

*О.Ю. Пазен, канд. техн. наук, С.Я. Вовк, канд. техн. наук,
О.І. Башинський, канд. техн. наук, доцент, М.З. Пелешко, канд. техн. наук, доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕТИЛФЕНІЛСИЛОКСАНУ ДЛЯ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розглянуто актуальну проблему з визначення межі вогнестійкості захищених сталевих елементів будівельних конструкцій. На основі проведеного аналізу літературних джерел розглянуто основні методи підвищення межі вогнестійкості сталевих конструкцій, а також запропоновано використання вогнезахисного покриття на основі поліметилфенілсилоксану. Проведено аналітичні дослідження для визначення часу вогнезахисної дії покриття порівняно з незахищеними конструкціями. Встановлено, що межа вогнестійкості захищених сталевих будівельних конструкцій підвищується у 2-4 рази залежно від товщини нанесення.

Ключові слова: вогнестійкість, вогнезахист, межа вогнестійкості, сталеві конструкції.

O.Yu.Pazen, S.Ya. Vovk, O.I. Bashynskiy, M.Z. Peleshko

DEFINITION OF EFFICIENCY OF POLYMETHYLPHENYLSILOXANE-BASED FIRE PROTECTIVE COATINGS FOR STEEL BUILDING STRUCTURES

The article deals with the current problem of determining the fire resistance of protected steel elements of building structures. Based on the analysis of literary sources, the main methods for increasing the fire resistance of steel structures are considered, as well as the use of fire retardant coatings based on polymetallophenylsiloxane. Analytical studies were conducted to determine the time of fire protection of the coating, compared to unprotected structures. The results show that the limit of fire resistance of protected steel constructions is increased 2-4 times, depending on the thickness of the application.

Key words: fire resistance, fire protection, fire resistance limit, steel structures.

Вступ. У будівництві застосовуються різноманітні сталеві конструкції, форма і конструктивне вирішення яких найчастіше визначаються призначенням. Це можуть бути елементи металевих чи змішаних каркасів виробничих будівель – балки, прогони, ферми, ригелі, колони, зв'язки тощо; листові конструкції, до яких належать трубопроводи великих діаметрів, посудини для зберігання рідин (резервуари), газів (газгольдери), сипких матеріалів (бункери і силоси), споруди і установки металургійних, нафтопереробних, хімічних виробництв, об'єктів енергетики (захисні та несучі оболонки домен, повітрянагрівачів, ректифікаційних колон, реакторів тощо); каркаси багатоповерхових (висотних) цивільних будівель; великопролітні конструкції покрівель ангарів, цехів авіа-, судно- та машинобудування, лабораторій, громадських споруд (театрів, кіноконцертних залів, ринків, критих стадіонів, виставочних павільйонів); інші конструкції, до яких висувають особливі вимоги, наприклад, пов'язані з атомною енергетикою тощо.

Широке впровадження металевих конструкцій у будівництві є наслідком таких основних позитивних характеристик, як висока надійність, яка зумовлена однорідністю металу; легкість (через високі міцності та модулі пружності сталей і алюмінієвих сплавів сталеві конструкції мають меншу масу порівняно з аналогічними залізобетонними чи дерев'яними); індустріальність (сталеві конструкції виготовляються з готових прокатних, пресованих чи гнутих профілів, найчастіше на висококомеханізованих підприємствах, монтуються спеціалізованими бригадами з мінімальними затратами ручної праці, мають високий ступінь заводської готовності); непроникність для рідин та газів, високі захисні властивості від впливу іонізуючих та інших шкідливих випромінювань.

Одночасно суттєвими є і недоліки, а саме недостатня корозійна стійкість, спричинена високою хімічною активністю сталі внаслідок взаємодії з різними реагентами середовища і його руйнуванням при переході в оксиди, солі та інші сполуки; **мала вогнестійкість** внаслідок швидкого нагрівання елементів сталевих конструкцій до температури переходу в пластичний стан через високу теплопровідність сталі та невеликі розміри перерізів. У сталях уже при температурах, вищих за 200 °С, спостерігається зменшення модуля пружності, що призводить до зростання деформації конструкцій, а при 500 °С вони переходять у пластичний стан.

Постановка проблеми. Відомо, що вогнестійкість сталевих незахищених конструкцій становить 15 хв. Проте до будівель ступеня вогнестійкості ІІІб або будівель до яких ставляться додаткові вимоги щодо межі вогнестійкості, цей час є недостатнім [1].

Перспективним шляхом збільшення межі вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій є нанесення на їх поверхні вогнезахисних речовин (ВЗР), що спучуються під дією високих температур пожежі з утворенням теплоізолювального шару [2, 3]. Тому розроблення рецептури вогнезахисних покриттів, що спучуються, є актуальною науково-технічною задачею.

На основі аналізу літературних джерел та попередніх експериментальних досліджень вибрано вихідні склади для захисних покриттів для одержання максимального вмісту температуростійких та вогнестійких фаз з врахуванням особливостей дії високих температур [2, 4].

Вихідний склад вогнезахисного покриття. В основу отримання композиції покладено задачу створити вогнезахисні композиції для збільшення вогнестійкості сталевих конструкцій. Поставлена задача вирішується веденням у склад композиції для покриття компонентів, що містять полісилоксан та алюмінію оксид. Полісилоксановий компонент містить поліметилфенілсилоксановий лак і як наповнювач алюмінію (ІІІ), титану (ІV) та хрому (ІІІ) оксиди. Склади вихідних композицій наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Склади композицій вогнезахисних речовин на основі наповненого поліметилфенілсилоксану (КО-08)

№ з/п	Вміст КО-08 мас. %	Вміст наповнювачів, мас. %		
		Алюмінію (ІІІ) оксид	Титану (ІV) оксид	Хрому (ІІІ) оксид
1	40	30	20	10
2	35	35	15	15
3	30	40	10	20

Адгезія покриттів визначається взаємодією між молекулами контактуючих поверхонь. Очевидно, що фізико-хімічні процеси, які проходять в композиціях при нагріванні у широкому інтервалі температур, впливають на зміну адгезійної міцності.

Суттєвий вплив на адгезійну міцність має стан, ступінь оброблення і структура поверхні та об'ємна усадка покриття внаслідок різниці температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) покриття і підкладки, а також площа контакту між ними.

Якісну та кількісну оцінку вказаних процесів можна оцінити визначенням сили зчеплення між покриттям та поверхнею підкладки, що досягається завдяки показнику адгезійної міцності.

Фізико-хімічні процеси у контактній зоні, перш за все, залежать від складу покриття та температури нагрівання. Тому зміна адгезійної міцності залежно від температури та часу контакту є опосередкованим показником процесів, що проходять на межі розділу фаз (контакту).

Встановлено, що при дії високих температур у покриттях на основі наповненого поліметилфенілсилоксану відбувається термоокисна деструкція плівкоутворювача із утворенням газоподібних продуктів, SiO₂ та муліту. Їх наявність сприяє синтезу нових фаз, що позитивно впливає на вогнезахисні властивості. Тому фазові перетворення у складі покриття будуть впливати на адгезійну міцність. Необхідно також враховувати фізико-хімічні процеси, що відбуваються у самому матеріалі при нагріванні. Отже вибір раціонального методу оброблення поверхні підкладки має суттєвий вплив на показник адгезійної міцності.

Поверхня підкладки мала однакову чистоту механічної обробки.

Досліджувані композиції наносили пензлем на поверхню сталеві підкладки для одержання покриття товщиною 0,8-2 мм. Формування покриття обумовлено процесами змочування та розтікання рідкого адгезиву, утворенням площі контакту між фазами та виникненням адгезійного зв'язку.

На рис. 1 показана зміна адгезійної міцності захисних композицій № 1, 2, 3 для Ст3 під час нагрівання. Як видно з рис. 1, характер зміни адгезійної міцності має параболічний характер.

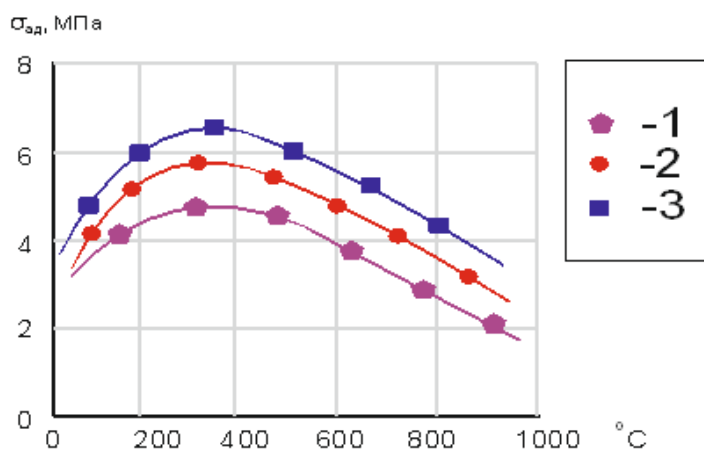


Рисунок 1 – Температурна залежність адгезійної міцності захисних композицій на Ст3: композиції № 1, 2, 3

З рис. 1 видно, що показник адгезійної міцності захисних покриттів після затверднення за кімнатної температури на повітрі впродовж 24 годин незначно збільшується, що обумовлено умовами розтікання рідкого адгезиву та його поліконденсацією. Цей показник знаходиться в межах 5,1-6,4 МПа. Підвищення показника адгезійної міцності при нагріванні до температури 200 °C залежно від складу композиції покриття становить відповідно 5,4-6,4 МПа. Це пояснюється утворенням додаткових зв'язків між покриттям та поверхнею підкладки. За цих умов адгезійна міцність визначається не умовами розтікання покриття (адгезиву), а зміною властивостей поліметилфенілсилоксану та структурою поверхні підкладки.

Нагрівання вище від 300 °C призводить до значного зменшення адгезійної міцності внаслідок часткової деструкції покриття та утворення пор і розривів. Найбільш інтенсивно цей процес проходить при нагріванні вище від 400 °C внаслідок інтенсивної втрати маси покриття, яка зумовлена виділенням органічної складової та руйнуванням поверхні покриття.

Показник адгезійної міцності зростає до температури нагрівання 300°C, а далі зменшується внаслідок термоокисної деструкції поліметилфенілсилоксану та зростання пористості.

Необхідно відзначити, що введення до складу композицій для захисних покриттів оксиду хрому (склад № 3) підвищує показник адгезійної міцності на 0,5-0,6 МПа (12... 15%) внаслідок зменшення показника пористості в інтервалі температур 200-300 °C і особливо (на 1,8-2,0 МПа) при 300 °C. На таке зростання адгезійної міцності частково впливає також наявність у складі покриття зв'язки, яка закриває пори та значно зменшує доступ кисню до підкладки і частку продуктів його деструкції.

Крім адгезійної міцності на вогнестійкість впливає коефіцієнт спучування захисного покриття. При нагріванні до температури 300 °C коефіцієнт спучування залежить як від товщини, так і від швидкості нагрівання. Збільшення значення товщини покриття приводить до зростання коефіцієнта спучування у 2...2,5 рази, а значення швидкості - у 1,2...1,6 раз, яке залежить від товщини покриття.

Слід відзначити, що збільшення товщини покриття менш суттєво впливає на коефіцієнт спучування. Підвищення температури нагрівання до 600 °C веде до значного зростання коефіцієнта спучування, особливо при нагріванні із швидкістю 40 град/хв. Максимальні значення коефіцієнта спучування (11...12,8) характерні для покриттів із значенням товщини 0,8 мм.

Підвищення температури нагрівання до 600 °C частково збільшує коефіцієнт спучування для покриттів із різним значенням товщини.

Максимальне значення коефіцієнта (11 та 12) характерне для покриттів складів 1 та 3 при товщині 0,8 мм.

Нагрівання захисних покриттів вище від температури 600 °C призводить до незначного зменшення коефіцієнта спучування внаслідок спікання покриттів та утворення більш щільної структури.

Отже, підвищення вогнезахисного ефекту можна досягнути шляхом введення до складу покриття додатків, які утворюють склоподібна фазу у зоні контакту «покриття – підкладка», що підвищує адгезійну міцність, а також і вогнестійкість завдяки спучуванню покриття.

Вогнестійкість сталевих конструкцій. Для визначення вогнезахисної ефективності вогнезахисного покриття, що спучується, на основі поліметилфенілсилоксану необхідно розглянути процес нагрівання сталеві конструкції, який описується диференціальним рівнянням теплопровідності [5, 6]

$$c\rho \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (1)$$

з умовами теплообміну між середовищем та поверхнею конструкції, що змінюються за законом Ньютона-Ріхмана [7]

$$\begin{cases} \alpha_0 t(0, \tau) - \lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_0 \cdot \left(345 \cdot \lg \left(\frac{8\tau}{60} + 1 \right) + 20 \right), \\ \alpha_n t(x_n, \tau) - \lambda \frac{\partial t(x_n, \tau)}{\partial x} = \alpha_n \cdot \left(345 \cdot \lg \left(\frac{8\tau}{60} + 1 \right) + 20 \right), \end{cases} \quad (2)$$

та початковою умовою

$$t(x, 0) = 20 \quad (3)$$

де, α_0 , α_n – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К); τ – час, с; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $345 \lg \left(\frac{8\tau}{60} + 1 \right) + 20$ – зміна температури на поверхнях пластини (стандартний температурний режим пожежі) [8].

Знаючи закон зміни температури за умов температурного режиму пожежі, дослідимо розподіл температурного поля по товщині плоскої сталеві конструкції, яку при аналітичних дослідженнях змодельємо пластиною [9]. Необхідно визначити розподіл температури по товщині пластини в будь-який момент часу.

Застосувавши прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля, який детально описаний у роботах [6, 7, 10, 11] отримаємо рішення поставленої задачі у вигляді

$$\begin{aligned} t(x, \tau) = \frac{\alpha_0 \alpha_n}{\Delta} \left(\psi_0(\tau) \sigma_n + \frac{\psi_n(\tau)}{\alpha_0} + \frac{\psi_0(\tau)}{\alpha_n} + (\psi_n(\tau) - \psi_0(\tau)) \left(\frac{x - x_i}{\lambda_i} + \sigma_i \right) \right) + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot X_k(x, \omega_k). \end{aligned} \quad (4)$$

При дослідженні дії високих температур на незахищені сталеві конструкції розглянемо окремо деякі несучі сталеві конструкції з приведеною товщиною металу 5 мм, 9 мм 20 мм та 32 мм.

За формулою (4) проведено дослідження температурного поля по товщині сталеві пластини. Дослідження проводились для температури середовища, яка змінюється за стандартним температурним режимом пожежі з інтенсивним теплообміном між факелом полум'я та конструкцією в межах $25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. Результати аналітичних розрахунків зображено на рис. 2

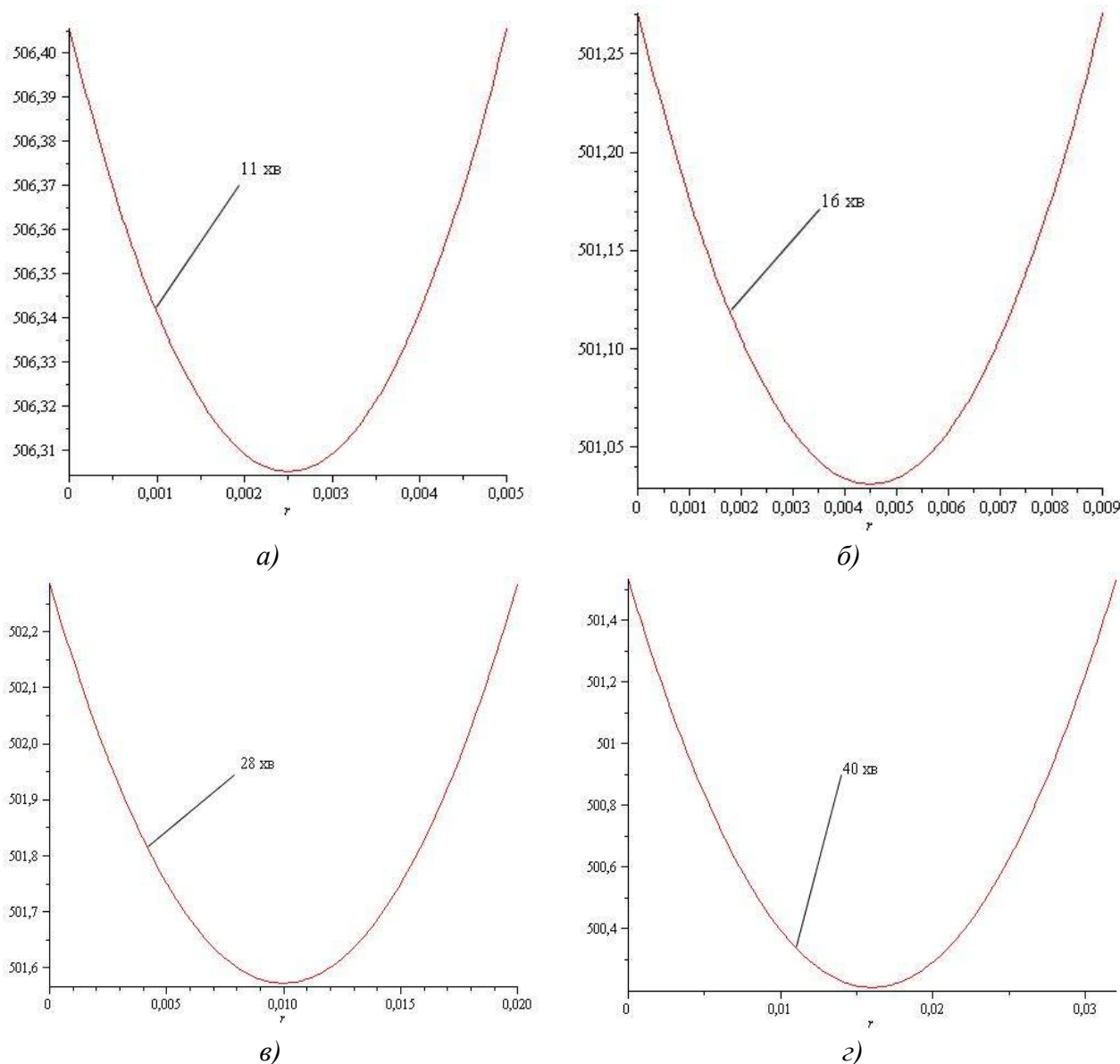


Рисунок 2 – Розподіл температурного поля по товщині незахищеної сталевій пластини:
 а) 5 мм; б) 9 мм; в) 20 мм; з) 32 мм

З досліджень розподілу температурного поля по товщині елементів сталевих конструкцій видно, що їх вогнестійкість за умов пожежі (стандартного температурного режиму) втрачається за 11-40 хв залежно від приведеної товщини металу. Для підвищення вогнестійкості цих конструкцій їх необхідно покривати вогнезахисними покриттями, що спучуються.

Для дослідження впливу теплофізичних та геометричних (товщина сухого шару) характеристик вогнезахисних покриттів на вогнестійкість несучих сталевих конструкцій розглянемо сталеву конструкцію, захищену вогнезахисним покриттям, що спучується, на основі поліметилфенілсилоксану.

Для дослідження розподілу температурного поля по товщині сталевій конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям, змодельємо її у вигляді двохшарової конструкції з товщиною вогнезахисного покриття 0,8; 1; 1,5 та 2 мм. На конструкцію діє тепловий потік факела полум'я.

Відомо, що при інтенсивному нагріванні покриття спучується в інтервалі 160...200 °С внаслідок чого його теплофізичні характеристики і геометричні розміри змінюються. Зокрема, товщина покриття під час спучування збільшується в 10-12 разів, а теплопровідність і густина зменшуються в декілька разів. Це призводить до зменшення інтенсивності нагрівання конструкції [9].

Вираз (4) також дає можливість дослідити вогнестійкість сталевій конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям, враховуючи зміну теплофізичних характеристик та геометричних розмірів, оцінити ефективність вогнезахисної фарби на основі поліметилфенілсилоксану, яка нанесена на елементи сталевих конструкцій.

Оскільки товщина вогнезахисного покриття після спучення значно збільшується, а теплофізичні характеристики (теплопровідність і густина) зменшуються, то інтенсивність нагрівання сталевій конструкції зменшується. Тому дослідження проводились у дві стадії:

- 1) система «конструкція-покриття» до спучування;
- 2) система «конструкція-покриття» після спучування;

Дослідження проводились для сталевій конструкції товщиною 9 мм, захищеної шаром вогнезахисного покриття на основі поліметилфенілсилоксану товщиною 0,8 мм, 1 мм, 1,5 мм, та 2 мм.

Під час першої стадії при інтенсивному нагріванні покриття спучується в інтервалі 5-6 хв, внаслідок чого його ТФХ і геометричні розміри змінюються. Так, при спучуванні товщина покриття збільшується в 10-12 разів.

За формулою (4) проведені дослідження розподілу температурного поля по товщині сталевій конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям, що спучується [12, 13].

Результати аналітичних розрахунків розподілу нестационарного температурного поля по товщині конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям для сталевій конструкції зображено на рис. 3.

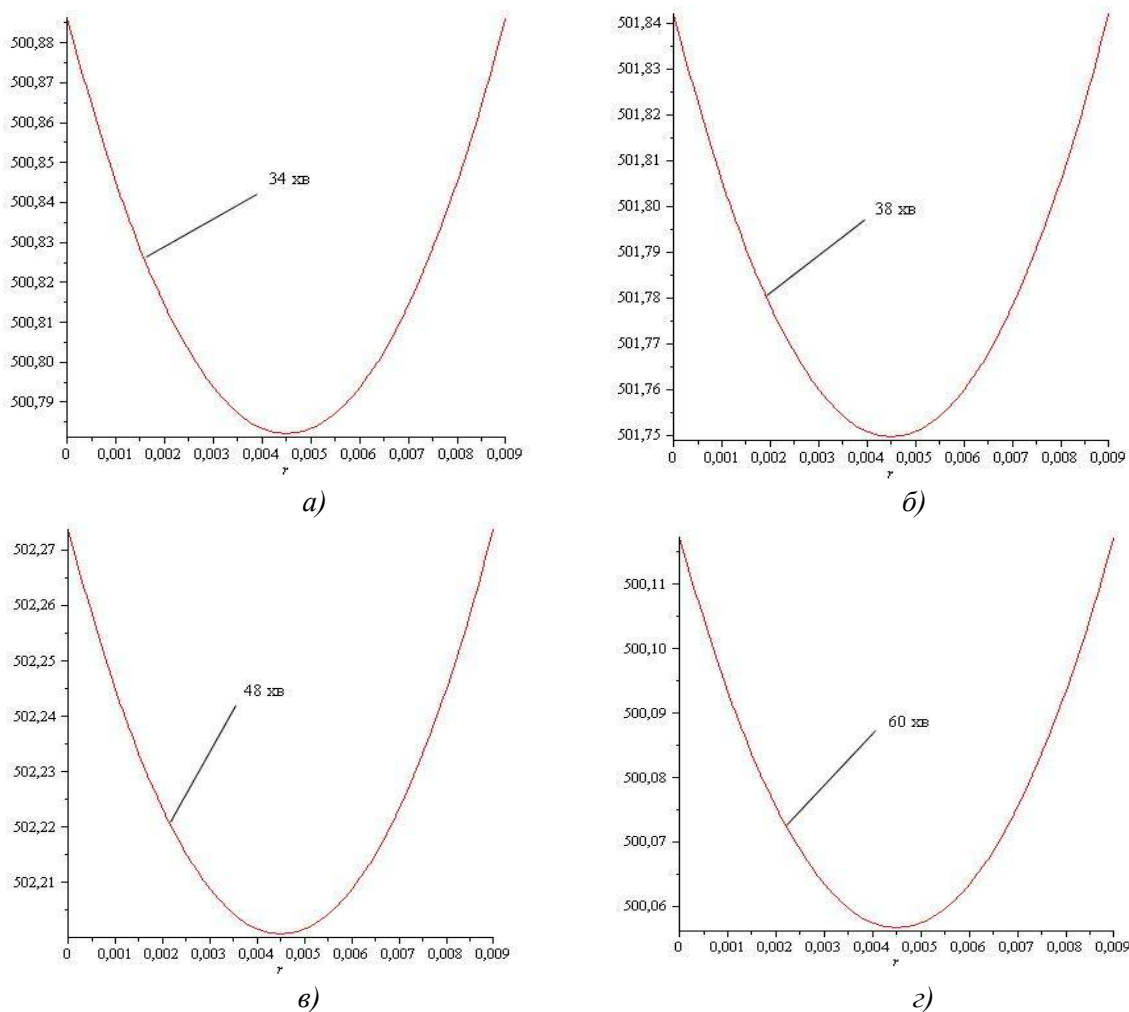


Рисунок 3 – Розподіл температурного поля по товщині сталевій конструкції (товщиною 9 мм) захищеної вогнезахисним покриттям товщиною:
а) 0,8 мм; б) 1 мм; в) 1,5 мм; г) 2 мм

Аналіз графічної залежності представленної на рис. 3 показує, що сталева конструкція захищена вогнезахисним покриттям на основі поліметилфенілсилоксану товщиною 9 мм прогрівається до критичної температури 500 °С: товщиною 0,8 мм за час 34 хв; товщиною 1 мм за час 38 хв; товщиною 1,5 мм за час 48 хв; товщиною 2 мм за час 60 хв.

Висновок. Елементи сталевих конструкцій товщиною 9 мм, покриті вогнезахисним покриттям на основі поліметилфенілсилоксану товщинами від 0,8 мм до 2 мм, нагріваються до критичної температури 500 °С за 34 хв – 60 хв, тоді як незахищені сталеві конструкції прогріваються до цієї температури за 16 хв.

Список літератури:

1. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2016.
2. Гивлюд М. М. Температуростійкі силікатні захисні покриття для металів та сплавів на основі наповненого поліметилфенілсилоксану / М. М. Гивлюд, О.І. Башинський, С.Я. Вовк // Вісник ЛДУ БЖД : Зб. наук. праць. – Львів : ЛДУ БЖД. – 2011. – № 18. – С. 40-45.
3. Вовк С.Я. Залежність процесу масопереносу у зоні контакту покриття-підклад від температури нагрівання / С.Я. Вовк // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів, ЛДУБЖД, 2011. – №9. – С. 23-27.
4. Wojko T., Lazarenko O., Vovk S., and Loik V. Research into nonstationary temperature field in the protected metallic structure under conditions of fire, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 89, no. 5, pp. 11-20, 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.112370.
5. O. Y. Pazen and R. M. Tatsii, General boundary-value problems for the heat conduction equation with piecewise-continuous coefficients, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 89, no. 2, pp. 357-368, March 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1386-8>.
6. Тацій Р. М. Прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля за умов пожежі / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека : Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – № 26. – С. 135-141.
7. Тацій Р. М. Загальна третя крайова задача для рівняння теплопровідності з кусково-сталеними коефіцієнтами та внутрішніми джерелами тепла / Р. М. Тацій, Т. І. Ушак, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – № 27. – С. 120-126.
8. EN 1991-1-2 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.
9. Субота А. В. Визначення та дослідження температурного поля в елементах металевих конструкцій за умов температурного режиму горіння водню / А. В. Субота, М. М. Семерак, О. В. Стокалюк // Пожежна безпека : зб. наук. пр. – Львів : ЛДУБЖД, 2014. – № 24. – С. 120-123.
10. Тацій Р. М. Визначення теплообміну в багатошаровій нескінченній плиті з дискретно-неперервним розподілом джерел тепла / Р. М. Тацій, М. І. Кусій, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека : Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2012. – № 20. – С. 20-26.
11. O. Y. Pazen "Mathematical modelling and computer simulation of direct method for studying boundary value problem of thermal conductivity" Problems of Infocommunications. Science and Technology, pp. 73-76. 2017. DOI:10.1109/INFOCOMMST.2017.8246353.
12. Семерак М. М. Теплоизолирующая способность многослойных строительных конструкций с учетом разрушения произвольного слоя / М. М. Семерак, Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Вестник Кокшетауского технического института Министерства по чрезвычайным ситуациям республики Казахстан: Сб. науч. тр. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК 4 (2015): 20. – С.8-17.
13. Пазен О. Ю. Дослідження вогнестійкості залізобетонних конструкцій, захищених вогнезахисним покриттям / О. Ю. Пазен, Р. М. Тацій // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації", 2016. С. 190-192.

Reference:

1. Zakhyst vid pozhezhi. Pozhezhna bezpeka obyektiv budivnytstva [Fire protection. Fire safety of construction objects]: DBN V.1.1.7-2016.
2. Hyvlyud M. M. Temperaturostiyki sylikatni zakhysni pokryttya dlya metaliv ta splaviv na osnovi napovnenoho polimetylphenilsyloksanu [Temperature-resistant silicate protective coatings for metals and alloys based on filled polymethylphenylsiloxane] / M. M. Hyvlyud, O.I. Bashynskyy, S.Ya. Vovk // Visnyk LDU BZHD : Zb. nauk. prats. – Lviv : LDU BZHD. – 2011. – № 18. – S. 40-45.
3. Vovk S.Ya. Zalezhnist protsesu masoperenosu u zoni kontaktu pokryttya-pidklad vid temperatury nahrivannya [Dependence of the process of mass transfer in the contact area of the coating layer on the heating temperature] / S.Ya. Vovk // Pozhezhna bezpeka: Zb. nauk. prats. – Lviv, LDUBZHD, 2011. – №9. – S. 23-27.
4. Bojko T., Lazarenko O., Vovk S., and Loik V. Research into nonstationary temperature field in the protected metallic structure under conditions of fire, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 89, no. 5, pp. 11-20, 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.112370.
5. O. Y. Pazen and R. M. Tatsiy, "General boundary-value problems for the heat conduction equation with piecewise-continuous coefficients," Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 89, no. 2, pp. 357-368, March 2016. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1386-8>.
6. Tatsiy R. M. Pryamyi metod rozrakhunku nestatsionarnoho temperaturnoho polya za umov pozhezhi [Direct method of calculation unsteady temperature field in a fire] / R. M. Tatsiy, O. Yu. Pazen // Pozhezhna bezpeka : Zb. nauk. pr. – Lviv : LDU BZHD, 2015. – № 26. – S. 135-141.
7. Tatsiy R. M. Zahalna tretya krayova zadacha dlya rivnyannya teploprovodnosti z kuskovo-stalymy koefitsiyentamy ta vnutrishnimy dzherelamy tepla [General third boundary value problem for the heat equation with piecewise constant coefficients and internal heat sources] / R. M. Tatsiy, T. I. Ushak, O. Yu. Pazen // Pozhezhna bezpeka: Zb. nauk. pr. – Lviv : LDU BZHD, 2015. – № 27. – S. 120-126.
8. EN 1991-1-2 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
9. Subota A. V. Vyznachennya ta doslidzhennya temperaturnoho polya v elementakh metalevykh konstruktsiy za umov temperaturnoho rezhymu horinnya vodnyu [Definition and study of the temperature field in the elements of metal constructions under the conditions of the temperature mode of hydrogen combustion] / A. V. Subota, M. M. Semerak, O. V. Stokalyuk // Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. pr. – Lviv : LDUBZHD, 2014. – № 24. – S. 120-123.
10. Tatsiy R. M. Vyznachennya teploobminu v bahatosharoviy neskinchennyi plyti z dyskretno-neperervnym rozpodilom dzherel tepla [Determination of heat transfer in a multilayer endless plate with discrete-continuous distribution of heat sources] / R. M. Tatsiy, M. I. Kusi, O. Yu. Pazen // Pozhezhna bezpeka : Zb. nauk. pr. – Lviv : LDU BZHD, 2012. – № 20. – S. 20-26.
11. O. Pazen "Mathematical modelling and computer simulation of direct method for studying boundary value problem of thermal conductivity" Problems of Infocommunications. Science and Technology, pp. 73-76. 2017. DOI:10.1109/INFOCOMMST.2017.8246353.
12. Semerak M. M. Teploizoliruyushchaya sposobnost' mnogosloynnykh stroitel'nykh konstruktsiy s uchëtom razrusheniya proizvol'nogo sloya [Thermal insulation ability of multilayer building structures with allowance for the destruction of an arbitrary layer] / M. M. Semerak, R. M. Tatsiy, O. Yu. Pazen // Vestnik Kokshetauskogo tekhnicheskogo instituta Ministerstva po chrezvychnym situatsiyam respubliki Kazakhstan: Sb. nauch. tr.–Kokshetau: KTI KCHS MVD RK 4 (2015): 20. – S.8-17.
13. Pazen O. Yu. Doslidzhennya vohnestiykosti zalizobetonnykh konstruktsiy, zakhyschenykh vohnezakhysnym pokryttyam [Investigation of fire resistance of reinforced concrete structures protected by fire protection coatings] / O. Yu. Pazen, R. M. Tatsiy // Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi" Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka. Teoriya, praktyka, innovatsiyi", 2016. S. 190-192.

