

УДК 614.841.332

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Досліджено вплив помилок у вимірюванні температур на необігрітій поверхні сталевій пластині з вогнезахисним покриттям на похибку визначення теплофізичних характеристик (коефіцієнт теплопровідності і питома об'ємна теплоємність). Встановлено, що випадкові похибки у вимірюванні температур 10 % і 20 % на необігрітій поверхні сталевій пластині з вогнезахисним покриттям значно впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття для захисту сталевих конструкцій і їх обов'язково необхідно враховувати при проектуванні будівель та споруд.

The influence of errors in measuring temperature on the unheated surface of a steel plate with fire-protective covering on the inaccuracy of determining heat and physical characteristics (coefficient of thermal conductivity and specific heat capacity per unit volume) was researched. It was determined that accidental inaccuracy in temperature measuring 10 % and 20 % on the unheated surface of a steel plate with fire-protective covering influence greatly accuracy of determining of heat and physical characteristic of the covering for protection of steel structures and they must be taken into consideration during designing buildings and structures.

**Ключові слова:** теплофізичні характеристики, похибка, коефіцієнт теплопровідності, вогнезахисне покриття, обернена задача теплопровідності.

**Т**очність будь-якого розрахунку значною мірою залежить від точності задання параметрів моделі, що забезпечують її відповідність реальним процесам теплообміну при випробуваннях на вогнестійкість. Серед параметрів моделі необхідно ідентифікувати ті, які є невідомими або недостатньо відомими і мають найбільший вплив на розрахункові значення температур обраної моделі. До таких параметрів для вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій відносяться коефіцієнт теплопровідності та питома об'ємна теплоємність покриття, що досліджується.

Наразі питання щодо визначення параметрів вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій є актуальним і достатньо вивченим. Проте, поза увагою дослідників залишився вплив випадкових помилок при вимірюванні температури на необігрітій поверхні сталевих пластин із вогнезахисними покриттями на похибку визначення саме коефіцієнта теплопровідності такого покриття як основного параметра, що найбільше впливає на точність розрахунку вогнестійкості конструкцій. Тому і метою даної роботи є дослідження впливу помилок при вимірюванні температур з необігрітій поверхні сталевій пластині на похибку визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття



**А.І. Ковальов**

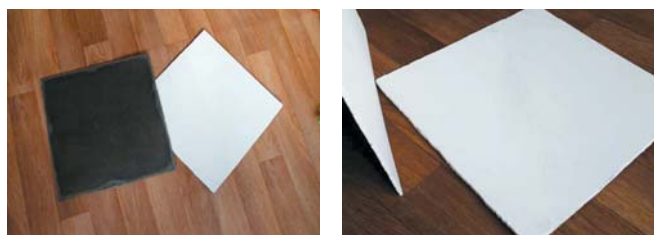
старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії інновацій у сфері цивільної безпеки Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, к.т.н.

відомої італійської фірми з метою врахування цих відхилень при проектуванні будівель та споруд із урахуванням вимог пожежної безпеки.

Для досягнення поставленої задачі були проведені вогневі випробування [1] двох сталевих пластин розмірами 500×500×5 мм із нанесеним вогнезахисним складом, що спучується, на водній основі. Після нанесення фарби білого кольору густиною 1200–1300 кг/м<sup>3</sup> на основі вінілових полімерів у водній дисперсії і спеціальних реагентів на пластині утворилася біла матова поверхня (рис. 1).

Необігрітна поверхня була захищена теплоізоляційною плитою, що складалася з двох шарів. Нижній шар, що прилягав до сталевій пластині, був виготовлений із керамічної вати згідно з п. 9.1.2 [2] завтовшки (20 ± 5) мм, а верхній – із базальтової плити завтовшки (100 ± 10) мм та густиною (100 ± 20) кг/м<sup>3</sup>. Пластину встановлювали на отвір опорної конструкції через теплоізоляційну вставку з керамічної вати завтовшки (10 ± 2) мм.

Для вимірювання середньої та максимальної температури на необігрітій поверхні сталевій пластині були встановлені три термопари типу ТХА з діаметром дроту 0,5 мм (Т1-Т3), одна термопара (Т2) в центрі зразка та дві (Т1, Т3) на відстані 100 мм від країв пластини (рис. 2).



**Рис. 1.** Загальний вигляд сталевій пластині після нанесення вогнезахисної речовини

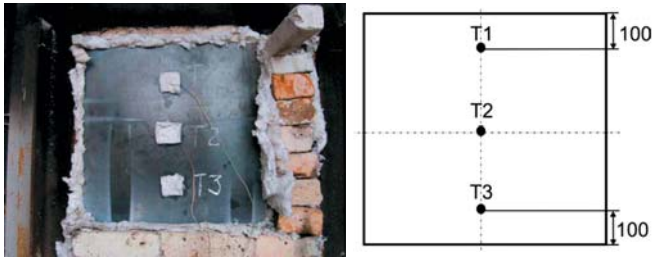


Рис. 2. Схема розміщення термопар із необігрівної поверхні сталеві пластини

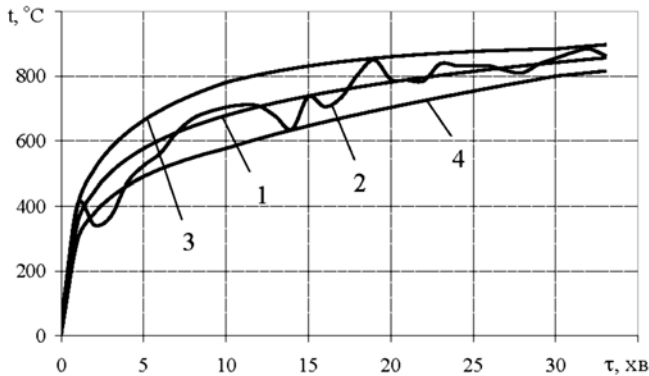


Рис. 3. Залежність температури в печі від часу вогневого впливу на обігрівну поверхню сталеві пластини з вогнезахисним покриттям:

1 – стандартний температурний режим; 2 – реальна крива зміни температури в печі; 3, 4 – допустимі при випробуваннях максимальні та мінімальні значення температури в печі відповідно



Рис. 4. Загальний вигляд зразка після випробувань

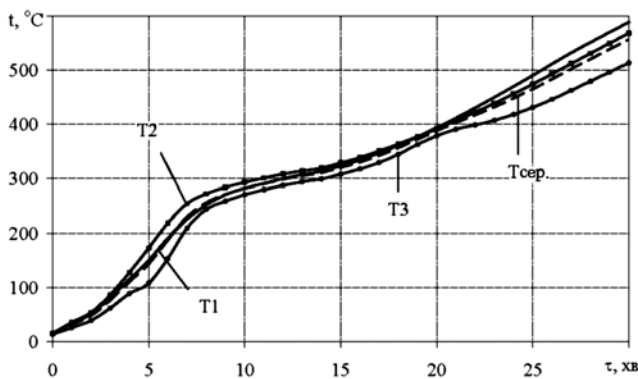


Рис. 5. Залежність температури від часу вогневого впливу на необігрівній поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям відомої італійської фірми:

T1 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від верхнього краю пластини; T2 – термопара, встановлена по центру пластини; T3 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від нижнього краю пластини; Tсер – середнє значення показників термопар

Суть випробування полягала у створенні температурного режиму в печі (рис. 3), регламентованого [3], при тепловій дії на дослідний зразок і визначенні часу від початку теплового впливу до настання граничного стану, коли досягається температура 500 °C з необігрівної поверхні сталеві пластини.

Для вимірювання товщини утвореного вогнезахисного покриття використовували товщинімір, яким було здійснено вимірювання в 9 точках, середня товщина складала 1,12 мм.

Випробування проводилися протягом 33 хв за температури повітря 14 °C, відносній вологості 64 % і тиску 742 мм рт. ст., тобто в умовах, близьких до стандартного температурного режиму.

Після випробувань при візуальному огляді зразків встановлено наступне (рис. 4):

- вогнезахисна речовина, нанесена на сталеву пластину розмірами 500×500×5 мм із грунтовкою ГФ-021, має задовільну адгезійну міцність;
- утворене покриття має незначне відшарування;
- середня товщина спученого шару після випробувань складала 61,5 мм.

Як видно із рис. 5, час прогрівання сталеві пластини з вогнезахисним покриттям завтовшки 1,12 мм до критичної температури 500 °C складає приблизно 33 хв.

Одним з етапів визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій за допомогою розрахунково-експериментального методу є побудова найбільш адекватних фізичної та математичної моделей теплових процесів, що відбуваються в сталевих пластинах із вогнезахисним покриттям. Розглянемо ці моделі.

Фізична модель представляє собою систему, що складається з двох шарів: сталеві пластини завтовшки 5 мм і вогнезахисного покриття завтовшки 1,12 мм (рис. 6).

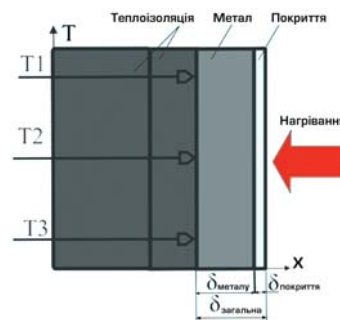


Рис. 6. Фізична модель сталеві пластини з вогнезахисним покриттям в одновимірній постановці

Загальна товщина системи складається із суми товщин окремих шарів. При випробуванні права поверхня пластини нагрівається конвективно-радіаційними механізмами теплообміну від гарячих газів у печі з температурою  $T_{C1}$ , що є близькою до кривої стандартної пожежі, і коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha_{c2} = 25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ . Ліва поверхня пластини охолоджується конвекцією в навколишнє середовище з температурою  $T_{C2} = 14 \text{ }^\circ\text{С}$ , коефіцієнт тепловіддачі з необігрівної поверхні  $\alpha_{c2}$  приймався  $7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

У середині перекриття тепло передається тільки завдяки теплопровідності пластини. Приймається умова ідеального теплового контакту між окремими їх шарами. Коефіцієнт теплопровідності сталевий пластини приймався таким, що дорівнює  $40 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ , а питома об'ємна теплоємність  $4 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{К}$ . Кількість вузлів чисельної моделі – 15, по просторовій координаті з кроком за часом 30 с.

Оскільки покриття, що досліджувалося, є таким, що спучується (з можливістю збільшення початкової товщини покриття до 100 разів), і закон збільшення початкової товщини покриття під час нагрівання невідомий, то виникає питання до якої товщини відносити отримані коефіцієнти ефективної теплопровідності і питомої об'ємної теплоємності покриття.

У даній роботі прийнято, що отримані коефіцієнти ефективної теплопровідності і питомої об'ємної теплоємності покриття відносяться до його початкової товщини. Тому розрахункові моделі процесу теплопровідності теж бралися з товщинами покриттів, незмінними у часі.

Математична модель процесу теплопровідності в такій двошаровій системі в декартовій системі координат, що описує розглянуту вище фізичну модель, багаторазово описана [4, 5] і являє собою одновимірне рівняння теплопровідності з комбінацією променистого теплообміну і граничними умовами 3-го роду на поверхні, що обігрівається, і граничними умовами 3-го роду на необігрівній поверхні, що враховує температуру навколишнього середовища.

Оскільки густина покриття також сильно змінюється (зменшується) під час нагрівання, то оберненими задачами теплопровідності, крім коефіцієнта теплопровідності, визначається питома об'ємна теплоємність  $\rho \cdot C$  ( $\text{Дж/м}^3 \cdot \text{К}$ ) пок-

риття, яка є добутком густини покриття ( $\text{кг/м}^3$ ) на питому вагову теплоємність  $C$  ( $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$ ).

Вихідними даними для вирішення задач визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, а саме сталевих, є експериментальні значення температур на таких конструкціях під час випробувань зразків у вогневих печах при стандартному температурному режимі пожежі.

На основі експериментальних даних (температури з необігрівної поверхні пластини), використовуючи фізичну і математичну моделі теплового стану зразка, розв'язанням обернених задач теплопровідності (ОЗТ) були отримані теплофізичні характеристики покриття, що досліджувалося: постійне значення питомої об'ємної теплоємності  $Cv = 1 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{К}$ , а теплопровідність як функція від температури (рис. 7).

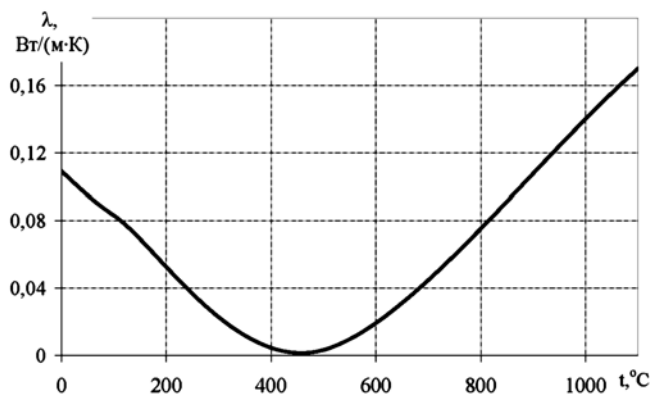


Рис. 7. Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття відомої італійської фірми від температури, знайденого розв'язанням ОЗТ

Як видно із рис. 7, крива коефіцієнта теплопровідності від початкової температури до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  лінійно падає, що пояснюється спученням покриття в заданому температурному діапазоні, а потім лінійно зростає, що може пояснюватись вигоранням шару покриття під дією температури.

Далі було досліджено вплив похибок 10 %, 20 % у вимірюванні температури з необігрівної поверхні сталевий пластини з вогнезахисним покриттям на точність визначення теплофізичних характеристик покриття, що досліджується.

Вводилися випадкові похибки 10 % і 20% у вимірюванні температур з необігрівної поверхні сталевий пластини з вогнезахисним покриттям з допомогою генератора випадкових чисел (рис. 8, 9).

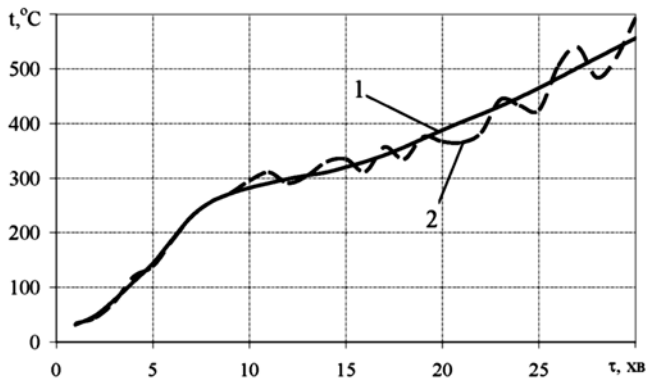


Рис. 8. Точні й збурені до 10 % значення температур на необігрівній поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям завтовшки 5 мм:

1 – точна крива зміни температури на необігрівній поверхні пластини; 2 – збурена на 10 % крива зміни температури на необігрівній поверхні пластини

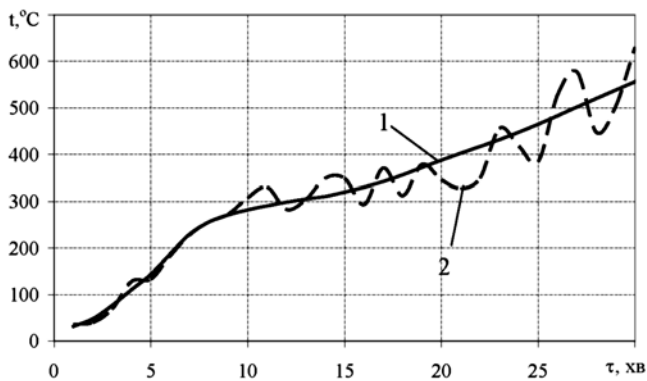


Рис. 9. Точні й збурені до 20 % значення температур на необігрівній поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям завтовшки 5 мм:

1 – точна крива зміни температури на необігрівній поверхні пластини; 2 – збурена на 20 % крива зміни температури на необігрівній поверхні пластини

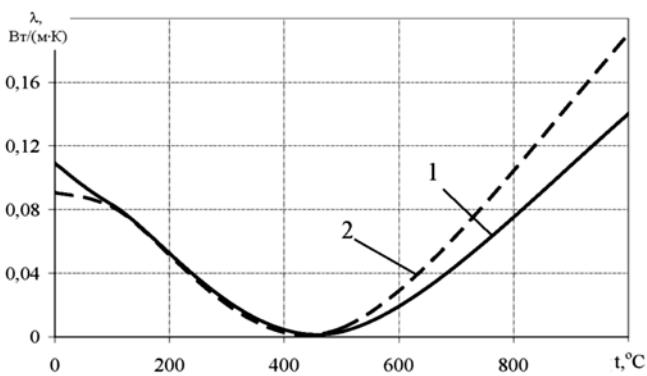


Рис. 10. Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття від температури:

1 – точні коефіцієнти; 2 – коефіцієнти, отримані розв'язком ОЗТ при збурених температурах на 10 %

Отримані збурені температури використовували при знаходженні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття, що досліджувалось, шляхом розв'язання обернених задач теплопровідності.

Критерій середньоквадратичного відхилення при пошуку коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття відомої італійської фірми по збуреним на 10 % температурам склав 18,6 °С, по збуреним на 20 % температурам – 37,03 °С (рис. 11, 12, 13).

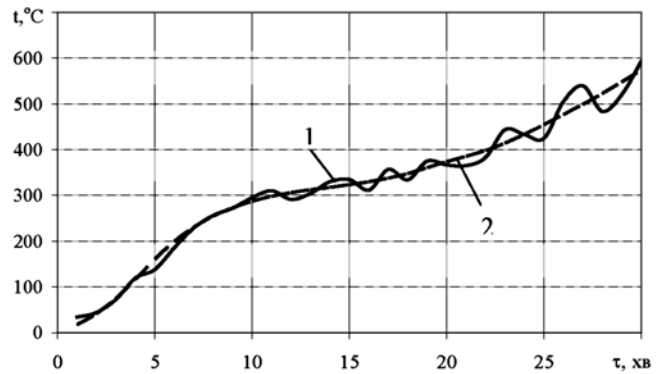


Рис. 11. Експериментальні й розрахункові значення температур на необігрівній поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям при їх збурюванні на 10 %:

1 – точна крива зміни температури на необігрівній поверхні; 2 – розрахункова крива зміни температури на необігрівній поверхні

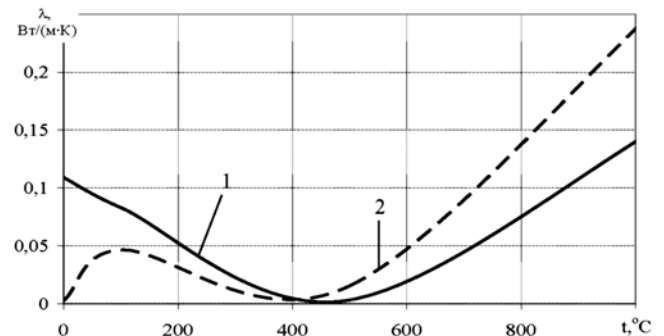


Рис. 12. Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття від температури:

1 – точні коефіцієнти; 2 – коефіцієнти, отримані розв'язанням ОЗТ при збурених температурах на 20 %

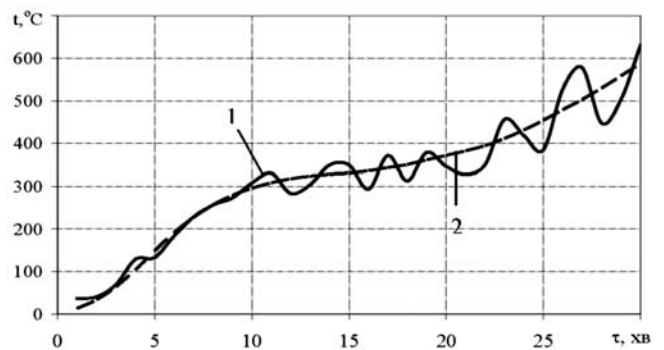


Рис. 13. Експериментальні й розрахункові значення температур на необігрівній поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям при їх збурюванні на 20 %:

1 – точна крива зміни температури на необігрівній поверхні; 2 – розрахункова крива зміни температури на необігрівній поверхні

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що випадкові похибки у вимірюванні температур 10 % і 20 % на необігрівній поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям значно впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття для захисту сталевих конструкцій, і їх обов'язково треба враховувати при проектуванні будівель та споруд. Неточність у вимірюванні температур з необігрівної поверхні сталеві пластини на 10 %

призводить до похибки у визначенні теплофізичних характеристик покриття в 17 %, а на 20 % – до похибок в 34 %.

Подальші роботи мають бути направлені на дослідження впливу похибок у вимірюванні температур з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям за умов вогневого впливу та температурного режиму вуглеводневої пожежі або іншого режиму пожежі.

- [1] Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання : ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. – [Чинний від 2011-11-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 9 с. – (Національний стандарт України).
- [2] Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (EN 13381-4:2002, NEQ) : ДСТУ Б В 1.1-17:2007. – [Чинний від 2008-01-01] – К.: Укрархбудінформ, 2009. – XIV, 105 с. – (Національний стандарт України).
- [3] Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги (ISO 834:1975) : ДСТУ Б В.1.1-4-98. – [Чинний від 1998-10-28]. – К. : Укрархбудінформ, 1999. – 21с. – (Державний стандарт України).
- [4] *Ковалев А.И.* Усовершенствование метода оценки огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий: дисс. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Ковалев Андрей Иванович. – К., 2012. – 163 с.
- [5] Експериментальне дослідження вогнезахисної здатності покриття «Amotherm Steel Wb» при температурному режимі вуглеводневої пожежі / *А.І. Ковальов, Є.В. Качкар, Н.В. Зобенко [та ін.]* // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2014. – № 17. – С. 53–60.

Надійшла 27.03.2017 р.