

**ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ НОВОСТВОРЕНИХ
ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

¹**Ковальов А.І.**, к.т.н., с.н.с.,
kovalev27051980@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6525-7558

¹**Отрош Ю.А.**, д.т.н., професор,
otrosh@nuczu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0698-2888

²**Томенко В.І.**, к.т.н., доцент,
firech1996@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7139-9141

¹**Васильєв О.Б.**, к.т.н., доцент,
alexevjas@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0698-2888

¹*Національний університет цивільного захисту України*
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна

²*Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України,*
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

Анотація. Представлено результати по розробці вогнезахисних речовин на основі вітчизняних матеріалів для підвищення вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Розроблено нові композиції вогнезахисних речовин на основі вітчизняних матеріалів, здатних до спучування. Проведено серію експериментальних досліджень з визначення температури прогріву вогнезахисних сталевих конструкцій. Для цього використано зразки зменшених розмірів у вигляді сталеві пластини з нанесеною на обігрівну поверхню вогнезахисної речовини. Проведені вогневі випробування вогнезахисних сталевих пластин, покритих розробленою вогнезахисною речовиною, що утворює покриття на захищасій поверхні, в умовах їх випробувань за стандартним температурним режимом пожежі з використанням установки для визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів. Проаналізовані результати експериментального визначення температури з необігрівної поверхні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі. На основі отриманих даних (температури в печі та з необігрівної поверхні сталевих пластин з системою вогнезахисту) розв'язанням обернених задач теплопровідності знайдено теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності та питому об'ємну теплоємність), які в подальшому можуть використовуватися для теплотехнічного розрахунку при нестационарному прогріву вогнезахисних сталевих конструкцій при довільних температурних режимах пожежі. Обґрунтовано теплофізичні характеристики утвореного вогнезахисного покриття для знаходження характеристики вогнезахисної здатності новоствореного вогнезахисного покриття та забезпечення вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Доведено ефективність розробленого вогнезахисного покриття для захисту сталевих конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, вогнезахист, вогнезахисна здатність, вогнезахисне покриття, теплофізичні характеристики, сталеві конструкції.

Вступ. У світі щорічно виникає близько 8 мільйонів пожеж, на яких гине до 100 тисяч людей. Це вимагає як підвищення готовності рятувальних підрозділів до дій за призначенням так і розробки превентивних заходів щодо недопущення чи пом'якшення наслідків таких подій. Сучасні будівельні конструкції, запроектовані і виготовлені згідно з чинними вимогами, можуть експлуатуватися десятиліттями. Однак в умовах пожежі такі конструкції руйнуються протягом декількох годин або навіть хвилин.

При пожежі порушення загальної стійкості будівлі відбувається внаслідок руйнування окремих елементів в каркасі споруди. Небезпека обвалу несучих конструкцій, крім матеріального збитку, також ставить під загрозу життя працівників об'єкту під час евакуації та рятувальників під час гасіння пожежі. У переважній більшості випадків руйнування

конструкцій призводить до повного знищення матеріальних цінностей, інженерного і технологічного обладнання. Наведені чинники створюють потребу в захисті людини від впливу окреслених загроз. При цьому одним з найбільш небезпечних чинників є пожежі в приміщеннях будівель та споруд. Умовою зниження незворотних наслідків пожеж на об'єктах різного призначення є збереження несучої здатності будівельних конструкцій, технологічних споруд і комунікацій. Зазначені вимоги стійкості забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням ефективних вогнезахисних покриттів для вогнезахисту будівельних конструкцій. Створення основ для розробки ефективних вогнезахисних речовин та оцінювання вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою, розв'язання якої призведе до забезпечення вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій в умовах сучасних екстремальних впливів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питаннями забезпечення вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за рахунок застосування реактивних та пасивних вогнезахисних покриттів займалися та займаються багато відомих вчених. Так [1] присвячене розробці вогнезахисних речовин, що утворюють покриття на сталій конструкції, та описано вплив основних складових розроблених композицій на характеристики таких вогнезахисних покриттів. При цьому залишилися невисвітленими питання впливу теплофізичних характеристик покриттів на вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій. В результаті досліджень [2] удосконалено існуючі «традиційні» рецептури вогнезахисних композицій, за допомогою обґрунтування внесення змін до складів і технологій виготовлення вихідних композицій. При цьому залишилися невисвітленими питання впливу теплофізичних характеристик покриттів на вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій. У [3] представлені результати детальної оцінки методу, який можна використовувати для прогнозування поведінки реактивного вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій і теплопровідності в різних умовах (зміна коефіцієнта перерізу сталі, товщини покриття і характеру впливу пожежі). Однак, не наведено точність методу і його адекватність при довільних режимах пожежі, а звідси і ефективність методу.

В [4] проведено прогнозування вогнестійкості будівельних конструкцій на основі моделі для проектування реактивних вогнезахисних покриттів, яка включає теплофізичні характеристики покриття.

Вогнезахисні матеріали не мають вогнестійкості окремо від будівельних конструкцій, які вони захищають. Тому оцінювання вогнезахисної здатності цих матеріалів пов'язане з оцінюванням вогнестійкості захищених будівельних конструкцій [5]. При цьому відкритим залишається питання щодо правильності і точності задавання параметрів вогнезахисних покриттів для теплотехнічного розрахунку.

В [6] проведено визначення вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій захищених реактивними вогнезахисними покриттями в залежності від змодельованих умов експлуатації і атмосферних чинників, що впливають на матеріали протягом певного періоду. Проте, відсутні дані щодо зміни теплофізичних характеристик покриттів після впливу кліматичних факторів.

У [7] представлена блок-схема, що показує переваги методів термічного напилювання захисних покриттів і основні чинники, що впливають на структуру та властивості покриття. Авторами запропонована процедура попередньої оцінки ефективності покриттів і відповідного методу термічного напилення. Критеріальну оцінку поліпшення характеристик деталей конструкції літака з термічним напиленням пропонується реалізувати в рамках концептуального підходу, який передбачає використання інтегрального критерію ефективності, що включає поодинокі, групові та комплексні компоненти. Проте, поза увагою дослідників залишилися питання щодо визначення ефективності покриттів шляхом визначення властивостей і їх наукового обґрунтування.

Як видно з проведеного аналізу, зазначені вимоги стійкості будівель та споруд з вогнезахисними сталевими конструкціями забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням ефективних вогнезахисних

покриттів для вогнезахисту будівельних конструкцій. Вогнезахисні покриття представлені широким спектром, аналіз характеристик та параметрів яких потребує детального вивчення.

У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є розроблення нових вогнезахисних речовин та створення основ ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахисених цими речовинами сталевих будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами. Розв'язання цієї проблеми призведе до підвищення точності теплотехнічного розрахунку нестационарного прогріву вогнезахисених сталевих конструкцій як з використанням даних експериментальних досліджень, так і за результатами чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка складу вогнезахисної речовини, що утворює на поверхні сталевій конструкції вогнезахисне покриття на основі вітчизняних матеріалів, а також дослідження основних параметрів новоствореного вогнезахисного покриття.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити новий склад вогнезахисного покриття на основі вітчизняних матеріалів;
- провести вогневі випробування сталевих пластин, покритих розробленою вогнезахисною речовиною, що утворює на захищаємій поверхні шар покриття;
- розробити одновимірну фізичну та комп'ютерну моделі теплового стану системи «сталеві пластина – вогнезахисне покриття»;
- на основі одновимірної моделі теплового стану та результатів вогневих випробувань, визначити теплофізичні характеристики новоствореного вогнезахисного покриття.

Матеріали та методика дослідження. На основі розгляду задачі, піднятої в даній роботі, було запропоновано та розроблено склади вогнезахисних речовин для підвищення вогнестійкості сталевих конструкцій з компонентів, що виготовлені із вітчизняних матеріалів: вермикуліт, амофос, ацетон, фенол-формальдегідна смола, полівиніловий спирт, щавлева кислота. Композиції готувалися двох типів: водорозчинні та розчинні в органічному розчиннику – ацетоні.

В результаті проведених випробувань по створенню вогнезахисних речовин, що утворюють покриття, які спучуються, для захисту сталевих конструкцій, розроблено ряд вогнезахисних композицій. Такі композиції включають неспучений вермикуліт (7,1-12,5%) і різноманітні добавки (всього 3 типи композицій). Перші дві з них із застосуванням в якості полімеру, що зв'язує, карбоксиметилцелюлози (15,4%) або полівинілового спирту (7,2%), що наносяться з водного розчину, а третя – із застосуванням епоксидіанової смоли (25%) – з розчину в ацетоні. Амофос, щавлева кислота розчинялись у воді у окремих ємностях при температурі 95°C у співвідношенні 0,5:3. Час отримання однорідної консистенції та охолодження суміші – 30 хвилин. Карбоксиметилцелюлоза розчинялась у воді при температурі 30°C у співвідношенні 1:3 до отримання напівпрозорої рідини. Час набухання до отримання однорідної консистенції – 2 год. Були виготовлені металеві пластини прямокутної форми розмірами 70×100 мм виготовлені з листової сталі товщиною 1 мм.

Кількість сталевих зразків для нанесення однієї суміші складало 5 штук. Експерименти проводили при температурі повітря 20°C, відносній вологості повітря 54 %.

Підготовлені зразки витримувались у вентиляційній сушильній шафі при температурі 62°C 21 годину, потім охолоджували до температури навколишнього середовища, не виймаючи із шафи. Приготовлена суміш речовин наносилася на сталеві пластини. Для попередження розтікання суміші по пластині застосовувались дерев'яні обмежувачі, що встановлювались по периметру кожної пластини (рис. 1).

Приготування, отримання складових сумішей, їх нанесення та застигання проводилось у шафі з місцевою витяжною вентиляцією. Зразки залишались до повного застигання суміші (час застигання композиції №2 становить 7 хвилин, а час повного затвердіння фенол-формальдегідної смоли у суміші – 30 хвилин).



Рис. 1. Загальний вигляд сталевих пластин, покритих вогнезахисною речовиною

Після застигання суміші проводились заміри мікрометром у п'яти точках для визначення товщини утвореного вогнезахисного покриття.

Були проведені вогневі випробування сталевих пластин, покритих розробленою вогнезахисною речовиною (склад № 2). Середня витрата речовини у рідкому стані становила $1,79 \text{ кг/м}^2$ на утворення 1 мм товщини покриття у сухому стані. Сутність методу випробування полягав у визначенні проміжку часу від початку випробування до настання одного з нормованих для даної конструкції граничних станів з вогнестійкості в умовах, що регламентуються стандартами. Тобто, досягнення критичної температури вогнезахисної сталеві пластини.

Перелік засобів для випробувань та засоби виміральної техніки показано на рис. 2.

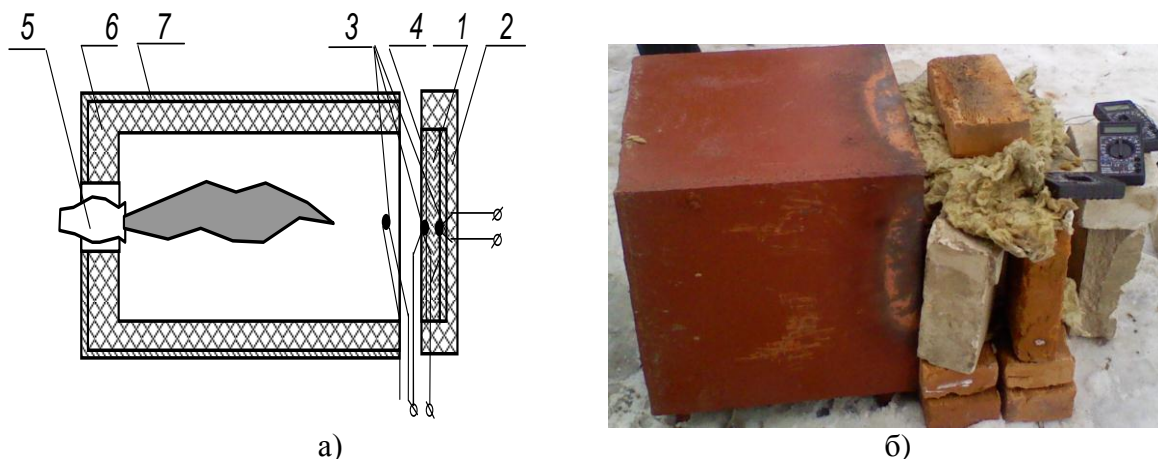


Рис. 2. Схема установки (а) та установка для визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів (б):

1 – сталевая пластина; 2 – теплоізоляція; 3 – термопара; 4– вогнезахисне покриття; 5 – палик; 6 – футеровка; 7 – корпус печі

Футеровка печі становила 50 мм та була виконана з матеріалу, теплова інерція якого за температури $500 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідає умові (1):

$$\sqrt{\lambda \rho c} \leq 500 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$;

ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

В якості обладнання для встановлення зразка в печі використовували вогнетривку цеглу, розміщуючи її таким чином, щоб не перешкоджати вогневному впливу та використанню ізолювальних прокладок термопар, вимірюванню температури поверхні зразка. Для вимірювання температури в печі використовували термопари з діаметром дроту 1,5 мм типу ТХА, що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Під час проведення випробування середня температура в печі θ_i змінювалась відповідно до стандартного температурного режиму пожежі, як показано на рис. 3.

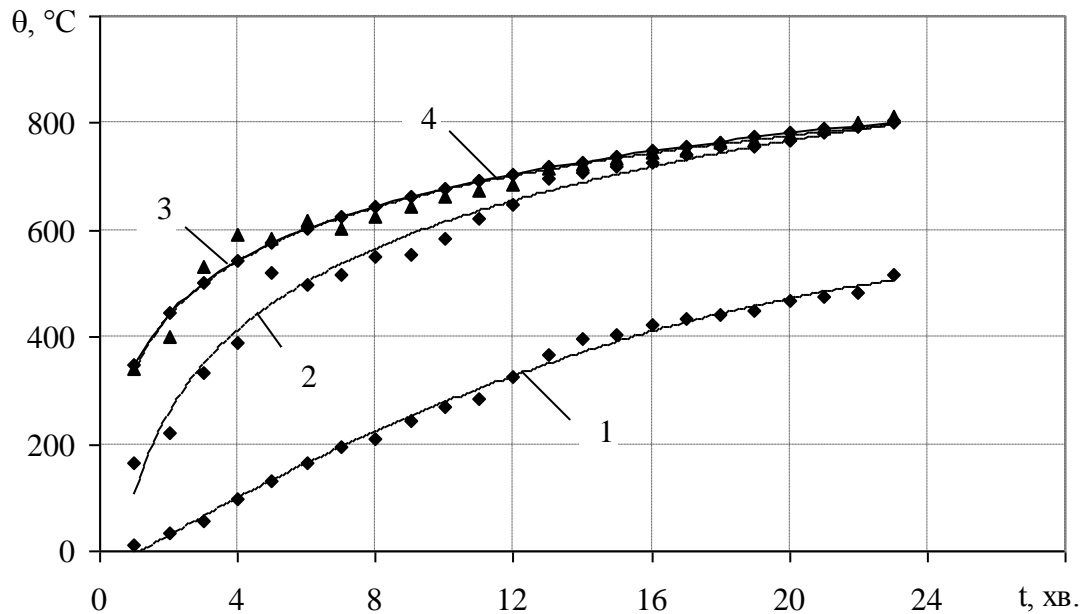


Рис. 3. Залежність температури в печі, з обігрівної та необігрівної поверхні вогнезахисної сталеві пластины від часу вогневого впливу:
1 – за пластиною; 2 – перед пластиною; 3 – стандартна температурна крива; 4 – температура в печі

Як видно із рис. 3, температура з необігрівної поверхні сталеві пластины, товщиною 1 мм, при товщині вогнезахисного покриття 1,7 мм (склад № 2) не досягнула критичної температури (500°C) за 23 хвилини вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Це дає підстави стверджувати про високу вогнезахисну ефективність розробленого покриття при більших товщинах. Загальний вигляд зразків вогнезахисних сталевих пластин показано на рис. 4.

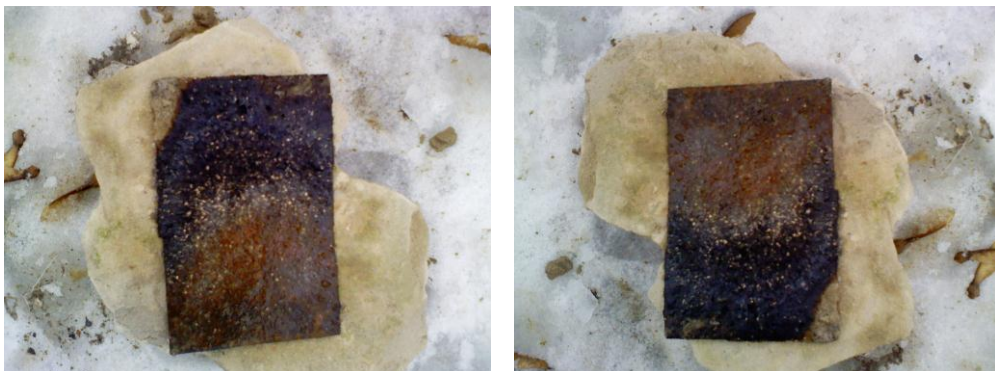


Рис. 4. Загальний вигляд вогнезахисних сталевих пластин після вогневих випробувань

Температури, отримані в результаті вогневих випробувань, використовувались в подальшому для знаходження теплофізичних характеристик новоствореного вогнезахисного покриття розв'язанням обернених задач теплопровідності [8-9].

Результати досліджень. Теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття необхідні для прогнозування вогнестійкості сталевих конструкцій, оброблених цими вогнезахисними речовинами. Визначення цих характеристик проводилось, використовуючи комп'ютерну програму FRIEND [10].

Була розроблена одновимірна фізична модель нагрівання, що складається із шару сталі і шару вогнезахисного покриття (рис. 5).

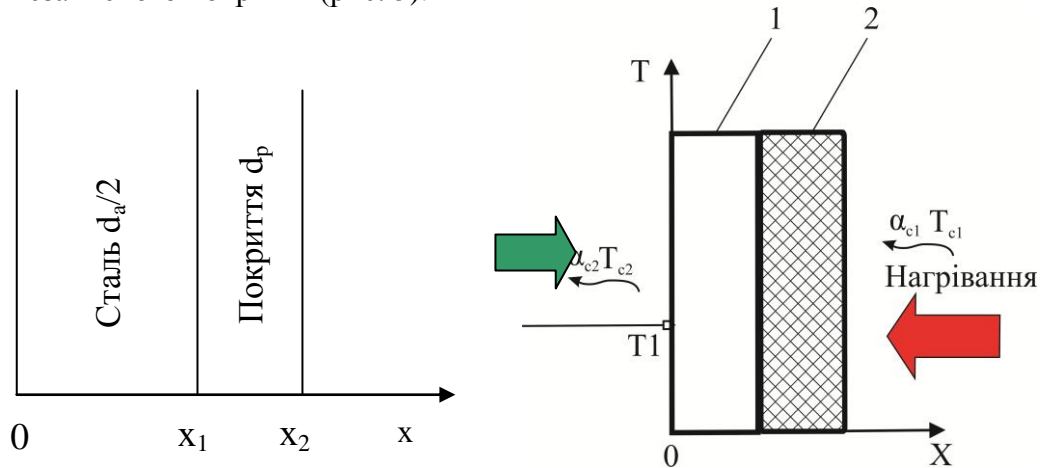


Рис. 5. Фізична модель вогнезахисної сталеві пластини:
1 – сталь; 2 – вогнезахисне покриття

Теплофізичні характеристики шару 1 задавали з [11] як постійні величини.

Комп'ютерна чисельна модель (метод кінцевих різниць) враховує радіаційно-конвективний теплообмін між поверхнею покриття і гарячими газами печі, що нагріваються, і конвективний теплообмін між вогнезахисною пластинною і навколишнім середовищем. Коефіцієнт конвективного теплообміну від гарячих газів в печі до поверхні покриття, що нагрівається, приймався рівним $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, ступінь чорноти поверхні покриття, що нагрівається, приймався рівним $0,5$. Коефіцієнт конвективного теплообміну від пластини з вогнезахисним покриттям в навколишнє середовище приймався як $f(t)$. Коефіцієнт теплопровідності сталеві пластини приймався рівним $45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$, а питома об'ємна теплоємність $4,71 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$. Кількість вузлів чисельної моделі складала 12 вузлів, по просторовій координаті з кроком за часом 30 сек.

Розрахункові моделі процесу теплопровідності з покриттями теж бралися з товщиною покриттів незмінними в часі.

Оскільки густина покриття також сильно змінюється (зменшується) під впливом полум'я пожежі, то оберненими задачами теплопровідності окрім коефіцієнту теплопровідності визначалася питома об'ємна теплоємність $\rho \cdot C$ ($\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}$) вогнезахисного покриття, яка є добутком густини покриття ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) на питому масову теплоємність C ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}$).

При знаходженні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття шукали питому об'ємну теплоємність покриття постійною і рівною $C_v = 1,92 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}$, а коефіцієнт теплопровідності розраховували як функцію від температури, як показано на рис. 6.

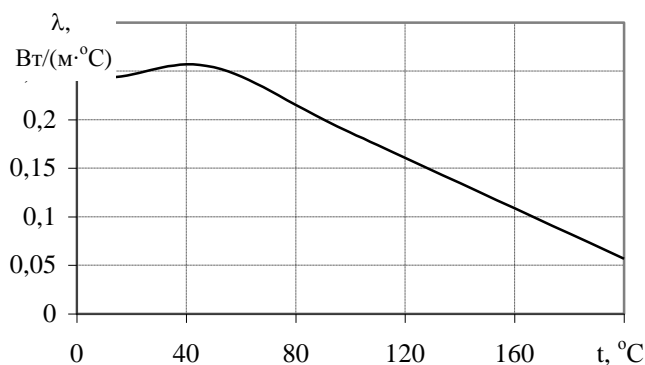


Рис. 6. Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість

Як видно із рис. 6, коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття від початкової температури до 50°C зростає і проходить через максимальне значення $0,254 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ (при 50°C), а потім падає із-за вигорання шару покриття, що можливо пояснюється появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою.

При цьому значення критерію середньоквадратичного відхилення експериментальних температур від розрахункових склав $15,7^{\circ}\text{C}$ (рис. 7).

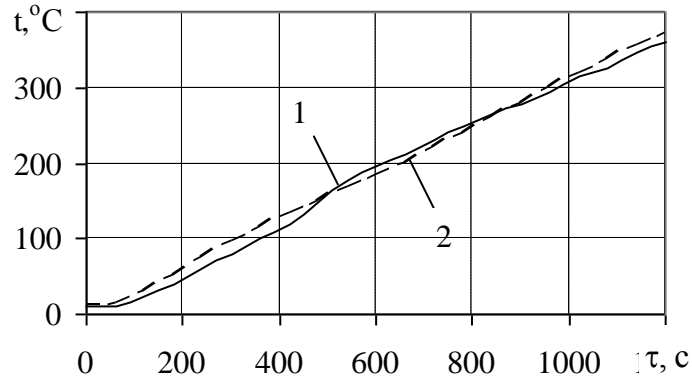


Рис. 7. Залежність температури від часу в місцях вимірювання температур з необігрівної поверхні вогнезахисної сталеві пластини:

1 – точна крива з необігрівної поверхні; 2 – розрахункова крива з необігрівної поверхні

Як видно із рис. 7, задовільна збіжність експериментальних і розрахункових температур пояснюється правильним вибором одновимірної фізичної моделі теплових процесів в системі «сталеві пластини-вогнезахисне покриття», правильною побудовою комп'ютерної моделі в програмному середовищі FRIEND і правильним задаванням параметрів моделі.

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. Розроблено ряд нових вогнезахисних композицій, які включають неспучений вермикуліт (7,1–12,5 %) і різноманітні добавки (всього 3 типи композицій), причому перші дві з них із застосуванням в якості полімеру, що зв'язує, карбоксиметилцелюлози (15,4 %) або полівинілового спирту (7,2 %), що наносяться з водного розчину, а третя – із застосуванням епоксидіанової смоли (25 %) – з розчину в ацетоні.

2. Проведено вогневі випробування сталевих пластин, товщиною 1 мм, покритих розробленою вогнезахисною речовиною (склад № 2), що утворює покриття товщиною 1,7 мм в умовах їх випробувань за стандартним температурним режимом пожежі з використанням установки для визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів.

3. Розроблено одновимірну фізичну модель теплового стану в системі «сталеві пластини-вогнезахисне покриття» за допомогою якої визначено теплофізичні характеристики новоствореного покриття: коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури та постійне значення питомої об'ємної теплоємності $C_v=1,92\cdot 10^7 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot^{\circ}\text{C})$, розв'язанням обернених задач теплопровідності.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на визначення характеристики вогнезахисної здатності розробленого вогнезахисного покриття, тобто виявлення взаємозв'язку між товщиною сталеві конструкції, товщиною вогнезахисного покриття і нормованим значенням межі вогнестійкості сталеві конструкції.

Література

1. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. SAGE Publications Ltd. 2016. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>.

2. Завьялов Д. Е. Повышение эффективности огнезащитных вспучивающихся композиций. Doctoral dissertation. Санкт-Петербург, 2013. 118 с.
3. Cirpici B. K., Wang Y. C., & Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 2016. Vol. 81. P. 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>.
4. Gillet M., Perez L., & Autrique L. A model based predictive tool for fire safety intumescent coatings design. *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 110. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102908>.
5. Новак С. В., Дрижд В. Л., & Добростан О. В. Аналіз сучасних європейських методів оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів для будівельних конструкцій. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*. 2018. № 1. С. 74–85.
6. R. Maciulaitis, M. Grigonis, J. Malaiskiene. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 98. P. 15–23.
7. Bychkov A. S., & Kondratiev A. V. Criterion-Based Assessment of Performance Improvement for Aircraft Structural Parts with Thermal Spray Coatings. *Journal of Superhard Materials*. 2019. Vol. 41(1). P. 53–59. <https://doi.org/10.3103/S1063457619010088>.
8. 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 Universytetu*. 2019. Vol. 3. P. 46–53. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/9>.
9. Kovalov A., Otrosh Y., Chernenko O., Zhuravskij M., Anszczak M. Modeling of non-stationary 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.
10. Kovalov A., Slovinskyi V., Udianskyi M., Ponomarenko I., Anszczak M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.3>.
11. ENV 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

References

- [1] T. Mariappan, "Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review", *Journal of Fire Sciences*. SAGE Publications Ltd. 2016. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>.
- [2] D.E. Zav'yalov, *Povyshenie effektivnosti ognezashchitnyh vspuchivayushchihsya kompozicij*. Doctoral dissertation. Sankt-Peterburg, 2013.
- [3] B.K. Cirpici, Y.C. Wang, & B. Rogers, "Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire", *Fire Safety Journal*, vol. 81, pp. 74–84, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>.
- [4] M. Gillet, L. Perez, & L. Autrique, "A model based predictive tool for fire safety intumescent coatings design", *Fire Safety Journal*, vol. 110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102908>.
- [5] S.V. Novak, V.L. Drizhd, & O.V. Dobrostan, "Analiz suchasnih evropejs'kih metodiv ocinyuvannya vognzahisnoi zdatnosti vognzahisnih materialiv dlya budivel'nih konstrukcij", *Naukovij visnik: civil'nij zahist ta pozhezhna bezpeka*, vol. 1, pp. 74–85, 2018.
- [6] R. Maciulaitis, M. Grigonis, & J. Malaiskiene, "The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance", *Fire Safety Journal*, vol. 98, pp.15–23, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.007>.
- [7] A.S. Bychkov, & A.V. Kondratiev, "Criterion-Based Assessment of Performance Improvement for Aircraft Structural Parts with Thermal Spray Coatings", *Journal of Superhard Materials*, vol. 41(1), pp.53–59, 2019. <https://doi.org/10.3103/S1063457619010088>.

- [8] A.I. Kovalov, Y.A. Otrosh, S.A.Vedula, O.M. Danilin, & T.M. Kovalevska, "Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 3, pp. 46–53, 2019. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/9>.
- [9] A. Kovalov, Y. Otrosh, O. Chernenko, M. Zhuravskij, & M. Anszczak, "Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode", *In Materials Science Forum*, vol. 1038, pp. 514–523, 2021. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.514>.
- [10] A. Kovalov, V. Slovinskyi, M. Udianskyi, I. Ponomarenko, & M. Anszczak, "Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method", *In Materials Science Forum*, vol. 1006, pp. 3–10, 2020. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.3>.
- [11] ENV 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

ОЦЕНИВАНИЕ ОГНЕЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ НОВОСОЗДАННЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

¹**Ковалев А.И.**, к.т.н., с.н.с.,
kovalev27051980@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6525-7558

¹**Отрош Ю.А.**, д.т.н., профессор,
otrosh@nuczu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0698-2888

²**Томенко В.И.**, к.т.н., доцент,
firech1996@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7139-9141

¹**Васильев А.Б.**, к.т.н., доцент,
alexejvas@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0698-2888

¹*Национальный университет гражданской защиты Украины*
ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, 61023, Украина

²*Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля НУГЗ Украины*
ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, 18034, Украина

Аннотация. Представлены результаты по разработке огнезащитных веществ на основе отечественных материалов для повышения огнестойкости огнезащищенных стальных конструкций. Разработаны новые композиции огнезащитных веществ на основе отечественных материалов, способных к вспучиванию. Проведена серия экспериментальных исследований по определению температуры прогрева огнезащищенных стальных конструкций. Для этого, использованы образцы уменьшенных размеров в виде стальной пластины с нанесенной на обогревательную поверхность огнезащитного вещества. Проведены огневые испытания огнезащищенных стальных пластин, покрытых разработанным огнезащитным веществом, образующим покрытие на защищаемой поверхности, в условиях их испытаний по стандартному температурному режиму пожара с использованием установки для определения огнезащитной способности огнезащитных покрытий. Проанализированы результаты экспериментального определения температуры с необогреваемой поверхности стальных пластин с огнезащитным покрытием в условиях огневого воздействия при стандартном температурном режиме пожара. На основе полученных данных (температуры в печи и с необогреваемой поверхности стальных пластин с системой огнезащиты) решением обратных задач теплопроводности найдены теплофизические характеристики огнезащитного покрытия (коэффициент теплопроводности и удельную объемную теплоемкость). Эти характеристики в дальнейшем могут использоваться для теплотехнического расчета прогрева огнезащищенных стальных конструкций при произвольных температурных режимах пожара. Обоснованы теплофизические характеристики образовавшегося огнезащитного покрытия для нахождения

характеристики огнезащитной способности нового огнезащитного покрытия и обеспечения огнестойкости огнезащищенных стальных конструкций. Доказана эффективность разработанного огнезащитного покрытия для защиты стальных конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, огнезащита, огнезащитная способность, огнезащитное покрытие, теплофизические характеристики, стальные конструкции.

EVALUATION OF FIRE-PROTECTIVE ABILITY OF NEWLY CREATED FIRE-PROTECTIVE COATINGS OF STEEL STRUCTURES

¹**Kovalov Andrii**, Phd, Senior Research,
kovalev27051980@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6525-7558

¹**Otrosh Yurii**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
otrosh@nuczu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0698-2888

²**Tomenko Vitalii**, Phd, Associate Professor,
firech1996@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7139-9141

¹**Vasylyev Oleksiy**, Phd, Associate Professor,
alexejvas@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0698-2888

¹*National University of Civil Defence of Ukraine*
94, Chernyshevska str., Kharkiv, 61023, Ukraine

²*Cherkassy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine*
8, Onoprienka str., Cherkasy, 18034, Ukraine

Abstract. The results of the development of fire-retardant substances based on domestic materials to increase the fire resistance of fire-retardant steel structures are presented. New compositions of fire-retardant substances on the basis of domestic materials capable of swelling are developed. A series of experimental studies to determine the heating temperature of fire-resistant steel structures. For this purpose, samples of reduced size in the form of a steel plate with a flame retardant applied to the heating surface were used. Fire tests of fire-retardant steel plates coated with the developed fire-retardant substance forming a coating on the protected surface, in the conditions of their tests on the standard temperature of the fire using the installation to determine the fire-retardant ability of fire-retardant coatings. The results of experimental determination of temperature from an unheated surface of steel plates with a fire-retardant covering in the conditions of fire influence at a standard temperature mode of a fire are analyzed. Based on the obtained data (temperature in the furnace and from the unheated surface of steel plates with fire protection system) the solution of the inverse problems of thermal conductivity found thermophysical characteristics of fire protection coating (thermal conductivity and specific volume), which can be used for thermal calculation heating of fire-retardant steel structures at arbitrary fire temperatures. The thermophysical characteristics of the formed fire-retardant coating are substantiated to find the characteristics of the fire-retardant ability of the newly created fire-retardant coating and to ensure the fire resistance of fire-retardant steel structures. The efficiency of the developed fire-retardant coating for protection of steel structures is proved.

Keywords: fire resistance, fire protection, fire protection ability, fire protective coating, thermophysical characteristics, steel structures.

Стаття надійшла до редакції 6.12.2021