ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОГРАФІЧНОГО СПОСОБУ КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТРІЩИН У СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Попаденко А.О., магістр,

popadenko@donnaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5615-7117

Колесніченко С.В., к.т.н., доцент

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

svk.mk15@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5087-8354

Анотація. У статті наведені результати дослідження можливості використання термографічного неруйнівного контролю для пошуку тріщин у сталевих конструкціях. Описано експеримент що доводить можливість застосування термографічного неруйнівного контролю для виявлення тріщини у сталевих конструкціях. У якості вимірювальних приладів для проведення експерименту використовувалися тепловізори із різною роздільною здатністю матриці ІЧ-зображення, інфрачервоний термогігрометр, люксметр. 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, вимірювальний, 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 із необхідністю виконання 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 останніх 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 напруг, 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, фотоприймач, 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 тепла 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 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 (болометрами) 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.

Основний матеріал. У якості вимірювальних приладів для проведення експерименту використовувалися тепловізори FLIR C2 із роздільною здатністю матриці ІЧ-зображення (термічного зображення) 80х60 пікселів та FLIR E8 із роздільною здатністю матриці ІЧ-зображення 320х240 пікселів, інфрачервоний термогігрометр, люксметр.

Задачі експериментальних досліджень включали:

1. Вивчення можливостей принципового застосування термографічного пособу 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 подолала 60-80%

товщини металу, розриви металу та корозійне пошкодження, 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)

б)

Рис. 3 Зразок № 1 а) схематичне зображення, б) фотографія зразку

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

а)

б)

Рис. 4 Зразок № 2 а) схематичне зображення, б) фотографія зразку

Зразок № 3 – Труба сталева, товщина 4 мм, діаметр 103 мм, імітація розриву з розкриттям 0,2-2,0 мм (рис. 5).

Рис. 5 Зразок № 3 а) схематичне зображення, б) фотографія зразку

Зразок № 4 – Балка сталева коробчастого перетину 80х80 мм, товщина стінки 3 мм, імітація розриву з розкриттям 0,3-1,0 мм (рис. 6).

Рис. 6 Зразок № 4 а) схематичне зображення, б) фотографія зразку

Зразок № 5 – Сталевий лист товщиною 5 мм, імітація тріщин що переходять у розриви з розкриттям до 1,5 мм (рис. 7).

Рис. 7 Зразок № 5 а) схематичне зображення, б) фотографія зразку

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 $\approx 373^0\text{K}$ ($\approx 100^0\text{C}$).
4. Сканування та запис термограм на інфрачервоні камери Flir C2 та Flir E8 при природному охолодженні зразків до температури $\approx 323^0\text{K}$ ($\approx 50^0\text{C}$).
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 випромінюванням, контактний нагрів.

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. 8 показано компіляцію цифрового та інфрачервоного зображення ділянки двотаврової сталевий балки товщиною 6мм, на інфрачервоному зображенні видно приховану тріщину, вона виглядає як різка зміна теплового поля.

Рис. 8 Компіляція цифрового та інфрачервоного зображення досліджуваного зразку №1.

На Рис. 9 показано фотографічне (а) та інфрачервоне (б) зображення зразка № 5, так само приховані тріщини виглядають як різкі зміни теплового поля.

Рис. 9 Зображення зразка № 5 (а фотографічне, (б інфрачервоне

На Рис. 10 зображено інфрачервоні зображення зразків 2, 3 і 4 на них видно що ділянки металу що розділені розривами різко відрізняються за поверхневою температурою.

Рис. 10. Інфрачервоні зображення зразків
а) зразок № 2, б) зразок № 3, в) зразок № 4.

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

- температура повітря навколишнього середовища;
- вологість повітря;
- ступінь блиску об'єкта, при високому ступені блиску досліджуваного об'єкта необхідно нанесення спеціального покриття, що володіє високим коефіцієнтом випромінювання;
- кут нахилу оптичної осі вимірювального приладу до поверхні досліджуваного об'єкта;
- природна освітленість об'єкта дослідження;
- наявність в полі зору тепловізора високотемпературних об'єктів.

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 тепловізора 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.

Значною мірою на якість термограм впливає ступінь блиску поверхні досліджуваного об'єкта, високий ступінь блиску не дозволяє отримати достовірні дані, для зниження ступеню блиску поверхню досліджуваного об'єкту необхідне нанесення спеціального покриття з високим коефіцієнтом випромінювання.

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.

Література

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. Є. 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., Мнацаканян 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. - p.24.
- [2] Eurocode 3: ENV 1993-1-1, Design of Steel Structures, Part 1.1: General rules and rules for 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] SE Burrows, S. Dixon, Simon Gideon Pickering, Teng Li, DP Almond, “Thermographic detection of surface breaking defects using a laser scanning 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. CEN, Brussels, 2016.

- [7] Kotelnikov V.V. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences "Development of the method of thermal control and diagnostics of the technical state of metal structures of bridge cranes". Bauman MSU. Moscow, 2009. P. 35.
- [8] M. Belkacemi, C. Stolz, A. Mathieu, G. Lemaître, J. Massich, and O. Aubreton, "Nondestructive testing based on a scanning-from-heating approach: Application to nonthrough defect detection and fiber orientation assessment", *Journal of Electronic Imaging*, 24 (6): 061112, 2015.
- [9] Kolesnichenko S.V., Sharabarin O.G., Tochonov I.V., Kovtun S.V., Mnatsakanyan K.B., Putilin S.V., Popadenko A.O. Patent of Ukraine No. 117575 from 06/26/2017. Method of contactless flaw detection of metal structures.
- [10] Kravets V.A., Kolesnichenko S.V., Tochonov I.V., Mnatsakanyan K.B., Sharabarin O.G., Gololobov B.D., Popadenko A.O. Patent of Ukraine No. 125968 from 05/25/2018. Method for non-contact defectoscopy of metal structures.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Попаденко А.А., магистр,
popadenko@donnaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5615-7117

Колесниченко С.В., к.т.н., доцент
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
svk.mk15@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5087-8354

Аннотация. 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 нарушении 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, фотоприёмник, жидкокристаллический элемент, болометр), которые преобразуют параметры поля (интенсивность, температурный градиент, контрастность, лучистость) в электрический сигнал регистрирующего устройства. В результате проведения эксперимента было подтверждено что термографический способ контроля может быть использован при обследовании стальных конструкций для качественной оценки скрытых дефектов и повреждений. В качестве измерительных приборов для проведения эксперимента использовались тепловизоры с различной разрешающей способностью матрицы ИК изображения, инфракрасный термогигрометр, люксметр. Во время проведения эксперимента не было выявлено принципиальной разницы применения тепловизоров с различными типами ИК матриц. При использовании более точного тепловизора Flir E8 термограмма имела более четкое определение температуры поверхности по сравнению с Flir C2. Эта особенность может пригодиться для количественного определения дефектов, к примеру, глубины и размеров трещины под слоем краски, но принципиально, для качественного обнаружения дефектов и повреждений, использование более точного оборудования не является обязательным условием. Указаны 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. В значительной степени на качество термограмм влияет степень блеска поверхности исследуемого объекта, высокая степень блеска не позволяет получить достоверные данные, для снижения степени блеска поверхность исследуемого объекта необходимо нанесение специального покрытия с высоким коэффициентом излучения.

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

THE POSSIBILITY OF THERMOGRAPHIC CONTROL METHOD APPLICATION FOR DETECTION OF CRACKS IN STEEL STRUCTURES

Popadenko A.O., Master,

popadenko@donnaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5615-7117

Kolesnichenko S.V., PhD., Associate Professor,

Donbas national academy of civil engineering and architecture

svk.mk15@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5087-8354

Abstract. The paper discusses a possibility of using thermographic non-destructive testing to search for cracks in steel structures. The basis of non-destructive thermal control is the registration of changes in the thermal field that occurs when the thermodynamic balance of the object with the environment is disturbed, which appears on the surface and whose nature allows to obtain the necessary information. The method of thermal control is based on the interaction of the thermal field of the object with thermodynamic sensitive elements (thermocouple, photodetector, liquid crystal element, bolometer), which convert the field parameters (intensity, temperature gradient, contrast, radiance) into electrical signal of the recording device. As a result of the experiment, it was confirmed that the thermographic control method can be used in the examination of steel structures for a qualitative assessment of latent defects and damage. As measuring instruments for the experiment, thermal cameras with different resolutions of the IR image sensor, infrared thermohygrometer, and luxmeter were used. During the experiment, there was no fundamental difference of the use thermal cameras with different types of IR matrices. When using a more accurate Flir E8 thermal camera, the thermogram had a clearer definition of surface temperature compared to Flir C2. This feature can be used for the quantitative determination of defects, for example, the depth and size of a crack under a paint layer, but fundamentally, for the qualitative detection of defects and damage, the use of more accurate equipment is not a prerequisite. The problems arising when using the method of thermal non-destructive testing and possible methods for solving them are indicated. The authors conclude that the method of thermographic control can be used in the examination of steel structures for a qualitative assessment of the presence of cracks. To a large extent, the quality of thermograms is influenced by gloss degree of the surface of studied object, a high gloss degree does not allow reliable data to be obtained, to reduce the gloss degree, the surface of the examined object requires the application of a special coating with a high emissivity.

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