

## MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TERMOGRAFII W PODCZERWIENI DO DIAGNOSTYKI OBIEKTÓW MOSTOWYCH<sup>1</sup>

Krzysztof ZIOPAJA\*, Leszek RÓŻAŃSKI\*\*

\* Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej

\*\* Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej

W artykule przeprowadzono analizę możliwości zastosowania termografii w podczerwieni jako narzędzia wspomagającego badania diagnostyczne elementów konstrukcyjnych oraz elementów wyposażenia obiektów mostowych. Istotą termografii w podczerwieni jest pomiar promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez powierzchnię danego ciała, który przetwarzany jest w mapę termalną przedstawiającą rozkład temperatury (termogram). Moc promieniowania ciała zależy od jego temperatury, zaś przepływ ciepła zależy od przewodności, pojemności cieplnej i dyfuzyjności danego materiału. Wszelkie anomalie rozkładu temperatury, rejestrowane na powierzchni ciała przez kamerę, mogą być powiązane ze znajdującymi się pod powierzchnią defektami. Najczęściej są to wtrącenia materiałów o innych właściwościach przewodzenia ciepła, wewnętrzne pustki, delaminacje warstw lub inne nieciągłości struktury badanego ciała. Stąd termografię w podczerwieni stosuje się do wykrywania wad materiałowych, pustek wewnętrznych, mostków termicznych, rozwarstwień materiału (np. kompozytów) czy różnic właściwości powierzchni (spowodowanej np. zawilgoceniem lub zmienną grubością powłok ochronnych).

Słowa kluczowe: termografia w podczerwieni, nieniszczące metody badań diagnostycznych, przeglądy mostów, wykrywanie uszkodzeń.

### 1. WSTĘP

Standardowe procedury przeprowadzania przeglądu mostu, czyli oceny jego stanu technicznego i przydatności do użytkowania, polegają na wizualnej ocenie wykonywanej przez inspektora mostowego. W zależności od jego doświadczenia zawodowego formułowana jest arbitralnie ostateczna ocena. Proces ten jest sformalizowany w celu uproszczenia i skrócenia inspekcji obiektu, a przez to nie zawsze w pełni obiektywny. Dla typowych obiektów mostowych, nieposiadających wad konstrukcyjnych i będących systematycznie właściwie, utrzymywa-

---

<sup>1</sup> DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.24.28

nych przeglądy – bieżący oraz podstawowy są zadowalającym sposobem ich oceny. Ze względu na fakt, że duża część obiektów mostowych w Polsce jest eksploatowana od wielu lat, a ich stan techniczny jest niezadawalający, istnieje potrzeba wdrażania nowych technik pomiarowych, które mogłyby usprawnić i ułatwić procesy decyzyjne w odniesieniu do przeglądów mostów.

Według informacji zawartych w raportach [5,7,8] wykonanych przez ośrodki akademickie na zlecenie rządowych organów administracji drogowej w stanach Missouri i Washington widać, że prace nad wdrożeniem m.in. termografii w podczerwieni do inspekcji mostów są dość zaawansowane. W powyższych raportach przedstawiono istotną rolę wstępnych badań laboratoryjnych, które służą do jakościowej oceny zjawisk przepływu ciepła, sposobu realizacji wymuszeń termicznych oraz sposobu prowadzenia pomiarów z uwzględnieniem zróżnicowanych czynników zewnętrznych. Podkreśla się jednocześnie potrzebę właściwego przeszkolenia użytkowników, którzy muszą posiadać odpowiednią wiedzę niezbędną do interpretacji wyników pomiarów.

W publikacji [10] opisano wyniki analiz ewentualnego zastosowania 12 bezkontaktowych technik (metod) pomiarowych traktowanych, jako narzędzie wspomagające ocenę wybranych elementów mostów, w tym m.in. termografię w podczerwieni. Analizowano takie aspekty poszczególnych metod jak dokładność pomiaru, możliwość zastosowania w warunkach polowych, koszt samych urządzeń pomiarowych, łatwość interpretacji oraz użyteczność wyników pomiarów.

Na przestrzeni ostatnich 20 lat rola termografii w podczerwieni, jako jednej z wielu metod badań nieniszczących, została ugruntowana i ze względu na szerokie spektrum zastosowań (poczynając od aplikacji medycznych, wojskowych, po zastosowania w różnych gałęziach przemysłu do kontroli procesów technologicznych a kończąc na diagnostyce technicznej) stała się jednym z bardziej powszechnych narzędzi. Jednym z pierwszych opisanych zastosowań termografii w odniesieniu do mostów można znaleźć w artykule [2], gdzie za pomocą kamery termowizyjnej przeprowadzono analizę stanu zawilgocenia powierzchni jednoprzęsłowego łukowego mostu kamiennego. Za sprawą coraz lepszych parametrów technicznych (rozdzielczości geometrycznej i czułości termicznej, a także poręczności) współczesna aparatura termowizyjna jest również stosowana do badań stanu technicznego elementów nośnych mostu. Takim przykładem zastosowania termografii w kontekście globalnej analizy stanu ceglano-łukowego z I poł. XIX w. zlokalizowanego w Wenecji jest praca [1]. W artykule tym przedstawiono wyniki badań z przeglądu mostu wykonanego za pomocą trzech technik in-situ: georadarowej, termograficznej i wzbudzenia dynamicznego, rozszerzone i uzupełnione o analizę numeryczną. Zaawansowane badania laboratoryjne polegające na wykrywaniu uszkodzeń w spoinach pachwinowych połączeń elementów pomostu ortotropowego opisano w [3]. Połączenie dwóch metod nieniszczących (impact-echo i IRT) do analizy różnych, „sztucznych” uszkodzeń pełnoskalowego fragmentu pomostu żelbetowego przedstawiono w [4].

Specyfiką mostów jest ich złożona, przestrzenna, wieloelementowa budowa nierzadko utworzona z różnych materiałów (o różnym współczynniku przewodzenia czy o różnej emisyjności powierzchni). Most to układ elementów konstrukcyjnych (dźwigarów oraz pomostu), stężeń (elementów usztywniających i zabezpieczających przed utratą stateczności) oraz elementów wyposażenia (np. nawierzchni bitumicznej jezdni czy nawierzchni z żywic syntetycznych na chodnikach). W tym kontekście będą prowadzone badania optymalnego zastosowania własnej aparatury pomiarowej oraz narzędzi obróbki sygnału do wykrywania określonego rodzaju defektów.

Niniejszy artykuł jest kontynuacją i rozszerzeniem badań przeprowadzonych przez autorów [6] i ma na celu wyznaczenie przydatności i ograniczeń wykrywania uszkodzeń w mostach przy zastosowaniu pasywnej i aktywnej termografii w podczerwieni oraz różnych technik obróbki cyfrowej sygnału.

## 2. PODSTAWY TERMOGRAFII W PODCZERWIENI

Termografia w podczerwieni (IRT<sup>2</sup>) jest metodą diagnostyczną stosowaną z powodzeniem od wielu lat w budownictwie<sup>3</sup> do wykrywania nieciągłości hydroizolacji dachów, warstw ocieplenia ścian czy mostków termicznych w budynkach. Metody badań nieniszczących NDT (akronim od ang. *Non Destructive Testing*), ze względu na swe zalety m.in. nieinwazyjność i globalność, są nieustannie rozwijane a ich aplikacyjność znajduje coraz to nowe pola zastosowań. Dotyczy to także aparatury pomiarowej, której parametry techniczne są stale udoskonalane (szczególnie w obszarach związanych ze zwiększeniem częstotliwości zapisu i przetwarzania obrazów termalnych).

W budownictwie kubaturowym metoda ta powszechnie wykorzystywana jest do: oceny izolacji cieplnej budynków, wykrywania mostków termicznych oraz wyznaczania współczynnika przenikania ciepła i rezystancji przegród budowlanych. W ostatnich latach można zaobserwować intensywny rozwój IRT, głównie w obszarze badań naukowych, jako narzędzia służącego do wykrywania bardzo małych defektów. W tym podejściu w celu wykrycia anomalii rozkładu temperatury pobudza się badany obiekt stosując źródła energii w postaci emiterów radiacyjnych takich jak lampy halogenowe i błyskowe (typu *flash*), promienniki laserowe, emiterów fal akustycznych lub mikrofalowych, czy generatorów prądów wirowych. Moc, spektrum i czas dostarczania energii cieplnej jest z reguły w pełni kontrolowane i dostosowane do rodzaju i charakteru badanego obiektu. Najczęściej stosowanymi technikami badań nieniszczących są: termografia synchroniczna<sup>4</sup> (z pobudzeniem periodycznym), termografia impulsowa (o ultra-

<sup>2</sup> IRT – Infrared thermography (przy. aut.).

<sup>3</sup> PN-EN 13187:2001 Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni.

<sup>4</sup> ang. *lock-in thermography* (przy. aut.)

krótkim lub długim pobudzeniu impulsowym) oraz termografia z pobudzeniem skokowym. Przykładem wdrożenia zaawansowanych technik diagnostycznych do przemysłu jest mobilny system termograficzny (złożony z kamery, zestawu lamp oraz oprogramowania) używany do szybkiej inspekcji kompozytowego poszycia samolotów stosowany przez francuską firmę Airbus.

Do niewątpliwych zalet termografii w podczerwieni należy szybkie tempo przeprowadzanych testów, brak kontaktu z obiektem oraz bezpieczna forma badań (zależy od stosowanych źródeł ciepła). Do innych zalet zaliczamy możliwość rejestracji i archiwizacji wyników w formacie cyfrowym, gotowym do dalszej obróbki.

Do słabych stron termowizji zaliczamy między innymi trudności z wywołaniem równomiernego nagrzania dużych powierzchni w krótkim przedziale czasu, efekty związane z niekontrolowaną utratą ciepła zakłócające kontrast termiczny (powodowane przez konwekcję, radiację czy przewodzenie), a także koszty sprzętu i oprogramowania. Pojawiają się również ograniczenia związane z wykrywaniem termicznych anomalii podpowierzchniowych tylko do pewnej głębokości (termowizja dotyczy zjawisk brzegowych) oraz problemy z jednorodnością emisyjności obserwowanych powierzchni. Należy też wymienić ujemny wpływ warunków pogodowych, takich jak wiatr, deszcz czy choćby promieniowanie słoneczne.

## 2.1. Podstawy fizyczne teorii promieniowania

Z uwagi na ograniczenie objętości w niniejszym referacie zostaną przytoczone jedynie elementarne prawa i definicje. Najnowszą polską monografią w tym zakresie jest [9]. Zgodnie z układem SI oraz Polską Normą<sup>5</sup> podstawową wielkością w termometrii radiacyjnej jest strumień energetyczny  $\Phi$  [W], który określa całkowitą moc przenoszoną przez promieniowanie w przestrzeni.

Do opisu źródła promieniowania służy pojęcie egzytancji energetycznej  $M_e$ , która definiuje jaka moc promieniowania elektromagnetycznego jest emitowana przez jednostkową powierzchnię ciała do półprzestrzeni:

$$M_e = \frac{d\Phi}{dS} \left[ W/m^2 \right]. \quad (2.1)$$

Jeżeli chcemy opisać promieniowanie padające na powierzchnię  $dS$  wówczas używamy pojęcia natężenia promieniowania  $E$ :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \left[ W/m^2 \right]. \quad (2.2)$$

Do opisu zjawiska promieniowania służy prawo Plancka, który w 1900 roku ilościowo opisał widmowy charakter promieniowania elektromagnetycznego,

---

<sup>5</sup> PN-90/E-01005 Technika świetlna. Terminologia.

czyli gęstość widmową egzytancji (2.3) ciała doskonale czarnego jako funkcję temperatury i długości fali:

$$M_{e,\lambda,c} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \left[ W/m^3 \right], \quad (2.3)$$

gdzie:  $h=6,6260755 \cdot 10^{-34}$  [J·s] – stała Plancka,  $c=299\,792\,458 \pm 1,2$  [m/s] - prędkość światła w próżni,  $k=1,3806 \cdot 10^{-23}$  [J/K] - stała Boltzmanna,  $T$  [K] - temperatura ciała doskonale czarnego,  $\lambda$  - oznacza długość fali [ $\mu\text{m}$ ].

Oczywiście ciało doskonale czarne, poza modelem fizycznym używanym w laboratorium, w przyrodzie nie występuje. Dla ciał rzeczywistych, zgodnie z zasadą zachowania energii, moc promieniowania padająca na pewną powierzchnię zostaje częściowo odbita, pochłonięta i przepuszczona. Jeżeli określimy stosunki poszczególnych mocy do całkowitej mocy padającej na powierzchnię to otrzymamy współczynniki znane jako: wsp. odbicia  $\rho$  (refleksyjności), wsp. pochłaniania  $\alpha$  (absorpcji) oraz wsp. przepuszczania  $\tau$  (transmisji). Stan ten nosi nazwę prawa Kirchoffa:

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad (2.4)$$

W przypadku ciała doskonale czarnego, w określonych warunkach, zachodzi równowaga pomiędzy mocą promieniowania  $M_p$  (padającego), które zostaje w 100% przez ciało czarne pochłonięte, a wyemitowaną przez to ciało egzytancją energetyczną  $M_e$ . Stąd dla ciał rzeczywistych, nieprzezroczystych niezwykle ważną kwestią jest znajomość współczynnika emisyjności:

$$\varepsilon = \frac{M_e}{M_p}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1,0. \quad (2.5)$$

Powierzchnia np. betonu pokryta sadzą charakteryzuje się współczynnikiem emisyjności zbliżonym do jedności, natomiast wypolerowana powierzchnia płytki stalowej ma wsp.  $\varepsilon = 0,1$ .

## 2.2. Rodzaje kamer termowizyjnych

Reasumując, w odniesieniu do podanych powyżej podstaw, wiadomym jest, że każde ciało w temperaturze powyżej 0K emituje promieniowanie o energii zależnej od wartości temperatury i długości fali. Najmniejszą porcją energii świetlnej jest foton, którego energia jest proporcjonalna do częstotliwości fali elektromagnetycznej. Kamera na podczerwień, dzięki konstrukcji detektora podczerwieni, potrafi przetworzyć energię padających fotonów promieniowania podczerwonego na sygnał elektryczny, którego wartość zależy od temperatury

badanego obiektu. Zainteresowanych budową i działaniem detektorów odsyłam do monografii [9]. Nadmienię, że podstawowymi detektorami stosowanymi we współczesnych kamerach termowizyjnych są detektory bolometryczne oraz detektory fotonowe.

W zależności od rodzaju i właściwości badanego obiektu, rodzaju i spodziewanego położenia (głębokości) defektu a także od rodzaju i mocy używanych źródeł pobudzenia termicznego stosowane są zasadniczo dwa typy kamer: bolometryczne lub fotonowe. Charakteryzują się one bardzo podobną rozdzielczością geometryczną – wynoszącą, w przypadku najlepszych kamer, do 1024x760 pikseli dla kamer bolometrycznych (np. kamera FLIR T1030sc) oraz 1280x1024 pikseli dla kamer fotonowych (np. kamera FLIR X8000sc).

Do badań naukowych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych predysponowane są kamery średnioletkowe MW<sup>6</sup> (akronim z ang. *Medium Wavelength*) z detektorami wykonanymi z antymonku indu (InSb), które są chłodzone do temperatury ciekłego azotu 77K. Pozwala to osiągnąć doskonałą rozdzielczość termiczną rozumianą w sensie NEDT (akronim od ang. *Noise Equivalent Temperature Difference*) na poziomie  $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ . Kamery z detektorami niechłodzonymi są kilkukrotnie tańsze od chłodzonych a ich zakres spektralny wynosi  $8\div 12\mu\text{m}$  (są to kamery długofalowe LW – *Long Wavelength*). Detektory bolometryczne wykonane są w postaci matryc detektorów punktowych (matryc pikseli detekcyjnych), które w literaturze anglojęzycznej opisuje się akronimem FPA (od *Focal Plane Array*). Kamery termograficzne z takimi detektorami mogą osiągać rozdzielczości termiczne na poziomie  $50\div 100\text{ mK}$  ( $0,05\div 0,1^{\circ}\text{C}$ ). Mimo gorszej rozdzielczości termicznej kamery bolometryczne są dużo bardziej poręczniejsze i można je stosować w dowolnych warunkach terenowych.

O ile rozdzielczość termiczna, czyli zdolność do rozróżniania najmniejszych różnic temperatury jest na poziomie zaledwie kilkudziesięciu mK, o tyle dokładność pomiaru temperatury dla kamer MW z detektorami InSb wynosi  $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$  lub  $\pm 1\%$  mierzonej temperatury. Natomiast, w przypadku zdecydowanej większości kamer LW, rozdzielczość ta jest gorsza i wynosi  $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$  lub  $\pm 2\%$  mierzonej temperatury. Uważa się, że poziom dokładności pomiaru  $\pm 1,0\div 2,0\%$  jest możliwy do osiągnięcia tylko w dość wyidealizowanych warunkach.

Jeszcze jedną istotną cechą jest częstotliwość rejestracji temperatury. Ze względu na dyfuzyjność (prędkość rozchodzenia się fali ciepła) zmiany rozkładu temperatury powodowane przez defekt mogą być niezauważone przez zbyt „wolny” system pomiarowy. Współczesne kamery bolometryczne pozwalają rejestrować obrazy termalne z częstotliwością  $30\div 50\text{ Hz}$ , natomiast kamery typu MW z detektorami InSb od 100 do 300 Hz, a w trybie okienkowania nawet do kilku tysięcy obrazów na sekundę (okienko ma rozmiar np. 132x8 pikseli).

---

<sup>6</sup> pasmo promieniowania o długości fali w zakresie  $3\div 5\mu\text{m}$ .

### 2.3. Wybrane techniki badawcze

Podstawowy podział termograficznych technik pomiarowych wyróżnia dwa typy termografii: pasywną i aktywną. Termografia pasywna polega na pomiarze promieniowania podczerwonego emitowanego przez badane ciało bez jakiegokolwiek ingerencji w procesy wymiany ciepła we wnętrzu i w otoczeniu ciała. Zastosowanie znajduje głównie w badaniu obiektów budowlanych, w nadzorowaniu procesów technologicznych i wyrobów, w określaniu właściwości materiałów, w medycynie. Rejestrowane przez system diagnostyczny różnice w rozkładzie temperatury odbiegające od przyjętej normy są traktowane jako alarmujący sygnał i wspomagają z kolei system decyzyjny.

W odróżnieniu od termografii pasywnej, w termografii aktywnej, wymagane jest użycie zewnętrznego pobudzenia cieplnego, które poprzez procesy wymiany ciepła (przewodzenie, konwekcję lub promieniowanie) wywoła propagację fali cieplnej we wnętrzu jak i na powierzchni badanego obiektu. Odkrywcą fal termicznych rozchodzących się wewnątrz materiału pod wpływem stymulacji cieplnej był *J. Fourier*. Wiadomym jest, że podpowierzchniowe defekty spowodują zaburzenia w propagacji fal cieplnych (na skutek ich odbicia), co może wywołać widoczne zmiany rozkładu pola temperatury na powierzchni obiektu.

#### Termografia pulsacyjna (ang. *pulsed thermography*)

Metoda ta polega na krótkim podgrzaniu próbki i na rejestracji rozkładu pola temperatury podczas procesu stygnięcia. Impuls cieplny dostarcza tyle energii, aby wywołać oczekiwaną propagację frontu fali ciepła w badanej próbce. Temperatura powierzchni próbki gwałtownie się zmienia na skutek dyfuzji<sup>7</sup> pod powierzchnią jak i przez straty ciepła związane z promieniowaniem i konwekcją. Obecność defektu wpływa na tempo dyfuzji co rejestrowane jest przez kamerę termograficzną na powierzchni jako pole o innej temperaturze. Oznacza to, że głębsze lub mniejsze defekty będą zaobserwowane później i ze zredukowanym kontrastem. Dla materiału izotropowego i homogenicznego są określone przybliżone formuły:

$$t \sim \frac{z}{\alpha} \quad \text{i} \quad c \sim \frac{1}{z^3}, \quad (2.6)$$

gdzie:  $t$  to czas,  $z$  to głębokość położenia defektu,  $c$  to kontrast termiczny, a  $\alpha$  to dyfuzyjność cieplna.

Z wzoru (2.6) wynika, że wykrywanie uszkodzeń ze względu na słaby kontrast ogranicza się tylko do defektów leżących w niewielkiej odległości od powierzchni. Wykazano, że okrągły defekt o promieniu  $R$ , znajdujący się np. 2,0 mm pod powierzchnią, będzie wykrywalny wówczas, gdy jego promień będzie wynosił  $2,0 \div 4,0$  mm. Według najnowszych doniesień literaturowych w elemen-

<sup>7</sup> Dyfuzja (dyfuzyjność cieplna)  $\alpha = \sqrt{\lambda/\omega \cdot c}$ ,  $\omega$  – częstotliwość fali impulsu cieplnego.

tach betonowych wykrywa się defekty (odpowiednio duże) znajdujące się nawet 10 cm pod powierzchnią pomiarową.

Odmianą tej metody jest rejestracja zjawisk cieplnych w czasie stygnięcia próbki (np. w procesach technologicznych), gdy temperatura obiektu jest wyższa od temperatury otoczenia. Znajomość ewolucji w czasie kontrastu termicznego pozwala odnaleźć takie parametry defektu jak głębokość, średnica czy opór termiczny. Zagadnienie to ma „bliski związek” z modelowaniem procesów odwrotnych przepływu ciepła. Kontrast termiczny wyznacza się w następujący sposób:

$$C(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)}, \quad (2.7)$$

gdzie  $T_{def}$  to wartość temperatury rejestrowana bezpośrednio nad defektem, z kolei  $T_s$  to wartość temperatury rejestrowana poza obszarem defektu. Czas  $t_0$  opisuje chwilę czasową pomiaru temperatury wcześniejszą niż czas  $t$ .

#### **Długie, stopniowane nagrzewanie** (ang. *step heating – long pulse*)

Inaczej niż w termografii pulsacyjnej w tej metodzie pomiar zmian przyrostów temperatury powierzchni obiektu przebiega podczas procesu nagrzewania. Czas oddziaływania wymuszenia cieplnego jest znacznie dłuższy a jego intensywność nie zmienia się podczas doświadczenia. Metodę tą stosuje się do badania struktur wielowarstwowych lub powierzchni pokrytych cienkimi powłokami<sup>8</sup>.

#### **Termografia modulatoryjna** (ang. *lock-in thermography*) zwana także termografią synchroniczną

W tej metodzie próbka poddawana jest pobudzeniu cieplnemu, którego charakter ma postać periodycznej fali sinusoidalnej o danej częstotliwości trwającej dowolny okres czasu. Oznacza to, że w próbce w obszarze bezpośrednio pod powierzchnią generowane są fale cieplne mające również postać sinusoidalną. W porównaniu z termografią pulsacyjną wyróżnia się dwie odmienne cechy tych metod. Pierwsza to fakt, że obserwacja temperatury przebiega zarówno w fazie stacjonarnej jak i periodycznej. W nagrzewaniu modulatoryjnym pozwala to zredukować wpływ szumu w analizowanym sygnale. Drugą zaletą tej metody jest możliwość wyznaczenia części amplitudowej i fazowej pola temperatury. Jeżeli termogram jest obrazem zapisu emitowanej przez powierzchnię energii elektromagnetycznej, to część fazowa tego obrazu (ang. *phase image*) związana jest z propagacją fali termicznej w funkcji czasu, a część amplitudowa obrazu (ang. *magnitude image*) związana jest z dyfuzyjnością cieplną. Jeżeli dla danego piksela znamy wartości temperatury dla jednego pełnego cyklu oświetlenia, okre-

<sup>8</sup> Spicer J.W.M. et al., Time-resolved infrared radiometry (TRIR) of multilayer organic coating using surface and subsurface heating, in Thermosense XIII, Proc. SPIE, G.S. Baird ed., 1467: 311-321, 1991.



ślone np. w czterech punktach fali cieplnej, obliczenie części fazowej  $\varphi(x_1)$  i amplitudowej  $A(x_1)$  wykonujemy według poniższych formuł<sup>9</sup>:

$$\varphi(x_1) = \arctan \left[ \frac{S_1(x_1) - S_3(x_1)}{S_2(x_1) - S_4(x_1)} \right] \quad (2.8)$$

oraz

$$A(x_1) = \sqrt{[S_1(x_1) - S_3(x_1)]^2 + [S_2(x_1) - S_4(x_1)]^2} \quad (2.9)$$

Procedurę powtarza się dla każdego piksela obrazu. Najistotniejsze jest jednak to, że mamy możliwość sterowania częstotliwością pobudzenia cieplnego oraz to, że możemy z bardzo wielu termogramów rejestrowanych podczas trwania jednego impulsu uśredniać pomierzone wielkości. Sterownie modulacją impulsu daje możliwość penetrowania falą cieplną do określonej głębokości. Wówczas głębokość położenia defektu pod powierzchnią można z grubsza określić ze wzoru na długość dyfuzyjną fali cieplnej  $\mu$ :

$$\mu = \sqrt{2\lambda / \omega \rho c} \quad , \quad (2.10)$$

gdzie:  $\lambda$  [W/(K·m)] to przewodność cieplna,  $\omega$  [Hz] to częstotliwość modulowanego impulsu,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] to masa objętościowa a symbol  $c$  [J/(kg·K)] oznacza ciepło właściwe. Z powyższej zależności wynika, że dla wysokich częstotliwości impulsu fale cieplne penetrują obszary leżące blisko powierzchni próbki, a dla niższych obszary leżące głębiej. Część fazowa termogramu jest w wielu przypadkach bardziej użyteczna w celach lokalizacji defektów, bo jest funkcją dyfuzyjności cieplnej, której zmiany czy wahania są skutkiem ukrytych defektów. Z drugiej strony część fazowa jest użyteczna gdyż nie jest wrażliwa na wpływy nierównomiernego nagrzewania czy wpływy niejednorodności współczynnika emisyjności powierzchni. Jest to konsekwencją zastosowania procedury ekstrakcji. Inną kwestią jest to, że poprzez możliwość sterowania częstotliwością pobudzenia podnosimy efektywność wykrywania ukrytych defektów. Należy nadmienić, że ta metoda wymaga używania specjalistycznej, przeważnie drogiej, aparatury.

### Wibrotermografia<sup>10,11</sup>

Przyjmijmy, że dowolną konstrukcję poddamy tym razem obciążeniu mechanicznemu, cyklicznemu o zmiennej częstotliwości i o niedużej amplitudzie.

<sup>9</sup> D. Wu, G. Busse, Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials, Rev. Gen. Therm., 37, 693-703, 1998.

<sup>10</sup> Rantala J., Wu D., Busse G., *Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites*, in Research in NDE, 7, 215-228, 1996.

<sup>11</sup> Salerno A., Wu D., Busse G., Rantala J., *Thermographic inspection with ultrasonic excitation*, in Proc. of Rev. Progresses in Quantitative NDE, D.O. Thompson, D.E. Chimenti eds., NY: Plenum Press, 16A, 345-352, 1996.

Podczas obciążania powstaje energia sprężysta. W przypadku występowania zamkniętych rys lub delaminacji nastąpi, na skutek tarcia, dysypacja tej energii w postaci wydzielonego ciepła. Poprzez modulację częstotliwością mechanicznego wymuszenia można identyfikować obszary występowania największych gradientów temperatury, które wskazują miejsca gdzie dochodzi do dysypacji energii. Dla niewielkich próbek pomiarowych skutecznymi źródłami wymuszeń mechanicznych są wzbudniki ultrasoniczne.

#### **Termografia pulsacyjno-fazowa** (ang. *pulse-phase thermography*)

Nie jest to odrębna metoda pomiarowa w termografii aktywnej (dynamicznej), a raczej narzędzie obróbki sygnału. Po ogrzaniu obiektu rejestrujemy pole temperatury w fazie stygnięcia (jak w termografii pulsacyjnej). Rozkład temperatury dla każdej chwili czasowej poddany jest transformacji Fouriera, co pozwala otrzymać widmo odpowiedzi temperaturowej w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie czasu. Procedura dyskretnej transformacji Fouriera przebiega zgodnie z równaniem:

$$F(f) = \sum_{n=1}^N T(t) \exp^{2\pi jkn/N} = \operatorname{Re}_n(f) + j \operatorname{Im}_n(f), \quad (2.11)$$

gdzie:  $\operatorname{Re}_n$  i  $\operatorname{Im}_n$  są odpowiednio częścią rzeczywistą i urojoną sygnału  $T(t)$  po transformacji Fouriera, symbol  $j$  oznacza liczbę urojoną,  $T(t)$  to analizowany sygnał temperatury dla danego piksela,  $N$  jest liczbą zarejestrowanych termogramów,  $f$  częstotliwością fali,  $n$  przyrostem częstotliwości, a  $t$  to czas. Część fazową  $\varphi$  oraz część amplitudową  $A$  obliczamy z wzorów:

$$\varphi = \operatorname{atan} \left( \frac{\operatorname{Im}_n}{\operatorname{Re}_n} \right) \quad (2.12)$$

i

$$A = \sqrt{\operatorname{Re}_n^2 + \operatorname{Im}_n^2}. \quad (2.13)$$

Termografia pulsacyjno-fazowa to jakby mariaż termografii pulsacyjnej i modulacyjnej. Najważniejszą zaletą tego narzędzia jest to, że w odróżnieniu od metody modulacyjnej, podczas jednego doświadczenia, dzięki transformacji Fouriera mamy dostęp, dla ustalonej chwili czasowej, do całej gamy fal o różnych częstotliwościach, zarówno dla części fazowej jak i amplitudowej przetransformowanego sygnału pola temperatury. Pozwala to na wykrywanie defektów, które znajdują się na różnej głębokości.

### 3. METODOLOGIA BADAŃ

Podstawowym celem niniejszych badań jest próba uzyskania odpowiedzi na pytanie czy termografia w podczerwieni może efektywnie poprawić wykrywanie oraz identyfikację uszkodzeń konstrukcji nośnej oraz elementów wyposażenia mostów? Jak już wspomniano, metoda ta, mogłaby być stosowana do wstępnego diagnozowania stanu technicznego obiektu i stanowiłaby uzupełnienie klasycznie przeprowadzanych przeglądów mostów.

Aktualne badania w założeniu ograniczono do konstrukcji betonowych. W konstrukcjach tego typu najczęściej występującymi uszkodzeniami są pustki wewnętrzne (tzw. raki), rozwarstwienia otuliny betonu na skutek korozji zbrojenia, korozja chemiczna betonu, zarysowanie, pęknięcia, występowanie obszarów źle zagęszczonej mieszanki betonowej, zawilgocenie, wtrącenia innych materiałów itp.

Metodologia badań obiektu mostowego z użyciem kamery na podczerwień powinna uwzględniać następujące etapy:

- znajomość dokumentacji technicznej obiektu
- wstępna wizualna ocena mostu
- ustalenie kolejności badań z użyciem kamery na podczerwień
- pomiary termowizyjne w trybie ciągłym (z poziomu jezdni i terenu) w celu wykrycia miejsc potencjalnie groźnych i ich wstępna analiza
- wytypowanie obszarów (markery) do przeprowadzenia wnikliwszych pomiarów (np. z użyciem statywu, podnośnika, rusztowania itp.)
- pomiary termowizyjne miejsc wytypowanych
- ewentualne użycie urządzeń do pobudzenia cieplnego (zestawów emiterów radiacyjnych)
- analiza otrzymanych termogramów z wykorzystaniem standardowego oprogramowania lub wyspecjalizowanych narzędzi matematycznych
- sformułowanie wniosków odnośnie stanu technicznego obiektu
- podanie ew. zaleceń zarządcy obiektu.

#### 3.1. Zalety i ograniczenia

Podstawowe zalety i ograniczenia termografii w podczerwieni opisano w rozdziale 2. W tym miejscu skupiono się na analizie słabych stron termografii pasywnej, która dedykowana jest do testów terenowych.

Stosując termografię pasywną, która wykorzystuje dobowe cykle zmian temperatury, jesteśmy uzależnieni od warunków pogodowych, tj. wartości amplitudy i gradientu temperatury. Trudno jest w dzień poprzedzający badania ocenić czy nazajutrz wystąpią oczekiwane przez nas optymalne warunki. Aby wykryć rozwarstwienia betonu wyłącznie za pomocą termografii pasywnej zaleca się prowadzenie pomiarów w godzinach południowych (ogrzewanie) oraz po zachodzie słońca (ochładzanie). W pierwszym przypadku miejsca delaminacji

objawiają się plamami na termogramach o podwyższonej temperaturze w stosunku do temperatury powierzchni sąsiednich. W drugim przypadku, w fazie stygnięcia, miejsca nad delaminacją będą się szybciej schładzać, co na termogramie objawi się obszarem o niższej temperaturze.

W celu wykrycia małych lub głębiej położonych defektów konieczne jest zastosowanie pobudzenia termicznego. Pobudzenie to wymaga odpowiedniego ustawienia aparatury blisko badanego obiektu (konieczne rusztowania lub podnośniki) oraz źródła zasilania. Czasem także niezbędne jest ekranowanie badanego obszaru przed wpływem wiatru, który zaburza proces nagrzewania i stygnięcia elementu oraz proces rejestracji.

### 3.2. Dobór aparatury

Przed przystąpieniem do badań z użyciem kamery na podczerwień powinniśmy udzielić sobie odpowiedzi na następujące pytania, które można tu traktować, jako kryteria doboru odpowiedniej aparatury:

- Co jest ważniejsze – dokładność pomiaru czy rozdzielczość termiczna? Jeżeli chcemy wykrywać możliwe jak najmniejsze różnice w rozkładzie temperatury zwracamy uwagę na wartość rozdzielczości termicznej rozumianą w sensie NEDT. Jeżeli ważniejsza jest precyzja w określeniu wartości temperatury zwracamy uwagę na dokładność pomiaru. Z własnych doświadczeń wynika, że rozdzielczość termiczna wynosząca  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  jest optymalna, choć niższa byłaby bardziej pożądana;
- Obiekty jakiej wielkości będą badane? Jeżeli bardzo małe możemy zadowolić się kamerą z detektorem o matrycy 320x240 pikseli. Jeżeli badane powierzchnie będą duże to konieczne jest zastosowanie kamer o matrycach o rozmiarze co najmniej 640x480 pikseli. Najlepsze, i niestety najdroższe, kamery na podczerwień mają rozdzielczość geometryczną wynoszącą 1280x1024 pikseli;
- Rodzaj materiału. W zależności od materiału, z jakiego wykonany jest obiekt, należy rozpoznać jego podstawowe cechy fizyko-termiczne, które mają istotny wpływ na sposób, warunki i prędkość procesów cieplnych. Stąd w badanych elementach wykonanych z materiału o dużym współczynniku przewodzenia ciepła, procesy przepływu ciepła i ew. jego zaburzenia będące następstwem uszkodzeń zachodzą na tyle szybko, że zbyt „wolna” kamera może je przeoczyć. Do typowych badań konstrukcji, zarówno stalowych jak i betonowych, częstotliwość rejestracji 30Hz jest satysfakcjonująca;
- Rodzaj uszkodzeń. Wpływ danego rodzaju uszkodzenia na rozkład temperatury na powierzchni badanego elementu odgrywa kluczową rolę;
- Miejsce prowadzenia badań. W laboratorium ze względu na stabilne, bezpieczne warunki stosowane są drogie kamery o chłodzonych detektorach fotonowych. W warunkach polowych lepiej stosować tańsze kamery bolometryczne. Przykładowo kamera FLIR T620 waży 1,3 kg, można ją mocować

do statywu jak i wykonywać „pomiar z ręki”. Dzięki akumulatorowi oraz wewnętrznej pamięci jest ona niezależna od źródeł prądu czy komputera. Stosowanie kamery FLIR X6540 SC wymaga sterowania nią z poziomu programu zainstalowanego na komputerze stacjonarnym, nie posiada ona wbudowanego akumulatora oraz waży 5,05 kg;

- Dobór obiektywu. Podobnie jak w fotografii cechy obiektywu takie jak ogniskowa czy ustawienie ostrości mają wpływ na rozmiar obrazu widzianego w kadrze. W zależności od odległości kamery od obiektu należy dobrać obiektyw o takim kącie widzenia, aby uzyskać oczekiwaną wielkość a także zadawalającą rozdzielczość rejestrowanego obszaru. Najczęściej kamery wyposażone są w obiektywy standardowe, szerokokątne lub teleobiektywy do obserwowania obiektów bardzo oddalonych. Obiektyw kamery FLIR T620 o ogniskowej 24,5 mm w zastosowaniach laboratoryjnych zbyt zawęża obraz i wymaga przez to większych odległości od obiektu co pogarsza rozdzielczość geometryczną. W raporcie [8] znajdziemy przybliżony wzór ułatwiający dobór właściwego obiektywu oraz praktyczne, maksymalne odległości kamery z danym obiektywem, do obiektu.

Tabela 1. Specyfikacja techniczna kamer użytych do testów

Rodzaj kamery	FLIR T620	FLIR X6540 SC
Typ detektora	Bolometryczny, niechłodzony, FPA	Fotonowy z antymonku indu (InSb), chłodzony
Rozdzielczość termiczna NETD [mK]	< 50	< 25 (20)
Dokładność pomiaru	$\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ lub $\pm 2\%$	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ lub $\pm 1\%$
Wielkość matrycy	640 x 480	640 x 512
Zakres widmowy [ $\mu\text{m}$ ]	7,8÷14	1,5÷5
Częstotliwość [Hz]	30	125
Rodzaj obiektywu	24,6 mm	50 mm
Oprogramowanie	FLIR ResearchIR	IrNDT (Automation Technology GmbH)

Obecnie produkowane kamery na podczerwień służące do celów naukowych i eksperymentalnych w zakresie promieniowania 3÷5  $\mu\text{m}$  posiadają chłodzone detektory fotonowe, a w zakresie promieniowania 8÷12  $\mu\text{m}$  wyłącznie detektory bolometryczne niewymagające chłodzenia. Zgodnie z prawem Plancka dla temperatury 300K wartość mocy promieniowania elektromagnetycznego w paśmie średniofalowym jest bardzo mała i kamera bolometryczna teoretycznie wypada wówczas korzystniej niż kamera z detektorem fotonowym. Przydatność kamery średniofalowej zależy od czułości detektora i poziomu szumów elektroniki. Po-

równanie parametrów technicznych dwóch kamer używanych podczas badań w terenie i eksperymentów w laboratorium zestawiono w tabeli 1.

Jeżeli wymagany jest dodatkowy sprzęt i aparatura do badań to należy przede wszystkim ustalić czy potrzebujemy bezpośredniego dostępu do elementów nośnych mostu (rusztowań, podnośników itd.) oraz czy musimy mieć zapewniony dostęp do źródła prądu (zasilanie kamery, aparatury pobudzenia cieplnego, laptopa itp.). W celu uzyskania obrazów wizyjnych i termalnych o dobrej ostrości zalecane jest używanie stabilnego statywu.

### 3.3. Interpretacja wyników

Analiza wyników badań termowizyjnych wymaga doświadczenia i wiedzy z zakresu wielu dyscyplin, m.in. znajomości zjawisk fizycznych z dziedziny promieniowania elektromagnetycznego w zakresie podczerwieni, wiedzę o właściwościach promiennych ciał, zrozumienia problematyki wymiany ciepła. Zakładamy, że użytkownik kamery na podczerwień jest mostowcem, rozumiejącym specyfikę tych konstrukcji, mający ogólną wiedzę dotyczącą badań nieniszczących oraz doświadczenie w przeprowadzaniu przeglądów mostów. Patrząc na doświadczenia administracji drogowej<sup>12</sup> w USA, m.in. Stanu Missouri [8], zauważamy kompleksowe podejście do diagnostyki poprzez wprowadzenie pilotażowego programu szkoleń i badań w roku 2012 przeprowadzonych wśród pracowników administracji technicznej aż w 12 Stanach.

Wydaje się wskazanym, aby takie szkolenia były prowadzone przez ekspertów z trzech kluczowych dziedzin: teorii promieniowania i zjawisk cieplnych, producentów kamer na podczerwień i mostowców.

Ze studiów literaturowych oraz doświadczeń własnych wynika, że badania w terenie należy poprzedzić eksperymentami w skali laboratoryjnej, co ułatwia oswojenie się z aparaturą, jej możliwościami i ograniczeniami w wykrywaniu ukrytych defektów. W przypadku badań prototypowych, silnie ukierunkowanych w danej dziedzinie, pomocne w ocenie jakościowej okazują się analizy numeryczne.

## 4. TESTY TERENOWE

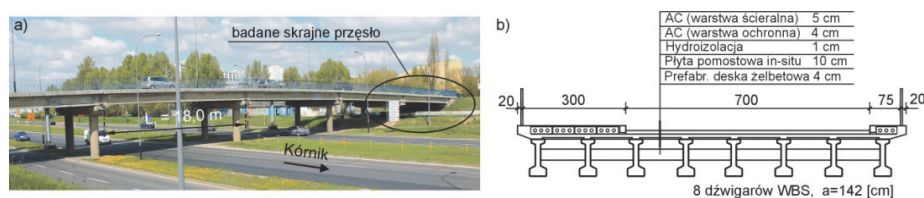
Poniżej opisano wyniki własnych badań przeprowadzonych dla dwóch różnych obiektów betonowych zlokalizowanych w Poznaniu. W przyszłości planuje się przeprowadzenie analogicznych testów w odniesieniu do obiektów o stalowej konstrukcji ustroju nośnego. Pomiary wykonano z poziomu gruntu bez stosowania rusztowań lub podnośników, co wynikało z relatywnie małej wysokości obiektów nad terenem (szczególnie przeszła wiaduktu opisanego w pkt. 4.1.).

---

<sup>12</sup> Department of Transportation.

#### 4.1. Wiadukt w ciągu ul. Kurlandzkiej

Ustrój nośny badanego wiaduktu stanowi 6 przęseł wolnopodpartych o rozpiętości teoretycznej 18,0 m wykonanych z prefabrykowanych sprężonych belek betonowych w systemie WBS. W przekroju poprzecznym rozmieszczono 8 belek o wysokości 1,0 m w osiowym rozstawie 1,42 m. Długość całkowita wiaduktu wynosi około 112,3 m. Obiekt powstał w II poł. lat 70-tych ubiegłego wieku. Należy podkreślić, że nie zbudowano żadnego systemu odwodnienia ani nie zamontowano urządzeń dylatacyjnych. Rys. 1a przedstawia fotografię części wiaduktu wraz z oznaczeniem obszaru inspekcji. Schematyczny przekrój poprzeczny z opisem warstw pomostu w strefie jezdni pokazano na rys. 1b.

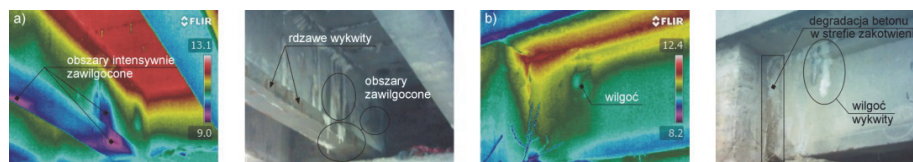


Rys. 1. Wiadukt w ciągu ulicy Kurlandzkiej w Poznaniu: a) widok ogólny fragmentu konstrukcji, b) poglądowy przekrój poprzeczny

Widoczny na rys. 1a spadek podłużny dużej części całego obiektu w kierunku analizowanego przęsła skrajnego, w połączeniu z brakiem urządzeń dylatacyjnych i spękaniem nawierzchni (i w konsekwencji uszkodzeniami hydroizolacji), powoduje intensywną degradację elementów nośnych tego przęsła. Przeciękająca woda, wzbogacana sezonowo chlorkami oraz intensywny ruch pod i na wiadukcie wywołują złożone i dynamiczne procesy korozji chemicznej betonu, korozji stali zbrojeniowej i sprężającej. Najbardziej uszkodzonymi elementami są dźwigary oraz płyta pomostowa znajdujące się w bezpośrednim obszarze wzdłuż krawężnika lewej chodnikowej.

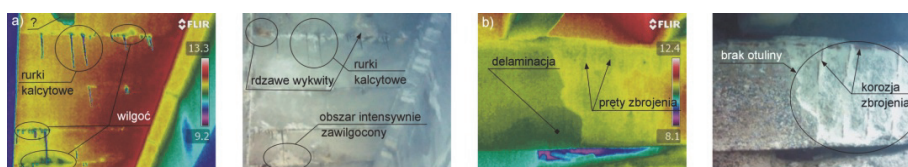
#### 4.2. Termografia pasywna

Pierwsze testy przeprowadzono bez stosowania pobudzenia termicznego mierząc naturalną energię promieniowania elektromagnetycznego badanych elementów. W trakcie badań warunki środowiskowe były następujące. Odległość między kamerą a danym elementem wiaduktu wynosiła zazwyczaj  $1,0 \div 2,5$  m (gdy kadr obejmował np. cały przyczółek odległość kamery wahała się w granicach 10 m). Do stabilizacji kamery nie używano statywu. Pomiar przeprowadzono w pochmurny dzień, co jak wiadomo jest korzystne, wówczas maleje wpływ promieniowania nieboskłonu i odbić promieniowania od innych obiektów, co ma korzystny wpływ na pomiar temperatury. Względna wilgotność powietrza wynosiła 85% a temperatura otoczenia  $12,0^{\circ}\text{C}$ . Parametry te wprowadzono do oprogramowania kamery FLIR T620 (specyfikacja – patrz tab. 1).



Rys. 2. Rezultaty termografii pasywnej (termogram i fotografia) dla: a) belki pośredniej typu WBS, b) belki skrajnej w miejscu podparcia na przyczółku

Obserwacja spodu płyty pomostowej za pomocą kamery FLIR T620 wykazała jednorodność rozkładu temperatury w suchych obszarach (rys. 2a) oraz potencjalne miejsca występowania uszkodzeń (rys. 3a). Na termogramach różnice temperatur przede wszystkim widoczne są w tych miejscach gdzie występuje zawilgoconie. Nie ma natomiast związku pomiędzy wykwitami korozji chemicznej betonu lub wykwitami korozji zbrojenia a temperaturą powierzchni, za wyjątkiem tych sytuacji, gdy miejsca te jednocześnie są zawilgocone. Przenikanie wody przez beton płyty pomostowej i dźwigarów jest tak intensywne i długotrwałe, że powstały w wielu miejscach stalaktyty (rurki kalcytowe). Potwierdza to niezmiernie dynamiczny charakter procesów ługowania i chemicznej korozji betonu. Spora ilość rdzawych smug informuje o silnej korozji zbrojenia prefabrykowanych płyt betonowych (niemniej w warstwie otuliny betonu nie ma pęknięć ani rozwarstwień). Pomiary bezstykowe nie wykazały w tych miejscach żadnych różnic temperatury.



Rys. 3. Rezultaty termografii pasywnej (termogram i fotografia) dla: a) spodu płyty pomostowej, b) oczepu przyczółka

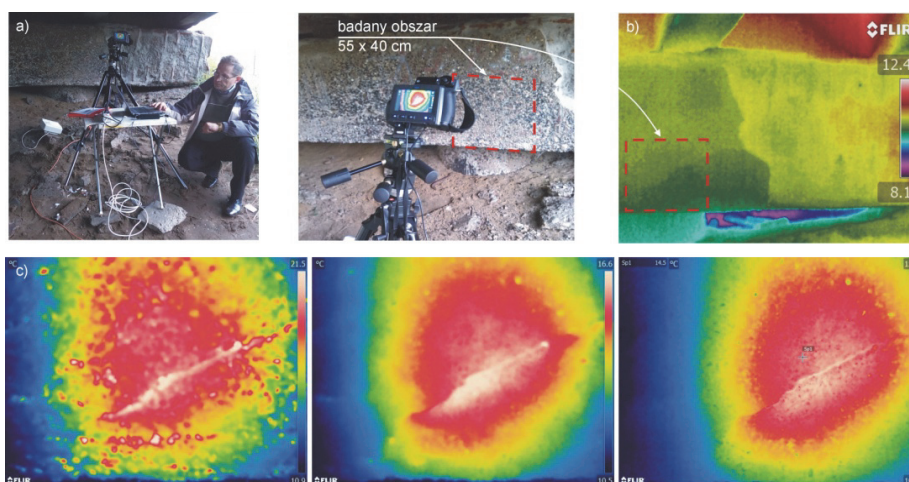
Podobne spostrzeżenia można sformułować badając dźwigary główne (rys. 2a,b). Dzięki termografii można lepiej wyekstrahować miejsca i wielkość obszarów zawilgoconych, a rozkład temperatury może świadczyć o intensywności stopnia zawilgoconia (im większy tym niższa mierzona temperatura). Nieco odmienne wnioski pojawiły się podczas badania oczepu przyczółka. Wykryto w nim obszary delaminacji warstwy otuliny betonu (rys. 3b) spowodowane korozją prętów zbrojeniowych. W tym przypadku mamy do czynienia z naturalną termografią aktywną związaną z dobowymi cyklami zmian temperatury i gradientami temperatur wywołanymi przez te zmiany - dlatego można obserwować na termogramach rozwarstwienia. Generalnie bez pobudzenia termicznego trudno zaobserwować większość defektów. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie dobowych zmian temperatury i wykonywanie badań późnym rankiem lub



w południe (naturalnym źródłem ciepła jest słońce) ewentualnie wieczorem po zachodzie słońca (wówczas wykorzystujemy fazę stygnięcia).

### 4.3. Termografia aktywna

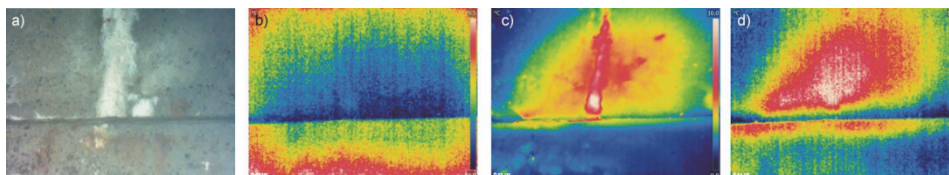
Przeprowadzono dwa testy aktywnej termografii w podczerwieni. Pierwszy test dotyczył fragmentu oczepu przyczółka, natomiast drugi fragmentu belki WBS. Do pobudzenia cieplnego powierzchni betonu zastosowano elektryczny promiennik grzewczy – widok stanowiska badawczego usytuowanego na wprost oczepu przyczółka przedstawia rys. 4a. Aby uzyskać prawidłową i stabilną pozycję kamery zastosowano specjalny statyw. Temperatura otoczenia wynosiła  $9,5^{\circ}\text{C}$ , a względna wilgotność powietrza wynosiła 80%.



Rys. 4. Termografia aktywna oczepu przyczółka: a) widok stanowiska oraz położenie badanego obszaru, b) termogram fragmentu oczepu zarejestrowany przed pobudzeniem termicznym, c) sekwencja termogramów badanego obszaru po pobudzeniu termicznym dla  $t=0, 142$  i  $374$  s

Na analizowanej powierzchni oczepu na obszarze o wym.  $55 \times 40$  cm występuje ukośna rysa. Nie wiadomo, czy w tym obszarze wystąpiło rozwarstwienie betonowej otuliny. Początkowa temperatura powierzchni oczepu wynosi  $9,2^{\circ}\text{C}$ . Całkowity czas ogrzewania powierzchni betonowej wynosił 6 minut. Po podgrzaniu badanej powierzchni rozpoczęto rejestrację obrazów termicznych z częstotliwością 30 Hz przez okres trzech minut. Po tym czasie, ze względu na rozmiar pliku danych, rejestrowano tylko pojedyncze termogramy co 15 sekund przez kolejne 3 minuty. Z powyższych badań wynika, że równomierne nagrzanie badanego obszaru jest trudne do uzyskania (rys. 4c). Wykrycie anomalii w rozkładzie temperatury od ukośnej rysy otuliny betonu jest proste, przy czym chwila pomiaru nie jest istotna. Podgrzanie powierzchni betonu poprawia identyfikację tego rodzaju uszkodzenia. Widoczne nieregularności rozkładu temperatury

mogą być związane z delaminacją otuliny betonu, niestety nie można precyzyjnie określić ani kształtu, ani obszaru tej delaminacji.



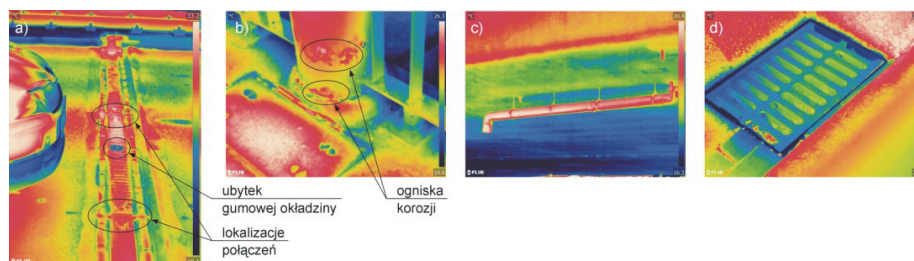
Rys. 5. Termografia aktywna dźwigara głównego: a) zdjęcie fragmentu belki WBS przy pasie dolnym, b) termogram zarejestrowany przed pobudzeniem termicznym, c) termogram zarejestrowany bezpośrednio po wyłączeniu pobudzenia termicznego, d) termogram zarejestrowany w chwili  $t=7$  min

W drugim teście podgrzano w analogiczny sposób fragment pasa dolnego jednej z belek WBS. Na termogramie (rys. 5c), w odróżnieniu do termogramu zarejestrowanego przed grzaniem (rys. 5b), następuje wyraźna poprawa uwypuklenia cech związanych z uszkodzeniem, którym jest silne, wewnątrz zlokalizowane, zawilgocenie betonu. Kontrast termiczny słabnie w fazie stygnięcia i zanika po upływie kilku minut (rys. 5d).

#### 4.4. Most Mieszka I

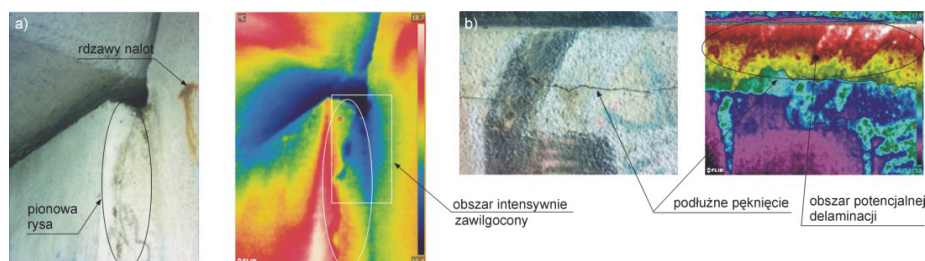
Most Mieszka I został oddany do użytku w roku 1970. Głównym projektantem był mgr inż. Andrzej Rawecki. Ramowy, ciągły, trójprzęsłowy (27,0+36,0+27,0) ustrój nośny konstrukcyjnie bliźniaczy jest z mostem Bolesława Chrobrego. Rygiel ramy w przekroju poprzecznym to płyta z betonu sprężonego z otworami, które wykonano z rur Spiro średnicy prawdopodobnie 600 mm. Konstrukcja jest podłużnie zdylatowana, a jej całkowita szerokość to ok. 24,10 m. Tarczowe filary o zmiennej grubości są podzielone na dwie części oraz utwierdzone z przęsłem.

Badania z użyciem kamery FLIR T620 zrealizowano w słoneczny dzień w godzinach południowych, gdy temperatura otoczenia wynosiła 28°C a wilgotność powietrza ok. 60%. Odległość między kamerą a elementami wyposażenia mostu wynosiła 1,5÷5,0 m, a w przypadku obserwacji spodu płyty i przyczółków wahała się w przedziale od 5,0 do ponad 35,0 m. Do stabilizacji kamery nie używano statywu. Obserwacja elementów wyposażenia pozwala wykryć zaburzenia rozkładu temperatury będące efektem nieciągłości, lokalnych uszkodzeń, różnic materiałowych (rys. 6a) czy ognisk korozji (rys. 6b).



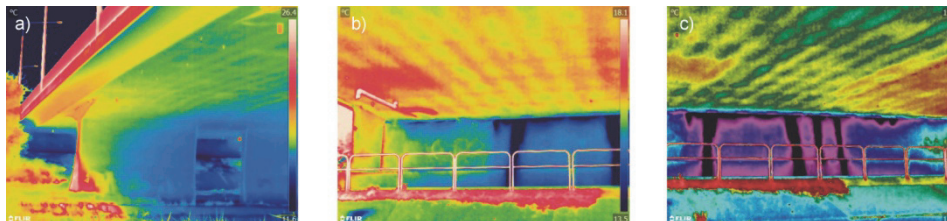
Rys. 6. Rezultaty termografii pasywnej wybranych elementów wyposażenia: a) blokowego urządzenia dylatacyjnego, b) mocowania słupa trakcji tramwajowej i oświetlenia, c) kolektora systemu odwodnienia, d) wpustu żeliwnego

Obserwacja przyczółka położonego na prawym brzegu Cibiny umożliwiła zlokalizowanie miejsc zawilgoconych oraz lokalne rozwarstwienia betonu w miejscach występowania rys lub pęknięć (rys. 7a,b). Zawilgoconie ściany przedniej w kilku miejscach spowodowane jest przez nieszczelne blokowe urządzenie dylatacyjne. Nie stwierdzono natomiast, aby spodnia konstrukcja płyty przęsła wykazywała oznaki ingerencji wody (brak oznak korozji ługującej lub chemicznej betonu) oprócz nielicznych miejsc wzdłuż dylatacji podłużnej. Ciekawostką jest częściowe ujawnienie struktury płyty posiadającej wewnętrzne pustki, co widać na termogramach rys. 8b,c.



Rys. 7. Rezultaty termografii pasywnej przyczółka od strony Śródki: a) zdjęcie oraz termogram ściany przedniej w miejscu oparcia przęsła, b) zdjęcie oraz termogram cokołu ściany przedniej

Należy podkreślić, że obserwowane powierzchnie były dość oddalone od kamery na podczerwień, co wpłynęło na pogorszenie rozdzielczości geometrycznej. O ile analiza przęsła na terenie zalewowym nie jest specjalnie utrudniona, o tyle obserwacja przęsła nurtowego wymagałaby użycia np. podnośnika.



Rys. 8. Rezultaty termografii pasywnej przedstawiające: a) termogram podpory pośredniej od strony Ostrowa Tumskiego, b,c) termogramy płyty ustroju nośnego przęsła skrajnego od strony Śródki wraz z przyczółkiem

## 5. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu walidacji zaproponowanej wcześniej metodologii badań obiektów mostowych wykonano płytę betonową o wymiarach 60x60x10 cm z betonu konstrukcyjnego klasy C35/45 użytego podczas betonowania rzeczywistej podpory wiaduktu w Poznaniu. Zbrojenie wykonano ze stalowych prętów B500SP o średnicy  $\varnothing 10$  i  $\varnothing 12$  mm w rozstawie co 15,0 cm. Geometrię płyty oraz układ i położenie siatki prętów przedstawia rys. 9b.

Wewnątrz płyty wprowadzono cztery nieciągłości imitujące uszkodzenia. Pustki wewnętrzne (tzw. raki) wykonano z plastikowych pudełek o wymiarach 7,0x4,7x1,9 cm. Umieszczono je w płycie tak, aby znajdowały się w odległościach 1,5/2,0/2,5/3,0 cm względem powierzchni górnej (pomiarowej). Rozmieszczenie uszkodzeń, nazwanych Wada1 ÷ Wada4, przedstawia rys. 9b.

Badania posłużyły do oceny jakościowej możliwości wykrycia zasymulowanych defektów, do przetestowania różnych sposobów pobudzenia termicznego oraz sprawdzenia potencjału dwóch różnych kamer na podczerwień. Przeprowadzono dwa zasadnicze testy termografii aktywnej wykorzystując do pobudzenia ciepłego zestaw dwóch projektorów (lamp) halogenowych o mocy 2x150Watt.

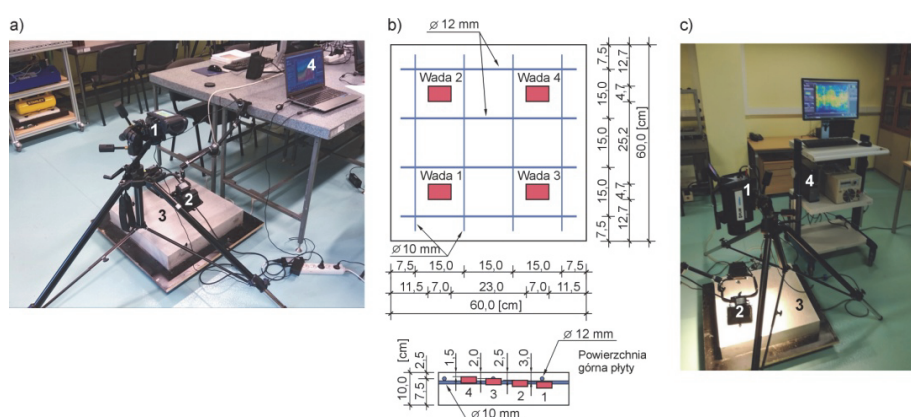
### 5.1. Test 1

Tok eksperymentu był następujący. Ze względu na trudność równomiernego ogrzania całej powierzchni płyty<sup>13</sup> oraz takiego ustawienia kamery, aby cały obszar płyty znalazł się w kadrze<sup>14</sup> postanowiono podzielić eksperyment na cztery etapy. Obszar w otoczeniu poszczególnej wady niezależnie ogrzewano i prowadzono rejestrację sekwencji termogramów co 5 sek w czasie ogrzewania jak i podczas procesu stygnięcia. Czas trwania ekspozycji lamp wynosił 5 min, po czym wyłączano je, a pomiar temperatury prowadzono jeszcze przez 13 min. Temperatura powietrza w laboratorium wynosiła 22,6°C a wilgotność 55%. Ka-

<sup>13</sup> zbyt mała ilość lamp halogenowych (2 szt.)

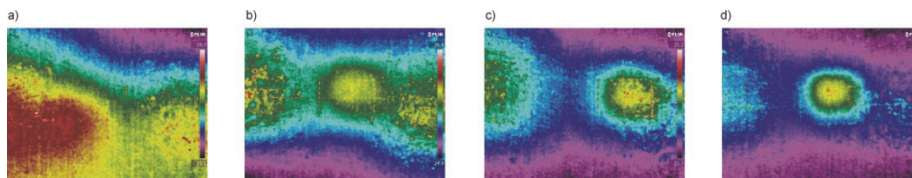
<sup>14</sup> obiektów o zbyt wąskim kącie widzenia

merę FLIR T620 ustawiono na statywie w odległości 0,6 m od powierzchni płyty, natomiast zestaw lamp znajdował się 0,25 m nad płytą. Widok stanowiska badawczego podczas pomiaru nad Wadą nr 3 przedstawia rys. 9a. Sterowanie kamerą prowadzono z poziomu oprogramowania FLIR ResearchIR zainstalowanego na laptopie. Rozmiar obrazu powierzchni płyty widzianego przez kamerę to ok. 23,5x18,0 cm. W miejscach teoretycznego położenia plastikowych pudełek ołówkiem narysowano na powierzchni płyty przerywane linie (widoczne na termogramach).



Rys. 9. Stanowisko do termografii pulsacyjnej; 1 – IR kamera, 2 – lampa halogenowa 2x150Watt, 3 – płyta żelbetowa, 4 – komputer: a) widok stanowiska podczas badań przy użyciu kamery FLIR T620, b) dane geometryczne żelbetowej płyty z lokalizacją siatki zbrojenia i wewnętrznych wad, c) widok stanowiska podczas badań przy użyciu kamery FLIR X6540 SC

Rezultaty eksperymentu okazały się interesujące i satysfakcjonujące (wykryto trzy z czterech wad – patrz rys. 10). Wada nr 4 (najpłycej położona wzdłuż powierzchni płyty – 1,5 cm) jest już obserwowana na termogramie po 1 min grzania jako mały nieregularny jeszcze obszar o podwyższonej temperaturze. Z upływem czasu kontrast termiczny jest coraz wyraźniejszy, a obszar o podwyższonej temperaturze zaczyna wielkością i kształtem odpowiadać symulowanemu uszkodzeniu. W fazie ekspozycji lamp na powierzchni betonu tworzą się widziane przez kamerę artefakty, wywołane przez nierównomierne radiacyjne oddziaływanie lamp, różnice właściwości powierzchni i być może także przez zbrojenie. Zaburzenia te w procesie stygnięcia są dużo słabsze, przez co rozkład temperatury jest równomierniejszy, za wyjątkiem silnego kontrastu w miejscu wady (rys. 10d). Kształt i wymiary wady zostały prawie idealnie „odzworowane” za wyjątkiem położenia, co mogło być spowodowane nieumyślnym przesunięciem plastikowego pudełka podczas betonowania.

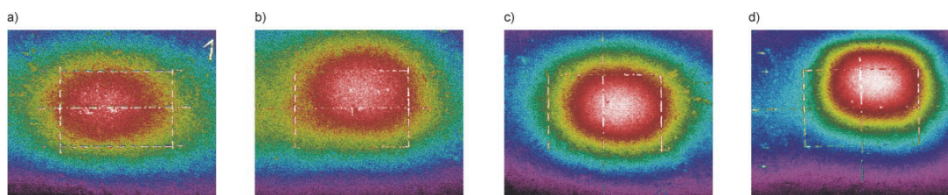


Rys. 10. Rezultaty otrzymane za pomocą kamery FLIR T620 (TEST 1), termogramy zarejestrowane podczas stygnięcia dla  $t=12$  min: a) wokół defektu WADA 1, b) wokół defektu WADA 2, c) wokół defektu WADA 3, d) wokół defektu WADA 4

Na rys. 10 przedstawiono termogramy zarejestrowane po upływie 12 min od zakończenia procesu grzania. Wpływ grubości otuliny betonu na detekcję wady jest wyraźny. W przypadku Wady nr 1 (otulina 3 cm) jej wykrycie zapewne też byłoby możliwe (widoczne czerwone pole na rys. 10a) gdyby wydłużono czas obserwacji płyty w fazie stygnięcia.

## 5.2. Test 2

Tok eksperymentu był analogiczny jak w Teście nr 1. Czas ekspozycji lamp przyjęto jak poprzednio równy 5 min, jednak wydłużono czas obserwacji i pomiaru temperatury w fazie stygnięcia do 15 min. Temperatura powietrza w laboratorium wynosiła  $22,7^{\circ}\text{C}$  a wilgotność 55%. W tym eksperymencie zastosowano kamerę FLIR X6540 SC ustawioną na statywie w odległości 0,7 m od powierzchni płyty, gdy zestaw lamp znajdował się 0,25 m nad płytą. Widok stanowiska badawczego podczas pomiaru nad Wadą nr 2 przedstawia rys. 9c. Sterowanie kamerą prowadzono z poziomu oprogramowania IrNDT zainstalowanego na komputerze stacjonarnym. Rozmiar obrazu powierzchni płyty widzianego przez kamerę to ok.  $14,0 \times 11,2$  cm.



Rys. 11. Rezultaty otrzymane za pomocą chłodzonej kamery FLIR X6540 SC (TEST 2), termogramy zarejestrowane podczas stygnięcia dla  $t=15$  min: a) wokół defektu WADA 1, b) wokół defektu WADA 2, c) wokół defektu WADA 3, d) wokół defektu WADA 4

Termogramy przedstawione na rysunku 11 zostały zarejestrowane po upływie 15 min od zakończenia procesu grzania. W tym przypadku także najgłębiej położona Wada nr 1 została poprawnie wykryta i zlokalizowana. Przewaga kamery chłodzonej z detektorem fotonowym, wynikająca z dwukrotnie lepszej rozdzielczości termicznej, względem kamery T620 jest bezsporna.

## 6. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie termografii w podczerwieni do rutynowych inspekcji mostów, jak pokazują powyższe badania ma swoje podstawy, jednak waga i ilość ograniczeń jest dość pokaźna. Podczas badań rzeczywistych obiektów pojawiają się następujące trudności:

- niesprzyjające warunki atmosferyczne (umiarkowany lub silny wiatr, opady, promieniowanie słoneczne, zamglenie),
- duże odległości między punktem obserwacji a konstrukcją wpływają na rozdzielczość geometryczną i pogorszenie rozdzielczości temperaturowej,
- rozmiary rzeczywistych elementów konstrukcji mostu wpływają na charakter zjawisk wymiany ciepła (np. duża pojemność cieplna elementów betonowych wydłuża czasy ich relaksacji przy zmianach temperatury otoczenia, duża grubość otulin prętów zbrojenia, itp.),
- rzeczywiste uszkodzenia mają inną naturę od tych symulowanych w warunkach laboratoryjnych,
- zastosowanie pobudzenia cieplnego w celu równomiernego nagrzania badanego elementu jest bardzo trudne,
- użycie kamery FLIR X6540 SC ze względu na jej koszt, zasilanie, zapewnienie odpowiednich warunków pracy, wymagany komputer sterujący jest praktycznie nierealne w warunkach polowych.

Mimo tych ograniczeń należy kontynuować badania nad wykorzystaniem termografii w podczerwieni do diagnostyki mostów w celu znalezienia jak najbardziej optymalnego wykorzystania potencjału tej metody pomiarowej.

## LITERATURA

1. Bergamo O., Campione G., Donadello S., Russo G., *In-situ NDT testing procedure as an integral part of failure analysis of historical masonry arch bridges*, Engineering Failure Analysis, 54, 2015, 31–55.
2. Clark M.R., McCann D.M., Forde M.C., *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*, NDT&E International, Vol. 36, 2003, 265–275.
3. Izumi Y, Sakagami T., Kubo S., Tamakoshi T., *Detection of through-deck type fatigue cracks in steel bridges by self-reference lock-in thermography*, Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference on Experimental Mechanics, EPJ Web of Conferences 6 (38011), published by EDP Sciences, 2010, 1–8.
4. Kee Seong-Hoon et al., *Nondestructive bridge deck testing with air-coupled impact-echo and infrared thermography*, Journal of Bridge Engineering, 17, 6, 2012, 928–939.
5. Pollock D.G. et al., *Detection of voids in prestressed concrete bridges using thermal imaging and ground-penetrating radar*, Washington State Transportation Center, Report DTFH61-05-C-00008, 2008.

6. Róžański L., Ziopaja K., *Applicability analysis of active IR thermography and selected signal processing methods for technical conditions assessment of bridge elements*, Proceedings of the 13th Quantitative InfraRed Thermography, QIRT Conference Open Archives on <http://qirt.gel.ulaval.ca/index.php> (10.21611/qirt.2016.157), 2016, 955–964.
7. Strategic Highway Research Program (SHRP 2), *Nondestructive testing to identify concrete bridge deck deterioration*, Transportation Research Board, Report S2-R06A-RR-1, Washington, 2013.
8. Washer G. et al., *Field testing of hand-held infrared thermography. Phase II*, Missouri Department of Transportation, Report no. cmr 16-007, 2015.
9. Więcek B., De Mey G., *Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania*, Warszawa, Wydawnictwo PAK, 2011.
10. Vaghefi K. et al., *Evaluation of commercially available remote sensors for highway bridge condition assessment*, Journal of Bridge Engineering, 17, 6, 2012, 886–895.

## **APPLICABILITY ANALYSIS OF IR THERMOGRAPHY FOR TECHNICAL CONDITIONS ASSESSMENT OF BRIDGES**

### **Summary**

The aim of the article is to analyze the applicability of infrared thermography as a diagnostic tool to support the inspections of the structure and equipment elements of bridges. Infrared thermography consists of recording the power of electromagnetic radiation emitted by the surface of a given body. Thanks to the IR camera, the energy of the infrared radiation is converted into an electrical signal whose value depends on the temperature of the object. The starting point is the assumption that the distribution of temperature anomalies, recorded by IR camera, may be associated with located under the surface hidden defects. This article briefly outlines the basic physical laws applicable to radiation thermometry, the characteristics of two types of IR cameras, and the most commonly used research techniques. In-situ and laboratory tests were performed to document the use of this NDT tool in bridge diagnostics.