

УДК 536.6+624.014.2

А.О. Попаленко,
ORCID: 0000-0002-5615-7117

С.В. Колесніченко,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0001-5087-8354

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОГРАФІЧНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТРІЩИН У СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

У статті наведені результати дослідження можливості використання термографічного неруйнівного контролю для пошуку тріщин у сталевих конструкціях. Основою неруйнівного теплового контролю є реєстрація змін теплового поля, що виникає під час порушення термодинамічної рівноваги об'єкта із оточуючим середовищем, яке з'являється на поверхні, та характер якого дозволяє отримати необхідну інформацію. Метод теплового контролю базується на взаємодії теплового поля об'єкта із термодинамічними чутливими елементами (термопара, фотоприймальник, рідкокристалічний елемент, болометр), що перетворюють параметри поля (інтенсивність, температурний градієнт, контрастність, променистість) в електричний сигнал реєструючого пристрою. Описано експеримент що доводить можливість застосування теплового неруйнівного контролю для виявлення тріщини у сталевих конструкціях. У якості вимірвальних приладів для проведення експерименту використовувалися тепловізори із різною роздільною здатністю матриці ІЧ-зображення (термічного зображення), інфрачервоний термогігрометр, люксметр. Зазначені проблеми, що виникають під час використання способу теплового неруйнівного контролю та можливі способи їх вирішення. Автори роблять висновки про те, що спосіб термографічного контролю може бути використаний під час обстеження сталевих конструкцій для якісного оцінювання наявності тріщин.

Ключові слова: сталеві конструкції, тріщина, термографія, інфрачервона камера, неруйнівний контроль.

Вступ. Питання виконання вимог нормативних документів щодо експлуатації сталевих конструкцій є основним для забезпечення нормального виробничого процесу та гарантування безпеки персоналу промислових підприємств, особливо через великий відсоток конструкцій, що експлуатуються за межами свого проектного ресурсу, що призводить до збільшення кількості випадків техногенних аварій [1].

Виникнення аварійних ситуацій спричинених металевими конструкціями пов'язано з багатьма факторами, але практично завжди обумовлено утворенням пошкоджень в елементах цих конструкцій. Самим небезпечним пошкодженням для сталевих конструкцій є тріщини. Використання конструкцій із тріщиною заборонено нормами [2] у зв'язку із неможливістю прогнозування їх розвитку, що призводить до подальшого руйнування конструкції.

Під час проведення технічного обстеження сталевих будівельних конструкцій використовують наступні методи неруйнівного контролю: візуальний, ультразвуковий, рентгенівський, вимірвальний, електромагнітний, капілярний, тощо. Всі ці методи дозволяють вирішити задачу виявлення і визначення параметрів дефектів та пошкоджень, однак, як правило, вимагають досить трудомістких робіт, тривалих технологічних перерв у виробництві при проведенні контролю. Також, їх використання у виробничих умовах ускладнене у зв'язку з необхідністю ви-конання жорстких вимог до підготовки поверхні, що потребує часу та значних матеріальних витрат. Враховуючи обмеження: неможливість доступу до всієї поверхні конструкції, обмежена кількість працівників, неможливість стаціонарного електропостачання - більшість площі конструкції не може бути обстеженою, що призводить до відповідних допущень у висновках за результатами обстеження, та наявності великих ризиків можливості розвитку невиявлених дефектів та пошкоджень.

Неруйнівний термографічний контроль [3] може використовуватися під час виробництва деталей для автоматичного виявлення відхилення геометричних показників виробів та наявності поверхневих дефектів [4]. Для виявлення поверхневих дефектів сталевих конструкцій може використовуватися сканування поверхні конструкції що нагрівається за допомогою лазерного променя, відхилення форми теплової точки буде свідчити про наявність дефекту поверхні [5].

Аналіз досліджень і публікацій. Розробка методик і апаратури термографічного контролю (ТК), орієнтованих на діагностику стану і дослідження теплофізичних характеристик різних матеріалів, здійснюється в провідних наукових лабораторіях США, Канади, Німеччині, Франції, Фінляндії, Росії, а в останні роки Індії та Китаю.

Перші дослідження по ТК були виконані ще в 70-ті роки минулого століття Н.А. Бекешко, В.П. Вавілов, Ю.А. Поповим, Д.А. Рапопортом, П.Н. Будаїним, Б.Н. Епіфанцевим. В останні роки проблемі ТК присвячено дослідження Е.В. Абрамова, А.Н. Чепрасова, В.А. Захаренко, В.Г. Торгунакова.

Більша частина уваги у вищезазначених дослідженнях приділяється методам та приладам термографічного контролю, що націлені на виявлення пошкоджень під час їх виникнення. Зокрема, у своїй роботі В.В. Котельников [7], розглядає методи і пристрої ТК, ґрунтуючись на тому, що під час виникнення деформацій у сталевих конструкціях, під впливом механічних напружень, виділяється певна кількість енергії (тепла), котра фіксується за допомогою інфрачервоної камери такий метод теплового неруйнівного контролю називається пасивним і не дає змогу виявляти дефекти після їх утворення.

Постановка завдання. Основою неруйнівного теплового контролю є реєстрація змін теплового поля, що виникає під час порушення термодинамічної рівноваги об'єкта із оточуючим середовищем, яке з'являється на поверхні, та характер якого дозволяє отримати необхідну інформацію. Метод теплового контролю базується на взаємодії теплового поля об'єкта із термодинамічними чутливими елементами (термопара, фотоприймальник, рідкокристалічний елемент, болометр), що перетворюють параметри поля (інтенсивність, температурний градієнт, контрастність, променистість) в електричний сигнал реєструючого пристрою.

В термографічному способі контролю у якості енергії використовується теплова енергія, що розповсюджується у об'єкті контролю. Температурне поле поверхні є джерелом інформації особливостей процесу теплопередачі, які, в свою чергу, залежать від наявності внутрішніх дефектів (пошкоджень).

Умовно розрізняють пасивний тепловий неруйнівний контроль (ПТНК), активний (АТНК) та комбіновані способи термографічного контролю [6]. Пасивний не потребує зовнішнього теплового впливу, активний, навпаки, передбачає нагрів об'єкта дослідження зовнішнім теплом. Комбіновані методи потребують додаткового використання інших методів неруйнівного контролю.

Пасивним методом контролюють виникнення дефектів та пошкоджень під час роботи та (або) експлуатації об'єкта. Це найбільш поширені методи, що використовуються під час енергетичного аудиту, контролю приладів, що працюють під електричною напругою.

Активний метод використовують, коли під час експлуатації об'єкта не виділяється достатня кількість теплового випромінювання для виконання обстеження. В цьому випадку об'єкт додатково нагрівають зовнішнім джерелом тепла [8].

Найбільш поширеними приладами теплового контролю є інфрачервоні камери (тепловізори). Прилади обладнані інфрачервоними датчиками (болOMETрами) та спеціальним цифровим дисплеєм, де відображається картина теплового поля. Як правило, всі тепловізори мають спеціальне програмне забезпечення для обробки отриманих термограм. Також існує розподілення на наглядові та вимірювальні тепловізори, але перші не мають широкого спеціального використання, тому що, як правило, контролюється значення температур поверхня об'єкта.

Теплопровідність — здатність речовини переносити теплову енергію, а також кількісна оцінка цієї здатності: фізична величина, що характеризує інтенсивність теплообміну в речовині, яка дорівнює відношенню густини теплового потоку до градієнта температури. Явище теплопровідності полягає в тому, що кінетична енергія атомів й молекул, яка визначає температуру тіла, передається атомам і молекулам у тих областях тіла, де температура нижча.

Найбільшу теплопровідність мають речовини, в яких тепло переноситься вільними електронами, що зумовлено їхньою малою масою. Саме тому теплопровідність металів зазвичай висока. В нагрітій області речовини є більше електронів із високою енергією, вони легко мігрують в холодніші області, й втрачають там енергію, розсіюючись на коливаннях кристалічної ґратки.

У структурно однорідних тілах розповсюдження тепла шляхом теплопровідності (тепловий градієнт) відбувається рівномірно у всі сторони від найгарячішої точки (рис. 1), у випадку коли тіло має структурні неоднорідності або пошкодження (наприклад тріщину), виникає помітна “ступінчастість” теплового градієнта (рис. 2), що помітна на термограмах, отриманих під час проведення тепловізійного обстеження.

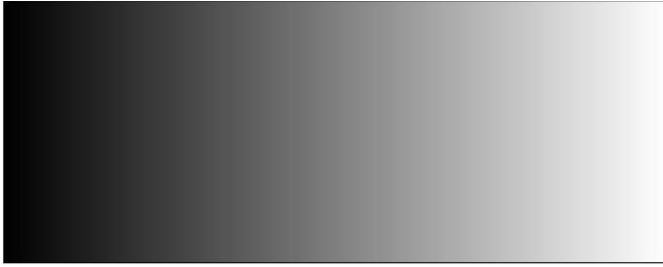


Рис. 1. Тепловий градієнт однорідної металевої пластини

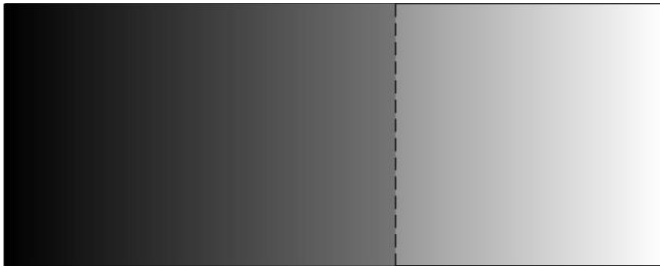


Рис. 2. Тепловий градієнт однорідної металевої пластини з тріщиноподібним дефектом

Також АТНК можна розподілити на контроль під час нагрівання, та контроль під час охолодження. АТНК під час нагрівання доцільно використовувати для виявлення ділянок неоднорідності в переважно однорідних тілах, АТНК під час охолодження дозволяє виявити чужорідні включення (наприклад ділянки корозійного ураження, коли замість металу присутній його оксид), виконувати контроль зварних з'єднань оскільки матеріал зварного шва відрізняється від матеріалу конструкції він охолоджується з іншою (відносно матеріалу конструкції) швидкістю.

Завданням дослідження є експериментальне визначення можливості та ефективності використання АТНК для пошуку та ідентифікації візуально невизначених тріщин у сталевих конструкціях

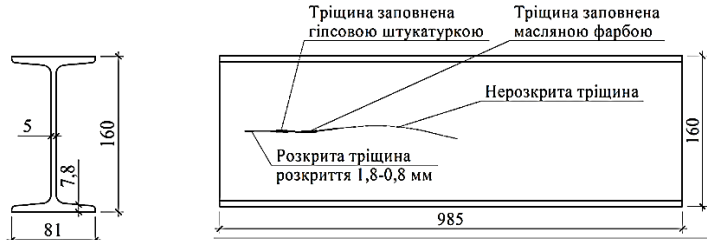
Методи дослідження. У якості вимірювальних приладів для проведення експерименту використовувалися тепловізори FLIR C2 із роздільною здатністю матриці ІЧ-зображення (термічного зображення) 80x60 пікселів та FLIR E8 із роздільною здатністю матриці ІЧ-зображення 320x240 пікселів, інфрачервоний термогігрометр, люксметр.

Задачі експериментальних досліджень включали:

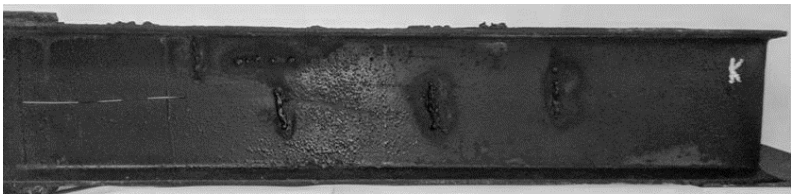
1. Вивчення можливостей принципового застосування термографічного способу контролю для обстеження сталевих конструкцій.
2. Пошук вирішення можливих проблем роботи із приладами.
3. Розробка методики виконання робіт при проведенні обстеження способом термографічного контролю з урахуванням реального стану конструкцій.

Для проведення експерименту у якості об'єктів дослідження було використано зразки металевих конструкцій та їх частин на яких було імітовано тріщину що пододала 60-80% товщини металу та розриви металу, далі приведено опис зразків що досліджувалися.

Зразок № 1 – балка сталева двотаврова №16, імітація тріщини що переходить у розрив з розкриттям 0,8-1,8 мм, розрив заповнений фарбою та гіпсовою штукатуркою, ділянки уражені корозією (рис. 3).



а) Схематичне зображення зразка 1



б) Загальний вигляд зразка № 1

Рис. 3. Зразок 1

Зразок № 2 – Труба сталева, товщина 4 мм, діаметр 103 мм, імітація розриву з розкриттям 0,2-3,0 мм (рис. 4).

Зразок № 3 – Балка сталева коробчастого перетину 80x80 мм, товщина стінки 3 мм, імітація розриву з розкриттям 0,3-1,0 мм (рис. 5)

Зразок № 4 – Сталевий лист товщиною 5 мм, імітація тріщин що переходять у розриви з розкриттям до 1,5 мм (рис. 6).

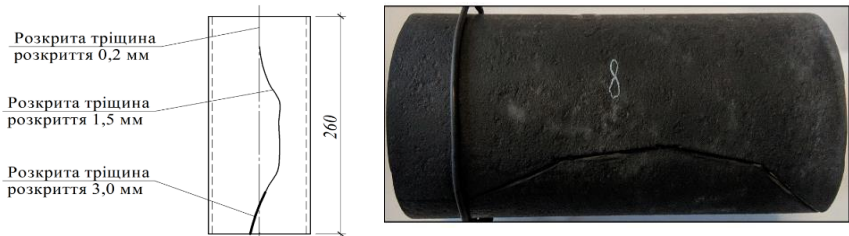


Рис. 4. Схематичне зображення та загальний вигляд зразка № 2

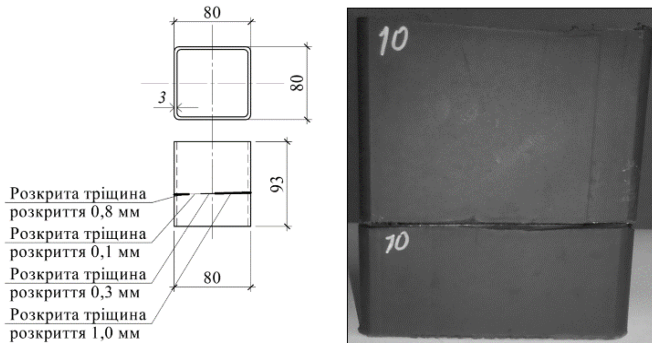


Рис. 5. Схематичне зображення та загальний вигляд зразка № 3

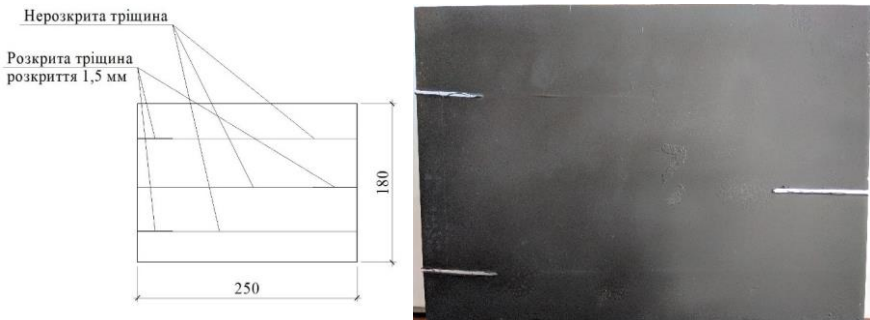


Рис. 6. Схематичне зображення та загальний вигляд зразка № 4

Методика проведення досліджень включала наступні основні операції:

1. Огляд та попередня оцінка зразків металевих конструкцій, що мають дефекти та пошкодження, визначення яких візуальним методом ускладнене або неможливе.
2. Визначення кліматичних параметрів зони проведення дослідження (температура, відносна вологість, природня освітленість).
3. Нагрів зразків до температури $\approx 100^{\circ}\text{C}$.
4. Сканування та запис термограм на інфрачервоні камери Flir C2 та Flir E8 при природному охолодженні зразків до температури $\approx 50^{\circ}\text{C}$.
5. Обробка даних з термограм за допомогою програмного комплексу Flir Tools.
6. Порівняння даних, отриманих за допомогою інфрачервоних камер Flir C2 та Flir E8.
7. Визначення місць пошкоджень на термограмах із формуванням зразків термограм.

Нагрів досліджуваного зразку виконувався різними шляхами: конвективний нагрів, нагрів випроміненням, контактний нагрів.

Основна частина. В результаті проведення експерименту було підтверджено що термографічний спосіб контролю може бути використаний під час обстеження сталевих конструкцій для якісного оцінювання наявності прихованих дефектів та пошкоджень. На рис. 7 показано компіляцію цифрового та інфрачервоного зображення ділянки двотаврової сталеві балки товщиною 6мм, на інфрачервоному зображенні видно приховану тріщину, вона виглядає як різка зміна теплового поля.



Рис. 7. Компіляція цифрового та інфрачервоного зображення досліджуваного зразку №1

На рис. 8 показано цифрове (а) та інфрачервоне (б) зображення зразка № 5, так-само приховані тріщини виглядають як різкі зміни теплового поля.

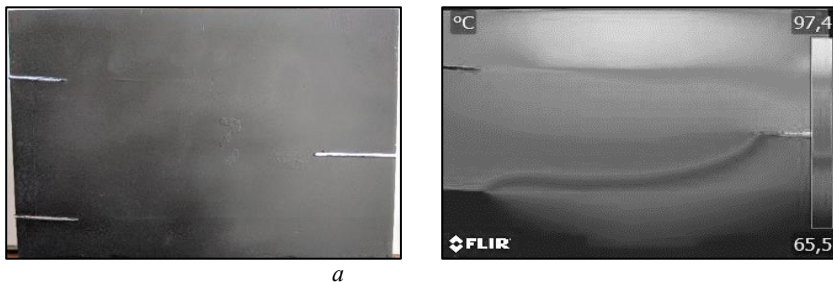
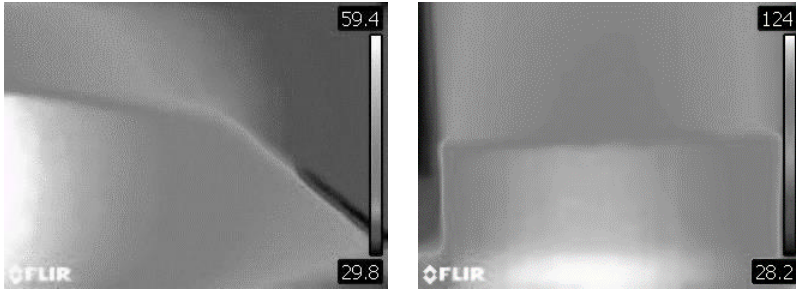


Рис. 8. Цифрове (а) та інфрачервоне (б) зображення зразка № 5

На рис. 9 зображено інфрачервоні зображення зразків 2 і 3 на них видно що ділянки металу що розділені розривами різко відрізняються за поверхневою температурою, на інфрачервоному зображенні зразка 2 (рис. 9 а) видно перехід тріщини в розрив.

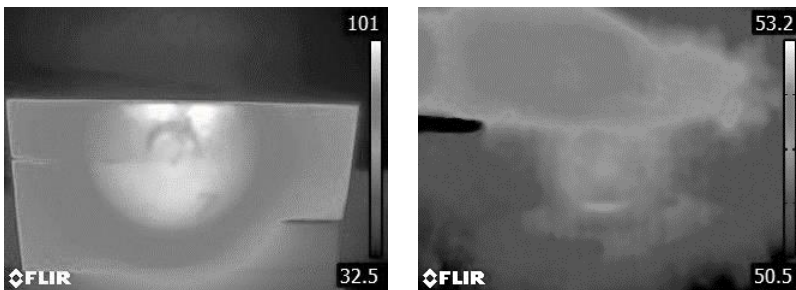


а
б
Рис. 9. Інфрачервоні зображення зразків 2 (а) та 3 (б)

Таким чином для отримання достовірних даних при використанні методу активної термографії необхідно враховувати наступні параметри:

- температура повітря навколишнього середовища;
- вологість повітря;
- кут нахилу оптичної осі вимірювального приладу до поверхні досліджуваного об'єкта;
- природна освітленість об'єкта дослідження;
- наявність в полі зору тепловізора високотемпературних об'єктів.

Значною мірою на якість термограм впливає ступінь блиску поверхні досліджуваного об'єкта. Властивий металевим конструкціям високий ступінь блиску може суттєво впливати на достовірність отриманих даних, на Рис. 10 приведено приклади термограм на яких видно вплив блиску досліджуваних зразків.



а
б
Рис. 10. Приклади термограм з відображеннями джерела інфрачервоного випромінювання (а) і оператора та об'єктива інфрачервоної камери (б)

Для зниження ступеню блиску поверхню досліджуваного об'єкту необхідне нанесення спеціального покриття з високим коефіцієнтом випромінення.

Висновки. Метод теплового контролю не потребує високоточного інфрачервоного обладнання. Під час проведення експерименту не було знайдено принципової різниці застосування тепловізорів із різними типами ІЧ матриць. При використанні більш точного Flir E8 теплограма мала чіткіше визначення температури поверхні, порівняно із Flir C2. Ця особливість може стати у нагоді для кількісного визначення дефектів – наприклад, глибини та розмірів тріщини під шаром фарби, але принципово, для якісного знаходження дефектів та пошкоджень, використання більш точного обладнання не є обов'язковою умовою.

Оптимальним методом нагріву виявився контактний нагрів оскільки він дозволяє точно локалізувати зону нагріву зразка.

На достовірність результатів теплового контролю значною мірою може впливати ступінь блиску поверхні досліджуваної конструкції.

Із вищезазначених даних випливає те, що використання теплового неруйнівного способу контролю значно збільшує імовірність знаходження місць розташування небезпечних прихованих дефектів та пошкоджень та підвищує якість результатів проведення обстеження технічного стану металевих конструкцій.

Список літератури:

1. Thoft-Christensen, P. (2001). Risk Analysis in Civil Engineering. Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering. Structural Reliability Theory, No. 224, Vol. R0163. – p.24.
2. Eurocode 3: ENV 1993-1-1, Design of Steel Structures, Part 1.1: General rules and rules for the buildings. CEN, Brussels, 2005.
3. A. Killey, J. P. Sargent, “Analysis of thermal nondestructive testing”, 22(1):216, 2000.
4. Beate Oswald-Tranta, Paul O'Leary, “Fusion of geometric and thermographic data for automated defect detection”, April 2012, Journal of Electronic Imaging 21(2):1108.
5. S.E. Burrows, S. Dixon, Simon Gideon Pickering, Teng Li, D.P. Almond, “Thermographic detection of surface breaking defects using a scanning laser source”, November 2011, NDT & E International 44(7):589-596.
6. European Standart EN 16714-1 Non-destructive testing – Thermographic testing – Part 1: General principles.
7. Котельников В. В. Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук «Разработка методики теплового контроля и диагностики технического состояния металлоконструкций мостовых кранов». МГУ ім Н. С. Баумана. Москва, 2009. С. 35.
8. M. Belkacemi, C. Stolz, A. Mathieu, G. Lemaître, J. Massich, O. Aubreton, “Nondestructive testing based on scanning-from-heating approach: Application to nonthrough defect detection and fiber orientation assessment”, Journal of Electronic Imaging, 24(6):061112, 2015.
9. Патент України на корисну модель № 117575 від 26.06.2017.Спосіб безконтактної дефектоскопії металевих конструкцій. Колесніченко С.В., Шарабарін О.Г., Точонов І.В., Ковтун С.В., Мнацаканян К.Б., Путілін С.В., Попаденко А.О.
10. Патент України № 125968. Спосіб безконтактної дефектоскопії металевих конструкцій. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні

моделі 25.05.2018. // Кравець В.А., Колесніченко С.В., Точонов І.В., Мнацакян К.Б., Шарабарін О.Г., Гололобов Б.Д., Попаденко А.О.

References:

1. Thoft-Christensen, P. (2001). Risk Analysis in Civil Engineering. *Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering. Structural Reliability Theory*, No. 224, Vol. R0163. Pp. 24.
2. Eurocode 3: ENV 1993-1-1, Design of Steel Structures, Part 1.1: General rules and rules for the buildings. CEN, Brussels, 2005.
3. Killey, A., Sargent, J.P. (2000). "Analysis of thermal nondestructive testing", 22(1):216.
4. Beate Oswald-Tranta, Paul O'Leary, "Fusion of geometric and thermographic data for automated defect detection", April 2012, *Journal of Electronic Imaging* 21(2):1108.
5. Burrows, S.E., Dixon S., Pickering, Simon Gideon, Teng Li, Almond, D.P. (2011). "Thermographic detection of surface breaking defects using a scanning laser source", *NDT & E International* 44(7):589-596.
6. European Standard EN 16714-1 Non-destructive testing – Thermographic testing – Part 1: General principles.
7. Kotelnikov, V.V. (2009). *Razrabotka metody teplovoho kontrolya y dyagnostyky tekhnicheskoho sostoyaniya metallokonstruktsyy mostovykh kranov*. [Development of a technique of thermal control and diagnostics of a technical condition of a metalwork of bridge cranes]. Ph.D. Thesis: Bauman Moscow State University. Moscow.
8. Belkacemi, M., Stolz, C., Mathieu, A., Lemaître, G., Massich, J., Aubreton, O. (2015). "Nondestructive testing based on scanning-from-heating approach: Application to nonthrough defect detection and fiber orientation assessment", *Journal of Electronic Imaging*, 24(6):061112.
9. Kolesnichenko, S.V., Sharabarin, O.H., Tochonov, I.V., Kovtun, S.V., Mnatsakanyan, K.B., Putilin, S.V., Popadenko, A.O. (2017). Patent Ukrayiny na korynsnu model' No 117575. Sposib bezkontaktnoyi defektoskopiyi metalevykh konstruktsiy.
10. Kravets', V.A., Kolesnichenko, S.V., Tochonov, I.V., Mnatsakanyan, K.B., Sharabarin, O.H., Hololobov, B.D., Popadenko, A.O. (2018). Patent Ukrayiny No 125968. Sposib bezkontaktnoyi defektoskopiyi metalevykh konstruktsiy.

А.А. Попаденко, С.В. Колесниченко

Экспериментальное исследование термографическими контроля для выявления трещин в стальных конструкциях

В статье приведены результаты исследования возможности использования термографического неразрушающего контроля для поиска трещин в стальных конструкциях. Основой неразрушающего теплового контроля является регистрация изменений теплового поля, возникающего при возбуждении термодинамического равновесия объекта с окружающей средой, которое появляется на поверхности, и характер которого позволяет получить необходимую информацию. Метод теплового контроля базируется на взаимодействии теплового поля объекта с термодинамическими чувствительными элементами (термопара, фотоприемальник, жидкокристаллический элемент, болометр), превращающих параметры поля

(интенсивность, температурный градиент, контрастность, лучезарность) в электрический сигнал регистрирующего устройства. Описан эксперимент доказывающий возможность применения теплового неразрушающего контроля для выявления трещины в стальных конструкциях. В качестве измерительных приборов для проведения эксперимента использовались тепловизоры с различной разрешающей способностью матрицы ИК-изображения (термического изображения), инфракрасный термогигрометр, люксметр. Указанные проблемы, возникающие при использовании способа теплового неразрушающего контроля и возможные способы их решения. Авторы делают выводы о том, что способ термографического контроля может быть использован при обследовании стальных конструкций для качественной оценки наличия трещин.

Ключевые слова: *стальные конструкции, трещина, термография, инфракрасная камера, неразрушающий контроль.*

S. Kolesnichenko, A. Popadenko

Experimental research of thermographic control for detection of cracks in steel structures

The paper presents the results of experimental research of the possibility of using thermographic non-destructive testing for the search of cracks in steel structures. The basis of non-destructive thermal control is the registration of changes in the thermal field that occurs in the case of disturbance of the thermodynamic equilibrium of object with an environment that appears on the surface, and parameters of which allows to obtain the necessary information. The thermal control method is based on the interaction of the thermal field of object with thermodynamically sensitive elements (thermocouple, photodetector, liquid crystal element, bolometer) that convert the field parameters (intensity, temperature gradient, contrast, variability) into the electrical signal of the recording device. An experiment is described which proves the possibility of using thermal nondestructive testing for the detection of cracks in steel structures. As measuring instruments for the experiment were used thermal imagers with different resolution of the matrix of the IR image (thermal image), infrared thermohygrometer, luxmeter. The problems encountered during the use of thermal non-destructive testing and possible solutions are indicated. The authors conclude that the thermographic control method can be used in the examination of steel structures for the qualitative assessment of cracks.

Keywords: *steel structures, crack, thermography, infrared camera, non-destructive testing.*

Посилання на статтю

APA: Kolesnichenko, S. & Popadenko, A. (2020). Experience and scientific research to substantiate the performance of work in construction. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 45, 80-90.

ДСТУ: Попаденко А.О. Експериментальне дослідження термографічного контролю для виявлення тріщин у сталевих конструкціях [Текст] / А.О. Попаденко, С.В. Колесніченко // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. – 2020. – № 45. – С. 80-90.