

Визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій при різних температурних режимах пожежі

Анотація. Представлено результати по розробці вогнезахисних речовин на основі вітчизняних матеріалів для підвищення вогнестійкості вогнезахиснених сталевих конструкцій. Розроблено нові композиції вогнезахисних речовин на основі вітчизняних матеріалів, здатних до спучування. Проведено серію експериментальних досліджень з визначення температури прогріву вогнезахиснених сталевих конструкцій. Для цього використано зразки зменшених розмірів у вигляді сталеві пластини з нанесеною на обігрівну поверхню вогнезахисної речовини. Проведені вогневі випробування вогнезахиснених сталевих пластин, покритих розробленою вогнезахисною речовиною, що утворює покриття на захищаємій 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 нестаціонарному прогріву вогнезахиснених сталевих конструкцій при довільних температурних режимах пожежі. Обґрунтовано теплофізичні характеристики утвореного вогнезахисного покриття для знаходження характеристики вогнезахисної здатності новоствореного вогнезахисного покриття та забезпечення вогнестійкості вогнезахиснених 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 сталевій 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 вогнезахищених 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 вогнезахищеними сталевими конструкціями забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням ефективних вогнезахисних 80 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 вогнезахищених цими речовинами сталевих будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами.

Розв'язання цієї проблеми призведе до підвищення точності теплотехнічного розрахунку нестационарного прогріву вогнезахисних 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 сталевих конструкцій 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 захищаній 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 фенолформальдегідної смоли у суміші – 30 хвилин). Були проведені вогневі випробування сталевих пластин, покритих розробленою вогнезахисною речовиною (склад № 2). Середня витрата речовини у рідкому стані становила 1,79 кг/м² 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. Футеровка печі становила 50 мм та була виконана з матеріалу, теплова інерція якого за температури 500 °C відповідає умові (1): $\lambda_{рс} \leq 500 \text{ Вт} \cdot \text{м} / \text{с} \cdot \text{м}^2$, (1) де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C); ρ – густина, кг/м³; c – питома теплоємність, Дж/(кг·°C). В якості обладнання для встановлення зразка в печі використовували вогнетривку цеглу, розміщуючи її таким чином, щоб не перешкоджати вогневому впливу та використанню ізолювальних прокладок термодар, вимірюванню температури поверхні зразка. Для вимірювання температури в печі використовували термодари з діаметром дроту 1,5 мм типу ТХА, що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300°C. 82.

Залежність температури в печі, з обігрівної та необігрівної поверхні вогнезахисної сталеві пластини 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 пластини, 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. 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. Була розроблена одновимірна фізична модель нагрівання, що складається із шару сталі і шару вогнезахисного покриття. Фізична модель вогнезахищеної сталевий пластини: сталь, вогнезахисне покриття. Теплофізичні характеристики шару 1 задавали з [11] як постійні величини. Комп'ютерна чисельна модель (метод кінцевих різниць) враховує радіаційноконвективний теплообмін між поверхнею покриття і гарячими газами печі, що нагріваються, і конвективний теплообмін між вогнезахищеною пластиною і навколишнім середовищем. Коефіцієнт конвективного теплообміну від гарячих газів в печі до поверхні покриття, що нагрівається, приймався рівним $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 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 сталевий пластини приймався рівним $45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, а питома об'ємна теплоємність $4,71 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$. 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 $\rho \cdot C$ ($\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$) вогнезахисного покриття, яка є добутком густини покриття ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) на питому масову теплоємність C ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$). При знаходженні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття шукали питому об'ємну теплоємність покриття постійною і рівною $C_v = 1,92 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, а коефіцієнт теплопровідності розраховували як функцію від температури. Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість Сталь da/2 Покриття dp 0 x1 x2 x 84 . 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 $15,7^{\circ}\text{C}$. Залежність температури від часу в місцях вимірювання температур з необігрівної поверхні вогнезахисної сталеві пластины, задовільна збіжність експериментальних і розрахункових температур пояснюється правильним вибором одновимірної фізичної моделі теплових процесів в системі «сталеві пластина-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 полівинилового 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 пластина–вогнезахисне покриття» за допомогою якої визначено теплофізичні характеристики новоствореного покриття: коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури та постійне значення питомої об'ємної теплоємності $C_v=1,92 \cdot 10^7$ Дж/(м³ · °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. 2. Завьялов Д. Е. Повышение эффективности огнезащитных вспучивающихся композиций. Doctoral dissertation. Санкт-Петербург, 2013. 118 с.
2. 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>.
3. 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>.
4. Новак С. В., Дріжд 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.
5. 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.
6. 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>.
7. 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>.
8. 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.
9. 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>.
10. ENV 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

