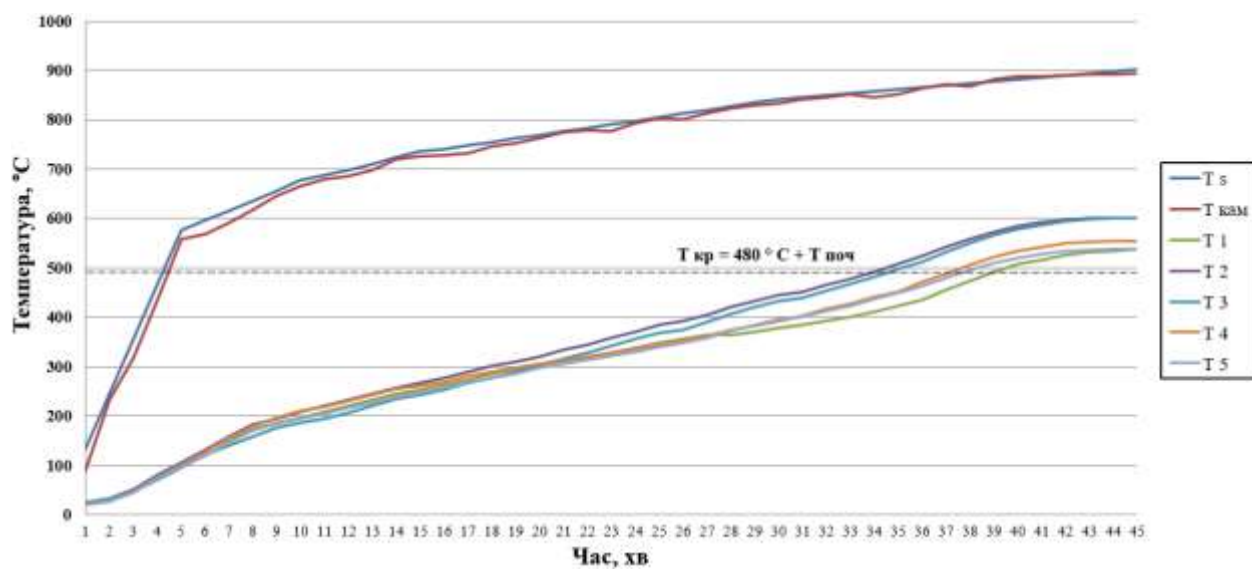


в)

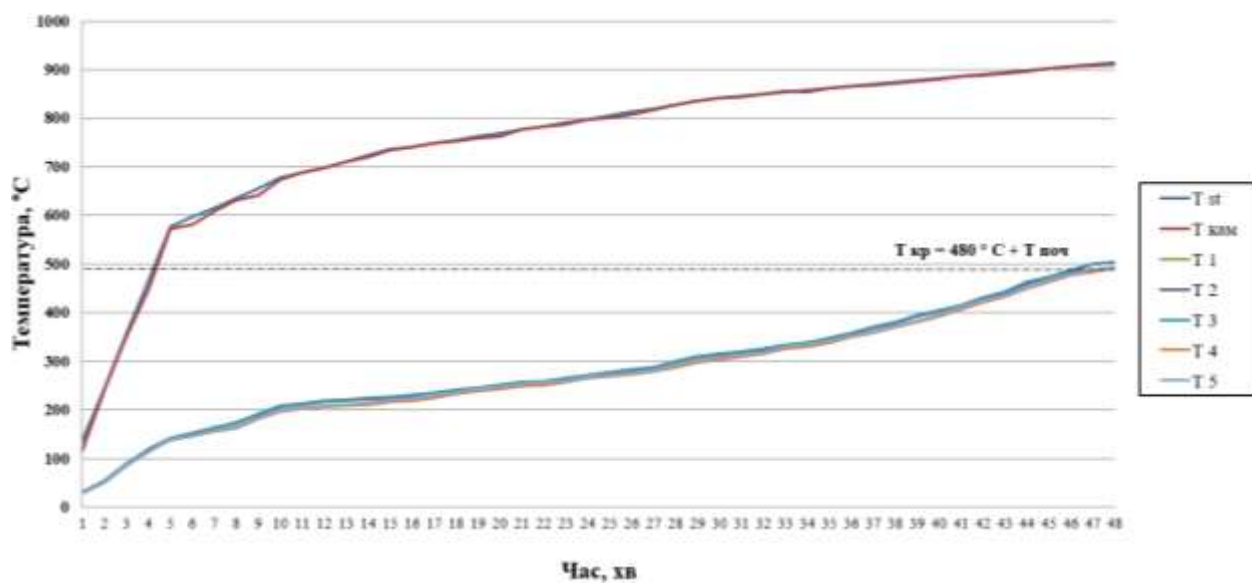
Рисунок 3.13 – Розподіли температури по сталевій пластині товщиною 5 мм, де: а) – при товщині вогнезахисного покриття 0,3 мм; б) – при товщині вогнезахисного покриття 0,45 мм; в) – при товщині вогнезахисного покриття 0,6 мм



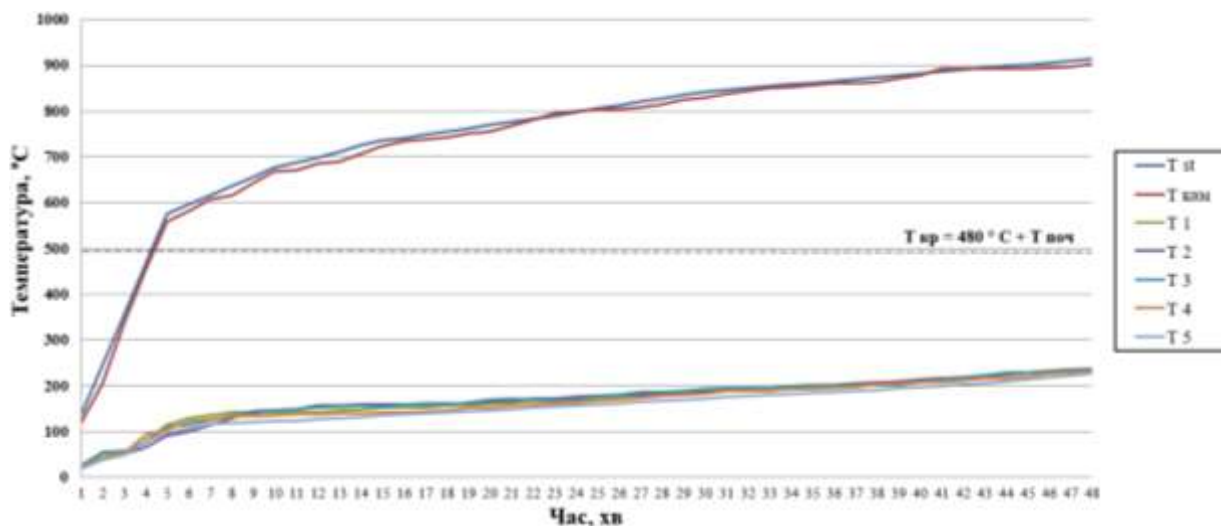
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.14 – Розподіли температури по сталевій пластині товщиною 8 мм, де: а) – при товщині вогнезахисного покриття 0,3 мм; б) – при товщині вогнезахисного покриття 0,45 мм; в) – при товщині вогнезахисного покриття 0,6 мм; г) – при товщині вогнезахисного покриття 0,8 мм

Вигляд дослідного зразка сталевієї пластини до та після температурного впливу представлено на рис. 3.15. Оглядом зразків після випробувань встановлено ефект спучення покриття, його добру адгезію зі сталевими пластинами, а відповідно, ефективність вогнезахисту.



Рисунок 3.15 – Вигляд дослідного зразка сталевієї пластини товщиною 3 мм із товщиною вогнезахисного покриття 0,3 мм, де: а) – до випробувань; б) – після випробувань

Як видно із отриманих результатів прогріву дослідних зразків 1–4, критична температура з необігрівної поверхні сталевієї пластини була досягнута при товщині вогнезахисного покриття 0,3 мм – на 23 хв, при товщині покриття 0,45 мм – на 34 хв, при товщині покриття 0,6 мм – на 46 хв. При товщині покриття 0,8 мм середня температура прогріву сталевієї пластини товщиною 3 мм на 48 хвилину становила 284 °С, що значно нижче критичної. Отримані результати дають підстави стверджувати про високу вогнезахисну ефективність розробленого покриття.

Результати прогріву дослідних зразків 5–7 та 8–11 показують, що товщина пластини не суттєво впливає на час досягнення критичної температури на необігрівній поверхні. Так, при збільшенні товщини пластини від 3 мм до 8 мм при однакових значеннях товщини вогнезахисного покриття час досягнення критичної температури збільшується орієнтовно на 1 хв.

3.5. Висновки за розділом

1. Розроблено склад рецептури вогнезахисного покриття та встановлено співвідношення компонентів композиції вогнезахисної композиції для покриття, яке включає полісилоксан і алюмінію оксид, додатково містить титан (IV) і хром (III) оксиди, як полісилоксан містить поліметилфенілсилоксановий лак:

- поліметилфенілсилоксановий лак (за сухим залишком) - 30-40 % мас;
- алюміній (III) оксид - 30-40 % мас;
- титан (IV) оксид - 10-20 % мас;
- хром (III) оксид - 10-20 % мас.

2. Встановлено, що об'ємний та лінійний коефіцієнт спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для сталевих будівельних конструкцій складає 10442,75 мм³/г та 38 відповідно.

3. Експериментально досліджено залежність товщини спучення вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому від товщини нанесеного шару. Найбільш ефективною товщиною сухого шару покриття є значення 0,61 мм, при якому товщина спучення буде становити 24,6 мм. При

подальшому збільшенні товщини нанесення покриття, при нагріванні, в заданих умовах проведення випробувань, воно розтріскується, стікає, а товщина спучення зменшується.

4. Експериментально досліджено закономірності часу прогріву до критичної температури квадратних сталевих пластин (зі стороною (500 ± 5) мм залежно від товщини покриття на основі полісилоксану (0,3 мм, 0,45 мм, 0,6 мм, 0,8 мм) та товщини сталевієї пластини (3 мм, 5 мм, 8 мм).

5. Результати прогріву дослідних зразків сталевієї пластини товщиною 3 мм, показують, що критична температура з необігрівної поверхні була досягнута при товщині вогнезахисного покриття 0,3 мм – на 23 хв, при товщині покриття 0,45 мм – на 34 хв, при товщині покриття 0,6 мм – на 46 хв. При товщині покриття 0,8 мм середня температура прогріву сталевієї пластини товщиною 3 мм на 48 хвилину становила 284°C , що значно нижче критичної. Отримані результати дають підстави стверджувати про високу вогнезахисну ефективність розробленого покриття.

6. Експериментальні дослідження прогріву дослідних зразків сталевих пластин свідчать про те, що товщина пластини не суттєво впливає на час досягнення критичної температури на необігрівній поверхні. Так, при збільшенні товщини пластини від 3 мм до 8 мм при однакових значеннях товщини вогнезахисного покриття час досягнення критичної температури збільшується орієнтовно на 1 хв.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАНДАРТНИХ КЛАСІВ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК

4.1. Загальна постановка задачі і основні положення розрахунку

Встановлення значень мінімальної товщини вогнезахисного покриття відбувається розрахунковим шляхом із використанням методики, поданої нижче [88, 138 – 140].

1. Шляхом розв’язку оберненої задачі теплопровідності визначаються повністю, або частково теплофізичні характеристики покриття на основі числових даних випробувань.

2. Використовуючи отримані теплофізичні характеристики, визначаються температурні показники нагрівання елементів сталевих конструкцій, підданих випробуванню, які порівнюються із експериментальними даними, і на основі даного порівняння робиться висновок про прийнятність використання отриманих теплофізичних характеристик.

3. За умови, що критерії адекватності не задовольняються, мають бути обчислені коригувальні коефіцієнти, або застосований один з альтернативних методів, що рекомендується відповідним стандартом.

4. За умови, що отримані характеристики задовольняють критеріям адекватності, виконується розрахунок температури елементів сталевих конструкцій, параметри яких входять у діапазон, що відповідає поставленій меті.

5. Послідовно багатократно вирішуючи теплотехнічну задачу щодо визначення температури нагрівання елементів конструкцій, визначаються значення мінімальної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття для забезпечення заданого класу вогнестійкості при встановлених температурах із нормованого ряду і заповнюється таблиця встановленої форми.

4.2. Температурний режим пожежі

Згідно із вимогами стандартів, чинних в Україні, для розрахунку повинен бути використаний стандартний температурний режим пожежі, який визначається формулою [143, 144]:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t / 60 + 1) + \theta_0, \quad (4.1)$$

де: t – час стандартного вогневого випробування, с;

θ_0 – початкова температура середовища, °C; $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$;

$\theta_p(t)$ – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій в залежності від часу t стандартного випробування.

4.3. Модель теплопередачі сталевих конструкцій

Для визначення температури нагріву незахищених сталевих конструкцій застосовується основна методика, яка базується на використанні формули [80, 142], яка визначає підвищення температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{V c_a \rho_a} \cdot \dot{i} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0), \quad (4.2)$$

де: k_{sh} – поправочний коефіцієнт для врахування впливу тіньового ефекту;

A_m / V – коефіцієнт перерізу для незахищених сталевих конструкцій (1/м);

A_m – площа поверхні конструкції на одиницю довжини (м²/м); V – об'єм конструкції на одиницю довжини (м³/м); c_a – питома теплоємність сталі, (Дж/(кг · К));

$\dot{i}$ – розрахункове значення результуючого питомого теплового потоку на одиницю площі (Вт/м²);

Δt – проміжок часу (с);

ρ_a – густина сталі, (кг/м³).

Для визначення температури нагріву вогнезахисних сталевих конструкцій за стандартом ДСТУ EN 13501-2:2023 застосовується основна методика, яка базується на використанні формули, яка визначає підвищення температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \Delta\theta_{g,t} > 0), \quad (4.3)$$

$$\text{де } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V,$$

де: A_p / V – коефіцієнт перерізу для сталевих конструкцій, ізольованих вогнезахисним матеріалом;

A_p – відповідна площа поверхні вогнезахисного матеріалу на одиницю довжини конструкції (м²/м); V – об'єм одиниці довжини конструкції (м³/м); c_a – питома теплоємність сталі, залежна від температури (Дж/(кг·К));

c_p – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, не залежна від температури (Дж/(кг · К));

d_p – товщина вогнезахисного матеріалу (м);

Δt – проміжок часу не повинно бути більшим за 30 с (с);

$\theta_{a,t}$ – температура сталі у момент часу t (°C); $\theta_{g,t}$ – температура оточуючого газу у момент часу t (°C); $\Delta\theta_{g,t}$ – підвищення температури оточуючого газу за проміжок часу Δt (K);

λ_p – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи (Вт/(м · К));

ρ_a – густина сталі (кг/м³); ρ_p — густина вогнезахисного матеріалу (кг/м³).

Площа вогнезахисного матеріалу A_p , як правило, має прийматися як площа його внутрішньої поверхні, однак для порожнистих облицювань із зазорами навколо

захищеної сталевій конструкції може бути використане значення площі для порожнистих облицювань без зазорів.

4.4. Методика розрахунку теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття

Для визначення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття сталевих конструкцій застосовується формула згідно із ДСТУ EN 13501-2:2023:

$$\lambda_{p,t} = \left[d_p \frac{V}{A_p} c_{a,t} \rho_a (1 + \phi / 3) \frac{1}{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] [\theta_{a,t} + (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_{g,t}]. \quad (4.4)$$

За умов застосування методу ДСТУ EN 13501-2:2023 теплоємність вважається сталою і рівна $c_p = 1000$ кДж/(кг·К). Густина вогнезахисного покриття також вважається сталою і дорівнює $\rho_p = 16,5$ кг/м³.

Числова залежність коефіцієнту теплопровідності від часу для кожної сталевій конструкції перетворюється на залежність від температури та усереднюється для кожних 50 °С для всіх конструкцій. Для визначення коефіцієнту теплопровідності для певного значення температури використовується лінійна інтерполяція.

Після цього перевіряються критерії адекватності (прийнятності) за рекомендаціями ДСТУ EN 13381-8:2022 [88]:

- час досягнення проектної температури для кожної проектної температури не має перевищувати реальний час, отриманий при випробуванні, більше як на 30 %;
- середнє значення відхилення розрахункового та експериментального часу досягнення проектної температури має бути менше за нуль;
- максимум 20 % окремих розбіжностей має бути більшим за нуль.

Для розв'язку рівняння (2.3) потрібно задати температурні залежності теплофізичних характеристик сталі. В табл. 4.1 подані означені теплофізичні характеристики [80, 88].

Таблиця 4.1

Теплофізичні характеристики матеріалів будівельних конструкцій

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$, Дж/(м³·°С)	Густина, кг/м³
Сталь ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2012 Eurocode 3		
$54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$, 27,3 при $\theta > 800^\circ\text{C}$.	$425 + 0,773 \theta - 1,69 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta^3$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$, $666 - 13002/(\theta - 738)$ при $600^\circ\text{C} < \theta \leq 735^\circ\text{C}$, $545 + 17820/(\theta - 731)$ при $735^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C}$, 650 при $900^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$	7850

4.5. Методика для визначення експериментальних значень температур

Для визначення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття сталевих конструкцій було використано установку, схема якої наведена на рис. 4.1.

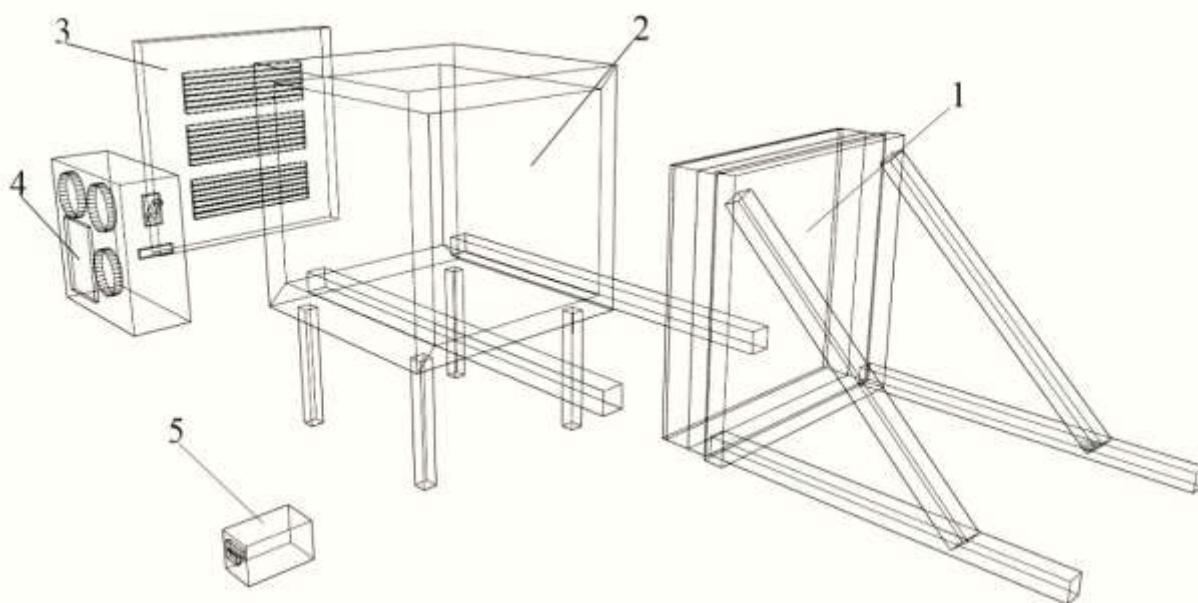


Рисунок 4.1 – Конструктивна схема установки для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів, де: 1 – дослідний зразок з кріпильною системою, 2 – камера установки, 3 – нагрівна панель, 4 – блок управління, 5 – прилад для контролю температури на дослідному зразку

Принцип роботи установки полягає у нагріванні камери установки за допомогою електричних нагрівальних елементів. Температура у камері установки контролюється термопарами із фіксацією результатів за допомогою контрольно-вимірювального пристрою. Даний пристрій призначений для поступового регулювання температури нагрівальних елементів у залежності від температури всередині камери установки, забезпечуючи при цьому відповідність температурного режиму нагрівання відповідно до стандартного температурного режиму пожежі відповідно до формули (4.1).

Зразок для випробування закріплюється за допомогою спеціальних кронштейнів, що у сукупності утворюють кріпильну систему.

Зразок для випробування являє собою сталеву пластину із «вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому» з боку теплового впливу у камері установки. З іншого боку зразок ізолюється шарами теплоізолювального матеріалу: перлітова плита (товщ. 50 мм) та плита з мінеральної вати (товщ. 40 мм). Конструктивна схема зразку для випробування показана на рисунку 3.9.

Для контролю температури з боку необігрівної сторони зразка для випробування на ньому встановлені п'ять термопар. Тип спаю термопар є хромель-алюмелевий. Схема розташування термопар показана на рисунку 3.10.

На рис. 4.2 подана конструктивна схема термопар, що були використані для вимірювання та контролю температур.



Рисунок 4.2 – Конструктивна схема термопар для вимірювання та контролю температур

При вивченні теплофізичних характеристик «вогнезахисного покриття на основі полісілоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому» були виготовлені зразки із різною товщиною сталевोї пластини та різною товщиною вогнезахисного покриття. На рис. 4.3 подана конструктивна схема встановлення зразків в установці для випробувань.



Рисунок 4.3 – Конструктивна схема встановлення зразків в установці для випробувань

Всього було виготовлено 11 типів зразків по два однакових зразка. Параметри кожного типу зразків наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнта теплопровідності

Параметр	Номенклатура зразків колон										
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11
Довжина сторони, мм	500										
Товщина сталеві пластини, мм	3				5			8			
Коефіцієнт перерізу, $A_m/V, m^{-1}$	333.333				200			125			
Товщина покриття, d, мм	0.3	0.45	0.6	0.8	0.3	0.45	0.6	0.3	0.45	0.6	0.8

Таким чином, були проведені випробування зразків в установці, яка у стані, підготованому до випробувань, показана на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Установа із зразком, підготовлена до випробування

4.6. Результати розрахунку коефіцієнта теплопровідності

Після проведення експериментів були отримані температурні криві нагріву сталевих пластин для різних зразків. На рис. 4.5 наведені температурні криві, отримані для зразка № 1 згідно із табл. 4.2.

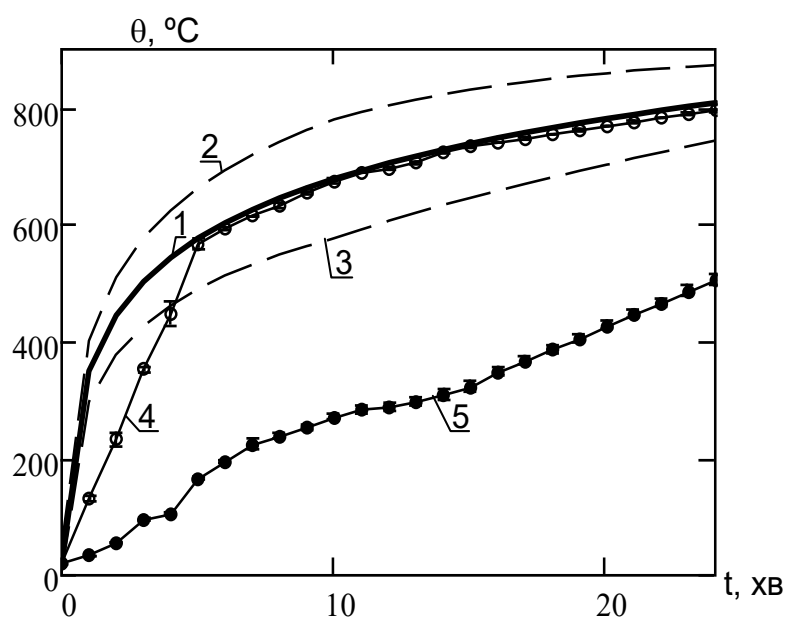


Рисунок 4.5 – Температурні криві нагрівання зразка №1, отримані під час випробувань, де:

1 – стандартна температурна крива; 2 – верхнє допустиме відхилення температури у камері печі від стандартної кривої; 3 – нижнє допустиме відхилення температури у камері печі від стандартної кривої; 4 – температурна крива нагріву у камері печі під час випробувань із відхиленнями; 5 – температурна крива нагріву зразку під час випробувань із відхиленнями

Графіки на рис. 4.5 показують добру відтворюваність температурного режиму випробувань, оскільки в межах більше 10 хв температурні показники попадають у нижнє та верхнє обмеження відхилень від стандартного температурного режиму пожежі. Відхилення вимірювань є незначними та не перевищують 4 %.

Аналогічні графіки було побудовано для всіх типів зразків відповідно до номенклатури дослідних зразків, що представлена у табл. 4.2. На рисунках 4.6 – 4.8 представлені температурні криві для всіх типів випробуваних зразків.

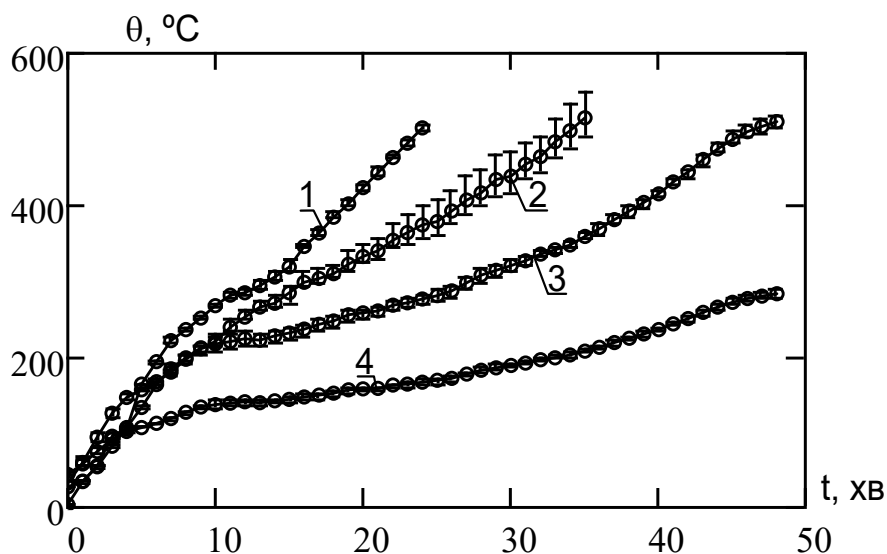


Рисунок 4.6 – Температурні криві із відхиленнями нагрівання дослідних зразків із сталеву пластину товщиною 3 мм отримані під час випробувань покриттів із різною товщиною: 1 – 0.3 мм; 2 – 0.45 мм; 3 – 0.6 мм; 4 – 0.8 мм

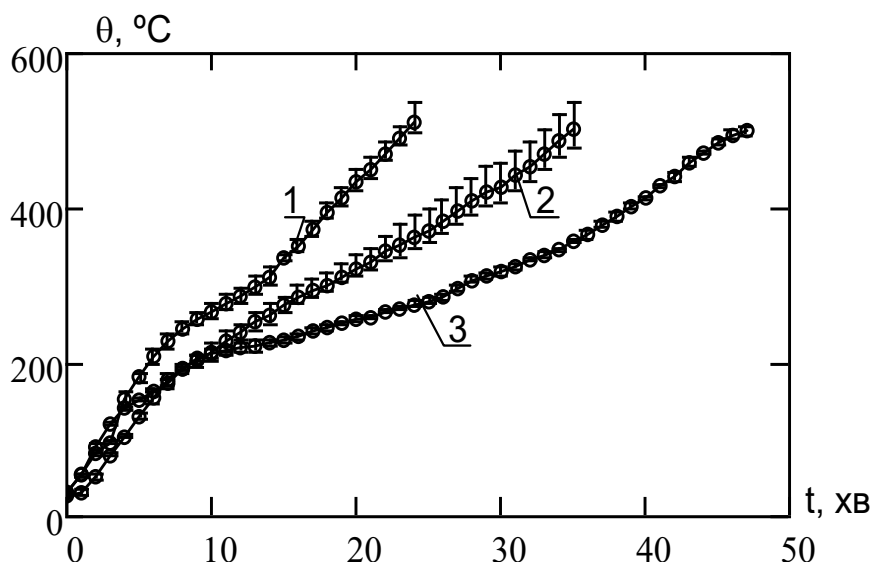


Рисунок 4.7 – Температурні криві із відхиленнями нагрівання дослідних зразків із сталеву пластину 5 мм отримані під час випробувань покриттів із різною товщиною: 1 – 0.3 мм; 2 – 0.45 мм; 3 – 0.6 мм

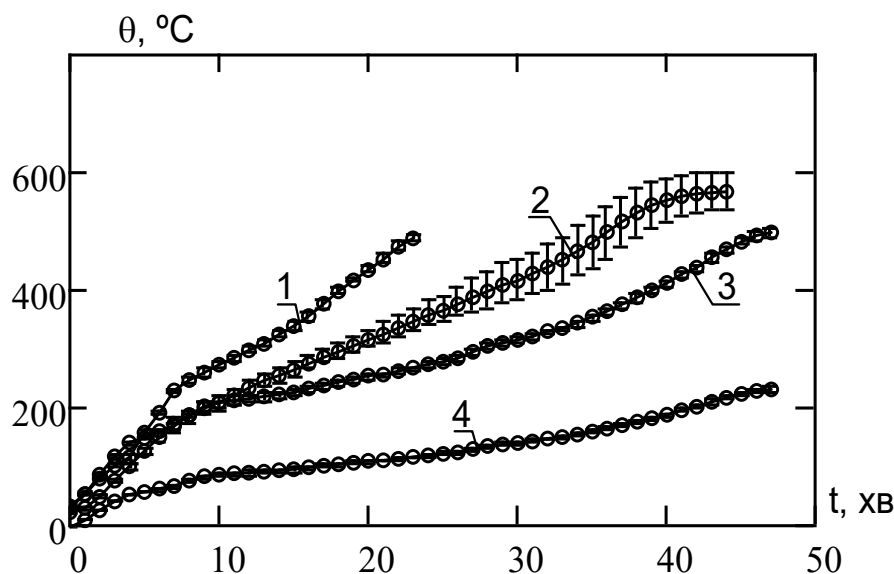


Рисунок 4.8 – Температурні криві із відхиленнями нагрівання дослідних зразків із сталеву пластину товщиною 8 мм отримані під час випробувань покриттів із різною товщиною: 1 – 0.3 мм; 2 – 0.45 мм; 3 – 0.6 мм; 4 – 0.8 мм

Аналізуючи температурні криві, представлені на рисунках 4.6 – 4.8, можна помітити, що збільшення товщини покриття уповільнює нагрівання. Це свідчить про ефективність запропонованого вогнезахисного покриття. Отримані відхилення не

перевищують у середньому 6%, що показує добру відтворюваність експерименту і адекватність результатів вимірювання.

Для розрахунку коефіцієнта теплопровідності за формулою (4.4) були використані дані вогневих випробувань зразків із вогнезахисним покриттям згідно із розробленою методикою, яка описана вище. На рис. 4.5 – 4.8 показані типові криві показників температури нагріву камери установки та температур, що виміряні на необігрівній стороні зразка під час випробувань, залежно від часу. Використовуючи дані, що наведені у табл. 4.2 були визначені залежності коефіцієнта теплопровідності від часу, які потім були перераховані у залежності від температури. Числові дані щодо залежності коефіцієнта теплопровідності від часу наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Значення коефіцієнту теплопровідності в залежності від часу

Час, t , хв	*Коефіцієнт теплопровідності при випробуваннях, $\lambda_{p,t}$, Вт/(м·°С)										
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11
0	0.01	0.01	0.025	0.015	0.02	0.015	0.04	0.023	0.02	0.052	0.032
1	0.011	0.004	0.022	0.014	0.016	0.003	0.029	0.022	0.011	0.046	0.028
2	0.012	0.008	0.021	0.013	0.014	0.013	0.036	0.022	0.019	0.052	0.031
3	0.002	0.006	0.018	0.01	0.011	0.011	0.03	0.018	0.016	0.044	0.026
4	0.01	0.008	0.015	0.008	0.005	0.013	0.022	0.012	0.021	0.035	0.02
5	0.004	0.007	0.013	0.007	0.004	0.011	0.02	0.01	0.019	0.031	0.018
6	0.005	0.006	0.008	0.004	0.015	0.009	0.012	0.006	0.015	0.022	0.012
7	0.002	0.005	0.007	0.004	0.014	0.008	0.011	0.005	0.013	0.019	0.011
8	0.003	0.005	0.003	0.002	0.007	0.008	0.005	0.015	0.013	0.006	0.003
9	0.003	0.005	0.003	0.002	0.007	0.008	0.005	0.015	0.013	0.006	0.003
10	0.002	0.006	0.003	0.002	0.007	0.008	0.005	0.013	0.013	0.008	0.005
11	0.001	0.006	0.003	0.002	0.007	0.008	0.005	0.013	0.013	0.008	0.005
12	0.002	0.004	0.004	0.002	0.005	0.008	0.005	0.015	0.012	0.006	0.003
13	0.002	0.004	0.004	0.002	0.005	0.008	0.005	0.015	0.012	0.006	0.003
14	0.002	0.003	0.005	0.002	0.004	0.005	0.008	0.007	0.008	0.013	0.007
15	0.004	0.003	0.005	0.002	0.004	0.005	0.008	0.007	0.008	0.014	0.007
16	0.003	0.003	0.004	0.002	0.003	0.004	0.006	0.005	0.006	0.011	0.006
17	0.004	0.003	0.004	0.002	0.003	0.004	0.006	0.005	0.006	0.011	0.006
18	0.003	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.003	0.006	0.006	0.004	0.002
19	0.004	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.003	0.006	0.006	0.004	0.002
20	0.004	0.004	0.001	0.0006	0.003	0.005	0.002	0.005	0.006	0.003	0.002
21	0.004	0.004	0.001	0.0004	0.003	0.005	0.002	0.005	0.006	0.003	0.002
22	0.004	0.003	0.001	0.001	0.002	0.004	0.002	0.006	0.007	0.002	0.001
23	0.004	0.003	0.001	0.001	0.002	0.004	0.002	0.006	0.007	0.002	0.001
24	0.004	0.003	0.001	0.0001	0.003	0.005	0.001	0.005	0.007	0.002	0.001

Продовження табл. 4.3

25	--	0.003	0.001	0.0003	0.003	0.005	0.001	0.005	0.007	0.002	0.001
26	--	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.007	0.004	0.003	0.001
27	--	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.007	0.004	0.003	0.001
28	--	0.003	0.001	0.001	0.007	0.004	0.001	0.007	0.005	0.002	0.001
29	--	0.003	0.001	0.001	0.007	0.004	0.001	0.007	0.005	0.002	0.001
30	--	0.003	0.001	0.001	0.004	0.004	0.002	0.007	0.006	0.004	0.002

*Значення температур обмеженні часом 30 хв, хоча для розрахунку використовується час у всьому діапазоні тривалості випробувань

Після процедури перетворення часової залежності коефіцієнта теплопровідності на температурну були визначені середні значення коефіцієнту теплопровідності для кожних 50 °С. Отримані розподіли середнього значення коефіцієнту теплопровідності на кожні 50 °С наведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Значення коефіцієнту теплопровідності у залежності від температури

Температура, $\theta, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт теплопровідності при випробуваннях, $\lambda_{p,t}$, Вт/(м·°С)										
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11
0	0.01	0.01	0.025	0.015	0.02	0.015	0.04	0.023	0.02	0.052	0.032
50	0.013	0.004	0.022	0.014	0.016	0.003	0.029	0.022	0.011	0.046	0.028
150	0.01	0.007	0.019	0.011	0.012	0.012	0.033	0.02	0.017	0.048	0.028
200	0.01	0.007	0.015	0.008	0.005	0.013	0.022	0.012	0.02	0.035	0.02
250	0.002	0.006	0.013	0.006	0.01	0.01	0.02	0.01	0.015	0.031	0.015
300	0.01	0.005	0.007	0.003	0.014	0.008	0.012	0.006	0.013	0.02	0.007
350	0.01	0.005	0.003	0.002	0.007	0.008	0.005	0.015	0.013	0.006	0.004
400	0.005	0.005	0.003	0.002	0.006	0.007	0.005	0.013	0.01	0.008	0.004

Продовження табл. 4.4

450	0.003	0.003	0.003	0.001	0.004	0.004	0.004	0.009	0.006	0.007	0.002
500	0.002	0.003	0.001	0.001	0.003	0.004	0.002	0.005	0.006	0.003	0.002
550	0.003	0.002	0.001	0.001	0.005	0.003	0.002	0.008	0.006	0.004	0.003
600	0.004	0.003	0.002	0.002	0.007	0.004	0.003	0.01	0.006	0.005	0.004
650	0.005	0.003	0.003	0.001	0.008	0.005	0.006	0.012	0.008	0.009	0.002
700	0.006	0.005	0.004	0.001	0.01	0.008	0.007	0.01	0.014	0.011	0.002
750	0.006	0.006	0.002	0.001	0.01	0.008	0.004	0.01	0.006	0.005	0.002
800	0.006	0.006	0.002	0.001	0.01	0.008	0.004	0.01	0.001	0.005	0.002
850	0.006	0.006	0.002	0.001	0.01	0.008	0.004	0.01	0.001	0.005	0.002
900	0.006	0.006	0.002	0.001	0.01	0.008	0.004	0.01	0.001	0.005	0.002
950	0.006	0.006	0.002	0.001	0.01	0.008	0.004	0.01	0.001	0.005	0.002
1000	0.006	0.006	0.002	0.001	0.01	0.008	0.004	0.01	0.001	0.005	0.002
1050	0.006	0.006	0.002	0.001	0.01	0.008	0.004	0.01	0.001	0.005	0.002

Використовуючи отримані дані, що наведені у табл. 4.4, були побудовані графіки залежностей усередненого значення коефіцієнта теплопровідності від температури. Отримані графіки наведені на рисунку 4.9.

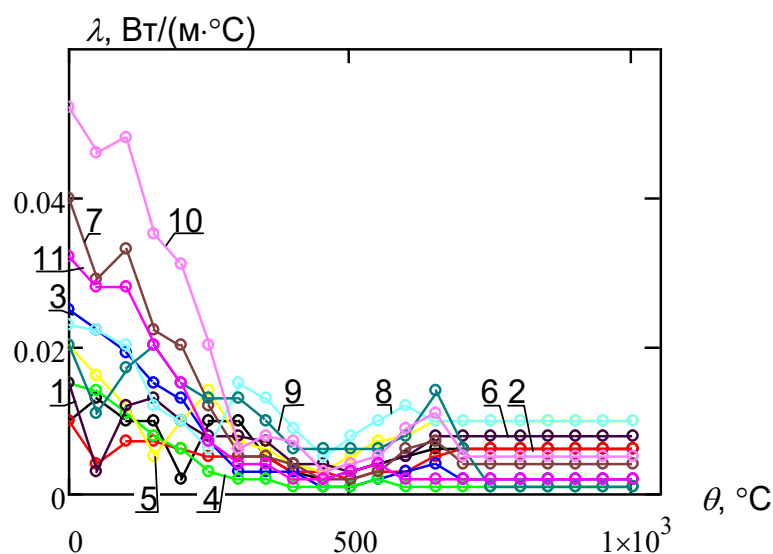


Рисунок 4.9 – Залежність усередненого значення коефіцієнту теплопровідності від температури зразків колон із вогнезахисним покриттям (1, 2, 3, ... – номери зразків).

З даних графіків можна побачити, що коефіцієнт теплопровідності суттєво залежить від товщини покриття і це означає, що для аналізу теплової задачі нагрівання сталеві конструкції із вогнезахисним покриттям не можна використовувати загальну спільну залежність. Крім того наведена залежність для визначення коефіцієнта теплопровідності через температуру та товщину вогнезахисного покриття, також не може бути використана ДСТУ EN 13501-2:2023, оскільки залежність коефіцієнту теплопровідності від температури та товщини є суттєво нелінійними.

Для того, щоб описати залежність коефіцієнта теплопровідності від товщини покриття та температури було зроблено усереднення за товщиною покриття. Усереднені значення за товщиною подані у табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Усереднені за товщиною вогнезахисного покриття значення коефіцієнту теплопровідності у залежності від температури

Температура, θ , °C	*Коефіцієнт теплопровідності при випробуваннях, $\lambda_{p,t}$, Вт/(м·°C)			
	Усереднена товщина, $d_{0,3}$, мм	Усереднена товщина, $d_{0,45}$, мм	Усереднена товщина, $d_{0,6}$, мм	Усереднена товщина, $d_{0,8}$, мм
	$3 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
0	0.018	0.015	0.039	0.024
50	0.017	0.006	0.032	0.021
150	0.014	0.012	0.033	0.02
200	0.009	0.013	0.024	0.014
250	0.007	0.01	0.021	0.011
300	0.01	0.009	0.013	0.005
350	0.011	0.009	0.005	0.003
400	0.008	0.007	0.005	0.003
450	0.005	0.004	0.005	0.002
500	0.003	0.004	0.002	0.002

Продовження табл. 4.5

550	0.005	0.004	0.002	0.002
600	0.007	0.004	0.003	0.003
650	0.008	0.005	0.006	0.002
700	0.009	0.009	0.007	0.002
750	0.009	0.007	0.004	0.002
800	0.009	0.005	0.004	0.002
850	0.009	0.005	0.004	0.002
900	0.009	0.005	0.004	0.002
950	0.009	0.005	0.004	0.002
1000	0.009	0.005	0.004	0.002
1050	0.009	0.005	0.004	0.002

Використовуючи дані, що наведені у табл. 4.5 можна отримати значення коефіцієнта теплопровідності за допомогою лінійної інтерполяції.

Застосовуючи лінійну інтерполяцію було побудовано поверхню значень коефіцієнта теплопровідності у діапазоні товщини вогнезахисних покриттів від 0.1 мм до 1 мм та температури від 0 до 1100 °C, що наведена на рис. 4.10.

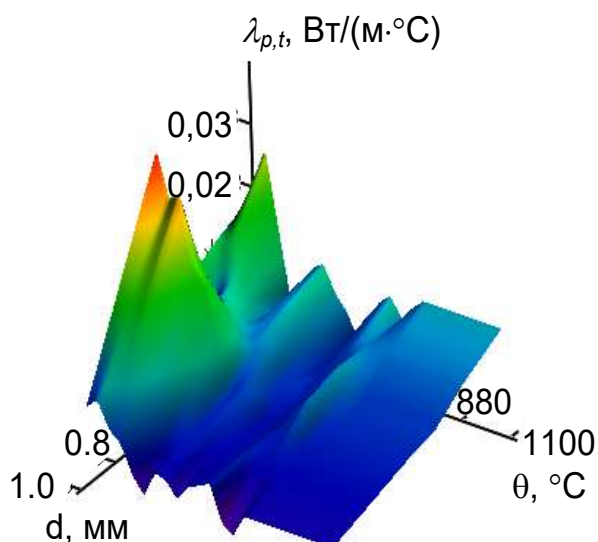


Рисунок 4.10 – Поверхня значень коефіцієнту теплопровідності від товщини вогнезахисного покриття (ліва горизонтальна вісь) та температури нагріву сталевого елемента конструкції (права горизонтальна вісь).

4.7. Результати розрахунку критеріїв прийнятності

Для оцінки адекватності (прийнятності) отриманих даних щодо коефіцієнта теплопровідності мають бути розраховані критерії адекватності згідно із ДСТУ EN 13501-2:2023. Температура нагрівання елемента сталеві конструкції розраховувалася за формулою (4.3) за умов стандартного температурного режиму пожежі (4.1). Результати розрахунку наведені у табл. 4.6. При розрахунках за умови невідповідності критеріям адекватності (прийнятності) у розрахунок вводився коефіцієнт безпеки для множення отриманих температур для забезпечення даних критеріїв. Отримані коефіцієнти безпеки потім використовуються для визначення відповідної товщини покриття для забезпечення необхідного класу вогнестійкості.

Таблиця 4.6

Критерії адекватності (прийнятності) отриманих значень коефіцієнту теплопровідності

№ зр.	Розб. досягн. значення норм. ряду температур, %								Середня розбіжн., %	Частка додатніх значень розб., %
	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C	750°C		
1	-8.621	-5.882	-3.846	-2.273	-1.02	-0.926	0.862	0	-2.713	12.5
2	-10	-7.317	-7.447	-5.769	-6.897	-7.813	-5.224	-5.479	-6.993	0
3	-25	-25	-22.222	-21.667	-23.529	-21.622	-22.619	-15.957	-22.202	0
4	-8.974	-7.609	-6.731	-6.034	-5.469	-4.348	-3.378	-0.633	-5.397	0
5	-17.391	-11.538	-11.667	-10.606	-9.722	-10	-6.977	0	-9.738	0
6	-12.791	-8.824	-6.897	-3.906	-3.521	-1.948	0	0.568	-4.665	0
7	-6.25	-3.571	0	-1.429	-2.564	0	-1.064	6	-1.11	12.5
8	0	-13.043	-8.974	-5.294	-3.226	-0.5	0.463	0	-3.822	12.5
9	-17.742	-11.429	-6.41	-2.326	-1.064	0	-0.893	0	-4.983	0
10	-8.163	-6.14	-3.125	-2.113	-1.282	-0.588	0	1.905	-2.438	12.5
11	-13.043	-9.259	-8.871	-7.246	-5.921	-4.268	-2.841	0	-6.431	0

Дані табл. 4.6 отримані при використанні коефіцієнту безпеки $K = 1.05$, на який помножуються температура, що отримана шляхом прямого розрахунку за формулою

(4.3). За таких умов критерії адекватності (прийнятності) ДСТУ EN 13501-2:2023 збігаються.

4.8. Результати розрахунку товщини вогнезахисного покриття для сталевих балок із проектними параметрами досліджуваного діапазону

Одержані експериментальні дані дозволяють зробити розрахунок регресійної залежності часу досягнення критичної температури за найбільш значущими параметрами у сталевих балках. Дана регресійна залежність має такий вигляд [145 – 147]:

$$t = a_0 + a_1 d_p + a_2 \frac{d_p}{A_p/V} + a_3 \theta_{SC} + a_4 d_p \theta_{SC} + a_5 d_p \frac{\theta_{SC}}{A_p/V} + a_6 \frac{\theta_{SC}}{A_p/V} + a_7 \frac{1}{A_p/V}, \quad (4.5)$$

де: $a_0, a_1, \dots, a_7$ – коефіцієнти регресії; d_p – товщина вогнезахисного покриття (м); θ_{SC} – критична температура елемента сталеві конструкції (°C), A_p / V – коефіцієнт перерізу (м⁻¹).

Формально, дана регресійна залежність є лінійною, оскільки всі фактори мають перший степінь [148]. Для побудування даної залежності потрібно скористатися відповідним алгоритмом, пов'язаним із побудуванням плану експерименту, який має вигляд матриці, наведеної у формі таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Матриця плану повного факторного експерименту для обґрунтування математичної моделі часу досягнення критичної температури у сталевих балках

№	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-

Продовження табл. 4.7

6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Тут x_1, x_2, x_3 – фактори, які відповідають параметрам відповідно d_p, θ_{SC} та A_p/V . Для зручності залежність (4.5) записується у вигляді:

$$t = a_0 + a_1 d_p + a_2 \theta_{SC} + a_3 \frac{1}{A_p/V} + a_4 d_p \theta_{SC} + a_5 \frac{d_p}{A_p/V} + a_6 \frac{\theta_{SC}}{A_p/V} + a_7 d_p \frac{\theta_{SC}}{A_p/V}. \quad (4.6)$$

Для побудування регресії маємо у широкому діапазоні варіювати фактори. Для цього використовуємо отримані залежності коефіцієнта теплопровідності і математичну модель (4.3). Діапазони варіювання факторів згідно із матрицею плану за табл. 4.7 наведені у табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Діапазони варіювання факторів у числовому експерименті
щодо вогнестійкості вогнезахисених сталевих балок

Товщина вогнезахисного покриття, d_p , мм			Критична температура, θ_{SC} , °C			Коефіцієнт перерізу, V/A_p , м ⁻¹		
Найменше значення, d_{p-1}	Середнє значення, d_{p0}	Найбільше значення, d_{p1}	Найменше значення, θ_{SC-1}	Середнє значення, θ_{SC0}	Найбільше значення, θ_{SC1}	Найменше значення, $(V/A_p)_{-1}$	Середнє значення, $(V/A_p)_0$	Найбільше значення, $(V/A_p)_{+1}$
0.2	1.1	2	350	525	700	80	290	500

Використовуючи дані табл. 4.8 при варіюванні факторів табл. 4.7 мають бути визначені шляхом проведення числового експерименту відповідні значення часу досягнення критичної температури з використанням отриманих залежностей

коефіцієнта теплопровідності, наведених у табл. 4.5 та математичної моделі (4.3). У таблиці 4.9 наведені відповідні отримані значення.

Таблиця 4.9

Експериментальні дані для обчислення коефіцієнтів регресійної залежності для визначення часу досягнення критичної температури нагріву вогнезахищених сталевих балок

Номер варіації згідно із табл. 4.7	1	2	3	4	5	6	7	8
Критична температура, θ_{SC} , °C	700	350	700	350	700	350	700	350
Товщина покриття, d_p , мм	2	2	0.2	0.2	2	2	0.2	0.2
Коефіцієнт перерізу, A_m/V , м ⁻¹	500	500	500	500	80	80	80	80
Час досягнення, t , хв	115	38	24	13	477	174	67	40

Використовуючи отримані результати, зведені до табл. 4.8, було розраховані коефіцієнти регресійної залежності (4.5) при застосуванні формул, значення яких зведено до табл. 4.10:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i ; b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i ; b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i ; \\
 b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i ; b_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i ; \\
 b_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i ; b_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i ; b_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i ,
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Де: $N = 8$ – кількість експериментальних ситуацій згідно із матрицею плану числового експерименту;

x_i – величини факторів згідно із матрицею плану табл. 4.7;

y_i – результати розрахунку часу досягнення критичної температури у сталевих балках згідно із табл. 4.9.

Таблиця 4.10

Коефіцієнти регресії для визначення часу досягнення критичної температури у сталевій балці

Коефіцієнти	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Кодовані	118.5	52.25	82.5	-71	42.75	-30.25	-53.5	-26.25
Реальні	-137.706	-104.444	0.553	-0.032	0.310	0.417	-0.0006	-0.0008

Використовуючи отриману регресійну залежність часу досягнення критичної температури у вогнезахищених сталевих балках залежно від товщини вогнезахисного покриття та температури нагріву сталевого елемента конструкції були побудовані відповідні поверхні, які показані на рисунку 4.11.

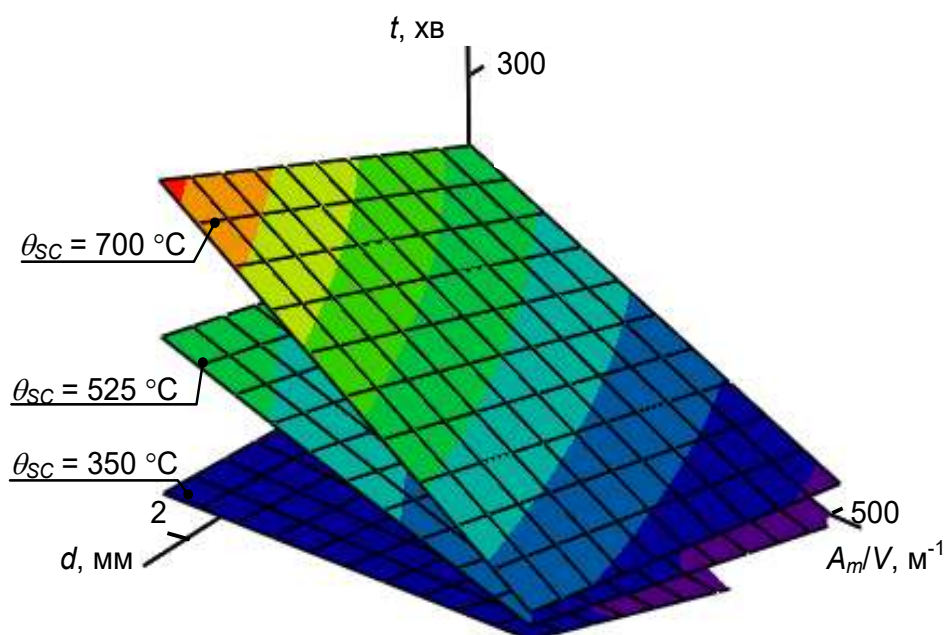


Рисунок 4.11 – Поверхня значень часу досягнення критичної температури у вогнезахищеній сталевій балці залежно від товщини вогнезахисного покриття (ліва горизонтальна вісь) та коефіцієнту перерізу (права горизонтальна вісь)

Також було побудовано відповідні криві залежності товщини вогнезахисного покриття від коефіцієнту перерізу сталеві балки для забезпечення різних класів її вогнестійкості і при досягненні критичних температур різної величини. Побудовані криві наведені на рисунку 4.12 – 4.14.

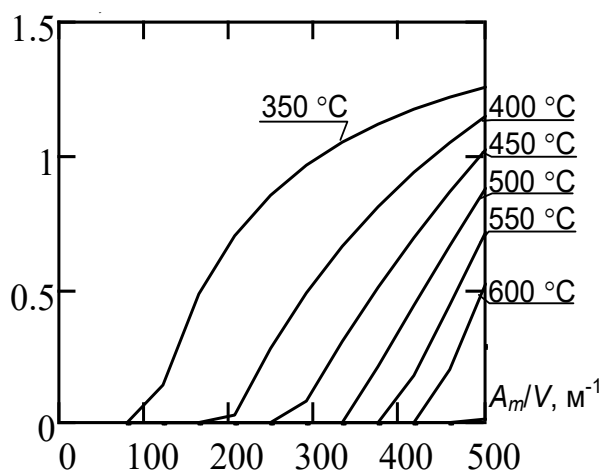


Рисунок 4.12 – Графіки залежності товщини вогнезахисного покриття від коефіцієнту перерізу сталеві балки для забезпечення класу вогнестійкості R 30

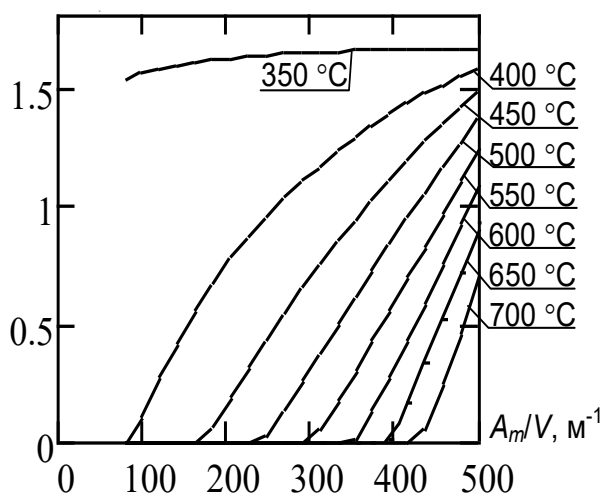


Рисунок 4.13 – Графіки залежності товщини вогнезахисного покриття від коефіцієнту перерізу сталеві балки для забезпечення класу вогнестійкості R 60

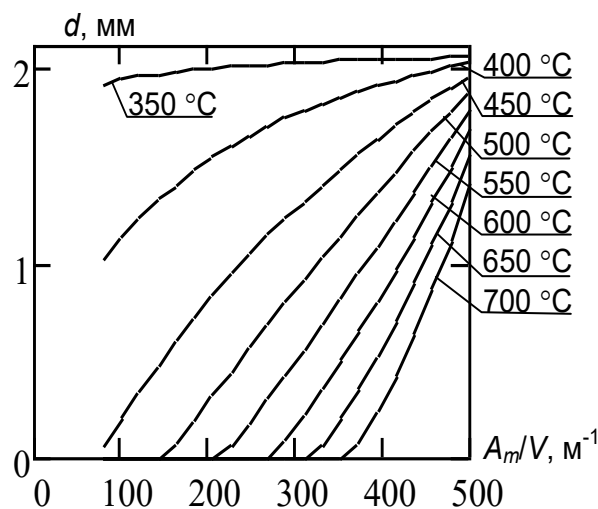


Рисунок 4.14 – Графіки залежності товщини вогнезахисного покриття від коефіцієнту перерізу сталеві балки для забезпечення класу вогнестійкості R 90

Отримана регресійна залежність може бути використана для створення відповідних таблиць, що дозволяють проектувати вогнезахисні системи для сталевих балок на основі запропонованого вогнезахисного покриття. Приклад наведено у формі таблиці 4.11. У технологічному регламенті нанесення складу вогнезахисного покриття на основі полісілоксану для сталевих будівельних конструкцій (дод. Г) представлено товщини вогнезахисного покриття, що забезпечують необхідний клас вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій (R15-R90).

Таблиця 4.11

Таблиця для визначення проектної товщини вогнезахисного покриття сталевих балок для класу вогнестійкості R 15

Приведена товщина, δ , мм	Коефіцієнт перерізу, $A_m \sqrt{V}$, m^{-1}	Проектна температура							
		350	400	450	500	550	600	650	700
12.5	80	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.901	101	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8.197	122	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.993	143	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.098	164	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5.405	185	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.854	206	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.405	227	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.032	248	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.717	269	0.548	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.448	290	0.625	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.215	311	0.691	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.012	332	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.833	353	0.802	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.674	374	0.849	0.543	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.532	395	0.891	0.619	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.404	416	0.93	0.689	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.288	437	0.965	0.755	0.533	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.183	458	0.996	0.817	0.622	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.088	479	1.025	0.875	0.707	0.52	0.5	0.5	0.5	0.5
2.000	500	1.052	0.929	0.789	0.629	0.5	0.5	0.5	0.5

За отриманими результатами здійснених експериментальних та теоретичних досліджень була проаналізована задача щодо виявлення закономірностей зміни коефіцієнта теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахисній сталевій балці залежно від товщини вогнезахисного покриття та температури нагріву балки. Отримані результати можуть слугувати основами для розрахункового метода оцінювання вогнестійкості.

4.9. Висновки за розділом

Виконано дослідження щодо виявлення закономірностей зміни коефіцієнта теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахисних сталевих конструкціях залежно від товщини вогнезахисного покриття та температури нагріву.

У ході досліджень було одержано такі основні результати:

- запропонована методика та виконані експериментальні дослідження вогнезахисної здатності реактивного вогнезахисного покриття на основі полісилоксану для сталевих конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі у діапазоні товщини покриття $0.3 \div 0.8$ мм та коефіцієнта перерізу сталевих конструкцій $125 \div 333 \text{ м}^{-1}$;

- показана адекватність отриманих експериментальних даних, оскільки найбільші відносні відхилення не перевищують 6 %.

- отримано та досліджено на основі експериментальних даних залежності коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому;

- виявлено, що значення коефіцієнта теплопровідності при сталих теплофізичних характеристиках, знаходяться у діапазоні $0.3 \div 0.00015 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;

- виявлено, що коефіцієнт теплопровідності на початку має більші значення, а потім при температурах більше 200 °C починає суттєво зменшуватися, що свідчить про ініціацію процесу спучування.

- показано, що отримані дані щодо коефіцієнта теплопровідності є адекватними, оскільки задовольняють стандартні критерії прийнятності;

- встановлена закономірність залежності часу досягнення критичної температури у вогнезахисних сталевих балках залежно від товщини вогнезахисного покриття (d_p), температури нагріву сталевих елементів конструкції (θ_{SC}) та коефіцієнту перерізу вогнезахисного сталевих елементів (A_m/V), у вигляді $t = -137.706 + 52.25 \cdot d_p + 0.417 \cdot d_p / (A_m/V) - 0.553 \theta_{SC} + 0.310 \cdot d_p \cdot \theta_{SC} - 8 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{SC} / (A_m/V) - 6 \cdot 10^{-4} \theta_{SC} / (A_m/V) - 0.032 / (A_m/V)$.

- обґрунтовано технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану і алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій, що представлено у вигляді таблиць підбору товщини вогнезахисного покриття для забезпечення класів вогнестійкості R 15 – R 90.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ БАЛОК СТАНДАРТНОГО ПРОФІЛЮ ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ ПРИ ВПЛИВІ ПОЖЕЖІ

Для дослідження адекватності отриманих результатів за запропонованими моделями, що описані у розділі 4, було виконано розрахунок температурних полів за допомогою загального розрахунково-теоретичного метода, заснованого на числовому розв'язку нестационарного диференціального рівняння теплопровідності.

Для цього використовується усталений інженерний підхід, заснований на таких основних положеннях:

1. Розрахунок проводиться для симетричної половини двотаврового перерізу сталеві балки;
2. Для розв'язку задачі теплопровідності використовується нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності при формулюванні крайової задачі на основі граничних умов III роду із комплексним врахуванням променистої та конвекційної складових теплообміну на обігрівних та необігрівних поверхнях;
3. Температурний режим у приміщенні із пожежею обчислюється за стандартним температурним режимом пожежі з використанням формули (4.1);
4. Теплофізичні характеристики сталі відповідають встановленим температурним залежностям, що рекомендуються Eurocode 3 EN 1993-1-2 [80, 138-141];
5. Нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності записується у дискретній формі за допомогою методу кінцевих різниць із застосуванням комп'ютерної системи MS Excel.

5.1. Математична модель теплопередачі у сталевих балках із вогнезахисними покриттями із стандартним двотавровим перерізом

Для дослідження температурних показників у перерізах сталевих балок із вогнезахисним покриттям за умови теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі було застосовано розрахунковий підхід, заснований на розв'язку

диференціального нестационарного рівняння теплопровідності, яке записується вигляді:

$$C_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\right) \quad (5.1)$$

де: θ – визначувана температура, °C;

t – час теплового впливу пожежі, с;

$\rho(\theta)$ – густина відповідного матеріалу, залежна від температури, кг/м³;

$C_p(\theta)$ – питома теплоємність відповідного матеріалу, залежна від температури, Дж/(кг·°C);

$\lambda(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності відповідного матеріалу, залежний від температури, Вт/(м·°C).

Розглядається як основний двотавровий переріз сталеві балки із трьохстороннім обігрівом. Схема даного перерізу показана на рисунках 5.1, 5.2.

Для розв'язку сформульованої крайової задачі використовуються граничні умови III роду:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial r} = \alpha(\theta_p - \theta_w), \quad (5.2)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·°C);

θ_p , θ_w – відповідно температури у приміщенні із пожежею і обігрівної поверхні балки, °C;

r – поточна просторова координата, м.

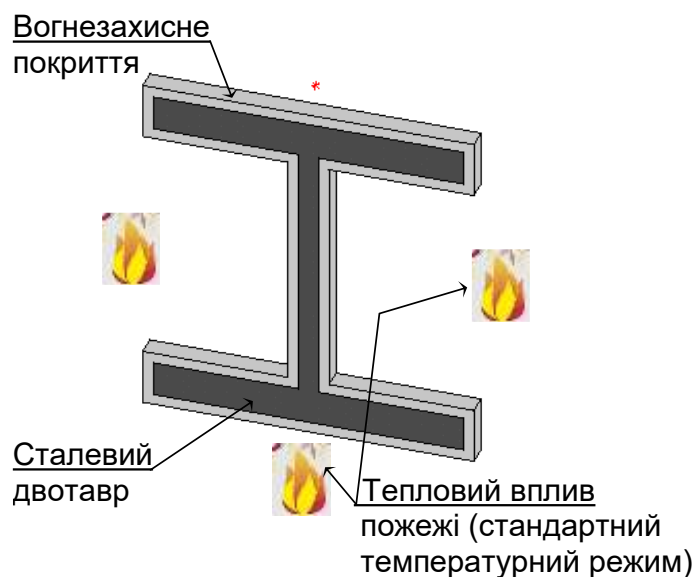


Рисунок 5.1 – Геометрична конфігурація будівельної конструкції для визначення температурних показників у профільному перерізі сталеві балки із вогнезахисним покриттям

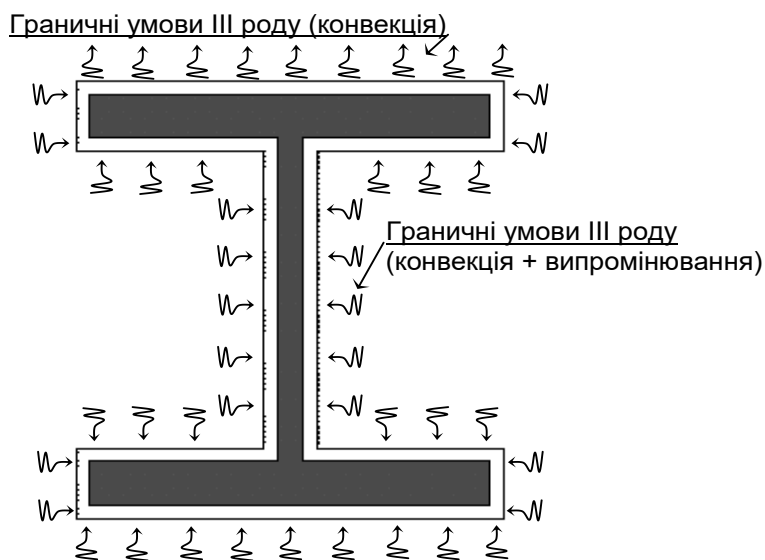


Рисунок 5.2 – Граничні умови до постановки крайової задачі щодо визначення температурних показників у профільному перерізі сталеві балки із вогнезахисним покриттям

Коефіцієнт теплообміну має враховувати умови конвекційного теплообміну та теплообміну за рахунок теплового випромінювання. У даному випадку він визначається за формулою:

$$\alpha = \alpha_B + \alpha_K \quad (5.3)$$

де: α_B – коефіцієнт теплообміну від випромінювання;

α_K – коефіцієнт теплообміну конвекцією.

Згідно з [151] складові конвективного і променистого теплообміну на обігрівній стороні можна визначити з формул:

$$\begin{aligned} \alpha_K &= 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \\ \alpha_B &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta_W^4 - \theta_P^4}{\theta_W - \theta_P}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

де:

$\varepsilon = 0,8$ – ступінь чорноти поверхні вогнезахисного покриття;

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4)$ – стала Стефана-Больцмана.

Початкова температура матеріалу сталевих балок та у просторі приміщення де розвивається пожежа, $\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Теплофізичні характеристики сталі приймаються за рекомендаціями [149].

Коефіцієнт теплопровідності сталі та її питома теплоємність визначаються температурними залежностями, що відповідають кривим, поданих на рисунках 5.3, 5.4.

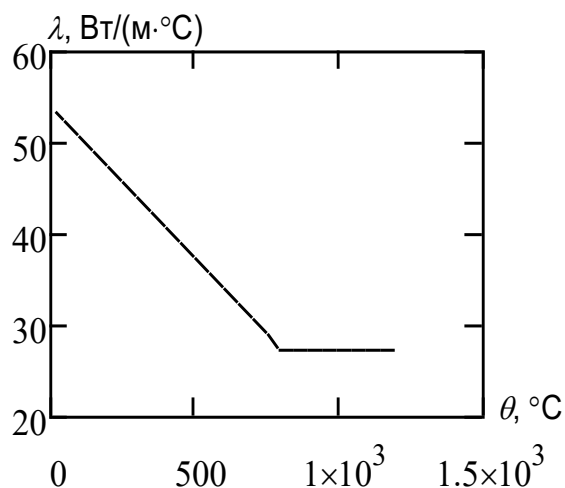


Рисунок 5.3 – Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності сталі

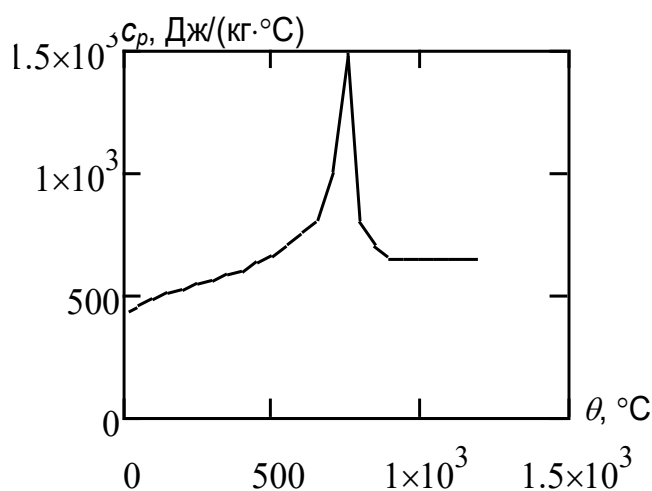


Рисунок 5.4 – Температурні залежності питомої теплоємності сталі

В таблиці 4.1 подані теплофізичні характеристики матеріалів необхідних для здійснення розрахунку.

5.2. Метод числового інтегрування диференціального нестационарного рівняння теплопровідності

Нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності (5.1) при встановлених теплофізичних характеристиках матеріалів сталевих балок із вогнезахистом, їх граничних умовах та встановленої геометричної конфігурації

перерізу може бути розв'язано тільки чисельними методами, оскільки аналітичних розв'язків при таких умовах не існує.

Щоб наблизити дане рівняння для реалізації алгебраїчних розрахунків має бути застосований один із чисельних методів [138 – 141]. У даній роботі при дослідженні температурних показників у двотаврових перерізах сталевих балок із вогнезахисним покриттям при використанні прийнятої математичної моделі теплопровідності запропоновано використовувати метод кінцевих різниць [150, 151]. Для застосування метода кінцевих різниць для розв'язку поставленої задачі теплопровідності на основі рівняння (5.1) використовується інтегро-інтерполяційний метод [141]. Вказаний метод дозволяє записати диференціальне нестационарне рівняння теплопровідності у лінеаризованому вигляді.

Представлення лівої частини диференціального нестационарного рівняння теплопровідності (5.1) за допомогою методу кінцевих різниць для певної вузлової точки має записаний нижче вигляд [141]:

$$C_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t}\Big|_{i,k} = C_p(\theta_{i,k})\rho(\theta_{i,k})\left(\frac{\theta_{i,k} + \theta_{i,k+1}}{2}\right) \cdot \frac{\theta_{i,k+1} - \theta_{i,k}}{\Delta t}. \quad (5.5)$$

Часткові похідні правої частини рівняння (5.1) з достатньою точністю $O(\Delta h^2 + \Delta t)$ виражаються кінцевими різницями за формулами [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\Big|_{i,k} &= a_x\theta_{i-1,k}^x - (a_x + b_x)\theta_{i,k} + b_x\theta_{i+1,k}^x, \\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)\Big|_{i,k} &= a_y\theta_{i-1,k}^y - (a_y + b_y)\theta_{i,k} + b_y\theta_{i+1,k}^y. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Коефіцієнти формул (5.6) залежні від коефіцієнта теплопровідності обчислюються на основі інтегро-інтерполяційного методу [141] за такими формулами:

$$a = \frac{\lambda(\theta_{i-1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i-1}) + \lambda(\theta_i))\Delta h^2}, \quad b = \frac{\lambda(\theta_{i+1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i+1}) + \lambda(\theta_i))\Delta h^2}. \quad (5.7)$$

Вирази (5.5) – (5.7) у комплексі дають змогу апроксимувати диференціальне нестационарне рівняння теплопровідності за допомогою методу кінцевих різниць. Апроксимоване таким чином рівняння теплопровідності записується у вигляді рекурентних формул у вузлах сітки, яка накладається на розрахункову область на $k+1$ -ому часовому кроці за попередньо обчисленими температурами на k -тому кроці за часом. Рекурентні формули записані у неявному вигляді і розв'язуються як нелінійні рівняння.

Розв'язок записаних таким чином нелінійних рівнянь виконується за методом половинної діхотомії, що здійснений з використанням алгоритму, наведеного в [141] при регуляризації можливих рішень за допомогою обмеження обґрунтовано реалістичною множиною допустимих температур нагрівання перерізу сталеві балки із вогнезахисним покриттям.

Граничні умови III роду для реалізації методу кінцевих різниць мають вигляд формули:

$$\frac{\lambda(\theta_{w_k})\lambda(\theta_{1,k})}{\lambda(\theta_{w_k}) + \lambda(\theta_{1,k})} \cdot \frac{\theta_{w_k} - \theta_{1,k}}{\Delta h} + \frac{\Delta h \cdot C_p(\theta_{i,k})\rho(\theta_{i,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (\theta_{1,k} - \theta_{1,k-1}) = \alpha_k (\theta_{1,k} - \theta_{p,k}) \quad (5.8)$$

де $\Delta h \sim 0.01 \div 0.005$ м – крок розбиття перерізу;

$\Delta t = 60$ с – часовий крок.

Часовий і просторовий кроки встановлюються з огляду на умову збіжності обчислювального процесу прийнятої кінцево-різницевої схеми. Також встановлення часового кроку за можливістю має враховувати, що він має бути рівним 1 хв., відповідно до проміжку часу, який є контрольним при здійсненні експериментальних випробувань.

Геометрична конфігурація розрахункової області повністю встановлюється розмірами двотаврового перерізу досліджуваної сталеві балки. Відповідно до рекомендацій європейських норм [152, 153] до профілів сталевих балок мають бути використані стандартні двотаврові перерізи, розміри яких показані у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Геометричні параметри двотаврових перерізів із вогнезахисним покриттям для визначення температурних показників

Двотавр згідно із: [152, 153]	Геометричні параметри перерізу двотавра						
	Висот a, h, мм	Ширина полки, b, мм	Товщина стілки, s, мм	Товщина полки, t, мм	Площа перерізу, A, см ²	Периметр обігр. пов. пер., p, м	Коефіцієн т перерізу, A _m /V, м ⁻¹
HE 200 A	190	200	6.5	10	53.8	0.987	183.457
HE 300 A	310	300	9.0	15.5	124.4	1.533	123.232
HE 400 A	390	300	11	19	159.0	1.696	106.667
IPE 200	220	110	5.9	9.2	28.48	0.777	272.683
IPE 300	270	135	6.6	15.0	45.95	0.962	209.314
IPE 400	400	180	8.6	13.5	84.46	1.35	159.815

Геометричні розміри двотаврових перерізів сталевих балок із вогнезахисним покриттям відповідають схемі, що наведена на рис. 5.5

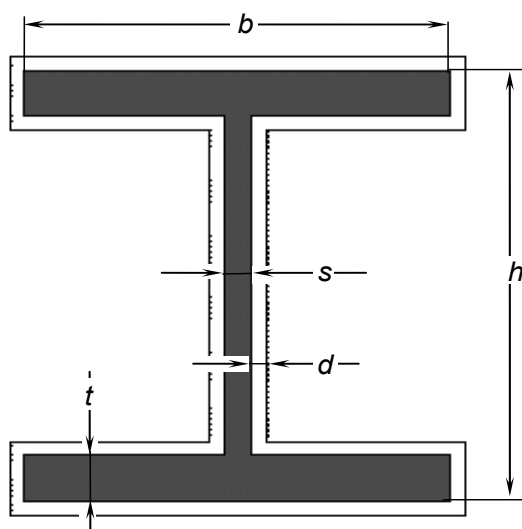


Рисунок 5.5 – Схема позначень геометричних розмірів двотаврового профілю перерізів сталевих балок із вогнезахисним шаром

Використовуючи дані, що наведені на рисунках 4.12 – 4.14, табл. 4.11 та дані табл. 5.1, були прийняті величини товщини вогнезахисного покриття. В таблиці 5.2 наведені дані щодо товщини вогнезахисного покриття.

Таблиця 5.2

Геометричні параметри двотаврових перерізів із вогнезахисним покриттям
для визначення температурних показників

Позначення двотавру згідно із: [152, 153]	HE 200 A	HE 300 A	HE 400 A	IPE 200	IPE 300	IPE 400
Коефіцієнт перерізу, A_m/V , м ⁻¹	183.457	123.232	106.667	272.683	209.314	159.815
Температура нагріву, $\theta_{кр}$, °C	450	400	400	450	450	400
Товщина вогнезахисного покриття, d_c , мм	0.2	0.3	0.16	0.6	0.2	0.56

Для реалізації метода кінцевих різниць цієї задачі були побудовані кінцево-різницеві схеми двотаврових профілів перерізів сталевих балок, визначених для дослідження разом з вогнезахисним покриттям. Побудовані схеми подані на рисунку 5.6, 5.7.

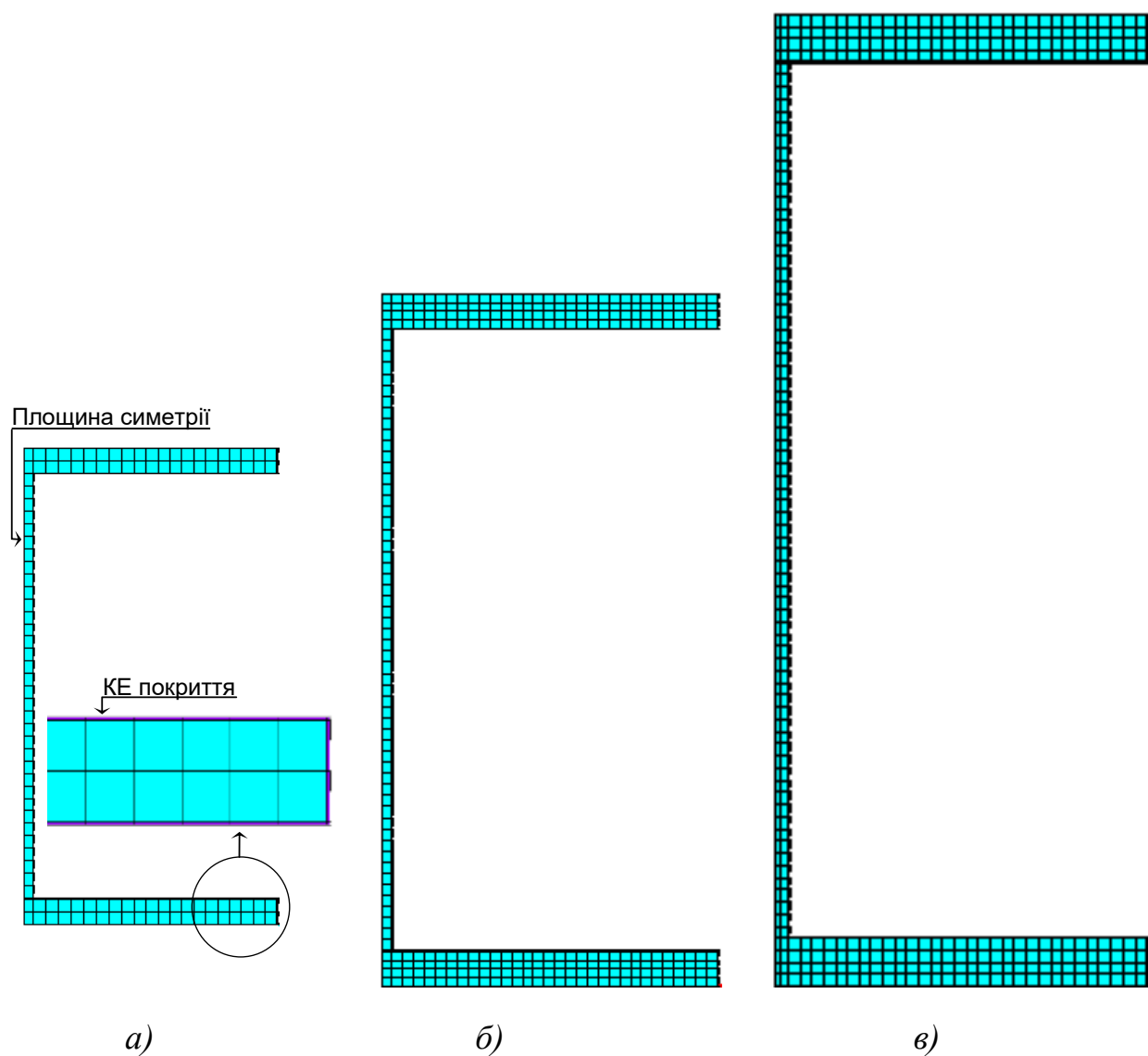


Рисунок 5.6 – Кінцево-різницеві схеми з врахуванням симетрії для досліджуваних профільних перерізів, де:

a – HE 200 A; *б* – HE 300 A; *в* – HE 400 A

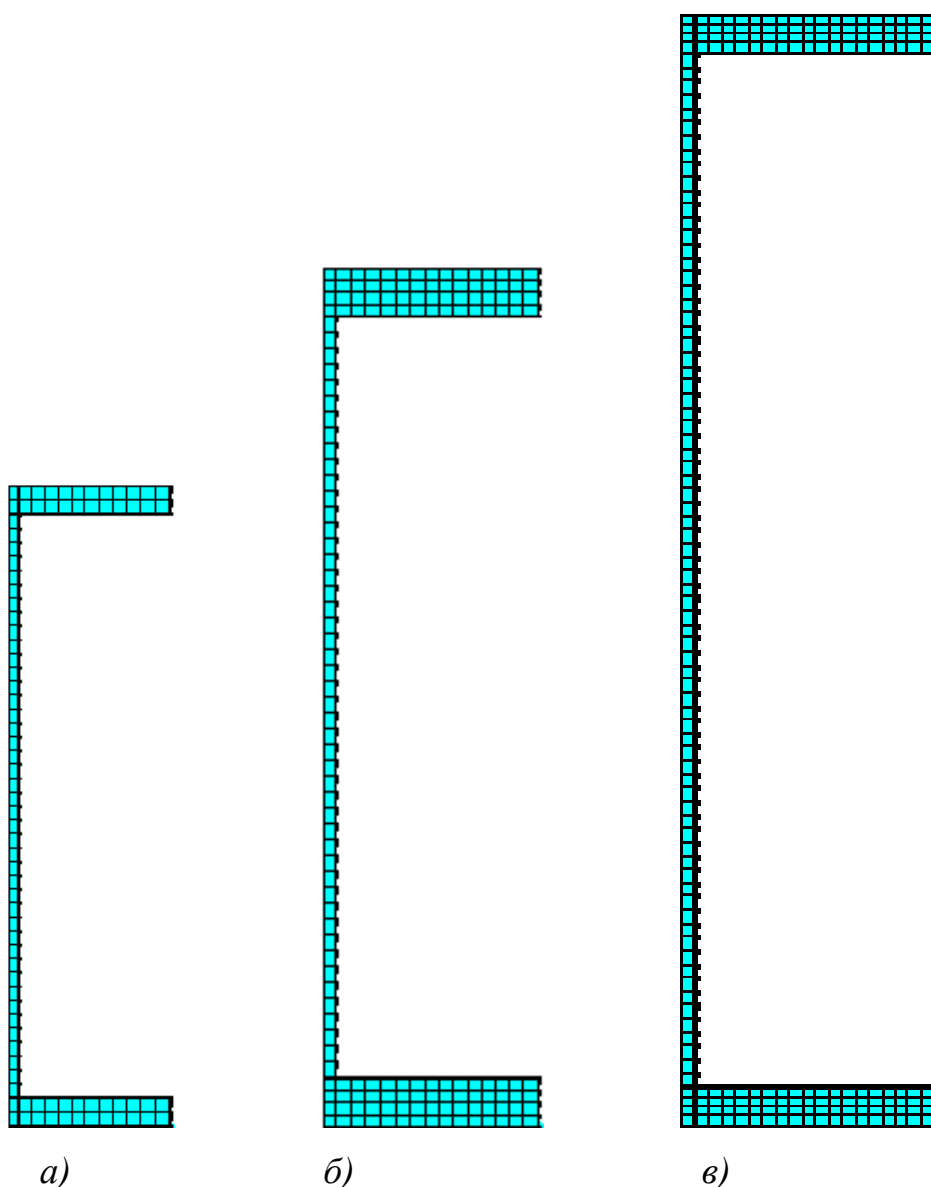


Рисунок 5.7 – Кінцево-різницькі схеми з врахуванням симетрії для досліджуваних профільних перерізів, де:

a - IPE 200; *б* - IPE 300; *в* - IPE 400

5.3. Результати розрахунків сталевих балок стандартного профілю із вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану

Під час проведення вогневих випробувань сталевих балок із вогнезахистом для оцінювання його вогнезахисної здатності без прикладення механічного навантаження відповідно до вимог діючого в Україні стандарту ДСТУ EN 13381-8:2022 [88] на двотавровому профілі фрагментів сталевих балок встановлюються температурні вимірювальні датчики у трьох контрольних положеннях – на стінці

двотаврового перерізу посередині між полками та на поверхні полк в серединній точці. Положення контрольних точок на двотавровому перерізі наведені на рисунку 5.8.

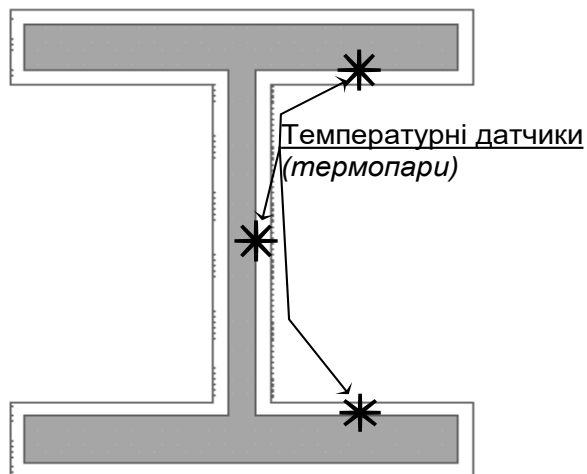


Рисунок 5.8 – Схема положень датчиків контролю температури для у профільному двотавровому перерізі зразків сталевих балок при їх стандартних вогневих випробуваннях із вогнезахисним покриттям.

Вимірюючи температуру за допомогою температурних датчиків (термопар), встановлених у вказаних на рис. 2.18 положеннях, встановлюється характеристична температура як середня величина показників даних термопар.

Температура в перерізах визначалася аналогічним чином. На рис. 5.9 – 5.14 показані графіки, за результатами розрахунків за спрощеною моделлю (4.3) і результатами, отриманими за числовим інтегруванням рівняння (5.1) для сталевих балок стандартного профілю згідно із: Euro norm 53-62 та Euro norm 19-57.

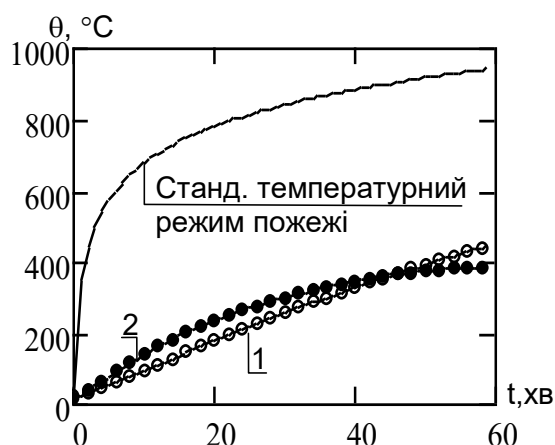


Рисунок 5.9 – Графіки зміни середнього значення температури у сталевій балці НЕ 200 А двотаврового перерізу за результатами розрахунку за спрощеною моделлю (1) та розрахунку за узагальненим підходом (2)

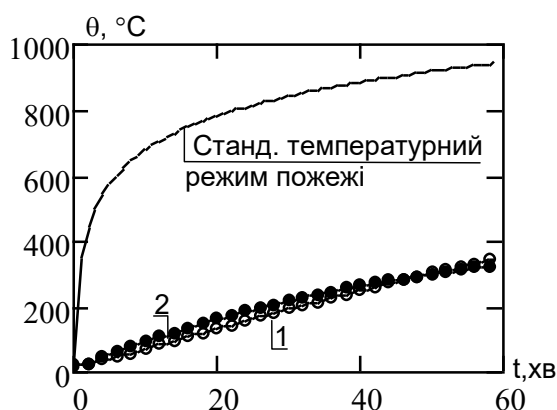


Рисунок 5.10 – Графіки зміни середнього значення температури у сталевій балці НЕ 300 А двотаврового перерізу за результатами розрахунку за спрощеною моделлю (1) та розрахунку за узагальненим підходом (2)

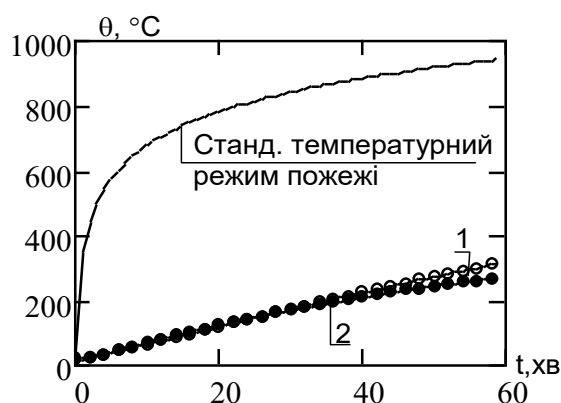


Рисунок 5.11 – Графіки зміни середнього значення температури у сталевій балці НЕ 400 А двотаврового перерізу за результатами розрахунку за спрощеною моделлю (1) та розрахунку за узагальненим підходом (2)

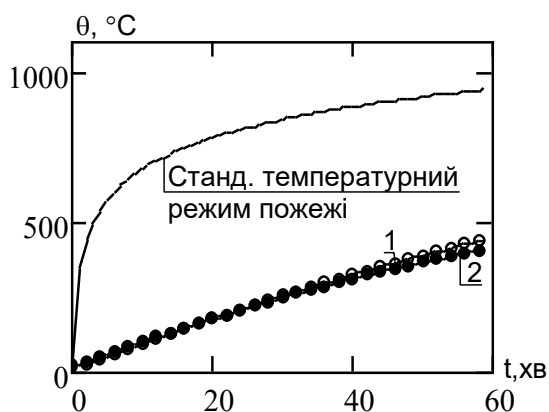


Рисунок 5.12 – Графіки зміни середнього значення температури у сталевій балці IPE 200 двотаврового перерізу за результатами розрахунку за спрощеною моделлю (1) та розрахунку за узагальненим підходом (2)

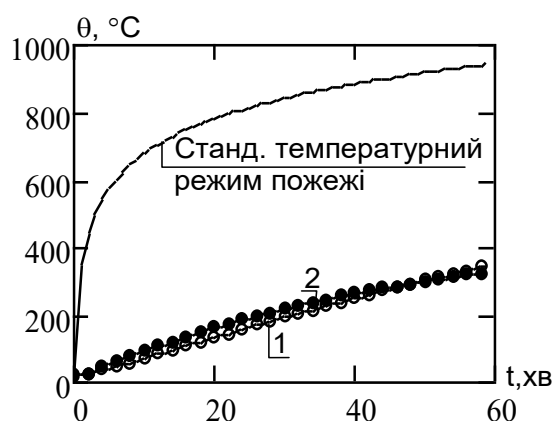


Рисунок 5.13 – Графіки зміни середнього значення температури у сталевій балці IPE 300 двотаврового перерізу за результатами розрахунку за спрощеною моделлю (1) та розрахунку за узагальненим підходом (2)

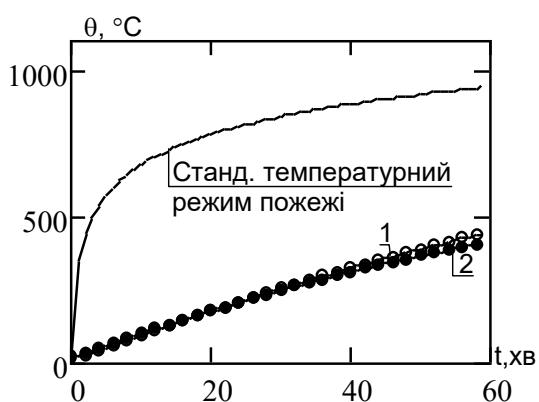


Рисунок 5.14 – Графіки зміни середнього значення температури у сталевій балці IPE 300 двотаврового перерізу за результатами розрахунку за спрощеною моделлю (1) та розрахунку за узагальненим підходом (2)

Аналіз графіків на рисунках 5.9 – 5.14 показує добру збіжність результатів, це підтверджує їх адекватність. Для більш детального аналізу адекватності результатів були визначені статистичні показники – середня відносна похибка та середньоквадратичне відхилення. У табл. 5.3 наведені результати аналізу.

Таблиця 5.3

Статистичні показники: середня відносна похибка та середньоквадратичне відхилення						
Позначення двотавру згідно із: [152, 153]	HE 200 A	HE 300 A	HE 400 A	IPE 200	IPE 300	IPE 400
Середня відносна похибка, δ , %	17.2	11.7	7.8	5.5	10.7	6.5
Середньо-квадратичне відхилення, q_m , °C	39.75	19.3	17.51	14.5	32.4	17.6

Згідно із отриманими результатами розрахунку за спрощеною моделлю та розрахунком за узагальненим підходом, було визначено, що середня відносна похибка складає 9.9 % а середньоквадратичне відхилення складає 23.51 °C. Дані статистичні показники свідчать про прийнятну адекватність отриманих розрахункових даних, які також мають кореляцію із даними, що наведені у табл. 4.11.

5.4. Висновки за розділом

Методом числового інтегрування диференціального нестационарного рівняння теплопровідності виконано теоретичне дослідження температурних показників у перерізах сталевих балок стандартного профілю із вогнезахисним покриттям на основі полісілоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому.

Використовуючи узагальнений теоретичний підхід на основі числового розв'язку нестационарного диференціального рівняння теплопровідності методом

кінцевих різниць було визначено середнє значення температури у сталевих балках стандартного двотаврового перерізу.

Шляхом порівняльного аналізу було показано прийнятність отриманих результатів розрахунків за визначеними характеристиками. Середня відносна похибка складає 9.9 % а середньоквадратичне відхилення складає 23.51 °С, що у свою чергу вказує на прийнятну адекватність отриманих розрахункових даних та підтверджує обґрунтовані технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану і алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій при підборі товщини вогнезахисного покриття для забезпечення класів вогнестійкості R 15 – R 90.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеною науковою працею, представлено розв'язання актуального наукового-технічного завдання розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану на межі їх вогнестійкості як наукового підґрунтя формування та обґрунтування технічних параметрів вогнезахисного покриття для стандартних профілів сталевих конструкцій. При цьому отримано наукові та практичні результати, які наведено нижче.

1. За результатами аналізу способів та засобів підвищення межі вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій шляхом їх вогнезахисту висунуто ідею, що для прогнозування вогнестійкості стандартних профілів сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану необхідно дослідити вплив конструктивних параметрів сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану та значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевих балок.

2. Розроблено склад рецептури вогнезахисного покриття та встановлено співвідношення компонентів композиції вогнезахисної композиції для покриття, яке включає полісилоксан і алюмінію оксид, додатково містить титан (IV) і хром (III) оксиди, як полісилоксан містить поліметилфенілсилоксановий лак:

- поліметилфенілсилоксановий лак (за сухим залишком) - 30-40 % мас;
- алюміній (III) оксид - 30-40 % мас;
- титан (IV) оксид - 10-20 % мас;
- хром (III) оксид - 10-20 % мас.

3. Встановлено, що об'ємний та лінійний коефіцієнт спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для сталевих будівельних конструкцій складає 10442,75 мм³/г та 38 відповідно. Експериментально досліджено залежність товщини спучення вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому від товщини нанесеного шару. Найбільш ефективною товщиною

сухого шару покриття є значення 0,61 мм, при якому товщина спучення буде становити 24,6 мм. При подальшому збільшенні товщини нанесення покриття, при нагріванні, в заданих умовах проведення випробувань, воно розтріскується, стікає, а товщина спучення зменшується.

4. Досліджено закономірності часу прогріву до критичної температури квадратних сталевих пластин (зі стороною (500 ± 5) мм залежно від товщини покриття на основі полісилоксану (0,3 мм, 0,45 мм, 0,6 мм, 0,8 мм) та товщини сталевий пластини (3 мм, 5 мм, 8 мм). Результати прогріву дослідних зразків сталевий пластини товщиною 3 мм, показують, що критична температура з необігрівної поверхні була досягнута при товщині вогнезахисного покриття 0,3 мм – на 23 хв, при товщині покриття 0,45 мм – на 34 хв, при товщині покриття 0,6 мм – на 46 хв. При товщині покриття 0,8 мм середня температура прогріву сталевий пластини товщиною 3 мм на 48 хвилину становила 284°C , що значно нижче критичної. Експериментальні дослідження прогріву дослідних зразків сталевих пластин свідчать про те, що товщина пластини не суттєво впливає на час досягнення критичної температури на необігрівній поверхні. Так, при збільшенні товщини пластини від 3 мм до 8 мм при однакових значеннях товщини вогнезахисного покриття час досягнення критичної температури збільшується орієнтовно на 1 хв.

5. Виявлено закономірності зміни коефіцієнта теплопровідності та часу досягнення критичної температури у вогнезахисних сталевих конструкціях залежно від товщини вогнезахисного покриття та температури нагріву. Встановлена закономірність залежності часу досягнення критичної температури у вогнезахисних сталевих балках залежно від товщини вогнезахисного покриття на основі полісилоксану (d_p), температури нагріву сталевий елемент конструкції (θ_{SC}) та коефіцієнту перерізу вогнезахисного сталевий елементу (A_m/V), у вигляді $t = -137.706 + 52.25 \cdot d_p + 0.417 \cdot d_p / (A_m/V) - 0.553 \theta_{SC} + 0.310 \cdot d_p \cdot \theta_{SC} - 8 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{SC} / (A_m/V) - 6 \cdot 10^{-4} \theta_{SC} / (A_m/V) - 0.032 / (A_m/V)$.

6. На підставі експериментальних та теоретичних досліджень обґрунтовано технічні параметри вогнезахисного покриття на основі полісилоксану і алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих

балок, що представлено у вигляді технологічного регламенту нанесення складу вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій з відповідними таблицями підбору товщини вогнезахисного покриття для забезпечення класів вогнестійкості R 15 – R 90.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила з вогнезахисту : НАПБ Б.01.012-2019 [Чинний від 05.04.2019] Київ: Міністерство внутрішніх справ України, 2018.
2. Вахітова Л.Н., Калафат К.В. Основи вогнезахисту сталевих конструкцій // Промислове будівництво та інженерні споруди. 2015. № 2. С. 23–27.
3. Katarzyna Mróz, Izabela Hager, Kinga Korniejenko. Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing // Procedia Engineering. 2016. Volume 151. pp. 284–291.
4. ETAG № 018-1:2004. Guideline for european technical approval of fire protective products. Part 1: General.
5. Веселівський Р.Б., Смоляк Д.В. Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. Пожежна безпека. 2021. № 39. С. 63–76
6. ETAG № 018-2:2013. Guide for the European technical approval of fire protective products. Part 2: Reactive coatings for fire protection of steel elements.
7. ETAG № 018-3:2013. Guide for the European technical approval of fire protective products – Part 3: Renderings and rendering kits intended for fire resisting applications.
8. ETAG № 018-4:2011. Guideline for european technical approval of fire protective products. Part 4: Fire protective board, slab and mat products and kits.
9. Вахітова Л.Н., Калафат К.В. Вогнезахист сталевих конструкцій: метод. рекомендації, Київ. 2013. 150 с.
10. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review // Journal of Constructional Steel Research. 2019. №162. – pp.105712.
11. Цвіркун С.В., Григор'ян Б.Б., Рудешко І.В. Визначення критичної температури стиснутих сталевих конструкцій підземних споруд // Пожежна безпека. 2016. №29. С. 154–162.
12. Шналь Т.М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій: навч. посібник. Львів, 2010. 176 с.

13. Український центр сталевих будівництва. Рекомендації щодо вибору вогнезахисту : офіц. сайт. URL: <https://uscc.ua/vognenezahyst-stalevyh-konstruktsiy>.
14. Калафат К., Вахітова Л. Каталог засобів вогнезахисту сталевих конструкцій 2017. Метінвест. 2017. 91 с.
15. Настанова з виконання робіт із застосуванням сухих будівельних сумішей : ДСТУ-Н Б В.2.6-212:2016 [Чинний від 01.04.2017]. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016.
16. Tekto hellas : офіц. сайт. URL: <https://www.tekto.gr/en/product/35-protherm-light>.
17. Boris A.P., Polovko A.P., Veselivskii R.B. Badanie eksperymentalne powlok ogniochronnych konstrukcji metalowych. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. 2014. № 35. С. 123–128.
18. Борсук О. В. Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 / Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2021. 170 с.
19. Sami Ullah, Faiz Ahmad, Abdullah G. Al-Sehemi, Mohammed Ali Assiri, Muhammad Rafi Raza, Ahmad Irfan. (2020). Effect of expandable graphite and ammonium polyphosphate on the thermal degradation and weathering of intumescent fire-retardant coating. Journal of Applied Polymer Science (IF3.125). DOI: 10.1002/app.50310.
20. Qandeel Fatima Gillani, Faiz Ahmad, Mohamed Ibrahim Abdul Mutalib, Puteri Sri Melor, Sami Ullah, Adiat Arogundade. (2016). Effect of Dolomite Clay on Thermal Performance and Char Morphology of Expandable Graphite Based Intumescent Fire Retardant Coatings. Procedia Engineering. 148. 146-150. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.505.
21. ASTM E119. Fire Tests of Building Construction and Materials [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.nationalfiber.com/docs/Omega%20Point%20Lab%20Fire%20Blocking%20Test.pdf>.

22. Muhammad Yasir, Faiz Ahmad, Puteri S.M. Megat-Yusoff, Sami Ullah, Maude Jimenez. (2019). Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surface Engineering*. 36. 1-30. DOI: 10.1080/02670844.2019.1636536.
23. Maria Zielecka, Anna Rabajczyk, Krzysztof Cygańczuk, Łukasz Pastuszka, Leszek Jurecki. (2020). Silicone Resin-Based Intumescent Paints. *Materials* 13(21):4785. DOI: 10.3390/ma13214785.
24. Sami Ullah, Faiz Ahmad, Anildav Singh. (2014). Development and Testing of Intumescent Fire Retardant Coating on Various Structural Geometries. *Applied Mechanics and Materials*. 699:360-365. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.699.360.
25. Puri R. G., Khanna A. S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017. № 14. P. 1-20.
26. Vakhitova, L., Kalafat, K., Plavan, V., Bessarabov, V., Taran N., & Zagoriy, G. (2021). Comparing the effect of nanoclays on the water-resistance of intumescent fire-retardant coatings . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6 (111), 59–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232822>.
27. Chuang, C.-S., Sheen, H.-J. (2019). Effects of added nanoclay for styrene-acrylic resin on intumescent fire retardancy and CO/CO₂ emission. *Journal of Coatings Technology and Research*, 17 (1), 115–125. doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00246-x>.
28. Pimenta, J. T., Gonçalves, C., Hiliou, L., Coelho, J. F. J., Magalhães, F. D. (2015). Effect of binder on performance of intumescent coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13 (2), 227–238. doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9737-5>.
29. Geoffroy L, Samyn F, Jimenez M, Bourbigot S. Intumescent Polymer Metal Laminates for Fire Protection. *Polymers*. 2018; 10(9):995. <https://doi.org/10.3390/polym10090995>.
30. Zhan, W., Chen, L., Cui, F., Gu, Z., & Jiang, J. (2020). Effects of carbon materials on fire protection and smoke suppression of waterborne intumescent coating. *Progress in Organic Coatings*. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.105491.

31. Ning Lu, Pengchao Zhang, Ya'nan Wu, Danqing Zhu, and Zhu Pan (2019). Effects of Size of Zinc Borate on the Flame Retardant Properties of Intumescent Coatings. *International Journal of Polymer Science*. 2019(016): 1-15. DOI: 10.1155/2019/2424531.
32. Гивлюд М. М., Артеменко В. В., Яковчук Р. С., Веселівський Р. Б. Вогнезахисні речовини на основі наповнених силіційелементоорганічних зв'язок для металевих конструкцій. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. № 26.1. С. 217–222.
33. 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>.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Калафат К.В., Таран Н.А., Плаван В.П., Вахітова Л.М. Термодеструкція нанокомпозитів полімер-наноглина 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.

41. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.005>.

42. Alongi Jenny, Zhidong Han, Serge Bourbigot. Intumescence: tradition versus novelty. A comprehensive review // *Progress in Polymer Science*. 2015. № 51. pp. 28–73..

43. Шологон В.І., Вахітов Р.А., Калафат К.В., Бессарабов В.І., Вахітова Л.М. Наносполуки для підвищення вогнезахисної ефективності епоксидних інтумесцентних систем // *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво* : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції, м. Шостка, 23–25 листопада 2022 р. Суми: Сумський державний університет. 2022. С.117–121.

44. Mariappan Thirumal. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review // *Journal of fire sciences*. 2006. № 34.2. pp. 120–163.

45. Lucherini A. Fundamentals of thin intumescent coatings for the design of fire-safe structures. Queensland, 2020. 261 p.

46. Gupta S.C., Shivhare A., Singh D., Gupta S. Melamine polyimide composite fire resistant intumescent coatings // *Defence Science Journal*. 2013. № 63(4). pp. 442–446.

47. Андрющенко Л.А., Борисенко В.Г., Кудін О.М., Горнескуль М.М. Інтумесцентні вогнезахисні покриття у сучасному будівництві (огляд) // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2019. № 1(29). С. 121–138.

48. Canosa G., Alfieri P.V., Giudice C.A. (2011). Hybrid intumescent coatings for wood protection against fire action // *Industrial & engineering chemistry research*. 2011. № 50(21). pp. 11897–11905.

49. Green J., Tracton A. Fire-retardant/fire-resistive coatings. Boca Raton, FL, 2005. pp. 773–778.
50. Hu Y., Yu B., Song L. Novel fire-retardant coatings // Novel fire retardant polymers and composite materials. 2017. pp. 53–91.
51. Афанасенко К.А., Білим П.А., Михайлюк А.П. Зниження показників пожежної небезпеки полімерних композиційних матеріалів шляхом застосування зв'язувальних, схильних до карбонізації // Проблеми пожежної безпеки. 2013. №34. С. 12–17.
52. Tokhtamuratov D.M., Sirojiddinov A.B., Bahabov B.V., Muslimov B.A. The Application Of Intumescent Compounds As A Means Of Providing Fire Protection Of Building Materials // The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research. 2021. № 3(01). pp. 19–24.
53. Lorenza Carabba, Raffaella Moricone, Giordano Emrys Scarponi, Alessandro Tugnoli, Maria Chiara Bignozzi, Alkali activated lightweight mortars for passive fire protection: A preliminary study, Construction and Building Materials, Volume 195, 2019, Pages 75-84, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.005>.
54. Andrius Kielė, Danutė Vaičiukynienė, Gintautas tamošaitis, Rėda Bistrickaitė. (2020). Thermal Properties of Alkali Activated Slag Plaster for Wooden Structures. Scientific Reports. 10(1):726. DOI: 10.1038/s41598-020-57515-8.
55. Gravit M. V., Golub E. V., Antonov S. P. (2018) Fire protective dry plaster composition for structures in hydrocarbon fire. Magazine of Civil Engineering 79 (3) pp. 86-94. DOI: 10.18720/MCE.79.9.
56. Новак С. В., Дріжд В. Л., Добростан О. В. Оцінювання відповідності штукатурок для вогнезахисту будівельних конструкцій на сталевій основі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2020. № 2(10). С. 39–53.
57. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications (Штукатурки і комплекти, до складу яких вони входять, для забезпечення вогнестійкості).

58. Jochen Zehfuß, Lisa Sander. (2021). Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. Civil Engineering Design Volume 3, Issue 3 p. 62-72. <https://doi.org/10.1002/cend.202100002>.
59. Seul-Hyun Park, Samuel L. Manzello, Dale P. Bentz, Tensei Mizukami. (2009). Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures. Fire and Materials Volume 34, Issue 5 p. 237-250. <https://doi.org/10.1002/fam.1017>.
60. Rusthi Ibralebbe, Poologanathan Keerthan, Anthony Ariyanayagam, Mahen Mahendran. (2015). Numerical Studies of Gypsum Plasterboard and MgO Board Lined LSF Walls Exposed to Fire. Conference: Second International Conference on Performance-based Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015) At: Brisbane Convection & Exhibition Centre, Brisbane, Australia. DOI: 10.14264/uql.2016.544.
61. Prakash Kolarkar, Mahen Mahendran. (2014). Experimental studies of gypsum plasterboards and composite panels under fire conditions. Fire and Materials. 38(1) p. 13-35. DOI: 10.1002/fam.2155.
62. Веселівський Р. Б., Яковчук Р. С., Василенко О.О., Семенюк П. В. Експериментальне дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій з гіпсокартонними плитами. Пожежна безпека. 2015. № 27. С. 26–32.
63. Вплив захисного покриття на міцнісні характеристики алюмінієвих сплавів при нагріванні / Гивлюд М. М., Ємченко І.В., Башинський О.І., Вовк С.Я. // Збірник наукових праць «Пожежна безпека», №21, Львів – 2012. – С. 59-64..
64. Підвищення ефективності вогнезахисту будівельних конструкцій з алюмінієвих сплавів покриттями на основі наповненого поліметилфенілсилоксану / М. М. Гивлюд, Ю. В. Гуцуляк, С. Я. Вовк, В. В. Корнійчук // Пожежна безпека. - 2012. - № 20. - С. 43-47..
65. Температуро-вогнезахисне покриття. Пат №66851 Україна, МПК (2011.01) C09K 21/00 / Гивлюд М. М., Вовк С. Я., Гуцуляк Ю. В., Башинський О. І. заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – опубліковано 25.01.2012. бюлетень №2.
66. Вовк С.Я. Підвищення вогнестійкості конструкцій з алюмінієвих сплавів. Пожежна безпека, 26, 26-30.

67. Вогнезахисна здатність наповнених силіційорганічних покриттів для бетону / Р.С. Яковчук, Р.В. Пархоменко, М.М. Гивлюд, Н.П. Сташко // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, УкрНДІПБ МНС України, 2013. – № 22. – С. 222 - 226.

68. Гивлюд М.М. Визначення компонентного складу та технологічного режиму нанесення атмосферостійких захисних покриттів для бетону / М.М. Гивлюд, Н.П. Холод, Р.С. Яковчук // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій (за заг. ред. Й.Й. Лучка): Зб. наук. праць. – Львів: Каменярь, 2012. – Вип. № 9. – С. 208 - 214.

69. Яковчук Р.С. Методика оцінювання тріщиностійкості бетону після впливу високих температур / Р.С. Яковчук // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, УкрНДІПБ МНС України, 2011. – №18. – С. 170 - 177.

70. Пат. 79962 України. МПК(2013.01) C09D 5/00. Температуровогнезахисне покриття / Яковчук Р.С., Пархоменко Р.В., Гивлюд М. М., Демидчук Л.Б. заявник Львівський державний університет безпеки життєдіяльності МНС України. - № u201212387; заяв. 29.10.12; опубл. 13.05.13, Бюл. № 19.

71. Пат. 53515 України. МПК(2009) C09D 5/18. Композиція для вогнестійкого покриття / Лоїк В. Б., Гивлюд М. М., Ємченко І. В. заявник Львівський державний університет безпеки життєдіяльності МНС України. - № u201003920; заяв. 06.04.10; опубл. 11.10.10, Бюл. № 19.

72. Пат. 39860 України. МПК(2009) C09K 21/00; E04B 1/94. Композиція для жаро- і вогнестійкого захисного покриття / Лоїк В.Б., Гивлюд М.М., Гуцуляк Ю. В., Юзьків Т. Б., Ємченко І. В., Передрій О. І. заявник Львівський державний університет безпеки життєдіяльності МНС України. – № u200813207; заяв. 14.11.08; опубл. 10.03.09, Бюл. № 5;.

73. Лоїк В. Б. Вогнезахисні покриття на основі наповнених оксидними компонентами силіційорганічних сполук / В. Б. Лоїк, М. М. Гивлюд, С. Я. Вовк // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Л., 2009. – №14. – С. 44-49.

74. Лоїк В. Б. Вогнетривкість та температуростійкість захисні покриття на основі наповнених полісилоксанів / В. Б. Лоїк, М. М. Гивлюд // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Л., 2009. – №15. – С. 31-36.

75. Лоїк В. Б. Температуростійкі покриття на основі наповнених силіційелементорганічних зв'язок / В. Б. Лоїк, М. М. Гивлюд, О. В. Хлевной, Д. Л. Дубина // УкрНДІПБ: наук. віс. – К., 2008. – №2(18). – С. 60-65.

76. Лоїк В. Б. Вогнезахисні покриття на основі наповнених карборансилоксанів / В. Б. Лоїк, М. М. Гивлюд, С. Я. Вовк // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. – Д., 2008. – Вып. 52. – С. 60-65.

77. Композиція для вогнетривкого покриття: пат. 24792 Україна: C09D 5/18. № u 2007 03305; заявл. 27.03.2007; опубл. 10.07.2007, Бюл. №10.

78. Givlyud M.M., Demidchuk L.B., Smolyak D.V. Silicium organic coatings for thermal and fireprotection of reinforced concrete. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2014. № 781. С. 46–49.

79. Смоляк Д.В. Вплив поверхневого захисного покриття на вогнестійкість залізобетонних конструкцій. Пожежна безпека. 2015. № 27. С. 121–126.

80. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість : ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 (EN 1993-1-2:2005, IDT) [Чинний від 01-07-2013]. Київ: ДП НДІБК, 2010.

81. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3. Практичний посібник до ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 / Український Центр Сталевого Будівництва. – Київ, 2016. 81 с.

82. Єврокод. Основи проектування конструкцій : ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 (EN 1990:2002, IDT) [Чинний від 01-07-2013]. Київ: Технічний комітет з стандартизації «Арматура для залізобетонних конструкцій», 2008.

83. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі : ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 (EN 1991-1-2:2002, IDT) [Чинний від 01-07-2013]. Київ: ДП НДІБК, 2010.

84. EN 13381-1:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 1 : Horizontal protective membranes.

85. EN 13381-2:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 2: Vertical protective membranes.

86. EN 13381-4:2013 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 4: Applied protection to steel members.

87. Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 4. Пасивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій : ДСТУ EN 13381-4:2022 (EN 13381-4:2013, IDT) [Чинний від 01-06-2023]. Київ: ТК 25, 2022.

88. Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій : ДСТУ EN 13381-8:2022 (EN 13381-8:2013, IDT) [Чинний від 01-06-2023]. Київ: ТК 25, 2022.

89. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members (2013). European Committee for Standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000. Brussels.

90. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги : ДСТУ EN 1363-1:2023 (EN 1363-1:2020, IDT) [Чинний від 01-03-2024]. Київ: ТК 25, 2023.

91. Федченко С. М. Удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів : дис. ... доктора філософії: 261 / Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2023. 198 с.

92. А.І. Ковальов. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі / А.І. Ковальов, Н.В. Зобенко // Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. - 2016. - № 1(1). - С. 59-65.

93. С.В. Новак. Обґрунтування параметрів зразків для експериментального визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах

вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі / С.В. Новак // Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. - 2016. - № 2(2). - С. 18-24.

94. А.І. Ковальов. Оцінювання вогнезахисної здатності новостворених вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій / А.І. Ковальов, Ю.А. Отрош, В.І. Томенко, О.Б. Васильєв // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. - 2021. - № 85. - С. 79-88. – DOI: 10.31650/2415-377X-2021-85-79-88.

95. Kovalov A. I., Otrosh Y. A., Vedula S., Danilin O. M., Kovalevska T. M. Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho* <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/9>. Universytetu. 2019. Vol. 3. P. 46–53.

96. Kovalov A., Otrosh Y., Chernenko O., Zhuravskij M., Anszczak M. Modeling of nonstationary heating of steel plates with fire-protective coatings in ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038 MSF. P. 514–523.

97. Donatella de Silva, Margherita Autiero, Antonio Bilotta, Emidio Nigro. (2023). Experimental investigation on galvanized steel elements at elevated temperature, *Fire Safety Journal*, Volume 138, 103803. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103803>.

98. Margherita Autiero, Donatella de Silva, Antonio Bilotta, Emidio Nigro. (2022). Galvanization effect on steel frames exposed to fire. *SiF 2022 – The 12th International Conference on Structures in Fire* The Hong Kong Polytechnic University, Nov 30 - Dec 2, 2022, p. – 74-85. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22153568>.

99. EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, 2005.

100. Gaigl C., (2019). Fire resistance of hot-dip galvanized steel structures, PhD Thesis, Technical University of Munich.

101. Fire safety of industrial halls - A valorisation project - EUROPEAN COMMISSION Directorate-General for Research Research Fund for Coal and Steel Unit - Contract No RFS2-CT-2007-00032 1 July 2007 to 31 December 2008.

102. Franssen, J.M., Gernay, T. (2017), Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities, Journal of Structural Fire Engineering, 8(3):300-323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.

103. ISO 834-1:1999(en) Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements.

104. А.І. Ковальов. Дослідження точності визначення параметрів покриттів для вогнезахисту сталевих конструкцій / А.І. Ковальов // Науково-виробничий журнал промислове будівництво та інженерні споруди. - 2017. - № 3. - С. 1-5.

105. Звіт про науково-дослідну роботу «Провести дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів та розробити методику попередньої оцінки їх ефективності», виконавці: О.П. Борис, О.В. Добростан, С.В. Новак, Т.В. Самченко, О.В. Ратушний, Д.А. Курков, Ю.В. Долішній, О.В. Корнієнко, Є.Ю. Шеверєв, С.А. Рогова, Н.А. Поворознюк, Н.М. Ільченко, С.Ю. Огурцов, номер державної реєстрації № 011611008038. Київ : УкрНДІЦЗ, 2017. 303 с.

106. Малишев В. В. Аналітична хімія та інструментальні методи аналізу : навч. посіб. / А. І. Габ, В. В. Малишев, Д. Б. Шахнін. – Київ: Університет «Україна», 2018. – 396 с.

107. Шабанова Г. М. В'язучі матеріали. Практикум з дисципліни «ОТТНСМ» / Г. М. Шабанова, А. М. Корогодська, О. В. Христич. – Харків: Підручник НТУ «ХП», 2014. – 220 с.

108. Нагорний А. О. Інструментальні методи аналізу в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : навч.-метод. посіб. / А. О. Нагорний. – Харків НТУ «ХП», 2023. – 48 с.

109. Проценко І.Ю., Чорноус А.М., Проценко С.І. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів /За загальною редакцією проф. І.Ю. Проценка: Навчальний посібник. - Суми: Вид-во СумДУ, 2007.-264 с.

110. Методи і засоби мікроскопії: моногр. / В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко та ін. – К.: НТУУ «КП», 2013. – 336 с.

111. Гнатюк В.М., Гучинська Т.М., Станіславчук В.П. Дослідження пожежонебезпечних властивостей нетканих матеріалів, виготовлених за допомогою різних технологій виробництва. Науковий вісник УкрНДІПБ, 2005. 2 (32). С. 82-87с.
112. Shackelford J. F. Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing / J. F. Shackelford, R. H. Doremus. – New York : Springer, 2008. – 201 p.
113. Свідерський В.А., Черняк Л.П., Пахомова В.М., Дорогань Н.О. Методи досліджень і контролю технології силікатних виробництв [Текст] навчальний посібник / В.А. Свідерський, Л.П. Черняк, В.М. Пахомова, Н.О. Дорогань: – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, вид-во „Політехніка”, 2021. - 109 с.
114. Paulik J., Paulik F., Comprehensive analytical chemistry, v. 12, pt A, Amst. [a.o.], 1981.
115. W. Zielenkiewicz and E. Margas: Theory of Calorimetry. 2002.
116. Paulik F. Termoanalisis / F. Paulik. J. Paulik. – Budapest. 1968. – 118 с.
117. ДСТУ ISO 9117-5:2015 Фарби та лаки. Контроль висихання. Частина 5. Модифікований метод Бендоу-Вульфа (ISO 9117-5:2012, IDT). Київ, 2015. 8 с.
118. Методи дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів: Навчальний посібник / Веселовська Н. Р., Посвятенко Е. К., Солоня О. В., Будяк Р. В. - Вінниця 2018. - 150 с.
119. ISO 16276-2:2007 Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Assessment of, and acceptance criteria for, the adhesion/cohesion (fracture strength) of a coating – Part 2: Cross-cut testing and X-cut testing.
120. ДСТУ 14760-69 Клеї. Метод визначення міцності при відриві. Зі Змінами.
121. Чехов А.П. Коррозионная стойкость материалов / Справочник. - Днепропетровск: "Промінь", 1980. - 191 с.
122. Гивлюд М.М., Гуцуляк Ю.В., Вовк С.Я. Вплив модифікаторів на процеси фазоутворення в вогнезахисних покриттях. Пожежна безпека. 2013. № 22. С. 51–54.
123. Металознавство : навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса : Екологія, 2020. – 308 с.

124. Ємченко І. В., Гивлюд М. М. Технологічні особливості отримання вихідних композицій для захисних покриттів. Вісник Технологічного Університету Поділля 2005. – №5 4.1. Т 2. – С.90-92.

125. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання.

126. Veselivskiy R.B., Yakovchuk R.S., Petrovskiy V.L., Havrys A.P., Smolyak D.V., Kahitin O.I. Environmentally safe installation for determining the fire resistance of coatings and fire resistance tests of small fragments building structures. Strength of Materials and Theory of Structures. 2024. № 112. С. 00–00.

127. В'язучі матеріали: Підручник / Р. Ф. Рунова, Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. Л. Носовський – К. : Основа, 2012. – 448 с

128. Ємченко І.В. Шляхи регулювання властивостей оксидної кераміки, одержаної із наповнених силіційорганічних композицій / І.В. Ємченко. М.М. Гивлюд // Вісник Донецького державного університету економіки і торгівлі ім. М. Тугай – Барановського. – 2006. – № 1. – С. 148 – 152.

129. Склад високотемпературного жаростійкого покриття : пат. 32622 Україна : С09D 5/18. № u 2008 00035 ; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10.

130. Склад для високотемпературного захисного покриття : пат. 36228 Україна : С09В 3/00. № u 2008 00031 ; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20.

131. Композиція для вогнезахисного покриття: пат. 109865 Україна : С09D 5/18. № u 2016 02849; заявл. 21.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.

132. Температуровогнезахисне покриття: пат. 79962 Україна : С09D 5/00. № u 2012 12387; заявл. 29.10.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9.

133. Композиція для високотемпературного захисного покриття: пат. 41193 Україна : С09D 5/08. № u2008 14143; заявл. 08.12.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9.

134. Композиція для високотемпературного захисного покриття: пат. 28404 Україна : С09D 5/18. № u2007 08001; заявл. 16.07.2007; опубл. 10.12.2007.

135. 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.

136. Веселівський Р.Б., Смоляк Д.В. Експериментальні дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій. Пожежна безпека. 2022. № 41. С. 31–37.

137. Веселівський Р.Б., Яковчук Р.С., Смоляк Д.В., Петровський В.Л. Методика дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому для сталевих будівельних конструкцій. Комунальне господарство міст: Серія: Технічні науки та архітектура. 2024. Том 1 № 182. С. 171–179.

138. Fellingner, J.H.H.: 1999a, Shear and Anchorage Behaviour of Fire Exposed HC Slabs, Third interim report, TNO Building and Construction research, Delft University of Technology, Technology Foundation STW, Delft.

139. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley. Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings. NIST Technical Note 1681. 2010. 217 p.

140. Kirby, B. (1999), The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fires, A European Joint Research Program, U.K.: British Steel Swinden Technology Centre.

141. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers.

142. Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 2. Класифікація за результатами випробувань на вогнестійкість (крім складників вентиляційних систем) : ДСТУ EN 13501-2:2023 (EN 13501-2:2016, IDT) [Чинний від 01-11-2023]. Київ: ТК 25, 2023.

143. T. Lennon, D.B. Moore, Y.C. Wang and C.G. Bailey. Designers' guide to EN 1991-1-2, EN 1992-1-2, EN 1993-1-2, EN 1994-1-2. Handbook for the fire design of steel, composite and concrete structures to the Eurocodes. Series editor H. Gulvanessian. (2013), London: Thomas Telford.

144. Ковальов А.І. Удосконалення методу оцінювання вогнезахисної здатності покривів залізобетонних перекриттів: дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Ковальов Андрій Іванович. – Черкаси, 2006. – 146 с.

145. Адаменко М. І. Основи наукових досліджень / М. І. Адаменко, М. В. Бейлін. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 188 с.

146. Бобилєв В. П., Іванов І. І., Проїдак Ю. С. Методологія та організація наукових досліджень: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2008. – 264 с.

147. С.М. Лапач Проблеми побудови регресійних моделей процесів різання металів / Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». 2014, №3(72). С.40–47.

148. Основи теорії планування експерименту: Розділ дисципліни «Методика та організація наукових досліджень» [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. освітньої програми «Комп'ютерні системи та мережі» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» / А.М. Волокита, В.Л. Селіванов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,58 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 41 с

149. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-12. Додаткові правила до EN 1993 для сталей класів не вище S 700 : ДСТУ-Н Б EN 1993-1-12:2012 (EN 1993-1-12:2007, IDT) [Чинний від 01-07-2013]. Київ: УкрНДІпроектстальконструкція, 2012.

150. Лозинський Р.Я., Харишин Д.В. Особливості застосування методу кінцевих різниць для розв'язання задачі нестационарної теплопередачі в умовах реальної пожежі. Вісник ЛДУБЖД. 2017. № 15. С. 159–164.

151. А.І. Ковальов, Ю.А. Отрош, В.І. Томенко А.В. Кондратьєв. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій. ВІСТІ Донецького гірничого інституту. 2021. № 2(49). С. 149–158.

152. EURONORM 53-62 Wide flanged beams with parallel flanges.

153. EURONORM 19-57 IPE beams, parallel flanged beams.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації
та відомості про апробацію результатів дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Gyvlyud M.M., Demidchuk L.B., **Smolyak D.V.** Silicium organic coatings for thermal and fireprotection of reinforced concrete. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2014. № 781. С. 46 – 49.
2. **Смоляк Д.В.** Вплив поверхневого захисного покриття на вогнестійкість залізобетонних конструкцій. *Пожарна безпека*. 2015. № 27. С. 121–126.
3. Веселівський Р.Б., **Смоляк Д.В.** Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. *Пожарна безпека*. 2021. № 39. С. 63–76. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.08>.
4. Веселівський Р.Б., **Смоляк Д.В.** Експериментальні дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій. *Пожарна безпека*. 2022. № 41. С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.04>.
5. Веселівський Р.Б., Яковчук Р.С., **Смоляк Д.В.**, Петровський В.Л. Методика дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану і хрому для сталевих будівельних конструкцій. *Комунальне господарство міст: Серія: Технічні науки та архітектура*. 2024. Том 1 № 182. С. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-171-179>.
6. Veselivskyi R.B., Yakovchuk R.S., Petrovskyi V.L., Havrys A.P., Smolyak D.V., Kahitin O.I. Environmentally safe installation for determining the fire resistance of coatings and fire resistance tests of small fragments building structures. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and-technical collected articles*. 2024. Issue 112. С. 248–257. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.248-257>.

Апробація результатів дисертації:

7. Веселівський Р.Б., **Смоляк Д.В.** Вогнезахист металевих будівельних конструкцій. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) (Черкаси, 26 травня 2022 р.)*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 62–63.

8. **Смоляк Д.В.**, Веселівський Р.Б. Вогнезахист металевих будівельних конструкцій шляхом фарбування/лакування. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення*: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Львів, 1 жовтня 2022 р.). Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 20–22.

9. Веселівський Р.Б., **Смоляк Д.В.**, Придатко В.В. Вогнезахист металевих будівельних конструкцій шляхом штукатурення. *Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»)*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 12 жовтня 2022 р.). Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 67–69.

10. **Смоляк Д.В.**, Веселівський Р.Б. Експериментальні дослідження об'ємного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття. *Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності*: збірник наукових праць XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів (Львів, 30-31 березня 2023 р.). Львів: ЛДУБЖД, 2023. С. 127–130.

11. Веселівський Р.Б., **Смоляк Д.В.** Вогнезахист металевих будівельних конструкцій шляхом облицювання. *«Problems of emergency situations»*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 19 травня 2023 р.). Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 24–25.

12. Y. Starodub, R. Veselivsky, D. **Smolyak, R.**, Hushchak. Ecology-geophysical environment eexperimental studies of the coating based on polysiloxane for steel building structures. *«Challenges in Science of Nowadays» Physics and Maths*: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference (Washington, USA, December 6-8, 2023). Washington, USA, Scientific Collection «InterConf», 2023. № 181 P 354-360.

13. Веселівський Р.Б., Яковчук Р.С., **Смоляк Д.В.** Експериментальні дослідження вогнезахисної здатності реактивного вогнезахисного покриття на сталевій пластині розміром 500x500 мм товщиною 0,3 см. *Проблеми пожежної безпеки 2024 («Fire Safety Issues 2024»)*: матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 27 березня 2024 р.). Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 121–123.

ДОДАТОК Б

Патент на корисну модель ua 71300:

Композиція для високотемпературного та вогнезахисного покриття

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 71300

КОМПОЗИЦІЯ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТА
ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи
і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні
моделі **10.07.2012.**

Перший заступник Голови
Державної служби
інтелектуальної власності України

О.В. Янов





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA**

(11) **71300**

(13) **U**

(51) МПК

C09D 5/18 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2011 15337**

(22) Дата подання заявки: **26.12.2011**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.07.2012**

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.07.2012, Бюл.№ 13**

(72) Винахідник(и):

**Гивлюд Микола Миколайович (UA),
Смоляк Дмитро Володимирович (UA)**

(73) Власник(и):

**Гивлюд Микола Миколайович,
вул. Ак. Лазаренка, 36, кв. 62, м. Львів,
79026 (UA),
Смоляк Дмитро Володимирович,
вул. Низинна, 2, кв. 102, м. Львів, 79052
(UA)**

(54) КОМПОЗИЦІЯ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТА ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ

(57) Реферат:

Температуро- та вогнезахисна композиція для покриття включає полісилоксан і алюмінію оксид. Додатково містить титан (IV) і хром (III) оксиди. Як полісилоксан містить поліметилфенілсилоксановий.

UA 71300 U

UA 71300 U

Корисна модель належить до складів покриттів, які володіють високотемпературними та вогнестійкими властивостями і може бути використана для захисту металевих конструкцій від дії вогню.

Відомий склад для високотемпературного жаростійкого покриття, який містить наповнювач у вигляді алюмінію і цирконію (IV) оксидів, легкоплавкого додатку, а як зв'язка поліметилфенілсилоксановий лак (патент України на корисну модель № 32622. Опубл. 26.05.2008 р. Бюл. № 10). Готове покриття використовують для захисту сплаву ОТ-4 від високотемпературної газової корозії при нагріванні до 1200 °С. Але зазначені склади мають високий показник відкритої корисності при нагріванні в інтервалі температур термостійкої

деструкції зв'язки (500-900 °С).
Найбільш близьким за технічною суттю і захисним ефектом є склад для високотемпературного захисного покриття на основі наповненого оксидом алюмінію і Глуховецьким каоліном карборансилоксанового лаку (патент України на корисну модель № 36228. Опубл. 27.10.2008 р. Бюл. № 20). Рецептūra цього складу наступна (мас. %):

- карборансилоксан - 25-30;
- алюмінію оксид - 50-65;
- Глуховецький каолін - 10-20.

Дане покриття можна використовувати для захисту металевих конструкцій зі сталі 09 Г2С від дії високих температур.

Недоліком даного складу є те, що таке покриття не можна використовувати для захисту металевих конструкційних матеріалів через низьку стійкість його компонентів до дії високих температур.

В основу корисної моделі покладено задачу створити склади для високотемпературних та вогнезахисних покриттів шляхом введення нових компонентів, що дозволяє збільшити суцільність та вогнестійкість.

Поставлена задача вирішується введенням у склад композиції для покриття, що містить полісилоксан і алюмінію оксид згідно з корисною моделлю, як полісилоксановий компонент містить поліметилфенілсилоксановий лак і додатково титан (IV) та хрому (III) оксиди при наступному співвідношенні компонентів, мас. %:

- поліметилфенілсилоксановий лак (за сухим залишком) - 30-40;
- алюміній (III) оксид - 30-40;
- титан (IV) оксид - 10-20;
- хром (III) оксид - 10-20.

Для отримання високотемпературно-вогнестійкого захисного покриття використано такі матеріали:

- поліметилфенілсилоксановий лак (КО-08), ГОСТ 16508-70;
- алюміній (III) оксид, ГОСТ 30569-98;
- титан (IV) оксид, ТУ 6-09-1211-77;
- хром (III) оксид, ТУ 4-12-7891-79.

Адгезійну міцність покриттів до металевих поверхонь визначали методом відриву двох циліндрів діаметром 2,5 см, нагрітих до вказаної температури на розривній машині МР-0-05. Суцільність покриття оцінювали за результатами мікроскопічних досліджень. Вогнестійкість металевих зразків визначали за втратою маси зразка після нагрівання (ГОСТ 16363).

Склади для високотемпературно-вогнестійкого захисного покриття (приклади 1-3) готували шляхом сумісного диспергування оксидного наповнювача у середовищі карборансилоксану в кульовому млині. Методом занурення, пульверизації або валиком покриття наносили на поверхню матеріалу товщиною 0,6-0,8 мм. Приклади складів покриттів та результати випробувань наведено в таблиці 1.

UA 71300 U

Таблиця 1

Результати випробувань зразків на сталі КП 6

Склад покриття, %		Температура вогневої камери, °C	Адгезійна міцність, МПа	Суцільність, %	Втрата маси зразка, %
Прототип, патент України на корисну модель № 36228		300	9,7	100	0
		600	5,9	92	0,2
		800	2,1	81	8,7
1.	Поліметилфенілсилоксан - 40	300	10,1	100	0
	Алюмінію (III) оксиду - 30	600	7,4	95	0
	Титан (IV) оксиду - 20	800	3,8	87	2,4
	Хром (III) оксиду - 10				
2.	Поліметилфенілсилоксан - 35	300	10,2	100	0
	Алюмінію (III) оксиду - 35	600	7,5	95	0
	Титан (IV) оксиду - 15	800	3,9	88	2,3
	Хром (III) оксиду - 15				
3.	Поліметилфенілсилоксан - 30	300	9,9	100	0
	Алюмінію (III) оксиду - 34	600	7,3	96	0
	Титан (IV) оксиду - 10	800	3,8	90	2,2
	Хром (III) оксиду - 20				

Запропоновані композиції застосовують як високотемпературні та вогнестійкі захисні покриття, що забезпечується утворенням за рахунок твердо фазових реакцій між продуктами термоокисної деструкції поліметилфенілсилоксану та наповнювачем нових жаростійких керамічних фаз. Встановлено, що введення до складу покриття титану та хрому оксидів збільшує його адгезійну міцність і суцільність відповідно на 40-60 % та 4-9 %, а втрата маси зразка зменшиться у 3,2-3,5 рази.

При випробуванні складів покриттів зі заграничними співвідношеннями компонентів були отримані незадовільні результати. Зменшення вмісту поліметилфенілсилоксану веде до зниження адгезійної міцності та суцільності при нагріванні вище від 600 °C на 5-20 % і збільшує втрату маси зразка на 7-12 %. Перевищення вмісту поліметилфенілсилоксану, титану (IV) та хрому (III) оксидів зростає масова доля чисто оксидних фаз, які негативно впливають на адгезійну міцність та суцільність покриттів.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Температуро- та вогнезахисна композиція для покриття, яке включає полісилоксан і алюмінію оксид, яка відрізняється тим, що додатково містить титан (IV) і хром (III) оксиди, як полісилоксан містить поліметилфенілсилоксановий лак, при наступному співвідношенні компонентів, мас. %:

- поліметилфенілсилоксановий лак (за сухим залишком) - 30-40;
- алюміній (III) оксид - 30-40;
- титан (IV) оксид - 10-20;
- хром (III) оксид - 10-20.

Комп'ютерна верстка Л.Литвиненко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601

(11) **71300**(19) **UA**(51) МПК
C09D 5/18 (2006.01)(21) Номер заявки: **u 2011 15337**(22) Дата подання заявки: **26.12.2011**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **10.07.2012**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **10.07.2012,
Бюл. № 13**

(72) Винахідники:

**Гивлюд Микола
Миколайович, UA,
Смоляк Дмитро
Володимирович, UA**

(73) Власники:

**Гивлюд Микола
Миколайович,
вул. Ак. Лазаренка, 36, кв. 62,
м. Львів, 79026, UA,
Смоляк Дмитро
Володимирович,
вул. Низинна, 2, кв. 102, м.
Львів, 79052, UA**

(54) Назва корисної моделі:

КОМПОЗИЦІЯ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТА ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ

(57) Формула корисної моделі:

Температуро- та вогнезахисна композиція для покриття, яке включає полісилоксан і алюмінію оксид, яка відрізняється тим, що додатково містить титан (IV) і хром (III) оксиди, як полісилоксан містить поліметилфенілсилоксановий лак, при наступному співвідношенні компонентів, мас. %:

- поліметилфенілсилоксановий лак (за сухим залишком) - 30-40;
- алюміній (III) оксид - 30-40;
- титан (IV) оксид - 10-20;
- хром (III) оксид - 10-20.

(11) 71300

Пронумеровано, прошито металевими
люверсами та скріплено печаткою
2 арк.

10.07.2012



Уповноважена особа

(підпис)

ДОДАТОК В

Технічні умови
ТУ У 24.3-08571340-2024
(дослідної партії):

Речовина температуро- та вогнезахисна на основі
полісілоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій

Затверджую



Директор

ТЗОВ «ГЕФЕСТ Л»

Роман ПЕЛЕХ

07 05 2024 року

Речовина температуро- та вогнезахисна на основі
полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій

Технічні умови
ТУ У 24.3-08571340-2024
(дослідної партії)

Розроблено:

Завідувач науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Докторант докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
к.т.н., доцент, Роман ВЕСЕЛІВСЬКИЙ

Ад'юнкт докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності
Дмитро СМОЛЯК

Львів 2024

ЗМІСТ

№ з/П	Найменування розділу	Ст.
1.	Нормативні посилання	3
2.	Технічні вимоги	5
3.	Загальна характеристика виробництва	6
4.	Характеристика виготовленої продукції	7
5.	Основні і допоміжні матеріали	7
6.	Опис технологічного процесу	7
7.	Норми витрат сировини	9
8.	Норми технологічного режиму	9
9.	Вимоги безпеки і охорони навколишнього середовища	9
10.	Правила приймання	11
11.	Методи випробувань	11
12.	Транспортування і зберігання	12
13.	Гарантії виробника	12
14.	Додаток А	13
15.	Додаток Б	14

1. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин та матеріалів. Номенклатура показників та методи їхнього визначення. Класифікація.

ДСТУ 6507:2009 Мікрометри. Технічні умови (ГОСТ 6507-90).

ДСТУ 12.2.061:2009 Система стандартів безпеки праці. Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки до робочих місць.

ДСТУ ISO 3696:2003 Вода для застосовування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння (ISO 3696:1987, IDT).

ДСТУ ISO 6272-1:2015 Фарби та лаки. Випробування швидкою деформацією (ударна міцність). Частина 1. Випробування падаючим вантажем, індентор великої площі (ISO 6272-1:2011, IDT).

ДСТУ ISO 12944-5:2020 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 5. Захисні лакофарбові системи (ISO 12944-5:2019, IDT).

ДСТУ ISO 12944-6:2019 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 6. Лабораторні методи випробувань (ISO 12944-6:2018, IDT).

ДСТУ ISO 2431:2015 Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням лійок (ISO 2431:2011, IDT).

ДСТУ ISO 2808:2019 Фарби та лаки. Визначення товщини плівки (ISO 2808:2019, IDT).

ДСТУ Б В.2.6-193:2013 Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування.

ДСТУ ISO 3251:2015 Фарби, лаки та пластмаси. Визначення вмісту нелетких речовин (ISO 3251:2008, IDT).

ДСТУ ISO 2409:2015 Фарби та лаки. Випробування методом решітчастих надрізів (ISO 2409:2013, IDT).

ДСТУ 13841-95. Ящики з гофрованого картону для хімічної продукції. Технічні умови. З поправкою.

ДСТУ 3545-97 Матеріали електроізоляційні тверді. Метод вимірювання електричного опору та питомого електричного опору за підвищених температур.

ДСТУ EN ISO 17463:2022 Фарби та лаки. Настанови з визначення антикорозійних властивостей органічних покриттів методом циклічної вольтамперометрії (EN ISO 17463:2022, IDT; ISO 17463:2022, IDT).

ДСТУ ISO 3248:2019 Фарби та лаки. Визначення впливу тепла (ISO 3248:2016, IDT).

ДСТУ ISO 1524:2015 Фарби, лаки та поліграфічні фарби. Визначення ступеня перетиру (ISO 1524:2013, IDT).

ДСТУ ISO 4624:2019 Фарби та лаки. Визначення адгезії методом відриву (ISO 4624:2016, IDT).

ДСТУ ISO 1513:2014 Фарби та лаки. Перевіряння та готування проб для випробування (ISO 1513:2010, IDT).

ДСТУ 9027:2020 Системи управління якістю. Настанови щодо вхідного контролю продукції.

ДСТУ Б А.3.2-12:2009 Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги.

ДСТУ 4500-3:2008 Вантажі небезпечні. Класифікація.

ДСТУ 4500-5:2005 Вантажі небезпечні. Маркування.

ДСТУ 9155:2021 Метрологія. Віскозиметри умовної в'язкості. Методика повірки.

ДСТУ EN 482:2016 Повітря робочої зони. Загальні вимоги до характеристик методик вимірювання вмісту хімічних речовин (EN 482:2012+A1:2015, IDT).

ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007 Система стандартів безпеки праці. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва.

ДСН 3.3.6.037-99 Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

ДСН 3.3.6.039-99 Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.

ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення.

ДБН В.2.5-64:2012 Внутрішній водопровід та каналізація. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. Зі зміною № 1.

ДБН В.2.2-28:2010 Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення.

ДСП 173-96 Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Зі змінами.

Наказ від 14.01.2020 № 52 Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць.

2. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

2.1. Вогнезахисна речовина повинна відповідати вимогам даних технічних умов і виготовлятися згідно визначеної рецептури – 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.

2.2. Вимоги до сировини: поліметилфенілсилоксановий лак (КО-08), ГОСТ 16508-70; алюміній (III) оксид, ГОСТ 30569-98; титан (IV) оксид, ТУ 6-09-1211-77; хром (III) оксид, ТУ 4-12-7891-79.

2.3. За якісними показниками вогнезахисне покриття повинно відповідати нормам, які вказані у таблиці 1.

Таблиця 1

Найменування показника	Норма
1. Зовнішній вигляд композиції і покриття	Композиція представляє собою непрозору рідину білого або сірого кольору, при полімеризації повинна створювати напів матове покриття без бульбашок і тріщин
2. Умовна в'язкість за віскозиметром ВЗ-2, (діаметр сопла при температурі (20)°С, не менше	22-34
3. Масова частка нелетких речовин, %, не менше	72
4. Час висихання при температурі (15-35)°С до ступеня 3, годин, не більше	24
5. Стійкість покриття до статичного впливу і води при температурі (20+)°С	Покриття повинно витримувати експеримент протягом 24 годин
6. Питомий об'ємний електроопір покриття, Ом-см, не більше	10 ⁸
7. Ступінь перетиру, мкм, не більше	50
8. Покривна здатність неpolімеризованої плівки, г/м ² , не більше	230-250
9. Адгезія плівки за методом решіткових надрізів, бали	1

2.4. Упаковка.

2.4.1. Наповнену силіційорганічну композицію упаковують відповідно до ГОСТ 9980.3 Група фасування. Упакування здійснюється в металічну тару з білої сталі із захисним покриттям місткістю 0,5; 1; 3; 5; 10 і 20 літрів. Допускається упаковка в

полімерну тару закордонного виробництва місткістю 0,5; 1; 3; 5; 10 і 20 літрів.

2.4.2. Тара повинна бути сухою і чистою, ступінь заповнення не більше ніж 95%.

2.4.3. Наповнена силіційорганічна вихідна композиція у споживчій тарі, упаковується в ящики з гофрованого картону за ДСТУ 13841-95.

Тара, яка застосовується для упакування, повинна відповідати вимогам нормативної документації і забезпечити збереження продукту при транспортуванні і зберіганні з врахуванням кліматичних умов. Максимальна маса брутто транспортної тари повинна бути не більше 20 кг.

2.5. Маркування.

2.5.1. Маркування здійснюється за ДСТУ 4500-3:2008.

2.5.2. Транспортне маркування – за ДСТУ 4500-5:2005 з нанесенням маніпуляційних знаків «Берегти від перегріву», «Герметична упаковка», «Обмеження температури не нижче 0°C». Маркування, що характеризує транспортну небезпеку вантажу, повинно включати: креслення 3, клас 3, підклас 3.3, класифікаційний шифр 3313.

2.5.3. Маркування здійснюється українською мовою.

3. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЦТВА

Композиція для вогнезахисного покриття за ТУ У 24.3-08571340-2024 являє собою продукт механохімічного оброблення неорганічних наповнювачів у середовищі модифікованого силіційорганічного полімеру.

Виготовлення вихідних композицій здійснюється механохімічним методом у кульових млинах за безвідходною технологією. Усі завантажені у кульовий млин матеріали є компонентами композиції. Технологічний процес здійснюється у закритому технологічному просторі і не супроводжується забрудненням навколишнього середовища.

Технологія виготовлення передбачає послідовне виконання таких технологічних операцій:

- попередня термоактивація мінеральної фракції;
- дозування і завантаження мінеральної фракції;
- дозування і завантаження силіційорганічного полімеру;
- сумісний помел компонентів протягом 10 годин;
- розлив композиції у підготовлену тару;
- складування готової продукції.

4. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИГОТОВЛЕНОЇ ПРОДУКЦІЇ

4.1. За фізичними показниками зовнішнього вигляду композиція повинна відповідати вимогам, зазначеним у табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Найменування	Норма	Метод випробувань
1	2	3
1. Умовна в'язкість (за ВЗ- 2, 46 діаметр сопла 2 мм), с, не менше	20-40	За ДСТУ 9155:2021 та дійсних ТУ
2. Масова частка нелетких речовин, мас, %	60-80	За ДСТУ ISO 3251:2015 та дійсних ТУ
3. Зовнішній вигляд плівки	Поверхня повинна бути рівною, без тріщин і пухирів	Згідно ТУ
4. Міцність плівки при ударі, ІТм, не менше	4	За ДСТУ ISO 6272-1:2015
5. Міцність плівки при згині, мм, не більше	3	За ДСТУ Б В.2.6-193:2013
6. Адгезія плівки за методом решітчастих надрізів, бал	1	За ДСТУ ISO 2409:2015

5. ОСНОВНІ І ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ

Таблиця 5.1.

Найменування матеріалу	Показники, обов'язково обумовлені перед використанням
Лак КО-08	Вміст нелетких речовин і в'язкість
Алюміній (III) оксид	Вологість
Титан (IV) оксид	Вологість
Хром (III) оксид	Вологість

6. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

6.1. Підготовка сировини і матеріалів

Основні компоненти композиції: силіційорганічний лак, мінеральні наповнювачі.

Підготовка полімеру полягає у перевірці відповідності технологічних характеристик лаку (вміст нелетких речовин, здатність утворювати плівку, в'язкість) паспортним даним.

Підготовка мінеральної фракції передбачає попередній помел у разі використання матеріалів великих розмірів до частинок розміром не більше 60-80 мкм.

6.2. Технологічне устаткування

Перелік технологічного устаткування включає подрібнювальні установки (кульові млини), сушильне устаткування (муфелі, тунельні щілинні сушарки, печі). Використовується млин кульовий з центральним завантаженням ТМ Р №10, 14, 17, 19, 24 чи аналогічні кульові млини, що повинні мати керамічне футерування (базальтове, уралітове, порцелянове тощо) і керамічні тіла, що мелють.

Для виготовлення композиції виробнича ділянка повинна бути обладнана вантажно-розвантажувальними механізмами, чи вагами-дозаторами.

6.3. Технологічна схема виробництва

Технологічний процес здійснюється під час сумісного оброблення компонентів у кульовому млині. У кульовий млин вводиться розрахункова кількість наповнювачів, пігментів і силіційорганічного лаку.

Сумісний помел проводиться протягом 8-10 годин. Завершується технологічний процес відбором проби композиції у кількості 0,5...1,0 кг, визначенням контрольних показників покриття і розливом композиції у суху чисту тару (бочки). Бочка заповнюється не більш 90 % всього об'єму, після чого герметично закривається. Бочки з готовою продукцією маркуються й у супроводі сертифіката на партію надходять на склад або відпускаються споживачу.

Технологічний процес здійснюється у приміщенні, обладнаному припливно-витяжною вентиляцією за нормами і вимогами «Правил техніки безпеки» і «Правил протипожежної безпеки».

Ретельне дотримання технологічного регламенту дозволяє роботи композицію за безвідходною технологією без забруднення навколишнього середовища, території і виробничих приміщень.

За необхідності (зупинка на ремонт) здійснюють промивання кульового млина розчинниками типу Р-4, толуол, ксилол. Промивання проводиться шляхом заливання у млин розчинника на 1/10 від об'єму полімеру, що завантажується. Млин працює протягом 15 хв. Потім брудний розчинник зливається у металеві бочки і відстоюється. Після відстою суміш розділяється на розчинник і щільний осад з неорганічних часток із сорбованим полімером. Далі цей розчинник знову використовується для промивання млинів, а осад - як наповнювач композиції.

7. НОРМИ ВИТРАТ СИРОВИНИ

Співвідношення поліметилфенілсилоксанового лаку (за сухим залишком) становить від 30 до 40.

Співвідношення компонентів мінерального наповнювача (в мас. %): алюміній (III) оксид (30 - 40); титан (IV) оксид (10 - 20); хром (III) оксид (10 - 20)

8. НОРМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ

Таблиця 8.1.

Найменування стадії	Найменування технологічних
1. Сушіння (термоактивація) неорганічних наповнювачів	За температури 200°C протягом 2 годин до залишкової вологості 0,5... 1.0 %
2. Дозування і завантаження мінеральної фракції	З точністю дозування 1,0 кг
3. Дозування і завантаження силіційорганічного лаку	З точністю дозування 1,0 кг
4. Сумісний помел компонентів	Безперервна робота кульового млина протягом 8-10 годин
5. Відбір проб для проведення контролю	Проба відбирається через розвантажувальний патрубок у кількості
6. Розвантаження млина	Композиція вливається через розвантажувальний патрубок безпосередньо у суху чисту тару, що заповнюється не більше 90 % об'єму

9. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ І ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

9.1. Застосування наповненої силіційорганічної композиції повинно бути узгоджено з МОЗ України у встановленому порядку.

9.2. Виробництво і застосування композиції належить до категорії пожежовибухонебезпечних за ДСТУ 8829:2019.

Токсичність вихідної композиції визначається властивостями речовин, які входять до складу компонентів.

При виробництві вихідної композиції застосовують силіційорганічну зв'язку, розчинником якої є толуол.

Можливі шляхи надходження шкідливих речовин при виробництві і застосуванні композиції: інгаляційний і через шкіряний покрив.

9.3. Повітря робочої зони повинно контролюватися на вміст шкідливих хімічних речовин.

9.4. Всі роботи, які пов'язані з виробництвом вихідної композиції повинні проводитися в промислових приміщеннях при постійно працюючій місцевій витяжці і

загальній вентиляції за ДСТУ Б А.3.2-12:2009, яка забезпечує чистоту повітря робочої зони виробничих приміщень (згідно ДБН В.2.5-67:2013), вміст шкідливих речовин яких не повинен перевищувати встановлених максимально допустимих концентрацій згідно ДСТУ EN 482:2016.

Приміщення для виготовлення вихідної композиції повинні забезпечуватись опаленням за ДБН В.2.5-67:2013, освітленням за ДБН В.2.5-28:2018, водопровід і каналізація повинні відповідати вимогам ДБН В.2.5-64:2012.

9.5. Працівники, які виготовляють вихідну композицію повинні бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям і засобами захисту рук, захисними мазями і пастами, гумовими рукавичками, для захисту органів дихання респіраторами, крім того ці особи повинні проходити попередні, при поступленні на роботу і періодичні медичні огляди.

9.6. Працівники повинні бути забезпечені санітарно-побутовими приміщеннями відповідно до вимог ДБН В.2.2-28:2010.

9.7. Параметри мікроклімату виробничих приміщень повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042.

9.8. Рівень шуму на робочих місцях повинен відповідати вимогам ГОСТ 12.1.003 і ДСН 3.3.037.

9.9. Рівень вібрації на робочих місцях повинен відповідати вимогам ДСН 3.3.039.

9.10. При виробництві і застосуванні вихідної композиції можуть утворюватися тверді, газоподібні і рідкі відходи, що спричиняють забруднення атмосферного повітря, ґрунту, води. З метою охорони атмосферного повітря від забруднення викидами повинен бути організований постійний контроль за дотриманням максимально допустимих викидів, затверджених у встановленому порядку згідно «Гігієнічним регламентом. Гранично допустимі концентрації хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць». Класифікація викидів згідно із ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007.

9.11. Під час виробництва вихідної композиції повинно бути передбачено очищення загальнообмінної і місцевої вентиляції повітря на газоочисних установках згідно гігієнічного регламенту.

9.12. Під час виробництва і застосування наповненої силіційорганічної композиції необхідно дотримуватися вимог безпеки згідно ДСТУ 12.2.061:2009.

10. ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ

10.1. Правила приймання вихідної композиції за ДСТУ 4500-3:2008. Партією вважають однорідну за якістю вихідну композицію, яку отримують за один технологічний цикл, що супроводжується одним документом про якість.

10.2. Відбір проб здійснюється за ДСТУ ISO 1513:2014. Маса середньої проби

повинна бути не менше 0,5 кг. Кількість середніх проб - 2. Одна проба наповненої силіційорганічної композиції передається в лабораторію для аналізу, друга зберігається протягом 6 місяців на випадок арбітражного аналізу.

10.3. Наповнену силіційорганічну композицію піддають приймально - здавальним і періодичним дослідженням.

10.4. Приймально - здавальні дослідження проводять за показниками 1, 2, 3, 6 таблиці 1, якість упаковки і маркування.

10.5. Періодичні дослідження проводять за показниками 4, 5, 7, 8, 9 таблиці 1 в кожній 10-й партії.

10.6. При отриманні незадовільних результатів досліджень хоча б за одним з показників, проводять повторні дослідження. Результати повторних досліджень є остаточними і розповсюджуються на всю партію.

10.7. Контроль використаної сировини проводять при вхідному контролі згідно із ДСТУ 9027:2020.

10.8. Показники безпеки розділу 3 контролюють при постановці і освоєнні виробництва органи держнагляду за затвердженими методами.

11. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ

11.1. Підготовка зразків випробувань.

11.1.1. Підготовку пластинок для нанесення наповненої силіційорганічної композиції проводять відповідно до вимог ДСТУ ISO 12944-6:2019. Час висихання, колір, зовнішній вигляд, стійкість до статичного впливу води, електроопір, покривну здатність визначають на скляних пластинах розміром 10 x 10 см, товщиною 2 мм, товщина покриття після висихання 20-50 мкм. Товщину плівки визначають за ДСТУ ISO 2808:2019 або іншими приладами для виміру товщини покриття з похибкою виміру не більше 10 мкм. Час витримки висохлого покриття на стійкість до статичного впливу води при температурі 20°C – 24 год.

11.2. Зовнішній вигляд визначають при природному розсіяному світлі. Не допускається розтріскування покриття.

11.3. Для визначення масової частки нелетких речовин пробу масою 2-3 грами поміщають в сушильну шафу і витримують при температурі 110°C до постійної маси. Перше зважування проводять через 1,5 години після витримки зразків у шафі, наступні - через кожні 20 хв. Сушильна шафа повинна забезпечувати нагрів температури до 200°C. Похибка установки і підтримування заданої температури $\pm 2^\circ\text{C}$.

11.4. При визначенні стійкості покриття до статичного впливу води досліджувані зразки поміщають на 2/3 висоти в ексікатор із дистильованою водою за ДСТУ ISO 3696:2003 і витримують при температурі $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Час витримки у воді повинен складати 24 год. Огляд покриття проводять неозброєним оком після

витримки на повітрі при температурі $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ протягом 1 години. Не повинно спостерігатись розтріскування, зморщування і утворення бульбашок.

11.5. Вимір питомого електроопору проводять згідно із вимогами ДСТУ 3545-97. Вимір проводять при тиску на електроди 100 г/см .

11.6. Контроль маси нетто проводиться шляхом зважування на вагах за ГОСТ 29329.

11.7. Контроль упаковки і маркування візуальний.

12. ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗБЕРІГАННЯ

12.1. Транспортування і зберігання наповненої силіційорганічної композиції здійснюються згідно із вимогами ДСТУ 4500-3:2008 та ДСТУ 4500-5:2005.

12.2. Наповнену силіційорганічну вихідну композицію зберігають при температурі від 0 до 50°C .

13. ГАРАНТІЇ ВИРОБНИКА

13.1. Виробник гарантує відповідність температуро- та вогнезахисної вихідної композиції вимогам технічних умов при дотриманні умов транспортування і зберігання.

13.2. Гарантійний термін зберігання вихідної композиції 3 місяці з дати виготовлення. Якщо термін зберігання перевищує 3 місяці, то проводяться дослідження якісних показників згідно вимог, вказаних у таблиці 1 даних ТУ. При відповідності якості вихідної композиції технічним вимогам дозволяється її використання протягом 1 місяця; у випадку негативного результату композиція піддається утилізації.

Додаток А

Інструкція щодо застосування силіційорганічної композиції

1. Перед нанесенням вихідної композиції поверхня повинна бути очищена від забруднень і висушена. Температура повітря виробу, який фарбується, і композиції при нанесенні повинна бути не менше 15°C.
2. Вихідна композиція наноситься на виріб пензлем, валиком або за допомогою пневматичного розпилювача. При нанесенні пензлем або валиком в'язкість вихідної композиції за ВЗ-4 (за ДСТУ ISO 2431:2015) повинна бути 20-32 с, при нанесенні розпилювачем - 18-20 с. Важкодоступні місця покривають пензлем. Розчинник - толуол. Час висихання композиції - 24 год. (за ДСТУ Б В.2.6-193:2013).
3. Після контролю якості нанесення наповненої силіційорганічної композиції не повинно бути непрофарбованих місць, шагрені та відшарування покриття.

Не допускається зберігати вихідну композицію при температурі нижче 0° С.

Аркуш реєстрації змін

Таблиця А.1

	Аркушів		Нових	Анульованих	Всього листів у документі	№ документа	Вхідний №	Підпис	Дата
	Змі-нених	Замі-нених							

Додаток Б

Інструкція із застосування температуро- та вогнезахисної композиції

1. Композиція призначена для захисту сталевих будівельних конструкцій, які експлуатуються в умовах високотемпературного нагрівання.
2. Перед нанесенням покриття поверхня, що фарбується має бути висушена, очищена від пилу, іржі, масляних плям і, за можливістю, знежирена органічними розчинниками типу ацетон, уайт-спірит, бензин.

Особливої уваги має бути надано видаленню або попередньому обробленню ділянок, що мають продукти корозії (іржа). Способи попереднього оброблення поверхні можна розташувати за наступним порядком: повне видалення іржі механічними методами – механічна обробка з подальшим застосуванням перетворювачів іржі - видалення продуктів корозії, що обсипаються, і зашкурювання. Механічні способи зачищення поверхні найчастіше здійснюються ручними шкрябаннями, металевими щітками, абразивними брусками, наждачним полотном. З цього ряду найзручнішими для обробки великих площ є щітки на оправах з дроту діаметром 0,1... 1,0 мм.

Найефективнішим і продуктивним є спосіб пневмоабразивного очищення поверхні. Піско- і дрібноструменеве очищення є процесом, при якому абразив захоплюється повітряним потоком і прямує на поверхню, що очищується. При цьому необхідно враховувати, що тонкометалічні вироби можуть деформуватися повітряним потоком. Пневмоабразивне очищення поверхні сприяє також підвищенню адгезійної взаємодії металу з покриттям. Пил і залишки абразивного матеріалу видаляються з поверхні струменем стислого повітря.

3. При проведенні неповної та часткової механічної обробки невидалені ділянки прокородованого металу рекомендується обробити перетворювачами іржі, оскільки фарбування по іржі звичайно не захищає метал від подальшої корозії.

Перетворювачі іржі – речовини, під дією яких компоненти іржі перетворюються на солі, здатні пасивувати процес корозії. Як перетворювач іржі найбільш часто використовуються розчини (20...30%) ортофосфорної кислоти. Оскільки ортофосфорна кислота погано змочує іржу, цим ускладнюючи процес проникнення до шару іржі, до складу перетворювачів вводять поверхнево-активні речовини (ОП-7, ситанол ДС-10 тощо) у кількості 0,1...0,3%. Як готовий матеріал рекомендується перетворювач Р-3.

4. Підготовлена поверхня покривається композицією у будь-який прийнятний у лакофарбовій промисловості спосіб. При цьому в'язкість композиції визначається способом нанесення. До необхідної в'язкості (за ВЗ- 4) композиція доводиться органічними розчинниками, бензолом, уайт-спіритом. Композиція наноситься у 1-3

шари залежно від умов експлуатації. Після нанесення кожен шар витримується протягом 1 години до нанесення подальшого шару.

Під час роботи з покриттям необхідно дотримуватися всіх заходів безпеки, як і під час роботи з рештою лакофарбовими матеріалами.

Для видалення композиції з одягу, шкіри, інструментів, а також для видалення натікань і неякісно забарвлених ділянок найбільш ефективно використовувати ацетон, толуол, уайт-спірит.

ДОДАТОК Г

Технологічний регламент

нанесення складу вогнезахисного покриття на основі
полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій

Затверджено

Директор

ТЗОВ «ГЕФЕСТ Л»

Роман ПЕЛЕХ



07.05 2024 року

Технологічний регламент

нанесення складу вогнезахисного покриття на основі
полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій

Розроблено:

Завідувач науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Докторант докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
к.т.н., доцент, Роман ВЕСЕЛІВСЬКИЙ

Ад'юнкт докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності
Дмитро СМОЛЯК

Львів 2024

ЗМІСТ

№ з/п	Найменування розділу	Ст.
1.	Нормативні посилання	3
2.	Назва, призначення, галузь застосування	3
3.	Характеристика вогнезахисного складу	4
4.	Розрахунок витрати вогнезахисного складу	5
5.	Підготовка поверхонь до вогнезахисної обробки	11
6.	Підготовка та нанесення вогнезахисної речовини	11
7.	Контроль якості робіт з вогнезахисної обробки	12
8.	Зберігання та транспортування	12
9.	Безпека і охорона навколишнього середовища	13

1. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

ДСТУ Б В.2.6-193:2013 Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування.

ДСТУ ISO 8502-4:2015 Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і подібної продукції. Випробування для оцінювання чистоти поверхні. Частина 4. Інструкції з оцінювання ймовірності утворення конденсату перед нанесенням фарби (ISO 8502-4:1993, IDT).

ДСТУ ISO 12944-5:2020 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 5. Захисні лакофарбові системи (ISO 12944-5:2019, IDT).

ДСТУ ISO 12944-6:2019 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 6. Лабораторні методи випробувань (ISO 12944-6:2018, IDT).

ДСТУ ISO 9117-5:2015 Фарби та лаки. Контроль висихання. Частина 5. Модифікований метод Бендоу-Вульфа.

ДСТУ EN 16623:2015 Фарби та лаки. Реакційні покриття для вогнезахисту металевих поверхонь. Визначення, вимоги, властивості та маркування.

ДСТУ EN ISO 17463:2022 Фарби та лаки. Настанови з визначення антикорозійних властивостей органічних покриттів методом циклічної вольтамперометрії (EN ISO 17463:2022, IDT; ISO 17463:2022, IDT).

ДСТУ Б А.3.2-12:2009 Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги.

ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007 Система стандартів безпеки праці. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва.

Наказ від 14.01.2020 № 52 Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць.

2. НАЗВА, ПРИЗНАЧЕННЯ, ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ

Композиція вогнезахисного покриття представляє собою непрозору рідину білого або сірого кольору, що при нагріванні забезпечує утворення за рахунок твердо фазових реакцій між продуктами термоокисної деструкції поліметилфенілсилоксану та наповнювачем нових жаростійких керамічних фаз.

Склад покриття призначений для нанесення на сталеві будівельні конструкції з метою їх вогнезахисту.

Первинна структура захисного покриття формується при затвердінні (утворюється напів матове покриття без бульбашок і тріщин), а вторинна – при дії

високих температур. Гази, що утворюються при дії високих температур на покриття, спучують захисний шар та змінюють мікроструктуру покриття.

Вогнезахисне покриття може експлуатуватись в опалювальних та неопалювальних приміщеннях. Допускається експлуатація при температурі навколишнього середовища від - 30 °С до +40 °С.

3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОГНЕЗАХИСНОГО СКЛАДУ

Склад вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій відповідає вимогам та характеристикам, що представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Найменування показника	Норма
Зовнішній вигляд покриття	Композиція представляє собою непрозору рідину білого або сірого кольору, при полімеризації повинна створювати напів матове покриття без бульбашок і тріщин
Умовна в'язкість за віскозиметром ВЗ-2, (діаметр сопла при температурі (20)°С, не менше	22-34
Масова частка нелетких речовин, %, не менше	72
Час висихання при температурі (15-35)°С до ступеня 3, годин, не більше	24
Стійкість покриття до статичного впливу і води при температурі (20+)°С	Покриття повинно витримувати експеримент протягом 24 годин
Покривна здатність не полімеризованої плівки, г/м ² , не більше	230-250
Адгезія плівки за методом решіткових надрізів, бали	1
Сухий залишок, %	80±5
Клас вогнестійкості	R15-R90
Гарантійний термін збереження вогнезахисної ефективності покриття	±15 років

4. РОЗРАХУНОК ВИТРАТИ ВОГНЕЗАХИСНОГО СКЛАДУ

Товщина вогнезахисного покриття, що забезпечує необхідний клас вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій (R15-R90), залежить від приведеної товщини сталевих конструкцій та проектної критичної температури та визначається за таблицями 4.3-4.7. Для утворення покриття товщиною 1 мм необхідно не менше 1,65 кг/м².

Витрата засобу для отримання покриття товщиною 1 мм залежить від умов і методів нанесення та типу конструкції, що підлягає захисту.

Розрахунок витрати засобу (m, кг) для отримання покриття товщиною (d, мм) визначають за формулою:

$$m = 1,65 \cdot S \cdot d \cdot (1 + k_1 + k_2 + k_3),$$

де: S – площа обробки (м²);

d – товщина вогнезахисного покриття (мм);

k₁ - коефіцієнт збільшення витрати засобу, залежно від розмірів конструкції;

k₂ - коефіцієнт збільшення витрати засобу залежно від висоти розташування конструкції;

k₃ - коефіцієнт збільшення витрати засобу залежно від методу нанесення (k₃ = 0,012- для безповітряного нанесення, k₃ = 0,009 - для ручного нанесення).

Значення коефіцієнтів k представлені у таблиці 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1

Коефіцієнт збільшення витрати вогнезахисного засобу
залежно від розмірів конструкції (k₁)

Розмір конструкції, мм	>600	300 - 600	150 - 300	≤150
k ₁	0,07	0,1	0,12	0,15

Таблиця 4.2

Коефіцієнт збільшення витрати вогнезахисного засобу
залежно від розмірів конструкції (k₂)

Розмір конструкції, мм	≤10	10 - 15	≥15
k ₂	0,02	0,04	0,08

Коефіцієнти k₁ і k₂ не враховують технологічних втрат, що залежать від індивідуальних особливостей об'єкта, на якому проводяться вогнезахисні роботи, таких

як обмежені умови для нанесення, наявність вітру тощо. Витрати при цьому можуть становити до 25 % від розрахункової витрати m .

Таблиця 4.3

Таблиця для визначення проектної товщини вогнезахисного покриття сталевих балок для класу вогнестійкості R 15

Приведена товщина, δ , мм	Коефіцієнт перерізу, $A_m \backslash V$, m^{-1}	Проектна температура							
		350	400	450	500	550	600	650	700
12.5	80	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.901	101	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8.197	122	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.993	143	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.098	164	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5.405	185	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.854	206	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.405	227	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.032	248	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.717	269	0.548	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.448	290	0.625	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.215	311	0.691	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.012	332	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.833	353	0.802	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.674	374	0.849	0.543	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.532	395	0.891	0.619	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.404	416	0.93	0.689	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.288	437	0.965	0.755	0.533	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.183	458	0.996	0.817	0.622	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.088	479	1.025	0.875	0.707	0.52	0.5	0.5	0.5	0.5
2.000	500	1.052	0.929	0.789	0.629	0.5	0.5	0.5	0.5

Таблиця 4.4

Таблиця для визначення проектної товщини вогнезахисного покриття сталевих балок для класу вогнестійкості R 30

Приведена товщина, δ , мм	Коефіцієнт перерізу, $A_m \backslash V$, m^{-1}	Проектна температура							
		350	400	450	500	550	600	650	700
12.5	80	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.901	101	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8.197	122	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.993	143	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.098	164	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5.405	185	0.601	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.854	206	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.405	227	0.782	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.032	248	0.852	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.717	269	0.912	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.448	290	0.964	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.215	311	1.01	0.576	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.012	332	1.05	0.66	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.833	353	1.086	0.737	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.674	374	1.118	0.809	0.506	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.532	395	1.147	0.875	0.601	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.404	416	1.173	0.937	0.692	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.288	437	1.197	0.994	0.78	0.551	0.5	0.5	0.5	0.5
2.183	458	1.219	1.048	0.864	0.662	0.5	0.5	0.5	0.5
2.088	479	1.238	1.099	0.944	0.771	0.576	0.5	0.5	0.5
2.000	500	1.257	1.147	1.021	0.878	0.713	0.519	0.5	0.5

Таблиця 4.5

Таблиця для визначення проектної товщини вогнезахисного покриття сталевих балок для класу вогнестійкості R 45

Приведена товщина, δ , мм	Коефіцієнт перерізу, $A_m \backslash V$, м ⁻¹	Проектна температура							
		350	400	450	500	550	600	650	700
12.5	80	0.533	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.901	101	0.723	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8.197	122	0.86	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.993	143	0.963	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.098	164	1.044	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5.405	185	1.108	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.854	206	1.162	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.405	227	1.206	0.517	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.032	248	1.243	0.619	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.717	269	1.276	0.712	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.448	290	1.304	0.797	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.215	311	1.328	0.875	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.012	332	1.35	0.947	0.578	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.833	353	1.369	1.013	0.675	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.674	374	1.387	1.074	0.769	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.532	395	1.402	1.131	0.858	0.584	0.5	0.5	0.5	0.5
2.404	416	1.416	1.184	0.944	0.695	0.5	0.5	0.5	0.5
2.288	437	1.429	1.234	1.026	0.806	0.571	0.5	0.5	0.5
2.183	458	1.441	1.28	1.105	0.914	0.705	0.5	0.5	0.5
2.088	479	1.451	1.323	1.181	1.022	0.842	0.639	0.5	0.5
2.000	500	1.461	1.364	1.254	1.127	0.981	0.81	0.608	0.5

Таблиця 4.6

Таблиця для визначення проектної товщини вогнезахисного покриття сталевих балок для класу вогнестійкості R 60

Приведена товщина, δ , мм	Коефіцієнт перерізу, $A_m \backslash V$, m^{-1}	Проектна температура							
		350	400	450	500	550	600	650	700
12.5	80	1.533	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.901	101	1.56	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8.197	122	1.58	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.993	143	1.595	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.098	164	1.606	0.56	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5.405	185	1.615	0.677	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.854	206	1.623	0.781	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.405	227	1.629	0.875	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.032	248	1.635	0.961	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.717	269	1.639	1.038	0.55	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.448	290	1.643	1.109	0.656	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.215	311	1.647	1.174	0.756	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3.012	332	1.65	1.234	0.852	0.502	0.5	0.5	0.5	0.5
2.833	353	1.653	1.289	0.944	0.617	0.5	0.5	0.5	0.5
2.674	374	1.655	1.34	1.031	0.73	0.5	0.5	0.5	0.5
2.532	395	1.657	1.387	1.115	0.841	0.566	0.5	0.5	0.5
2.404	416	1.659	1.431	1.196	0.951	0.699	0.5	0.5	0.5
2.288	437	1.661	1.473	1.273	1.06	0.833	0.591	0.5	0.5
2.183	458	1.663	1.511	1.347	1.167	0.97	0.753	0.514	0.5
2.088	479	1.664	1.548	1.418	1.272	1.109	0.923	0.711	0.5
2.000	500	1.666	1.582	1.486	1.376	1.25	1.101	0.926	0.714

Таблиця 4.7

Таблиця для визначення проектної товщини вогнезахисного покриття сталевих балок для класу вогнестійкості R 90

Приведена товщина, δ , мм	Коефіцієнт перерізу, $A_m \backslash V$, м ⁻¹	Проектна температура							
		350	400	450	500	550	600	650	700
12.5	80	3.533	1.014	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.901	101	3.235	1.131	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8.197	122	3.02	1.233	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.993	143	2.858	1.323	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6.098	164	2.731	1.402	0.607	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5.405	185	2.63	1.472	0.725	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.854	206	2.546	1.535	0.837	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.405	227	2.476	1.592	0.944	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.032	248	2.417	1.643	1.044	0.568	0.5	0.5	0.5	0.5
3.717	269	2.367	1.69	1.14	0.686	0.5	0.5	0.5	0.5
3.448	290	2.323	1.732	1.232	0.802	0.5	0.5	0.5	0.5
3.215	311	2.284	1.771	1.319	0.916	0.556	0.5	0.5	0.5
3.012	332	2.25	1.807	1.402	1.029	0.685	0.5	0.5	0.5
2.833	353	2.22	1.84	1.481	1.14	0.816	0.508	0.5	0.5
2.674	374	2.193	1.871	1.557	1.249	0.949	0.655	0.5	0.5
2.532	395	2.168	1.9	1.629	1.357	1.083	0.808	0.53	0.5
2.404	416	2.146	1.926	1.699	1.464	1.22	0.967	0.705	0.5
2.288	437	2.126	1.951	1.766	1.568	1.358	1.134	0.894	0.637
2.183	458	2.107	1.974	1.83	1.672	1.499	1.309	1.099	0.865
2.088	479	2.091	1.996	1.891	1.774	1.642	1.492	1.321	1.123
2.000	500	2.075	2.017	1.95	1.874	1.787	1.684	1.562	1.416

5. ПІДГОТОВКА ПОВЕРХОНЬ ДО ВОГНЕЗАХИСНОЇ ОБРОБКИ

Підготовка поверхонь сталевих конструкцій, що підлягають вогнезахисній обробці, складається з таких етапів:

- огляд поверхонь;
- очищення поверхонь від забруднень, іржі, усунення дефектів та нерівностей;
- обробка поверхонь ґрунтувальними, захисними лакофарбовими матеріалами.

При очищенні необроблених поверхонь проводять видалення з них пилу, бруду, іржі, окалини та виконують знежирення.

Очищення поверхонь здійснюється ручним або механізованим способом.

Необроблені поверхні елементів сталевих будівельних конструкцій можуть покриватися ґрунтувальними, захисними або декоративними лакофарбовими матеріалами.

Порядок нанесення, середні товщини ґрунтувального чи захисного шару покриття повинні відповідати вимогам виробника.

6. ПІДГОТОВКА ТА НАНЕСЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ РЕЧОВИНИ

Склад наноситься на поверхні елементів сталевих будівельних конструкцій, при температурі навколишнього середовища від -10 °С до +50 °С та відносній вологості повітря від 30% до 90%.

При виконанні робіт на відкритих будівельних майданчиків оброблювані поверхні повинні бути захищені від атмосферних опадів. На оброблюваних поверхнях не допускається наявність вологи, конденсату, снігу чи льоду.

Вогнезахисний склад наноситься пошарово вручну (кісточками або валиками) або механізованим способом (апаратами безповітряного нанесення).

Кожен шар складу наносять рівномірно без пропусків. Товщина мокрого шару повинна знаходитися в межах 0,1-0,5 мм. Час сушіння вогнезахисного покриття, перед нанесенням на нього наступного шару – не менше 2 діб при температурі навколишнього середовища 20 °С і відносній вологості повітря 60%.

Час повного висихання нанесеного вогнезахисного покриття становить 20 діб від моменту покриття сталевих конструкцій.

Контроль рівномірності товщини нанесеного покриття на сталеві конструкції, здійснювати інструментальним методом у 10 рівновіддалених точках.

Всі вимірювання необхідно здійснювати безпосередньо на місці проведення робіт з вогнезахисту із записом у журнал виконання робіт.

7. КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ РОБІТ З ВОГНЕЗАХИСНОЇ ОБРОБКИ

Контроль якості виконаних робіт з нанесення складу і товщини мокрого і сухого шару вогнезахисного покриття проводиться відповідальною особою.

Контроль якості нанесеного вогнезахисного покриття проводиться візуально та інструментальним методом. Якість нанесеного покриття визначають:

1) зовнішнім оглядом, так, щоб після висихання речовини утворювалось суцільне матове покриття білого (сірого) кольору, без пропусків, тріщин, відшарувань, підтікань тощо;

2) контроль товщини покриття проводиться приладами неруйнівного контролю, відповідно до вимог «Правил з вогнезахисту». Вимірювання товщин вогнезахисного покриття здійснюється через кожні 15-20 метрів довжини об'єкта вогнезахисту, але не менше ніж у 10 рівновіддалених точках.

Середнє-арифметичне значення виміряних товщин повинно бути не менше проєктного значення товщини для кожного елемента конструкції, що захищається, при цьому:

- середнє значення виміряних товщин на будь-якій частини елемента конструкції повинно бути не менше 80 % від проєктного значення;

- допускається, що не більше 10 % усіх виміряних значень на елементі конструкції можуть бути менше 80 % від проєктного значення. Якщо при вимірюванні буде виявлено, що будь-яке значення товщини становить менше 80% від проєктного значення, потрібно додатково провести ще два або, три вимірювання в межах від 150 до 300 мм від виявленого зменшеного значення. Елемент конструкції вважається вогнезахисним, якщо усі додаткові виміри становлять не менше 80 % від проєктного значення. Якщо одне або декілька додаткових вимірювань становить менше 80 % від зазначеного у проєкті з вогнезахисту, повинні бути зроблені додаткові виміри для визначення площі ділянки недостатньої товщини;

- всі виміряні значення повинні бути не менше 50 % від проєктного значення.

8. ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ

Вогнезахисну речовину необхідно зберігати в заводській упаковці у закритих складських приміщеннях. Транспортування здійснюється критим транспорту відповідно до правил перевезення вантажів, що забезпечують збереження упаковки від пошкоджень. Зберігання і транспортування речовини здійснюється за температури навколишнього середовища від 0 °С до + 40 °С, в умовах, що виключають пряме попадання вологи, агресивних речовин та сонячного проміння. Термін придатності продукту становить 24 місяці з дня виготовлення.

9. БЕЗПЕКА І ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Виробництво і застосування композиції належить до категорії пожежовибухонебезпечних за ДСТУ 8829:2019.

Токсичність вихідної композиції визначається властивостями речовин, які входять до складу компонентів.

При виробництві вихідної композиції застосовують силіційорганічну зв'язку, розчинником якої є толуол.

Можливі шляхи надходження шкідливих речовин при виробництві і застосуванні композиції: інгаляційний і через шкіряний покрив.

При роботі зі складом слід уникати потрапляння складу на незахищені шкірні покриви і слизові оболонки. У разі потрапляння на шкіру склад необхідно видалити за допомогою м'якої тканини, а потім промити шкіру гарячою водою з милом. При значному забрудненні необхідно застосовувати тампони, змочені в етиловому спирті. Після видалення складу з шкірних покривів їх потрібно змастити жирною маззю на основі ланоліну або вазеліну. У разі попадання засобу в очі слід негайно промити проточною водою та звернутися за медичною допомогою.

Повітря робочої зони повинно контролюватися на вміст шкідливих хімічних речовин.

Всі роботи, які пов'язані з виробництвом вихідної композиції повинні проводитися в промислових приміщеннях при постійно працюючій місцевій витяжці і загальній вентиляції за ДСТУ Б А.3.2-12:2009, яка забезпечує чистоту повітря робочої зони виробничих приміщень (згідно ДБН В.2.5-67:2013), вміст шкідливих речовин яких не повинен перевищувати встановлених максимально допустимих концентрацій згідно ДСТУ EN 482:2016.

Приміщення для виготовлення вихідної композиції повинні забезпечуватись опаленням за ДБН В.2.5-67:2013, освітленням за ДБН В.2.5-28:2018, водопровід і каналізація повинні відповідати вимогам ДБН В.2.5-64:2012.

Працівники, які виготовляють вихідну композицію повинні бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям і засобами захисту рук, захисними мазями і пастами, гумовими рукавичками, для захисту органів дихання респіраторами, крім того ці особи повинні проходити попередні, при поступленні на роботу і періодичні медичні огляди.

Працівники повинні бути забезпечені санітарно-побутовими приміщеннями відповідно до вимог ДБН В.2.2-28:2010.

Параметри мікроклімату виробничих приміщень повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042.

При виробництві і застосуванні вихідної композиції можуть утворюватися тверді, газоподібні і рідкі відходи, що спричиняють забруднення атмосферного повітря, ґрунту, води. З метою охорони атмосферного повітря від забруднення викидами повинен бути організований постійний контроль за дотриманням максимально допустимих викидів, затверджених у встановленому порядку згідно «Гігієнічним регламентом. Гранично допустимі концентрації хімічних і біологічних

речовин в атмосферному повітрі населених місць».

Під час виробництва вихідної композиції повинно бути передбачено очищення загальнообмінної і місцевої вентиляції повітря на газоочисних установках згідно гігієнічного регламенту.

Під час виробництва і застосування наповненої силіційорганічної композиції необхідно дотримуватися вимог безпеки згідно ДСТУ 12.2.061:2009.

ДОДАТОК Д

Протоколи експериментальних досліджень з визначення:

1. Вогнезахисної здатності композиції високотемпературного вогнезахисного покриття (патент на корисну модель ua 71300) методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення;
2. Вогнезахисної здатності композиції високотемпературного вогнезахисного покриття (патент на корисну модель ua 71300) методом визначення лінійного коефіцієнта спучення;
3. Визначення залежності товщини спучення композиції високотемпературного вогнезахисного покриття (патент на корисну модель ua 71300) від товщини нанесеного шару методом визначення лінійного коефіцієнта спучення.

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

Свідоцтво про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

ПРОТОКОЛ № 28/40/220623

ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ КОМПОЗИЦІЇ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ
(ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ UA 71300) МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ
ОБ'ЄМНОГО КОЕФІЦІЄНТА СПУЧЕННЯ
ЗА ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «ВОГНЕЗАХИСНЕ ОБРОБЛЕННЯ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ТА МЕТОДИ
КОНТРОЛЮВАННЯ»

Львів-2022



ПРОТОКОЛ № 28/40/220623
ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ КОМПОЗИЦІЇ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ
(ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ UA 71300) МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ
ОБ'ЄМНОГО КОЕФІЦІЄНТА СПУЧЕННЯ
ЗА ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010

Дата проведення
випробування: 13.06-20.06.2022 р.

Умови в приміщенні:
 температура, °C 18
 атм. тиск, кПа 97,3
 відносна вологість, % 64,5

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ЛДУ БЖД.

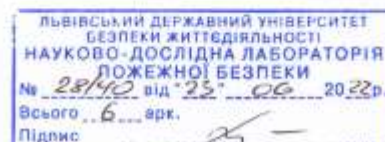
Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Матеріал композиції для високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій. Зразок композиції пастоподібний білого кольору. Склад: поліметилфенілфенілсилоксан -30 - 40 %, алюмінію оксид – 30 - 40 %, титану оксид – 10 - 20 %, хрому оксид – 10 - 20 %.

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Згідно п. 7.3.2. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання».

Метод визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з деревини, металу або бетону.



3

Метод поширюється на випробування вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу). Випробування проводять за методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення вогнезахисного матеріалу.

Для випробувань слід використовувати такі засоби випробувань:

- електрична піч з пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури, об'ємом робочої камери не менше 30 дм³ та температурою нагріву не менше ніж 340 °С (нерівномірність температури за об'ємом робочої камери печі не більше ± 10 °С);

- секундомір класу не нижче 2;

- штангенциркуль з ціною поділки 0,05 мм;

- ваги з похибкою вимірювання не більше $\pm 0,1$ г;

- два скляні стакани з термостійкого скла діаметром 45 мм ± 5 мм;

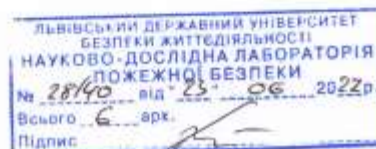
- корзинка з алюмінієвої фольги довжиною 160 мм ± 2 мм, шириною 60 мм ± 2 мм та висотою 10 мм ± 2 мм.

Як зразки використовують дві наважки вогнезахисного матеріалу масою від 1 г до 3 г у сухому стані.

ВИПРОБУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМНОГО КОЕФІЦІЄНТА СПУЧЕННЯ

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. Метод застосовують для вогнезахисних покриттів і однорідних матеріалів та сумішей (фарби, лаки).

Корзинку з алюмінієвої фольги заповнюють матеріалом, що випробовують, шаром товщиною $(2,5 \pm 1,0)$ мм (сирий стан) та висушують за температури (20 ± 5) °С протягом 48 год та за температури (70 ± 5) °С протягом 3 год. Після охолодження до температури навколишнього середовища засіб відділяють від фольги, вимірюють товщину шару матеріалу h , його довжину l , ширину та масу m . Вимірювання товщини, довжини та ширини виконують у п'яти точках рівномірно по довжині зразка із вогнезахисного матеріалу.



З висушеного матеріалу утворюють дві наважки у вигляді дисків (циліндрів), діаметр яких на $(3,0 \pm 1,0)$ мм менше за діаметр скляних стаканів, або дві наважки із гранул з розміром частинок не більше 2,0 мм.

Із матеріалів, що надійшли на випробування у сухому стані, готують наважки у вигляді гранул. Кожну наважку розміщують у скляному стакані. Пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури у печі задають температуру $(340 \pm 5)^\circ\text{C}$ та доводять її до сталої температури протягом не менше 1 год.

Два скляних стакани з наважками вносять до печі за час не більше 20 с. Після закриття печі вмикають секундомір. Через 20 хв стакани виймають із печі та встановлюють на пластину з негорючого матеріалу для охолодження. Через 30 хв штангенциркулем визначають середнє значення висоти спученого шару матеріалу h_c у кожному стакані, для чого вимірюють висоту у п'яти точках у центрі стакану і на середині чотирьох радіусів.

За результатами випробувань за методом визначення об'ємного коефіцієнта спучення розраховується об'ємний коефіцієнт спучення $K_{об}$ за формулою:

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

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.

Додатково може бути розрахований умовний лінійний коефіцієнт спучення $K_{ул}$ за формулою:

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

де ρ_n - густина засобу в сухому стані, $\text{г}/\text{см}^3$.

Густина ρ_n приймається з паспортних даних

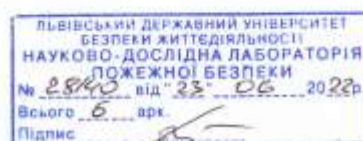
$$\rho_n = 103 \times m / (l \cdot a \cdot h) = 1,613 \text{ г}/\text{см}^3,$$

де m - середнє значення маси зразка із вогнезахисного засобу, г;

l - довжина зразка із вогнезахисного засобу, мм;

a - ширина зразка із вогнезахисного засобу, мм;

h - товщина зразка із вогнезахисного засобу, мм.



5

Таблиця 1

**Технічні характеристики високотемпературного
вогнезахисного вогнезахисного покриття**

Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня
Масова частка нелетучих речовин, % мас	80 %
Термін служби покриття	20-25 років
Гарантійний термін збереження при температурі від +5 °C до +40 °C	1 рік
Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм (без обліку технологічних утрат)	1,6 кг/м ² •мм

Таблиця 2

Характеристика вимірювальних приладів

№ п/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 °C	-
2	Регулятор-вимірювач РТ 0102	05.387	Від 0 до 1200 °C	± 2 °C
3	Термопара ТХА	5	Від 0 до 1200 °C	
4	Секундомір СОПр	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	± 1 мкм

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ:

Результати експериментальних випробувань визначення об'ємного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій наведено у таблиці 3.



Таблиця 3

Результати експериментальних випробувань		
Показники	1	2
Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня	білий, матова поверхня
Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм	1,65 кг/м ² мм	1,65 кг/м ² мм
Діаметр склянки, мм	50,0	50,0
Маса зразка, г	2,96	2,04
Середня товщина спученого шару, мм	13,48	12,42
Коефіцієнт об'ємного спучення	10442,75	10442,75
Маса матеріалу в корзині, г	32,7	32,7
Довжина корзини, мм	160	160
Ширина корзини, мм	60	60
Середня висота матеріалу в корзині, мм	2,07	2,07
Коефіцієнт умовно-лінійного спучення	1,717	1,717

Розрахунок об'ємного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття:

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

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

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

$$K_{yl} = 0,125 \cdot 10^{-4} \pi \cdot d^2 \cdot \rho_n \cdot (h_{c1}/m_1 + h_{c2}/m_2),$$

$$\rho_n = 10^3 \cdot m / (l \cdot a \cdot h) \text{ [г/см}^3\text{]},$$

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

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



ВИСНОВКИ

Згідно з п. 7.3.2 ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання» об'ємний коефіцієнт спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій становить 10442,75 мм³/г, коефіцієнт умовно-лінійного спученням – 1,717.

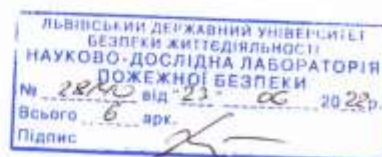
Завідувач науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності



Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Ад'юнкт докторантури, ад'юнкт
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності

Дмитро СМОЛЯК



ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

Свідоцтво про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

ПРОТОКОЛ № 28/40/220712

ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ КОМПОЗИЦІЇ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ
(ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ UA 71300) МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ
ЛІНІЙНОГО КОЕФІЦІЄНТА СПУЧЕННЯ
ЗА ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «ВОГНЕЗАХИСНЕ ОБРОБЛЕННЯ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ТА МЕТОДИ
КОНТРОЛЮВАННЯ»

Львів-2022



ПРОТОКОЛ № 28/40/220712

ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗА ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010
«ВОГНЕЗАХИСНЕ ОБРОБЛЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ. ЗАГАЛЬНІ
ВИМОГИ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮВАННЯ»

Дата проведення

випробування: 04.07-11.07.2022 р.

Умови в приміщенні:

температура, °C	18
атм.тиск, кПа	97.3
відносна вологість, %	64,5

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ЛДУ БЖД.

Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Матеріал композиції для високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій. Зразок композиції пастоподібний білого кольору. Склад: поліметилфенілфенілсилоксан -30 - 40 %, алюмінію оксид – 30 - 40 %, титану оксид – 10 - 20 %, хрому оксид – 10 - 20 %.

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Згідно з п. 7.3.3. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання».

Метод визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з деревини, металу або бетону.

Метод поширюється на випробування вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу). Випробування проводять за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисного матеріалу.

Для випробувань слід використовувати такі засоби випробувань:



- електрична піч з пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури, об'ємом робочої камери не менше 30 дм³ та температурою нагріву не менше ніж 340 °С (нерівномірність температури за об'ємом робочої камери печі не більше ± 10 °С);

- секундомір класу не нижче 2;

- штангенциркуль з ціною поділки 0,05 мм;

ВИПРОБУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙНОГО КОЕФІЦІЄНТА СПУЧЕННЯ

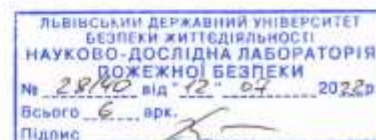
Сутність методу визначення лінійного коефіцієнта спучення полягає у визначенні співвідношення товщини вогнезахисного матеріалу, що нанесений на металеву пластину, до та після впливу температури 340 °С. Метод застосовують для матеріалів, які постачаються із фіксованими розмірами (стрічки, рулони, пластини). Для випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисні покриття (фарби, лаки) наносять згідно з технологією підприємства-виробника на дві металеві квадратні пластини зі стороною (50 ± 1) мм та товщиною $(2,0 \pm 0,2)$ мм. Товщина шару покриття після висихання має становити $(1,0 \pm 0,5)$ мм. Допускається нанесення шару іншої товщини, якщо це передбачено технологією підприємства-виробника. З вогнезахисних матеріалів, що постачаються у вигляді стрічок, пластин тощо, вирізають зразки довжиною (50 ± 1) мм та фактичною шириною, але не більше (50 ± 1) мм, які накладають або наклеюють на металеві пластини згідно з технологією підприємства-виробника.

Підготовлені зразки висушують за температури (20 ± 5) °С протягом 48 год та за температури (70 ± 5) °С протягом 3 год. Після охолодження до температури навколишнього середовища вимірюють товщину шару покриття із вогнезахисного матеріалу h_n за формулою:

$$h_n = h_z - h_m,$$

де h_z - товщина зразка (разом із металевою пластиною), мм;

h_m - товщина металевої пластини, мм.



Пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури у печі задають температуру $(340 \pm 5) ^\circ\text{C}$ та доводять її до сталої температури протягом не менше 1 год.

Два зразки вносять до печі за час не більше 20 с. Після закриття печі вмикається секундомір. Через 20 хв пластини виймають із печі та встановлюють на пластину з негорючого матеріалу для охолодження. Через 30 хв штангенциркулем визначається середня висота спученого шару матеріалу h_c на кожній пластині.

Для визначення середнього значення висоти вимірюють висоту у п'яти точках у центрі пластини і в середніх точках між центром та кутами пластини.

За результатами випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення розраховується коефіцієнт спучення на пластинах K_d за формулою:

$$K_d = 0,5 (h_{c1} / h_{n1} + h_{c2} / h_{n2}),$$

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

h_{n1} , h_{n2} - середні значення товщини початкового шару матеріалу на першій та другій пластинах, мм.

Таблиця 1

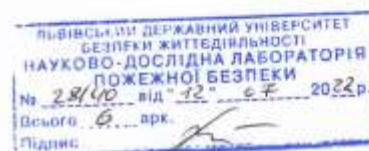
Технічні характеристики високотемпературного
вогнезахисного вогнезахисного покриття

Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня
Масова частка нелетучих речовин, % мас	80 %
Термін служби покриття	20-25 років
Гарантійний термін збереження при температурі від $+5 ^\circ\text{C}$ до $+40 ^\circ\text{C}$	1 рік
Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм (без обліку технологічних утрат)	1,6 кг/м ² •мм

Таблиця 2

Характеристика вимірювальних приладів

№ п/п	Найменування приладу чи пристрою	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка вимірювання
1	Електроніч СНОЛ 2.5	б/н	Від 20 до 1100 $^\circ\text{C}$	-



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 СОПр	8625	Від 0 до 1800 с	±1с
5	Лінійка вимірювальна	б/н	Від 0 до 1000 мм	±0,5 мм
6	Штангенциркуль ШЦ-I-200-0,02	0805174	Від 0 до 200 мм	± 0,02 мм
7	Товщиномір Profiline TG-8855-fn	04864	Від 0 до 1250 мкм	± 1мкм

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ:

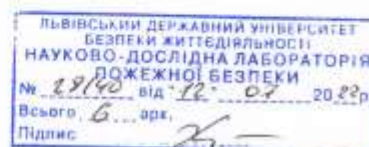
Результати експериментальних випробувань визначення лінійного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати експериментальних випробувань		
Показники	1	2
Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня	білий, матова поверхня
Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм	1,65 кг/м ² мм	1,65 кг/м ² мм
Металева квадратна пластина розмір сторони, мм	50	50
Товщина металевої квадратної пластини, мм	2	2
Середня товщина сирого шару, мм	0,8	1,0
Середня товщина сухого шару, мм	0,53	0,68
Середня товщина спученого шару, мм	22,5	23,5
Коефіцієнт лінійного спучення, мм	38	

Розрахунок лінійного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття:

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



ВИСНОВКИ

Згідно з п. 7.3.3 ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання» лінійний коефіцієнт спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій становить 38.

Завідувач науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності



Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Ад'юнкт докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності

Дмитро СМОЛЯК

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності	
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ	
№ 28140	від "12" 09 2022р.
Всього 6... арк.	
Підпис	

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

Свідоцтво про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р.

Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

ПРОТОКОЛ № 28/40/220803

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТОВЩИНИ СПУЧЕННЯ КОМПОЗИЦІЇ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ
(ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ UA 71300) ВІД ТОВЩИНИ
НАНЕСЕНОГО ШАРУ МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙНОГО
КОЕФІЦІЄНТА СПУЧЕННЯ
ЗА ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «ВОГНЕЗАХИСНЕ ОБРОБЛЕННЯ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ТА МЕТОДИ
КОНТРОЛЮВАННЯ»

Львів-2022



ПРОТОКОЛ № 28/40/220803

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТОВЩИНИ СПУЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ (ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ UA 71300) ВІД ТОВЩИНИ НАНЕСЕНОГО ШАРУ ЗА ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «ВОГНЕЗАХИСНЕ ОБРОБЛЯННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮВАННЯ»

Дата проведення

випробування: 18.07-01.08.2022 р.

Умови в приміщенні:

температура, °C	18
атм. тиск, кПа	97.3
відносна вологість, %	64,5

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ЛДУ БЖД.

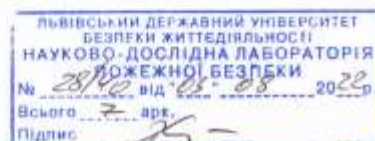
Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Матеріал композиції для високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісілоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій. Зразок композиції пастоподібний білого кольору. Склад: поліметилфенілфенілсилоксан -30 - 40 %, алюмінію оксид – 30 - 40 %, титану оксид – 10 - 20 %, хрому оксид – 10 - 20 %.

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Згідно з п. 7.3.3, ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання».

Метод визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій з деревини, металу або бетону.



Метод поширюється на випробування вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу). Випробування проводять за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисного матеріалу.

Для випробувань слід використовувати такі засоби випробувань:

- електрична піч з пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури, об'ємом робочої камери не менше 30 дм³ та температурою нагріву не менше ніж 340 °C (нерівномірність температури за об'ємом робочої камери печі не більше ± 10 °C);

- секундомір класу не нижче 2;

- штангенциркуль з ціною поділки 0,05 мм;

ВИПРОБУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙНОГО КОЕФІЦІЄНТА СПУЧЕННЯ

Сутність методу визначення лінійного коефіцієнта спучення полягає у визначенні співвідношення товщини вогнезахисного матеріалу, що нанесений на металеву пластину, до та після впливу температури 340 °C. Метод застосовують для матеріалів, які постачаються із фіксованими розмірами (стрічки, рулони, пластини). Для випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисні покриття (фарби, лаки) наносять згідно з технологією підприємства-виробника на дві металеві квадратні пластини зі стороною (50 $\pm$ 1) мм та товщиною (2,0 $\pm$ 0,2) мм. Товщина шару покриття після висихання: 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)

Допускається нанесення шару іншої товщини, якщо це передбачено технологією підприємства-виробника. З вогнезахисних матеріалів, що постачаються у вигляді стрічок, пластин тощо, вирізають зразки довжиною (50 $\pm$ 1) мм та фактичною шириною, але не більше (50 $\pm$ 1) мм, які накладають або наклеюють на металеві пластини згідно з технологією підприємства-виробника.



Підготовлені зразки висушують за температури $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ протягом 48 год та за температури $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ протягом 3 год. Після охолодження до температури навколишнього середовища вимірюють товщину шару покриття із вогнезахисного матеріалу h_n за формулою:

$$h_n = h_z - h_m,$$

де h_z - товщина зразка (разом із металевою пластиною), мм;

h_m - товщина металевої пластини, мм.

Пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури у печі задають температуру $(340 \pm 5)^\circ\text{C}$ та доводять її до сталої температури протягом не менше 1 год.

Два зразки вносять до печі за час не більше 20 с. Після закриття печі вмикається секундомір. Через 20 хв пластини виймають із печі та встановлюють на пластину з негорючого матеріалу для охолодження. Через 30 хв штангенциркулем визначається середня висота спученого шару матеріалу h_c на кожній пластині.

Для визначення середнього значення висоти вимірюють висоту у п'яти точках у центрі пластини і в середніх точках між центром та кутами пластини.

За результатами випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення розраховується коефіцієнт спучення на пластинах K_a за формулою:

$$K_a = 0,5 (h_{c1} / h_{n1} + h_{c2} / h_{n2}),$$

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

h_{n1} , h_{n2} - середні значення товщини початкового шару матеріалу на першій та другій пластинах, мм.

Таблиця 1

Технічні характеристики високотемпературного
вогнезахисного вогнезахисного покриття

Колір і зовнішній вигляд покриття	білий, матова поверхня
Масова частка нелетучих речовин, % мас	80 %
Термін служби покриття	20-25 років
Гарантійний термін збереження при температурі від $+5^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$	1 рік
Витрата для одержання покриття товщиною 1 мм (без обліку технологічних утрат)	1,6 $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{мм}$



5

Таблиця 2

Характеристика вимірювальних приладів

№ п/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 °C	-
2	Регулятор-вимірювач РТ 0102	05.387	Від 0 до 1200 °C	± 2°C
3	Термопара ТХА	5	Від 0 до 1200 °C	
4	Секундомір СОПр	8625	Від 0 до 1800 с	±1с
5	Лінійка вимірювальна	б/н	Від 0 до 1000 мм	±0,5 мм
6	Штангенциркуль ШЦ-I- 200-0,02	0805174	Від 0 до 200 мм	± 0,02 мм
7	Товщиномір Profiline TG-8855-fn	04864	Від 0 до 1250 мкм	± 1мкм

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ:

Результати експериментальних випробувань визначення лінійного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та оксидів алюмінію, титану, хрому для металевих будівельних конструкцій наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

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

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 ² мм						
Металева квадратна пластина розмір	50						



сторони, мм							
Товщина металевої 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

Розрахунок лінійного коефіцієнта спучення високотемпературного та вогнезахисного покриття:

$$K_{\text{л. група п}} = 0,5 (h_{c1} / h_{n1} + h_{c2} / h_{n2})$$

Згідно наведеної вище методу та проведених експериментальних випробувань, отримуємо залежність товщини спучення вогнезахисного покриття (патент на корисну модель ua 71300) від товщини нанесеного шару, що представлено на рисунку Б1.



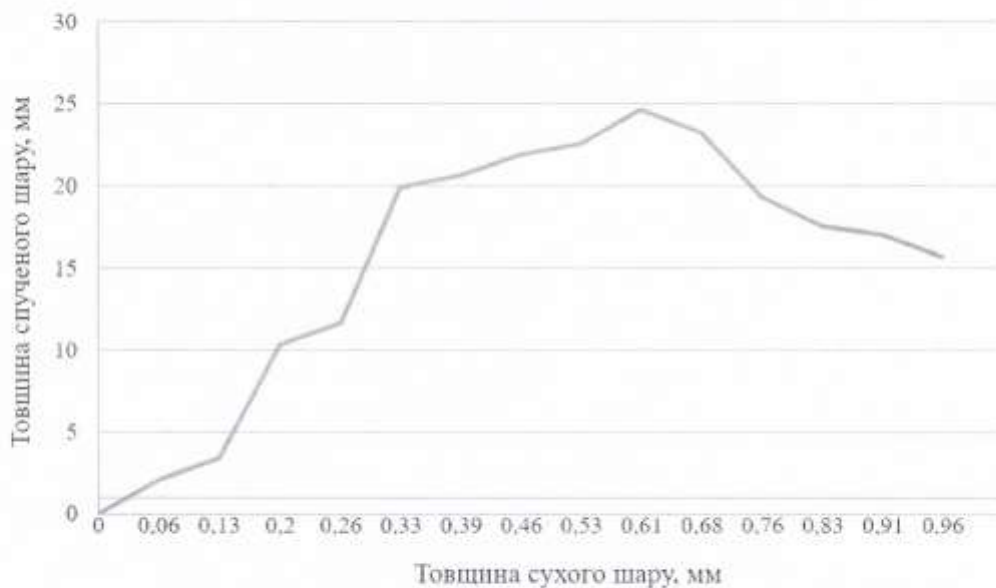


Рисунок Б1 – Залежність товщини спучення вогнезахисного покриття (патент на корисну модель ua 71300) від товщини нанесеного шару

ВИСНОВКИ

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.

Завідувач науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності



Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Ад'юнкт докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності



ДОДАТОК Е

Методика

проведення експериментальних досліджень з визначення вогнезахисної здатності
(ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій

**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ**

Свідомство про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р.

Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

**МЕТОДИКА
ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З
ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ
(ЕФЕКТИВНОСТІ) ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ
СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Розроблено:

Завідувач науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності



Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Докторант докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності
к.т.н., доцент



Роман ВЕСЕЛІВСЬКИЙ

Ад'юнкт докторантури, ад'юнктури
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності



Дмитро СМОЛЯК

Львів- 2023

Зміст

№ з/п	Найменування розділу	Ст.
1	Сфера застосування	3
2	Нормативні посилання	3
3	Терміни та визначення	4
4	Сутність методу випробування	4
5	Засоби випробування	5
6	Дослідні зразки	7
7	Підготовка та проведення випробування	9
8	Оцінка результатів випробування	11
9	Правила оформлення результатів випробування	11
10	Вимоги безпеки під час проведення випробування	12

1. Сфера застосування

1.1. Методика призначена для дослідження температури прогріву сталевих будівельних конструкцій (пластин) захищених реактивними (пасивними) вогнезахисними матеріалами.

1.2. Методика поширюється на реактивні та пасивні вогнезахисні покриття для сталевих конструкцій: реактивні (інтумесцентні) покриття, штукатурні вогнезахисні покриття та конструктивні матеріали (плити).

1.3. Методика встановлює порядок проведення випробувань зразків сталевих конструкцій (пластин) із вогнезахисним покриттям та облицюванням.

1.4. Результати випробування/оцінювання за цією методикою можуть бути застосовані для визначення технічних параметрів вогнезахисного покриття для підвищення межі вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій.

2. Нормативні посилання

У даній методиці використані такі стандарти та нормативні документи:

ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT);

ДСТУ EN 13381-8:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-8:2013, IDT);

ДСТУ EN 13381-4:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 4. Пасивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-4:2013, IDT);

ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності;

ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги;

ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги та методи контролювання;

ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94) Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статистичні характеристики перетворення;

ДСТУ 2272-2006 Пожежна безпека. Терміни та визначення.

3. Терміни та визначення

У даній методиці подані такі терміни та визначення:

3.1. Реактивний вогнезахисний матеріал – реактивні матеріали, склад яких спеціально підібрано з таким розрахунком, щоб забезпечити перебіг хімічної реакції під час нагрівання, з тим щоб змінився їх фізичний стан, в такий спосіб забезпечуючи вогнезахист за рахунок теплоізолювального та ендотермічного ефектів;

3.2. Пасивний вогнезахисний матеріал – матеріали, які не змінюють свого фізичного стану під час нагрівання і забезпечують захист завдяки своїм фізичним і тепловим властивостям;

3.3. Вогнезахист – захист, забезпечуваний сталевій конструкції системою вогнезахисту, за якого температуру сталевій конструкції обмежено упродовж всього проміжку часу вогневого впливу;

3.4. Система вогнезахисту – вогнезахисний матеріал разом з відповідною ґрунтовкою та верхнім покриттям (якщо воно застосовується);

3.5. Зразок для випробування – сталева конструкція з системою вогнезахисту, яку піддають випробуванню;

3.6. Межа вогнестійкості будівельної конструкції – показник вогнестійкості конструкції, який визначається часом в хв від початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з граничних станів з вогнестійкості;

3.7. Критична температура сталевій конструкції – температура, за якої очікується руйнування сталевій конструкції при рівномірному розподілі температури для заданого рівня навантаження.

3.8. Коефіцієнт поперечного перерізу сталевій конструкції – співвідношення площі поверхні, що зазнає впливу та об'єму сталі.

4. Сутність методу випробування

Сутність методу випробувань полягає у визначенні проміжку часу від початку температурного впливу за стандартним температурним режимом згідно з ДСТУ Б

В.1.1-4-98* на квадратну сталеву пластину зі стороною (500 ± 5) мм з нанесеним засобом вогнезахисту (вогнезахисні фарби, штукатурки та облицювання) до підвищення її температури на $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ від початкового значення (критична температура).

5. Засоби випробування

5.1. Склад засобів вогневого випробування:

- установка для випробувань;
- засоби вимірювальної техніки;
- обладнання для проведення фото- та відеозйомок.

5.2. Установка для випробувань

Установка для випробувань (далі – установка) призначена для створення температурного режиму у печі відповідно до ДСТУ EN 1363-1:2023 та кріплення зразків сталевих конструкцій (пластин) з вогнезахисними покриттями.

Для проведення випробувань застосовують установку для визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів, принцип роботи якої полягає у нагріванні внутрішнього простору камери установки з використанням електричних нагрівальних елементів. Схему установки представлено на рис 5.1.

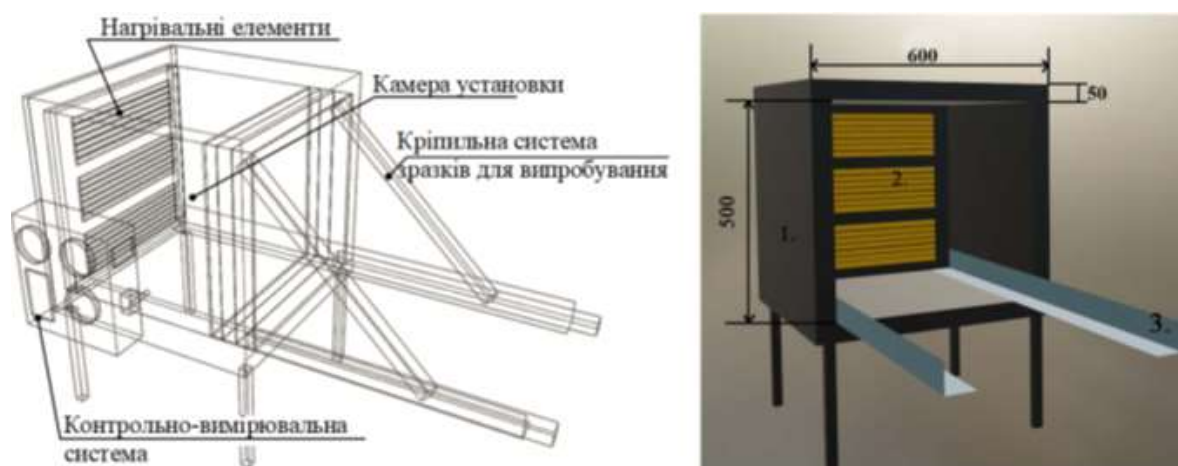


Рисунок 5.1 – Конструктивна схема випробувальної установки, де:

1 – корпус теплоізоляційний з вермикулітових плит (товщ. 50 мм), обшитих сталевими листами; 2 – радіаційна нагрівна панель; 3 – напрямні для встановлення та руху дослідного зразка

Розміри камери установки 500 х 500 х 500 мм. Об'єм камери становить 0,5 м³. Діапазон робочих температур камери – від 0 до 1100 °С. Температурний режим у камері забезпечує нагрівальна радіаційна панель, яка складається з трьох нагрівачів потужністю 4 кВт кожний, що живляться напругою 220 В від трифазної мережі. Робочий нуль загальний.

Допускається для проведення випробувань застосовувати інші вогневі (теплові) печі, які мають більші розміри, ніж вказані вище, і відповідають вимогам ДСТУ Б В.1.1-4-98*.

5.3. Засоби вимірювальної техніки.

Засоби вимірювальної техніки, що необхідні під час випробувань:

- засоби вимірювання температури в печі, а також на дослідному зразку;
- засоби вимірювання параметрів навколишнього середовища (температури повітря, атмосферного тиску, відносної вологості повітря);
- засоби вимірювання лінійних розмірів зразків;
- засоби вимірювання часу випробування.

Засоби вимірювальної техніки мають забезпечувати вимірювання параметрів з похибкою, значення якої не перевищує:

- а) при вимірюванні температури: в установці ± 15 °С; необігрівної поверхні сталевій конструкції ± 4 °С; повітря ± 1 °С;
- б) при вимірюванні атмосферного тиску ± 4 мм рт. ст.;
- в) при вимірюванні відносної вологості повітря ± 5 %;
- г) при вимірюванні лінійних розмірів зразків: довжини та ширини зразка ± 1 мм; товщини вогнезахисного покриття ± 10 %;
- д) при вимірюванні часу випробування ± 5 с.

Перелік технічних засобів вимірювань, які призначені для проведення випробувань і відповідають зазначеним вище вимогам, наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Технічні засоби вимірювання

Найменування технічного засобу	Діапазон вимірювання	Клас точності, похибка засобу вимірювальної техніки
Система для вимірювання температури у печі та на зразку	Від 0 °С до 1100 °С	$\pm 0,35 \%$
Термопари ТХА за ДСТУ 2837-94	Від 0 °С до 333 °С від 334 °С до 1200 °С	$\pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим}}$
Гігрометр	Від 0 °С до 50 °С від 2 % до 98 %	$\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 3\%$
Барометр-анероїд	Від 600 мм рт. ст. до 800 мм рт. ст.	$\pm 1 \text{ мм рт. ст.}$
Лінійка вимірювальна	Від 0 мм до 1000 мм	$\pm 1,0 \text{ мм}$
Штангенциркуль	Від 0 мм до 125 мм	2 клас точності $\pm 0,1 \text{ мм}$
Прилад для вимірювання товщини вогнезахисного покриття	Від 0 мм до 2 мм від 2 мм до 10 мм більше 10 мм	$\pm 0,01 \text{ мм}$ $\pm 0,2 \text{ мм}$ $\pm 1 \text{ мм}$
Секундомір	Від 0 с до 3600 с від 0 с до 60 с більше 60 с	2 клас точності $\pm (0,4 \cdot t_{\text{вим}}/60) \text{ с}$; $\pm (0,4 + 1,5 \cdot (t_{\text{вим}} - 60)/3540) \text{ с}$

5.4. Обладнання для проведення фото- та відеозйомок.

Для проведення фото- та відеозйомок застосовуватися фотоапарати, кіно- та відеокамери.

6. Дослідні зразки

6.1. Дослідний зразок для випробування закріплюється за допомогою спеціальних кронштейнів, що у сукупності утворюють кріпильну систему. Зразок для випробування являє собою сталеву квадратну пластину (розмір сторони 500 мм) із вогнезахисним покриттям з боку теплового впливу випробувальної камери. З іншого боку зразок ізолюється шарами теплоізолювальних матеріалів згідно зі схемою, поданою на рис. 6.1.

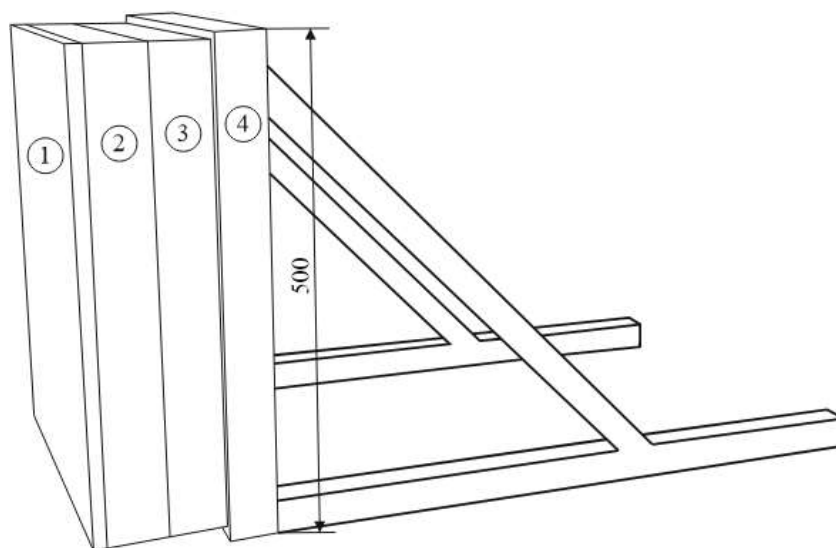


Рис. 6.1. Конструктивна схема зразка для випробувань: 1 – сталева пластина (товщ. 3 – 8 мм); 2 – перлітова плита (товщ. 50 мм); 3 – плита з мінеральної вати (товщ. 40 мм); 4 – каркас напрямної шахти (товщ. 38 мм)

Для контролю температури з боку необігрівної сторони зразка для випробування встановлюється п'ять термопар. На рис. 6.2. наведено схему розташування термопар (Т1 – Т5 – номер термопари).

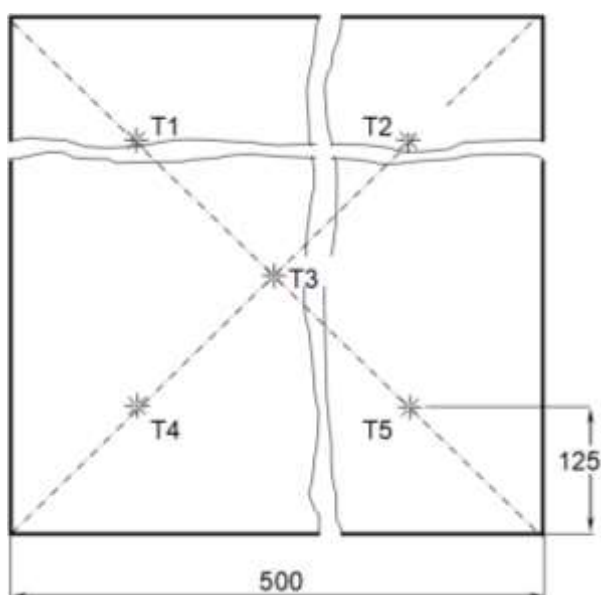


Рис. 6.2. Схема розташування термопар

6.2. Для кожного виду досліджуваного вогнезахисного покриття, мінімально застосовують 9 дослідних зразків. Дослідження проводяться із дослідними зразками різної товщини сталевий пластини та товщини вогнезахисного покриття.

6.3. Типові параметри та технічні характеристики дослідних зразків наведено яких наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Типові параметри та технічні характеристики дослідних зразків

№ зразка Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Товщина сталевий пластини, мм	3			5			8		
Товщина покриття, мм	мін.	сер.	макс.	мін.	сер.	макс.	мін.	сер.	макс.

6.4. Вологість зразків повинна відповідати вимогам ДСТУ Б В.1.1-4-98*.

Вологість зразка повинна відповідати технічним умовам і бути врівноваженою з навколишнім середовищем. Для отримання відповідної вологості зразки необхідно кондиціонувати у закритому відокремленому приміщенні за температури не менше 15 °C та відносній вологості не більше 75%.

7. Підготовка та проведення випробування

7.1. Встановлення зразків.

До початку випробування слід встановити дослідний зразок у відповідності розділу 5 методики.

Для контролю температури всередині камери використано дві термопари, одна з яких розташована на відстані 10 – 15 см від електричних нагрівальних елементів, а друга – на такій ж відстані від дослідного зразка.

7.2. Початок випробування.

Не більше ніж за 5 хв до початку випробування необхідно зареєструвати початкові значення температури в печі та на зразку за показами усіх термопар, а також температуру та вологість повітря в приміщенні лабораторії.

Температура в приміщенні лабораторії повинна бути не менше 5 °С, а вологість не більше 75 %.

Температура зразка до початку випробування має бути від 5 до 40 °С та не повинна відрізнятися від температури навколишнього середовища більше ніж на ± 5 °С.

Початком випробування вважається час початку дії температурного впливу на дослідний зразок.

7.3. Вимірювання та спостереження у процесі випробування.

Вимірювання температури.

Вимірювання і реєстрування температури в печі та на необігрівній поверхні зразка необхідно проводити з інтервалом не більше ніж 1 хв.

Вимірювання температури в печі, навколишнього середовища та на зразку слід проводити згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98*.

7.4. Спостереження за поведінкою зразка.

Під час проведення випробування слід спостерігати, якщо це можливо, за зразком і складати хронологічний опис змін у зразку, тобто: появи тріщин, отворів, диму, розплавлення і обвуглювання матеріалу тощо. Якщо це можливо, то під час випробування слід проводити фото- та відеозйомку. В звіті (протоколі) про результати випробувань обов'язково подаються фотографії зразків до і після випробувань.

7.5. Припинення випробування.

Випробування мають продовжуватися до перевищення середньої температури дослідного зразка над його початковою температурою на 480 °С.

Випробування припиняється достроково, якщо його продовження загрожує безпеці персоналу лабораторії або призведе до пошкодження випробувальної печі.

8. Оцінка результатів випробування

8.1. За результатами випробування встановлюють час прогріву дослідних зразків до критичної температури прогріву – 480 °С від початкового значення на необігрівній поверхні зразка. Критична температура приймається як середнє арифметичне значення показників термопар на необігрівній поверхні зразка (рис. 6.2).

8.2. Результати експериментальних даних представляють у вигляді графіків чи таблиць, де представлено температури прогріву дослідних зразків різної товщини сталевієї пластини та товщини вогнезахисного покриття.

9. Правила оформлення результатів випробування

Результати випробування оформлюються протоколом або звітом.

Протокол випробування (звіт про випробування) має містити відомості про зразки, що були випробувані, умови та результати випробування, а саме:

- назву та адресу лабораторії, що проводила випробування;
- дату випробування;
- назву та адресу замовника, а також назву виробника вогнезахисного матеріалу;
- дані щодо параметрів зразків для випробувань, а також технології нанесення (кріплення) вогнезахисного покриття на них;
- якщо виготовлювач матеріалу або виробу невідомий, то це слід вказати;
- ескізи, фотографії та опис зразків;
- позначення стандарту, за яким проводилося випробування;
- опис розташування термопар на зразках;
- результати вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску в приміщенні, де проводились випробування;
- результати вимірювання температури у випробувальній установці;
- результати вимірювання температури на (в) дослідних зразках;
- опис поведінки зразків у процесі випробування (якщо це можливо);
- час початку та закінчення випробування і причину припинення випробування;
- оцінку результатів випробування;

- значення часу прогріву дослідних зразків до критичної температури прогріву – 480 °С від початкового значення на необігрівній поверхні зразка;
- фотографії зразків до і після випробування.

10. Вимоги безпеки під час проведення випробування

Організація роботи по техніці безпеки та охороні праці, а також загальне керівництво покладається на керівника лабораторії, в якій проводяться випробування, а по окремим ділянкам - на керівника ділянок цієї лабораторії.

До роботи в лабораторії допускаються особи, що пройшли інструктаж і навчання з безпеки праці.

Для закріплення знань співробітників проводять періодичні повторні інструктажі і перевірку знань.

Всі співробітники лабораторії повинні володіти прийомами надання першої долікарської медичної допомоги при нещасних випадках.

В кожному робочому приміщенні повинна знаходитись повністю укомплектована аптечка першої медичної допомоги.

Якщо установка для випробувань розміщена у приміщенні, то це приміщення повинно бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією, котра повинна включатись за 30 хв до початку роботи і вимикатись після її закінчення.

Працівники лабораторії повинні перед початком робіт надіти спецодяг і мати при собі індивідуальні засоби захисту, що передбачені в робочих інструкціях на проведення робіт.

В лабораторних приміщеннях повинні знаходитись первинні засоби пожежогасіння. Кожний працівник лабораторії повинен знати, де вони знаходяться.

Після закінчення випробувань необхідно навести порядок на робочому місці, вимкнути випробувальне обладнання та засоби вимірювальної техніки, систему вентиляції та освітлювальні прилади.

ДОДАТОК Ж

Акти впровадження результатів досліджень:

- Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту;
- ТзОВ «ГЕФЕСТ Л»;
- Львівський державний університет безпеки життєдіяльності.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
доктор наук з державного управління, професор, Заслужений лікар України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

Петро ВОЛЯНСЬКИЙ

«08» травня 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
СМОЛЯКА Дмитра Володимировича на тему:
«Прогнозування вогнестійкості сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісілоксану»

Складено комісію:

голова комісії:

заступник начальника ІДУ НД ЦЗ з навчальної роботи, доктор технічних наук, професор **ЄРЕМЕНКО Сергій Анатолійович**;

члени комісії:

головний науковий співробітник науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ д-р. техн. наук, ст. наук. співроб. **ЖАРТОВСЬКИЙ Сергій Володимирович**;

начальник науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ, канд.техн.наук, ст. дослідник **ДОБРОСТАН Олександр Васильович**.

Комісія перевірила та цим актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи **СМОЛЯКА Дмитра Володимировича** на тему «Прогнозування вогнестійкості сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісілоксану» впроваджено у наукову діяльність науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, зокрема методика проведення експериментальних досліджень з визначення вогнезахисної здатності (ефективності) вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій використовується під час оцінювання вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій.

Акт складено для надання в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Голова комісії

д-р техн. наук, професор

Сергій ЄРЕМЕНКО

Члени комісії:

д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

канд. техн. наук, ст. досл.

Олександр ДОБРОСТАН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТзОВ «ГЕФЕСТ Л»

Роман ПЕЛЕХ

07 05 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

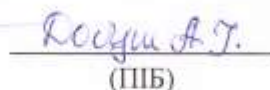
Смоляка Дмитра Володимировичана тему: «Прогнозування вогнестійкості сталевих балок
із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану»

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Смоляка Дмитра Володимировича було впроваджено під час розроблення робочих проектів вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій. Об'єктом впровадження є «Технологічний регламент нанесення складу вогнезахисного покриття на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для сталевих будівельних конструкцій».

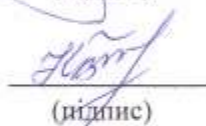
Згідно регламенту, передбачено застосування речовини температуро- та вогнезахисної на основі полісилоксану та алюмінію оксиду для проектування вогнезахисних систем стандартних профілів сталевих конструкцій при підборі товщини вогнезахисного покриття для забезпечення необхідного класу вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій (R15-R90).

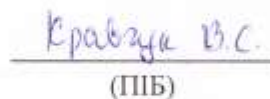
Голова


(підпис)

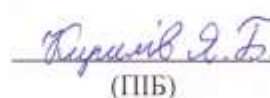

(ПІБ)

Члени комісії:


(підпис)


(ПІБ)


(підпис)


(ПІБ)

« 07 » 05 2024 року

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з навчальної та методичної
Львівського державного
університету безпеки життєдіяльності
технічних наук, доцент
Дмитро ЧАЛИЙ
2024 року

про впровадження результатів дисертаційної роботи
СМОЛЯКА Дмитра Володимировича
за темою:

«Прогнозування вогнестійкості сталевих балок
із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану»

Комісія у складі:

голови комісії – начальника навчально-методичного центру Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Миколи СИЧЕВСЬКОГО;

членів комісії: заступника начальника інституту з навчально-наукової роботи навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки кандидата технічних наук, доцента Івана ПАСНАКА та начальника кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки кандидата технічних наук Олега ПАЗЕНА встановила, що результати дисертаційної роботи Дмитра СМОЛЯКА на тему «Прогнозування вогнестійкості сталевих балок із реактивним вогнезахисним покриттям на основі полісилоксану» мають теоретичне та практичне значення та використовуються у навчальному процесі в університеті.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на кафедрі наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики при викладанні навчальної дисципліни «Будівельні матеріали і конструкції та їх поведінка в умовах пожежі» змістовного модуля №2 «Архітектурні конструкції будівель та споруд», тема 2.4 «Вогнезахист металевих конструкцій» за освітньо-професійною програмою «Пожежна безпека» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 261 «Пожежна безпека».

Результати використані в лекційних курсах та при проведенні практичних занять з зазначеної навчальної дисципліни при викладенні основних теоретичних положень та практичній реалізації методики розрахунку вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття для забезпечення нормованих класів вогнестійкості металевих балок.

Голова комісії:

Члени комісії:

Микола СИЧЕВСЬКИЙ

Іван ПАСНАК

Олег ПАЗЕН