

**V.B. Ihnatieva**

***Deformability and cracking of steel concrete beams, reinforced with reinforcement package with combined reinforcement***

*The article experimentally investigated the deformability and crack resistance of reinforced concrete structures with combined reinforcement, reinforced with bar reinforcement class A1000 and tape reinforcement class A240C. Based on the research, it was found that with combined reinforcement of steel concrete beams reinforced with A240C class reinforcement in combination with high-strength A1000 rod reinforcement, it is possible to reduce the reinforcement percentage, respectively, by 15–30%, due to the higher design resistance of high-strength reinforcement, while meeting the strength requirements, deformability and crack resistance. It was also established that the current regulatory document DBN V.2.6-98:2009 allows to estimate with sufficient accuracy the deformability of steel-concrete elements with mixed reinforcement, deviations from experimental data do not exceed 20,9%.*

**Keywords:** *steel beams, combined reinforcement, core reinforcement, tape reinforcement, deformability, crack resistance.*

УДК 536.6+624.014.2

**С.В. Колесніченко,**

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-5087-8354

**А.О. Попаденко,**

магістр

ORCID: 0000-0002-5615-7117

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

**ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОГРАФІЧНОГО СПОСОБУ КОНТРОЛЮ ДЛЯ  
ВИЯВЛЕННЯ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*У статті наведено теоретичне обґрунтування та приклади практичного використання термографічного способу контролю для виявлення тріщин та ділянок корозійного ураження сталевих конструкцій. Автори роблять висновки про те, що спосіб термографічного контролю може бути використаний під час обстеження сталевих конструкцій для якісного оцінювання наявності тріщин та ділянок корозійного ураження.*

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

**Вступ.** В останні роки питання забезпечення безпеки експлуатації сталевих конструкцій різко загострився через зношеність виробничого обладнання і конструкцій та збільшення кількості випадків технологічних аварій. Настання відмови та подальшого руйнування металоконструкцій пов'язано з багатьма факторами, але практично завжди обумовлено утворенням дефектів в елементах цих конструкцій.

Найбільш небезпечними недосконаlostями - дефектами та пошкодженнями сталевих конструкцій є тріщини, піттингові корозійні пошкодження та недосконаlostі зварних швів у вигляді непроварів та пропалень. Використання конструкцій із такими пошкодженнями неможливе у зв'язку із непрогнозованим їхнім розвитком і подальшим руйнуванням.

Відповідно до нормативної документації [1], під час проведення періодичного обстеження сталевих будівельних конструкцій, необхідно використовувати методи неруйнівного контролю: ультразвуковий, рентгенівський, візуальний, вимірювальний, магнітний, капілярний, тощо. Дані методи вирішують задачу виявлення і визначення характеристик дефектів, однак, як правило, вимагають досить трудомістких робіт і тривалих перерв у виробництві при проведенні контролю.

Тому, актуальною є задача розробки і впровадження методу оперативного неруйнівного контролю, який при достатньо низькій трудомісткості дозволить визначати наявні недосконалості із великим рівнем достовірності. Одним з перспективних методів неруйнівного контролю є термографічний спосіб.

#### **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, Німеччини, Франції, Фінляндії, Росії, а в останні роки Індії та Китаю. Серед зарубіжних вчених, чий дослідження внесли істотний внесок у розвиток активного ТК, необхідно відзначити Х. Maldague (Канада), D. Balageas (Франція), E. Cramer, D. Burleigh і S. Shepard (США), E. Grinzato, S. Marinetti і P. Bison (Італія), D. Almond (Великобританія), G. Busse (Німеччина), N. Avdelidis (Греція), W. Svviderski (Польща) та ін.

В СРСР 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. Будадіним, 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 [2]. Зокрема, у своїй роботі В. В. Котельников [3], 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.**

Не аналізуючи переваги існуючих методів неруйнівного контролю, можна вказати на їх одну загальну особливість – вони потребують достатньо якісної підготовленої поверхні та мають переважно локальне застосування, що врешті-решт вимагає додаткових ресурсів часу, обладнання, живлення, та у будь-якому разі унеможливує 100% достовірний результат.

Пошук ефективного та простого у використанні метода, який дозволив би знаходити тріщини та приховані корозійні пошкодження з великим відсотком імовірності та не потребував спеціальної трудомісткої підготовки поверхні є однією з задач, яка збільшить достовірність обстеження.

#### **Основний матеріал.**

Основою ТК [2, 4] 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 ТК 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 розподіляють пасивний, активний та комбіновані способи термографічного контролю: 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 тепла під час роботи та (або) експлуатації об'єкта. Це найбільш поширені методи, що використовуються під час енергетичного аудиту, контролю приборів, 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.

Найбільш поширеними приладами ТК є тепловізори, що наразі призвело до виникнення нового терміну «тепловізійний контроль». Прилад обладнаний 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 великого спеціального використання, тому що, як правило, контролюється значення температур поверхня об'єкта.

З практичної точки зору, під час обстеження сталевих конструкцій, необхідно перш за все визначити сам факт існування тріщини, недосконалостей зварного шва або ділянок корозійного ураження - вимірювання розмірів тріщини може бути не потрібне взагалі, тому що експлуатація конструкції з такими пошкодженнями не допускається за діючими нормами [5].

В цій роботі наведено результати використання способу термографічного контролю сталевих конструкцій із короткочасним локальним нагріванням поверхні об'єкту та запису термограм безконтактним методом за допомогою тепловізорів [6, 7].

У якості вимірювальних приладів 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.

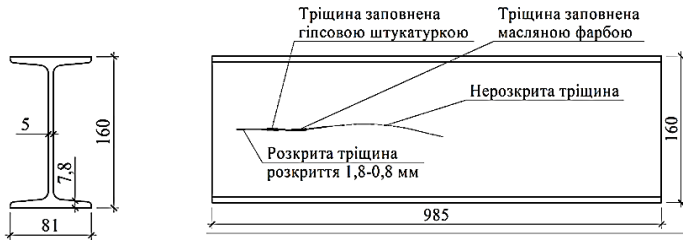
Задачі експериментальних досліджень включали:

1. Вивчення можливостей принципового застосування термографічного способу контролю для обстеження сталевих конструкцій. Пошук вирішення можливих проблем роботи із приладами. Переваги використання приладів із різними типами ІЧ матриць.
2. Розробка технології виконання робіт при проведенні контролю способом термографічного контролю з урахуванням реального стану конструкцій.
3. Розробка прикладів термограм для існуючих дефектів та пошкоджень сталевих конструкцій, які систематизовані у таблиці Додатку В ДБН [5].

Для виконання досліджень було підготовлені спеціальні зразки із імітацією різних недосконалостей. В процесі досліджень зразки мали різний тип покриття: оригінальний без фарбування, фарбування олійною фарбою.

Опис зразків, що були досліджені:

Зразок № 1 – балка сталева двотаврова №16, імітація тріщини розкритої (розкриття 0,8-1,8 мм), тріщини нерозкритої, розкритої тріщини що заповнена фарбою та гіпсовою штукатуркою, ділянки уражені корозією (рис. 1).



а) Схематичне зображення зразка 1



б) Загальний вигляд зразка № 1

Рис. 1. Зразок 1

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

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

Зразок № 4 – Балка сталева коробчастого перетину 80x80 мм, товщина стінки 3 мм, імітація тріщини із розкриттям 0,3-1,0 мм (рис. 4).

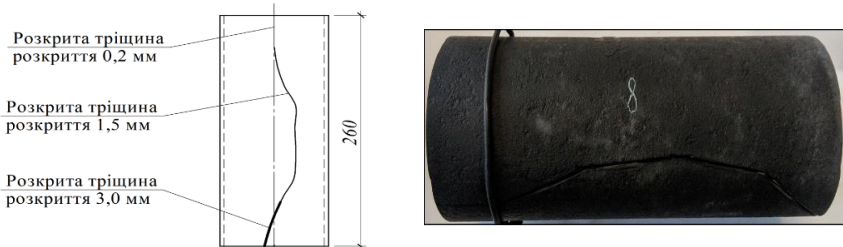


Рис. 2. Схематичне зображення та загальний вигляд зразка № 2



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

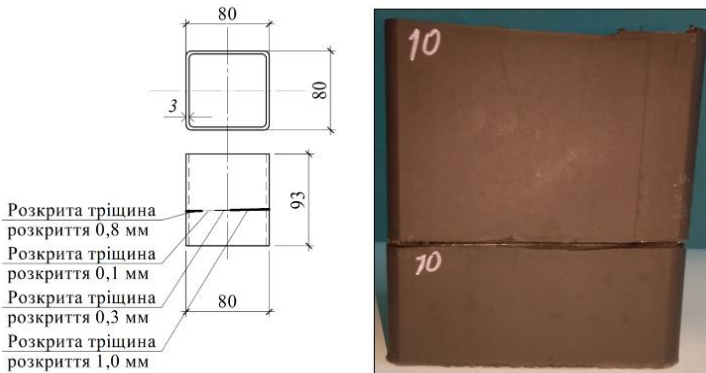


Рис. 4. Схематичне зображення та загальний вигляд зразка № 4

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, освітленість).
3. Нагрів зразків до температури  $\approx 373^{\circ}\text{K}$  ( $\approx 100^{\circ}\text{C}$ ). Спочатку нагрівання відбувалося за допомогою газової горілки. Але, для умов реального обстеження, цей процес небезпечний та незручний. Тому, нагрів відбувався технічним (будівельним) феном.
4. Сканування та запис термограм на інфрачервоні камери Flir C2 та Flir E8 при природному охолодженні зразків до температури  $\approx 187^{\circ}\text{K}$  ( $\approx 50^{\circ}\text{C}$ ).
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.

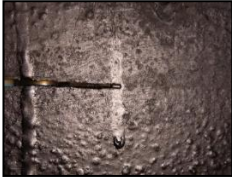
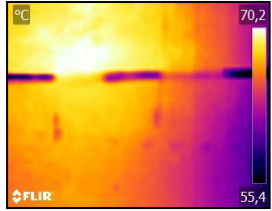
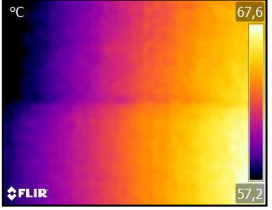

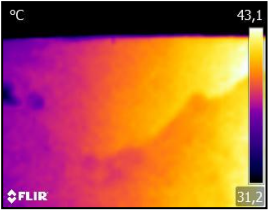

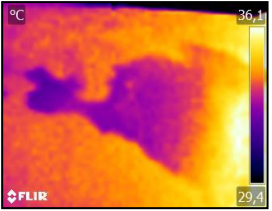
Під час проведення експерименту не було знайдено принципової різниці застосування тепловізорів із різними типами ІЧ матриць. Для більш точного Flir E8 термограма мала чіткіше визначення температури поверхні, порівняно із Flir C2. Ця особливість може стати у нагоді для кількісного визначення недосконалості – наприклад, глибини корозійного пошкодження та розмірів тріщини під шаром фарби,

але принципово, для якісного знаходження дефектів та пошкоджень, використання більш потужного обладнання не є обов'язковою умовою.


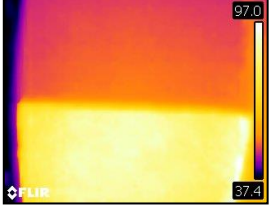

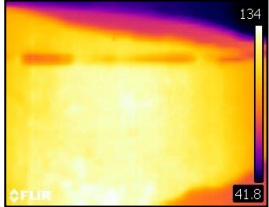

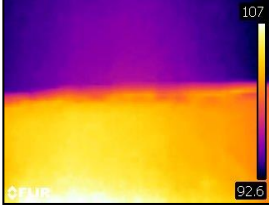
За результатами досліджень у таблиці 1 надані термограми дефектів та пошкоджень у відповідності до Додатку В ДСТУ Б В.2.6-210:2016 [5].

Таблиця 1

Термограми дефектів та пошкоджень згідно з ДСТУ [5]

№ зразка	Опис дефекту та номер	Категорія дефекту	Фото дефекту	Термограма
1	2.1 Тріщина в основному металі елемента конструкції	A		 
	11.2 Загальна нерівномірність корозія	B		
	11.3 Місцева корозія (корозія плямами)	B		

Закінчення табл. 1

№ зразка	Опис дефекту та номер	Категорія дефекту	Фото дефекту	Термограма
2	2.1 Тріщина в основному металі елемента конструкції	A		
3	2.1 Тріщина в основному металі елемента конструкції	A		
4	2.1 Тріщина в основному металі елемента конструкції	A		

**Висновки.** За результатами вимірів можливо зробити наступні висновки:

1. Термографічний спосіб контролю безумовно може бути використаний під час обстеження сталевих конструкцій для якісного оцінювання наявності прихованих дефектів та пошкоджень – тріщини, корозії. Це значно збільшує імовірність знаходження місць розташування небезпечних ділянок та підвищує якість результатів.

2. Метод не потребує високоточного обладнання. Можливе використання тепловізорів із розрішенням інфрачервоного детектора на рівні 80×60 пікселів. Збільшення розширення матриці до рівня 320×240 пікселів може дозволити виконувати кількісний аналіз дефектів та пошкоджень, але це потребує додаткових експериментальних досліджень.

3. Персонал, який буде працювати із тепловізорами, повинен пройти спеціальну підготовку для роботи із обладнанням, програмними засобами та визначення ДП за результатами зйомки.

### Список літератури:

1. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 «Настанова щодо обстежень будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану». ДП «УкрНДНЦ». Київ. 2017. С. 10.
2. ГОСТ 23483–79. Контроль неразрушающий. Методы теплового контроля. Общие требования. Государственный комитет СССР по стандартизации. С. 8.
3. 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.
4. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Государственный комитет СССР по стандартизации. 40 с.
5. ДСТУ Б В.2.6–210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються [Текст] – Київ: 2016. – 80 с.
6. 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.
7. 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.

***С.В.Колесніченко, А.А. Попаденко***

#### ***Использование термографического способа контроля для выявления несовершенств стальных конструкций***

*В статье приведено теоретическое обоснование и примеры практического использования термографического способа контроля для выявления трещин и участков коррозионного поражения стальных конструкций. Авторы делают выводы о том, что способ термографического контроля может быть использован при обследовании стальных конструкций для качественной оценки наличия трещин и участков коррозионного поражения.*

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

***S. Kolesnichenko, A. Popadenko***

#### ***Thermographic inspection method application for the detection of imperfections for steel structures***

*The article provides the theoretical basis and practical examples of thermographic inspection method for detection of cracks and corrosion damage of steel structures. The authors conclude that thermographic inspection method can be used for inspection of steel structures for the qualitative assessment of the presence of cracks and areas of corrosion damages.*

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