

ЧИСЕЛЬНО-ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ТЕРМОГРАФІЧНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД

О.С. Міленін, В.Ю. Глуховський, О.А. Великоіваненко, В.А. Литвиненко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Для підвищення ефективності безконтактного контролю стану важкодоступних ділянок великогабаритних конструкцій та споруд розроблено чисельно-інструментальний підхід термографічного контролю. Він полягає в комплексному застосуванні промислових тепловізійних приладів і розрахункових методів аналізу температурних полів у досліджуваних конструкціях. Це дозволяє покращити точність визначення геометричних особливостей дефектів і зменшити трудомісткість робіт з технічної діагностики стану. Використання розробленого підходу продемонстровано на типових прикладах безконтактного контролю технічного стану промислових димових труб. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: термографічний контроль, технічний стан, дефектоскопія, промислові димові труби, теплоперенесення

Вступ. Діагностика технічного стану великогабаритних конструкцій, будівель і споруд довготривалої експлуатації є обов'язковим етапом експертного аналізу їх стану та основою для планування заходів ремонтно-відновлювальних робіт. Одним із основних аспектів дослідження є виявлення дефектів конструкцій, які можуть впливати на цілісність і функціональність відповідних конструкційних компонентів.

Для аналізу конструкцій певного класу (житлові та нежитлові будівлі, димові труби, резервуари, посудини високого тиску) при виявленні геометричних аномалій різного типу показали свою ефективність методи пасивного термографічного контролю (ТК), які дозволяють проводити діагностику стану будівель у важкодоступних місцях без необхідності використання коштовного обладнання та знизити виробничі ризики для персоналу [1, 2]. Суть цього методу полягає в тому, що різниця температур всередині досліджуваної конструкції та зовні різна, це зумовлює певне прогрівання зовнішньої поверхні. Фактичний розподіл температури поверхні залежить від багатьох факторів, зокрема від термічного опору конструкції, теплопровідності матеріалів, а також від наявності експлуатаційних дефектів, тобто локальних стоншень або порожнин у стінці. Це може бути зафіксовано за допомогою безконтактних методів термографії. Простота та доступність цього підходу зумовила його поширеність для оцінки теплових характеристик будівель, виявлення зон надмірних втрат тепла, витоків повітря, відсутності або пошкодження теплоізоляції, джерел вологи тощо [3, 4]. Безконтактний характер ТК дозволяє широко застосовувати його для аналізу руйнування металевих

матеріалів, а також для виявлення підповерхневих дефектів у полімерах чи композитах [5, 6].

Але одним із принципових недоліків цього методу технічної діагностики є невелика точність кількісної оцінки розмірів виявлених дефектів, особливо вздовж товщини конструкції. Це означає, що в разі виявлення певних аномалій для обґрунтованого експертного висновку про їх припустимість необхідними є додаткові заходи з обстеження відповідного конструкційного елемента, що, певним чином, нівелює переваги ТК. Тому актуальною є розробка наукомістких підходів аналізу результатів вимірювання полів температур з точки зору їх кількісної інтерпретації.

Метою даної роботи є розробка чисельно-інструментального методу ТК стану великогабаритних конструкцій та споруд на основі комплексного застосування тепловізійних приладів і розрахункових підходів аналізу теплових полів.

Методологія дослідження. Інструментальна частина запропонованої методики полягає у термографічному вимірюванні природних (пасивна термографія) чи наведених (активна термографія) полів на поверхні плоских або циліндричних конструкцій. Області поверхневих або підповерхневих дефектів характеризуються локальною зміною температури. При цьому співвідношення температур в області дефекту та в бездефектній частині конструкції залежить, перш за все, від залишкової товщини стінки та типу дефекта. Для визначення типу (поверхнева, підповерхнева) та фактичного розміру несучільності необхідно мати залежності локальної температури на зовнішній поверхні конструкції в області дефекту від теплофізичних властивостей матеріалу та особливостей

температурного впливу. Такі залежності було отримано на основі чисельного розрахунку температурного поля з урахуванням геометричних та фізичних особливостей стану конструкції. Валідацію математичних моделей та засобів їх комп'ютерної реалізації було проведено на основі відповідних лабораторних досліджень модельних конструкційних елементів.

Так, розрахунок нерівномірного температурного поля базувався на скінченно-різницевому розв'язку нестационарного рівняння теплопровідності [7, 8]:

– у декартовій системі координат (x, y, z) – для опису процесів теплоперенесення в пластинах:

$$\begin{aligned} C\rho(x, y, z, T) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

– у циліндричній системі координат (r, β, z) – для циліндричних конструкцій:

$$\begin{aligned} C\rho(r, \beta, z, T) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial t} = \\ = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot \lambda(r, \beta, z) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial r} \right] + \\ + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \left[\lambda(r, \beta, z) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial \beta} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(r, \beta, z) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z, t)}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

де T – температура, °C; λ – теплопровідність, Дж/(м·с·°C); $C\rho$ – об'ємна теплоємність, Дж/(м³·°C).

При постановці задачі (1) або (2) було використано граничні умови другого роду відповідно до сумарної дії характерних джерел і стоків тепла. У якості основних дисипативних процесів розглядалися конвективні (відповідно до закону Ньютона-Ріхмана) та випромінювальні (за законом Стефана-Больцмана) механізми. Процес нагрівання з однієї з поверхонь досліджуваного об'єкта описувався відповідним потоком тепла. Чисельний розв'язок рівняння теплопровідності дозволив визначити як стаціонарний розподіл температур, так і кінетику розвитку температурного поля, що було важливим при лабораторній валідації чисельного підходу.

Лабораторні випробування. Розроблений підхід було валідовано шляхом порівняння температурних полів, виміряних за допомогою тепловізора (TESTO 876 з роздільною здатністю 320×240 пікселів) на дослідних зразках з модельними поверхневими дефектами, з результатами чисельних розрахунків. У якості дослідних зразків були використані пластини розмірами 300×200×10 та 260×125×10 мм зі сталі Ст3 кп, теплофізичні властивості матеріалу в залежності від температури наведено в табл. 1. У якості модельних дефектів були розглянуті стоншення завдовжки 160 мм, завширшки 50 мм на глибинах 2 і 6 мм та горизонтальне підповерхнє розшарування (1×61×66 мм на глибині 8 мм) (рис. 1). У рамках лабораторних досліджень було використано метод двосторонньої активної термографії, для чого з одного боку зразки нагрівались інфрачервоним джерелом, потужність якого змінювалась від 1,05 до 0,45 кВт, а з іншого боку проводилося вимірювання температурних полів.

Нагрівання зазначених лабораторних зразків проводилось за різні проміжки часу для забезпечення стаціонарного температурного поля. Так, нагрівання пластини зі стоншеннями (рис. 1, а) відбувалося протягом 905 с, термограми температурних полів на поверхні зразка на різних етапах (5 та 65 с) наведено на рис. 2. Як видно з результатів вимірювань, області дефектів стоншення характеризуються локальним збільшенням температури в порівнянні з периферією від 3 до 22 °C у залежності від глибини дефекту та часу нагрівання. На противагу дефекту стоншення пластини в разі наявності розшарування на поверхні лабораторного зразка спостерігається локальне зниження температури в результаті збільшення термічного опору пластини (рис. 3). Для випадку, що розглядався в рамках лабораторних досліджень (рис. 1, б) та нагрівання протягом 47 с, величина локального зниження температури поверхні складала близько 2 °C. Порівняння експериментально виміряних розподілів температур з результатами розрахунків (рис. 4) показують похибку не більше 15 % як на етапі нагрівання, так і в стаціонарному режимі. Такий рівень точності є достатнім для розв'язання інженерних задач технічної діагностики.

Таблиця 1. Залежність теплофізичних властивостей сталі Ст3 кп від температури [9]

T, °C	Теплопровідність, Вт/(м·°C)	Теплоємність, Дж/(кг·°C)
100	55	482
200	54	498
300	50	514
400	45	533
500	39	555
600	34	584
700	30	626

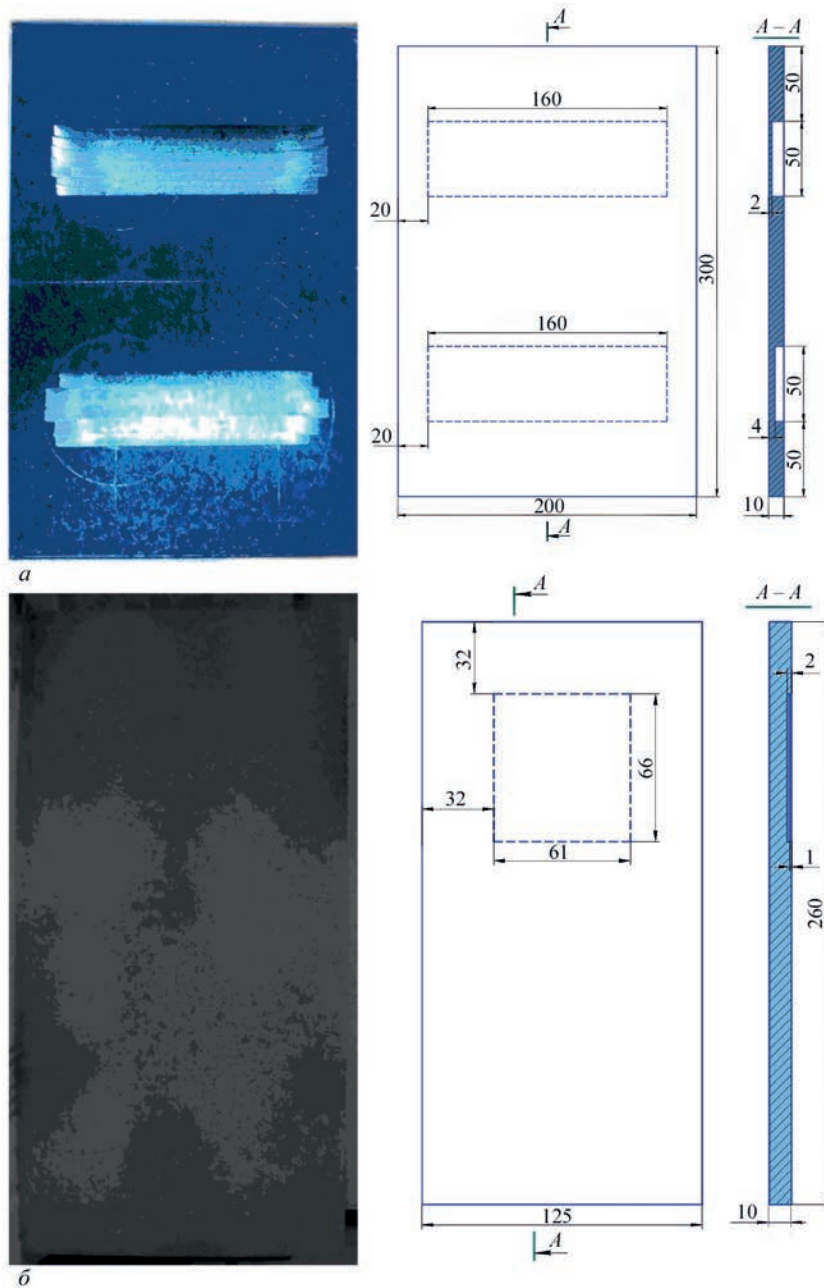


Рис. 1. Зовнішній вигляд і схеми пластин з модельними дефектами, що використані для лабораторних досліджень: *a* – пластина зі стоншеннями; *б* – пластина з розшаруванням

тики та підвищення точності кількісного аналізу відповідних термограм.

Результати та обговорення. Розроблений підхід було використано для підвищення ефективності діагностування технічного стану типових промислових димових труб на прикладі конструкції залізобетонної чотиришарової промислової димової труби для котлоагрегатів ПТВ-100 (висота

120 м, діаметр гирла 4,8 м, товщина стінки контрольованої області труби 0,55 м, при цьому товщина залізобетонного шару – 0,120 м, цегляного притискного шару – 0,120 м, теплоізолюючого шару – 0,05 м та шару цегляної футерівки – 0,120 м). Теплофізичні характеристики матеріалів шарів наведено в табл. 2. На основі результатів чисельного розрахунку було отримано залежності максималь-

Таблиця 2. Теплофізичні властивості матеріалів різних шарів промислової димової труби для котлоагрегатів ПТВ-100 у сухому стані при атмосферному тиску і температурі 20...50 °С [10]

Назва шару	Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м °С)	Теплосмність, Дж/(кг °С)
Футерівка	Цегла червона повнотіла	0,74	860
Теплоізоляція	Вата мінеральна	0,041	920
Притискний	Цегла червона повнотіла	0,74	860
Залізобетонний стовбур	Залізобетон	1,70	840

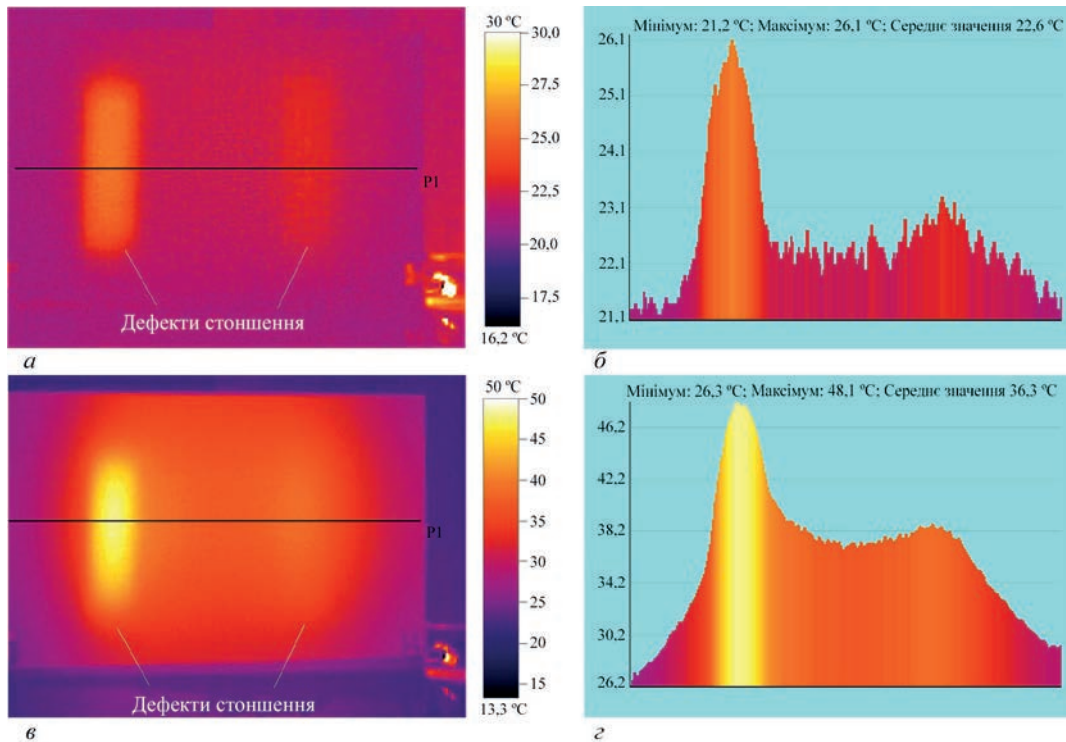


Рис. 2. Термограми температурних полів на поверхні плоского лабораторного зразка з модельними дефектами стоншення (а, в) та температурні розподіли вздовж лінії P1 (б, г) через різні проміжки часу після початку нагрівання: а, б – 5 с ; в, г – 65 с

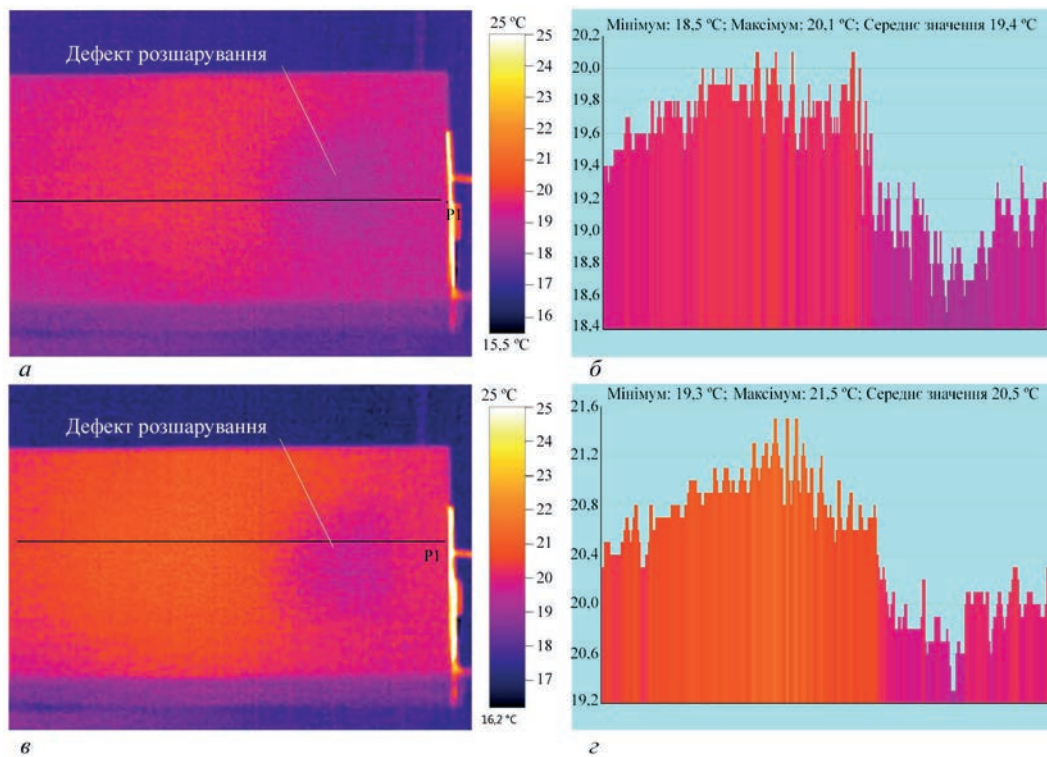


Рис. 3. Термограми температурних полів на поверхні плоского лабораторного зразка з модельним дефектом розшарування (а, в) та температурні розподіли вздовж лінії P1 (б, г) через різні проміжки часу після початку нагрівання: а, б – 18 с ; в, г – 47 с

ної температури в центрі дефекту локального стоншення стінки від його глибини та внутрішньої температури в трубі при різній температурі димових газів в трубі $T_{вн}$ (рис. 5). Як видно з цих даних, при руйнуванні внутрішнього шару цегляної футерівки стрімке зростання температури на зовнішній поверхні димової труби починається лише

при деградації наступного шару, а саме теплової ізоляції, що накладає певні обмеження щодо застосування ТК технічного стану такого роду неоднорідних об'єктів.

Стосовно підповерхневих дефектів розшарування, на рис. 6 наведено розрахункові залежності локальної температури від радіального розміру

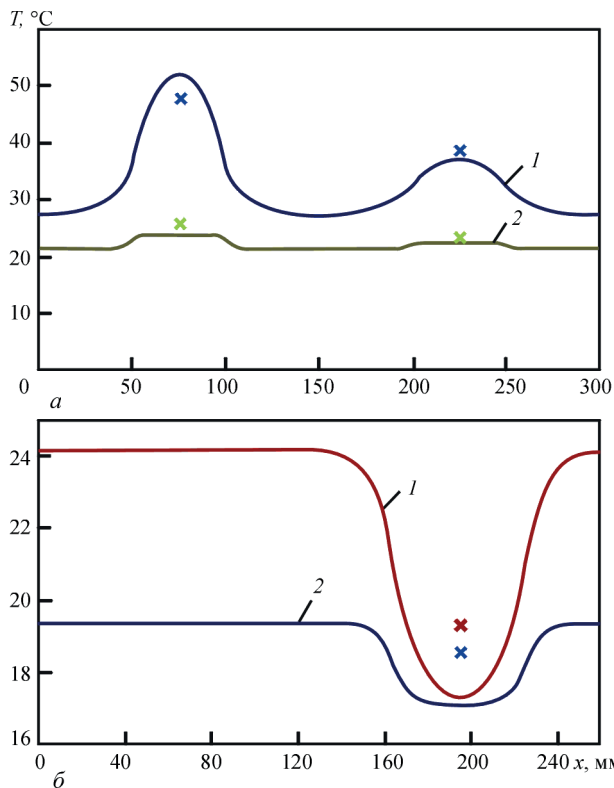


Рис. 4. Розрахункові розподіли температури на поверхні лабораторного зразка зі стоншеннями (а) ($1 - \tau = 65$ с, $2 - \tau = 5$ с) та розшаруванням (б) ($1 - \tau = 47$ с, $2 - \tau = 18$ с) через різні проміжки часу нагрівання (лінії) та відповідні значення термографічних вимірювань (x)

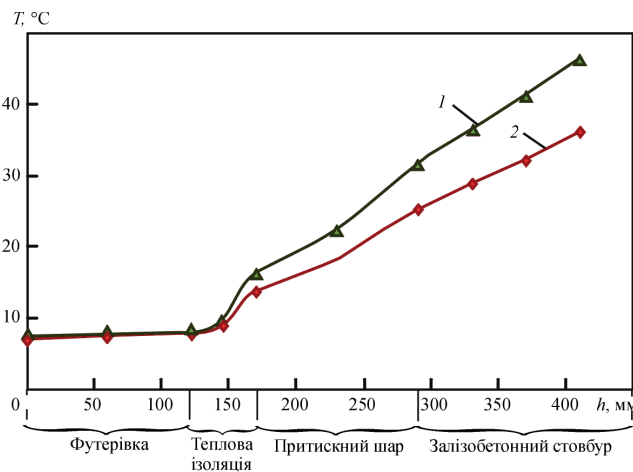


Рис. 5. Розрахункові залежності локального максимуму температури від глибини стоншення промислової чотиришарової димової труби діаметром 5870 мм при різних температурах димових газів: $T_{\text{вн}}$: 1 – 130; 2 – 100 $^{\circ}\text{C}$

об'ємного дефекту (величини розкриття порожнини в результаті деградації матеріалу), що розташований в центральному ізоляційному шарі труби, та температури димових газів. Як видно з цих даних, рекомендований метод ТК є достатньо чутливим для ідентифікації такого роду внутрішніх дефектів, які важко виявити іншими засобами неруйнівного контролю: перепад температури на поверхні в залежності від розміру дефекта досягає

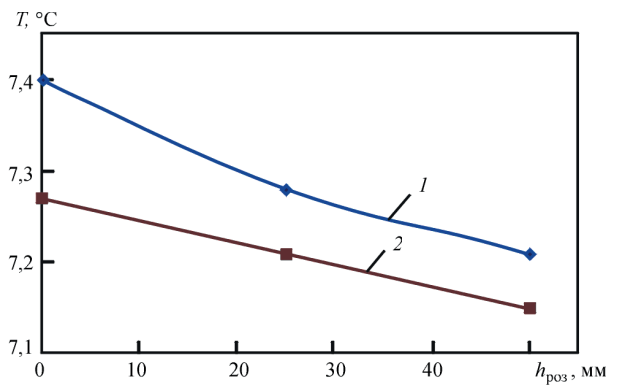


Рис. 6. Розрахункові залежності локального температурного мінімуму від величини деградації (розшарування) ізоляційного шару промислової димової труби діаметром 5870 мм при різних температурах димових газів $T_{\text{вн}}$: 1 – 130; 2 – 100 $^{\circ}\text{C}$

0,2 $^{\circ}\text{C}$, що може бути виявлено, враховуючи точність прилада на рівні 0,1 $^{\circ}\text{C}$.

Запропоновані розрахункові залежності дозволяють точніше аналізувати відповідні термограми, оцінювати температуру всередині труби на певній висоті (відповідні залежності сходяться до конкретних температур поверхні бездефектної ділянки при розмірі дефекта, що дорівнює нулю), визначити тип і розміри дефектів у процесі ТК.

Висновки

Розроблено чисельно-інструментальний метод термографічного аналізу технічного стану великогабаритних конструкцій і споруд з метою підвищення точності визначення розмірів експлуатаційних дефектів. Для цього поєднано методи чисельного моделювання неоднорідного поля температур на поверхні плоских чи циліндричних об'єктів контролю з інструментальними підходами термографічного аналізу інфрачервоного випромінювання.

Для валідації розробленого методу проведено лабораторні дослідження на сталевих пластинах з модельними дефектами — локальним стоншенням і внутрішнім розшаруванням. За результатами розрахунків і термографічного вимірювання температури поверхні дефектного зразка показано похибку розробленого підходу не вище 15 %.

На прикладі конструкції залізобетонної чотиришарової промислової димової труби для котлоагрегатів ПТВ-100 заввишки 120 м та діаметром гирла 4,8 м на основі результатів чисельного розрахунку було отримано залежності максимальної температури в центрі дефекту локального стоншення стінки від його глибини, а також локальної температури від радіального розміру об'ємного дефекту розшарування, що розташований в центральному перерізі стінки димової труби. Запропоновані розрахункові залежності на основі аналізу відповідних термограм дозволяють оцінити темпе-

ратуру всередині труби на певній висоті, визначити тип і розміри дефектів з підвищеною точністю.

Список літератури/References

1. Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., P. de Wilde (2014) Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, 296–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>
2. DSTU B EN 13187:2011 *Thermal performance of buildings – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method.*
3. Kylili, A., Fokaides, P.A., Christou, P., Kalogirou, S.A. (2014) Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, **114**, 531–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
4. Miguel, M., Chong, A., Biljecki, F., Miller, C. (2022) Infrared thermography in the built environment: A multi-scale review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **156**, 112540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112540>
5. Wu, Z., Qin, S., Zhang, P., Pan, Z. (2023) Damage evolution in braided composite tubes under axial compression studied by combining infrared thermography and X-ray computed tomography. *Composite Structures*, **311**, 116634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116634>
6. Xie, H., Fang, H., Li, X. et al. (2021) Low-velocity impact damage detection and characterization in composite sandwich panels using infrared thermography. *Composite Structures*, **Vol. 269**, 114008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114008>
7. Karkhin, V.A. (2019) *Thermal Processes in Welding*. Singapore, Springer Singapore.
8. Ахонин С.В., Миленин А.С., Пикулин А.Н. (2005) Моделирование процессов испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении поверхности цилиндрических слитков из сплавов на основе титана. *Современная электрометаллургия*, **1**, 21–25.
9. Akhonin, S.V., Milenin, A.S., Pikulin, A.N. (2005) Modeling of processes of evaporation of alloying elements in EBSM of cylindrical ingots produced from Ti-base alloys. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 21–25.
9. (1991) *Физические величины. Справочник*. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.). Москва, Энергоатомиздат. (1991) *Physical quantities. Handbook*. Eds by I.S. Grigoriev, E.Z. Mejlkhov. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
10. <https://eco-obogrev.com/ua/a233242-spravka-plotnost-teploprovodnost.html>

NUMERICAL-INSTRUMENTAL METHOD OF THERMOGRAPHIC CONTROL OF THE STATE OF LARGE-SIZED STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

O.S. Milenin, V.Yu. Glukhovskiy, O.A. Velykoivanenko, V.A. Lytvynenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: asmilenin@ukr.net

A numerical-instrumental approach of thermographic control was developed to improve the efficiency of contactless control of the state of difficult-of-access parts of large-sized structures and constructions. It consists in integrated application of industrial thermal imaging instruments and computational methods of analysis of temperature fields in the studied structures. This allows improving the accuracy of determination of the geometrical features of the defects and reducing the labour consumption of operations of technical diagnostics of the state. Application of the developed approach was demonstrated on typical examples of contactless control of the technical state of industrial chimneys. 10 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: thermographic control, technical state, flaw detection, industrial chimneys, heat transfer

Надійшла до редакції 03.04.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництвах. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

- <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
- <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
- <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
- <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2022 рр.