

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA TERMOGRAFII AKTYWNEJ DO LOKALIZACJI ZBROJENIA W ELEMENTACH ŻELBETOWYCH

POSSIBILITIES OF USING ACTIVE IR THERMOGRAPHY FOR LOCALIZATION OF STEEL BARS IN REINFORCED CONCRETE

Paweł Noszczyk

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-377 Wrocław
e-mail: pawel.noszczyk@pwr.edu.pl

Abstract: The paper presents the possibility of using non-destructive testing with active thermography to the location of reinforcement in concrete elements. Four reinforced concrete elements in the form of beams with dimensions of 24 x 24 x 200 cm was researched. The beams had the main reinforcement with diameters sequentially: 12 mm, 16 mm, 20 mm and 25 mm. Stirrups with a diameter of 6 mm were placed every 20 cm. Lagging for the main reinforcement of test surface was 26 mm. Reinforced concrete elements were heated with an infrared lamp and thermal images were recorded periodically at intervals of 1 min. Preliminary studies have shown that detection of reinforcement in concrete elements using active thermography is possible. The rebar was visible on the thermograms from the start of the cool down phase for about 20 min after. The study contains a description of the test stand, and the tests performed. The paper also highlighted the problems encountered on the implementation of research and prospect of development active thermography as a non-destructive testing.

Keywords: active thermography, non-destructive testing, material inclusions, detection of rebar.

Wprowadzenie

W praktyce inżynierskiej bardzo często zachodzi potrzeba lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych. Istniejące obiekty są przebudowywane, remontowane lub zmieniana jest ich funkcjonalność, przez co należy przeliczać ponownie konstrukcję nośną obiektu. W przypadku kiedy nie zachowała się dokumentacja projektowa lub powykonawcza należy w elementach żelbetowych wykonywać odkrywki w celu określenia rodzaju zbrojenia. Jednak nie zawsze istnieje możliwość ich wykonania, na przykład z uwagi na zabytkowy charakter obiektu lub niedostępność powierzchni. Alternatywą jest stosowane różnego rodzaju badań nieniszczących do których zaliczana jest termografia aktywna [9, 11]. Jest to młoda metoda badań, opisana po raz pierwszy w latach 90' XX wieku [6, 7]. Metoda ta wykorzystuje zjawisko promieniowania cieplnego (podczerwonego). Termografia aktywna wyróżnia się tym od termografii pasywnej, że badaną powierzchnię należy pobudzić cieplnie, a następnie sprawdzać odpowiedź cieplną rejestrując cyklicznie termogramy. W literaturze można doszukać się publikacji na temat prowadzonych badań przy zastosowaniu termografii aktywnej przez naukowców z całego świata [4, 13, 15, 16, 18]. Większość z nich porusza problemy detekcji

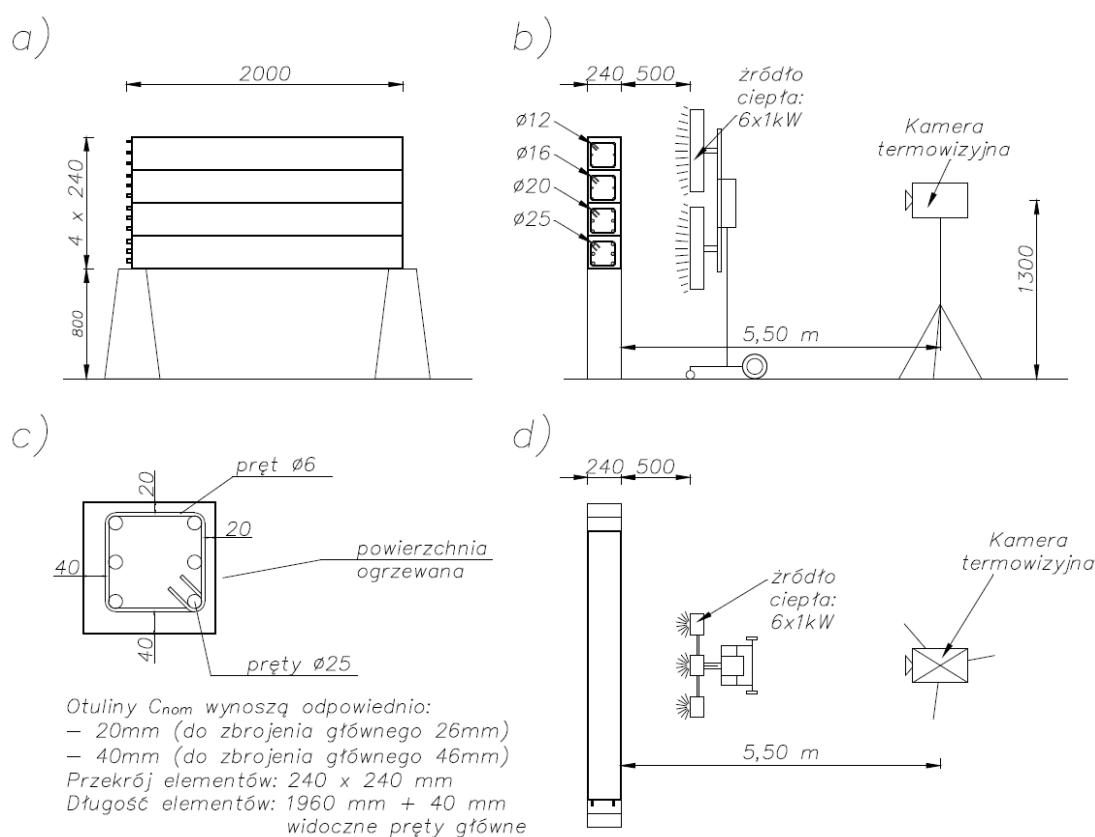
wtrąceń materiałowych płytko położonych w materiale jednorodnym tj. do kilkunastu mm pod badaną powierzchnią. W niniejszej publikacji oceniono przydatność i możliwości zastosowania badań z zastosowaniem termografii aktywnej do detekcji zbrojenia głównego w elementach żelbetowych [5, 8, 17] w postaci belek.

Material i metody

Wszelkie pomiary termowizyjne zostały wykonane zgodnie z zaleceniami normowymi [14] oraz ogólnymi zasadami wykonywania pomiarów znanych z literatury [10, 16]. Badaniom zostały poddane 4 elementy żelbetowe w postaci belek. Ich przekrój wynosił 24 x 24 cm, a długość 196 cm żelbetu + 4 cm pręty zbrojenia głównego, które wychodziły z betonu (pręty były widoczne jednostronnie w celu określenia poprawności wykonania otulin oraz zastosowanej średnicy zbrojenia głównego). Dodatkowo w przekroju występowały strzemiona o średnicy 6 mm ułożone w rozstawie co 20 cm. Zastosowano dwie grubości otulin tj. kolejno: 20 mm do strzemion (26 mm do prętów głównych) oraz 40 mm do strzemion (46 mm do prętów głównych). Są to grubości otulin jakie mogą wystąpić najczęściej w elementach żelbetowych. Tak wykonany element reprezentował belki lub słupy

żelbetowe, które klasycznie występują w obiektach budowlanych. W każdym z elementów zastosowano inne średnice zbrojenia głównego: 12 mm, 16 mm, 20 mm oraz 25 mm. Zbrojenie główne ułożone jest w jednym rzędzie po 2 lub 3 pręty. Dzięki takiej geometrii przekroju dysponuje się 4 różnymi powierzchniami na każdym elemencie co w sumie daje 16 różnych kombinacji geometrii (4 belki), które można przebadać. Przykładowy przekrój dla zbrojenia głównego 25 mm i zastosowanych otulin jest pokazany na ryc. 1 c). W pozostałych przekrojach otuliny i układ zbrojenia pozostają takie same, natomiast zmienia się jedynie średnica prętów głównych. W opisywanych badaniach wstępnych przebadano powierzchnię z otuliną 20 mm do strzemion i trzema prętami zbrojenia głównego w jednym boku. Badanie przeprowadzono dla wszystkich

czterech średnic prętów głównych. Budowę stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1. Belki ułożono na sobie w pozycji poziomej. Kolejno w dół średnice prętów głównych rosły tj. na samym dole znajdowała się belka z prętami o średnicy 25 mm, a na samej górze belka z prętami średnicy 12 mm. Elementy zostały umieszczone na podporach na wysokości 80 cm nad powierzchnią terenu. Do pobudzenia cieplnego użyto promiennika podczerwieni składającego się z 6 lamp, każda o mocy 1 kW. Lampa była ustawiona w odległości 50 lub 100 cm od badanej powierzchni. Do rejestracji zdjęć termowizyjnych użyto kamery termowizyjnej Flir P65 o rozdzielczości detektora podczerwieni 320 x 240 pikseli, która była ustawiona 5,5 m od elementów żelbetowych.



Ry1. Schemat stanowiska badawczego. Wymiary ogólne badanych elementów a), widok stanowiska badawczego z boku b) oraz z góry d), układ zbrojenia głównego i zastosowanych otulin c).

Badanie można podzielić na dwa zasadnicze etapy. Pierwszy z nich polegał na nagraniu badanej powierzchni. Wszystkie cztery belki były pobudzane ciepłnie w tym samym momencie przez okres 10 lub 30 min (im mocniej chce się nagrzać powierzchnię tym promiennik należy ustawić bliżej badanego elementu i nagrzewać przez dłuższy okres czasu). Podczas nagrzewu promiennik był ustawiany zarówno w pozycji poziomej jak i pionowej aby wskazać optymalne położenie lampy w celu zapewnienia jednorodnej powierzchni

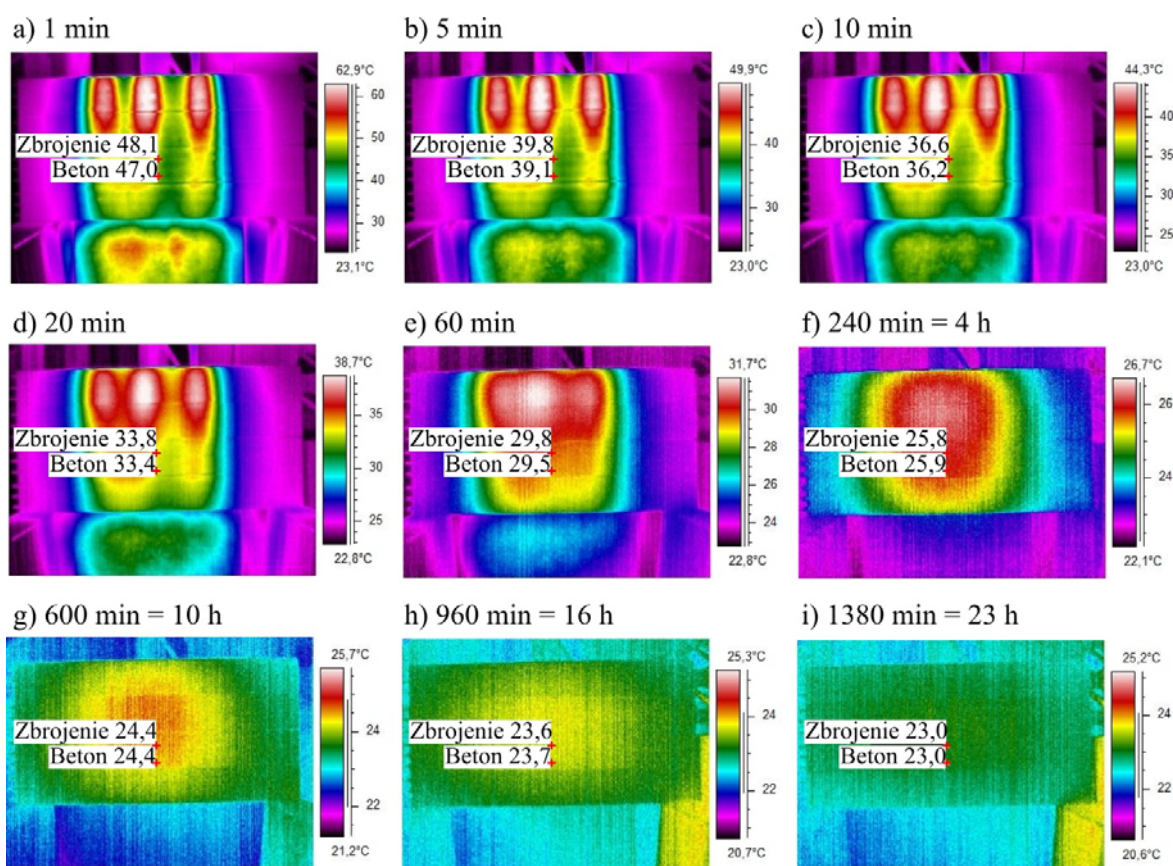
nagrzewu. Drugi etap to moment stygnięcia wcześniej nagrzanego elementu. Podczas stygnięcia następuje cykliczna rejestracja termogramów za pomocą kamery termowizyjnej. Zdjęcia były zapisywane co 1 min. Etap drugi prowadzony był do momentu wyrównania się temperatury powietrza i temperatury powierzchni badanego elementu. Z uwagi na dużą pojemność cieplną belek, rejestracja termogramów trwała do kilkunastu godzin. Dodatkowo przed wykonaniem zdjęć termowizyjnych badano, za pomocą aparatury firmy Almemo,

temperaturę powietrza zewnętrznego oraz wilgotność względną powietrza. Oba parametry uwzględniano w poprawkach przy pomiarach termowizyjnych wprowadzając je do ustawień kamery termowizyjnej. Największym problemem przy wykonywanych badaniach było uzyskanie jednorodnej powierzchni nagrzewu badanej powierzchni belek.

Wyniki

Wykonane termogramy zostały przeanalizowane i opisane w programie ResearchIR firmy Flir. Na poszczególnych termogramach na białym tle znajdują się wartości temperatury (podane w °C) w charakterystycznych miejscach na powierzchni tj. w przekroju gdzie występują stalowe pręty główne - zbrojenie; oraz przekrój jednorodny gdzie nie ma zbrojenie - beton. Punkt pomiaru został oznaczony czerwonym krzyżykiem. Nad każdym zdjęciem termowizyjnym podano czas w

minutach od momentu rozpoczęcia fazy stygnięcia badanej powierzchni. Na rys. 2 zobrazowano zmiany zachodzące w czasie w rozkładzie pola temperatury badanych elementów. Można zaobserwować, że 30 minutowy nagrzew podgrzewa temperaturę powierzchni o ponad 28°C (temperatura powietrza podczas badań wynosiła około 20°C). W pierwszej minucie różnica temperatury między obszarami ze zbrojeniem i bez niego wynosi ponad 1°C (widoczne pręty główne jako obszary chłodniejsze), około 20 min później różnica ta wynosi około 0,4°C, a możliwość lokalizacji prętów jest już niemożliwa. Cały badany element stygnie przez prawie całą dobę - efekt dużej pojemności cieplnej żelbetu. Na rysunku widoczne są 3 pionowo ogrzane obszary. Niestety, w wyniku ogrzewania promiennikiem podczerwieni z odległości 0,5 m w ustawieniu pionowym nie uzyskano jednorodnego nagrzania powierzchni co utrudnia detekcję prętów zbrojenia głównego.



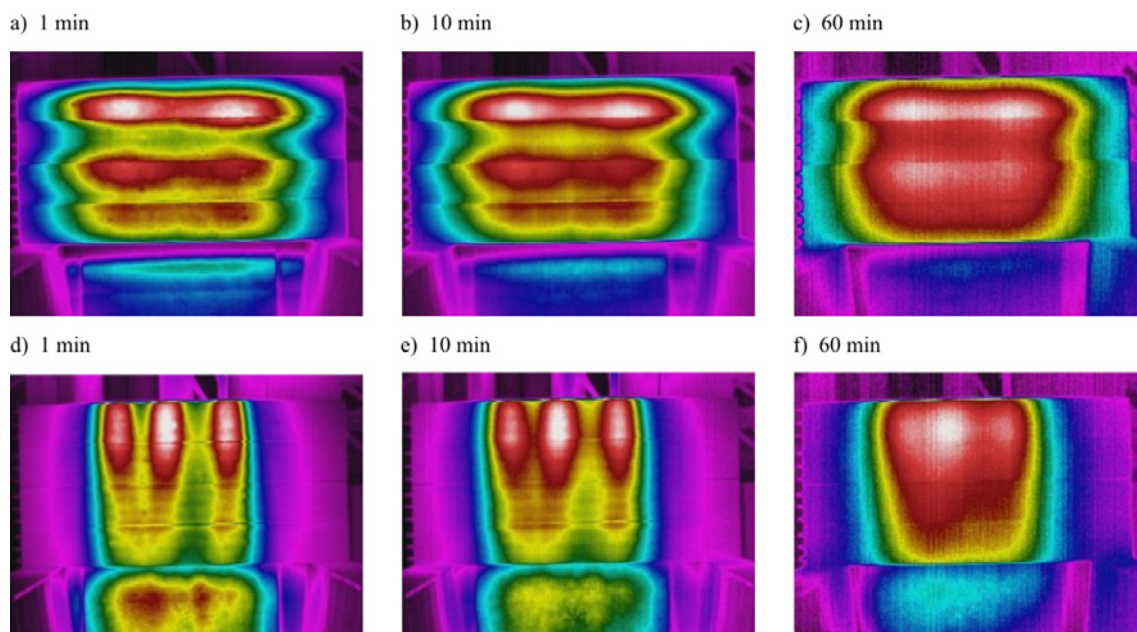
Rys. 2. Zdjęcia termowizyjne wykonywane cyklicznie w fazie stygnięcia elementu (nagrzew z odległości 0,5 m przez 30 min). Nad zdjęciami podany czas od momentu wyłączenia promiennika podczerwieni. Na termogramach podano temperatury (w °C) w charakterystycznych punktach na powierzchni.

W celu poprawienia widoczności prętów zbrojeniowych podczas fazy stygnięcia, sprawdzono poziome ułożenie lamp nagrzewu. Na rys. 3 przedstawiono porównanie efektów grzania lampą (z odległości 0,5 m przez 30 min) w ustawieniu poziomym (górne termogramy) oraz w ustawieniu pionowym (dolne termogramy). Można

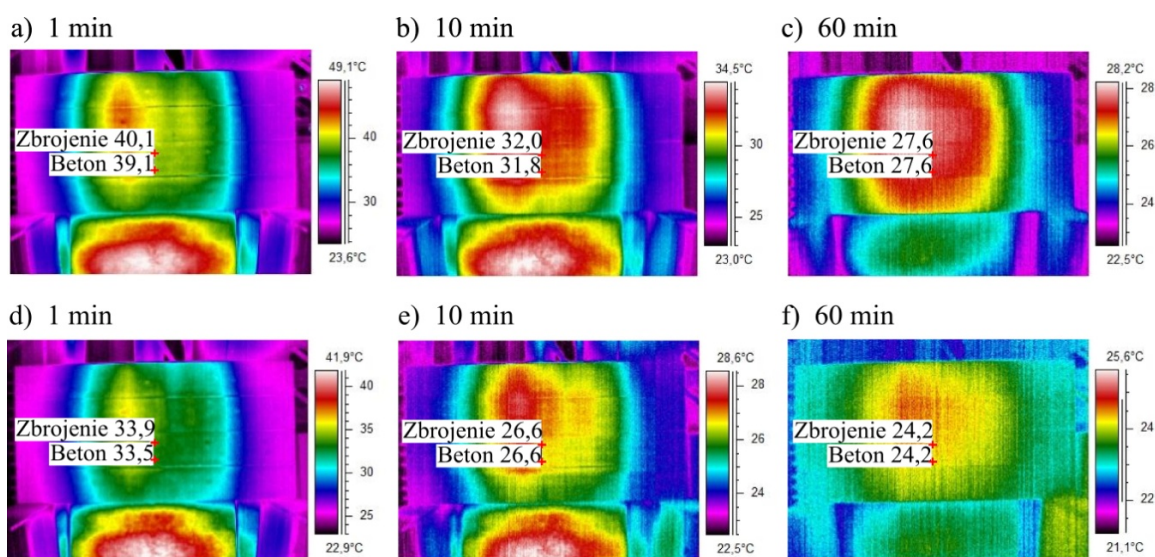
zauważyć, że przy ustawieniu poziomym badane elementy zostały nagrzane jeszcze bardziej nierównomiernie, co powoduje brak możliwości lokalizacji zbrojenia głównego. Uznano, że pionowe ustawienie lamp pozwala na uzyskanie bardziej jednorodnego nagrzania powierzchni i porównywania termogramów

między sobą. Na rys. 4 przedstawiono różnice w rozkładzie pola temperatury przy uwzględnieniu różnych czasów nagrzewania badanych elementów. Nagrzewanie z odległości 1,0 m przez 30 min podwyższa temperaturę powierzchni do około 40°C, natomiast nagrzew z tej samej odległości przez 10 min podgrzewa powierzchnię do około 34°C. Różnica około 6°C jednakże wpływa ona bardzo znacząco na możliwość detekcji zbrojenia głównego. Na rys. 4 a) możliwe są do zaobserwowania

pręty stalowe (różnica temperatury nad obszarami ze zbrojeniem i bez niego wynosi 1°C), natomiast na rys. 4 d) różnica ta wynosi około 0,4°C, a zbrojenie nie jest już widoczne na termogramie. Oczywiście wraz z wydłużaniem się fazy stygnięcia różnice temperatury obszarów ze zbrojeniem jak i bez niego są coraz mniejsze, a cała powierzchnia badanego elementu dąży do wyrównania temperatury z otoczeniem.



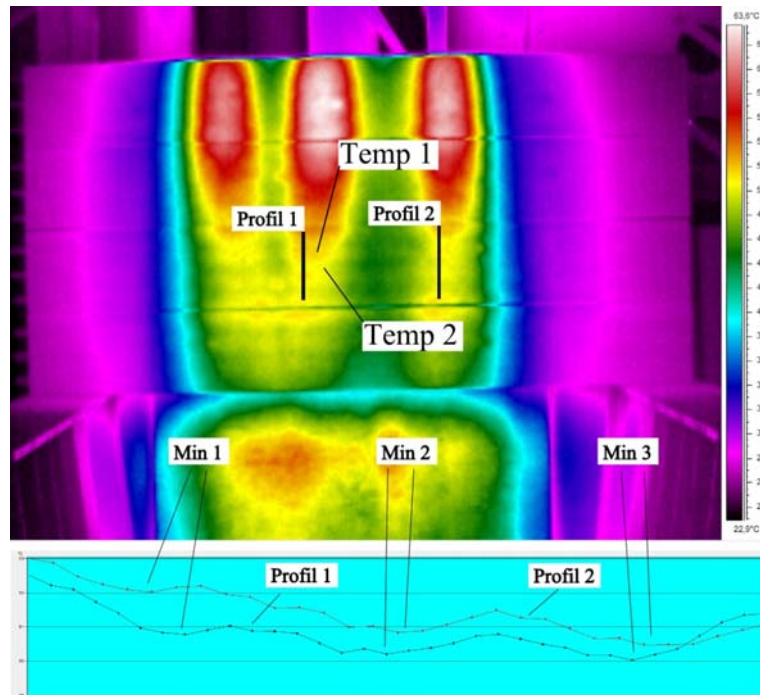
Rys. 3. Zdjęcia termowizyjne dla różnego ułożenia lamp w promienniku podczerwieni względem badanej powierzchni. Ułożenie poziome lamp a) – c) oraz ułożenie pionowe lamp d) – f). Nad zdjęciami podany czas od momentu wyłączenia promiennika podczerwieni.



Rys. 4. Zdjęcia termowizyjne pokazujące różnice w rozkładzie pola temperatury przy nagrzewaniu powierzchni przez okres 30 min a) - c), a przez okres 10 min d) - f). Nad zdjęciami podany czas od momentu wyłączenia promiennika podczerwieni. Na termogramach podano temperatury (w °C) w charakterystycznych punktach na powierzchni.

Dla lepszego zobrazowania różnicy temperatury na całej wysokości belki na rys. 5 (u dołu) przedstawiono przebieg temperatury wzdłuż dwóch linii prostych (profil 1 i profil 2). Na obu profilach widoczne są trzy charakterystyczne obniżenia wartości temperatury oznaczone

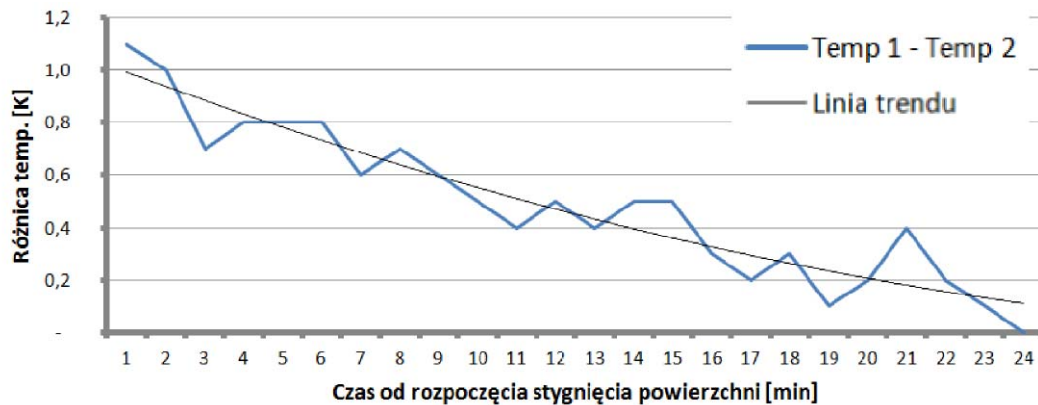
jako: Min 1-3. W tych obszarach występują pręty zbrojenia głównego. Przedstawione wyniki na rys. 5 są dla termogramu wykonanego od razu po wyłączeniu promiennika podczerwieni, który ogrzewał powierzchnię z odległości 0,5 m przez 30 minut.



Rys. 5. Termogram wykonany dla czasu nagrzewania badanej powierzchni przez 30 min z odległości 0,5 m. Zdjęcie zrobione od razu po wyłączeniu promiennika podczerwieni. Pod termogramem zamieszczono rozkład temperatury wzdłuż dwóch prostych (profil 1 i profil 2).

Zmiany zachodzące w czasie podczas wykonywania badań przy użyciu termografii aktywnej można również przedstawić za pomocą kontrastów w czasie (rys. 6). Różnica temperatury pomiędzy dwoma punktami z czego jeden jest dowolny (np. z defektem) a drugi jednorodny (bez defektu) nazywa się kontrastem absolutnym. Rys. 6 pokazuje spadek kontrastu abso-

lutnego w czasie od rozpoczęcia stygnięcia powierzchni do 25 min. Niebieską linią oznaczono kontrast, natomiast czarną - linię trendu. Przy kontraście około 1°C do 0,5°C pręty zbrojeniowe są widoczne pod otuliną 26 mm. Z wykresu można odczytać graniczny kontrast, przy którym widoczne są pręty zbrojenia przy około 12 minucie stygnięcia powierzchni.



Rys. 6. Zmiana temperatury w czasie od momentu wyłączenia nagrzewu dla różnicy temperatur w charakterystycznych punktach powierzchni (Temp 1 – Temp 2). Punkty wg ryc. 5 (Temp 1 – przekrój z samym betonem oraz Temp 2 – przekrój z występującym prętem zbrojenia głównego).

Podsumowanie

Wyniki wstępnych badań potwierdziły możliwość zastosowania termografii aktywnej do lokalizacji prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych przy otulinie do 26 mm. Pręty widoczne są na termogramach od początku fazy stygnięcia i przez kolejne 12-15 min. Należy pamiętać, że im większe zagłębienie (otulina) prętów w betonie tym elementy są coraz słabiej widoczne. W wykonanym badaniu niestety nie uzyskano jednorodnej powierzchni nagrzania, co uniemożliwiło pokazanie różnic w detekcji zbrojenia o różnej średnicy. Naturalnie, przewiduje się, że im większa średnica i im płycej położony pręt tym będzie on lepiej widoczny na termogramie (uzyska się większe kontrasty temperaturowe pomiędzy obszarami ze zbrojeniem i bez niego).

Następnym krokiem w badaniach będzie wyeliminowanie niejednorodności nagrzewania powierzchni (poprzez zsunięcie do siebie sześciu lamp podczerwieni oraz ich równoległe ułożenie względem badanej powierzchni). Przy lokalizacji różnego rodzaju wtrąceń w materiałach jednorodnych niewątpliwie ważnym problemem do rozwiązania są odwrotne zagadnienia przewodzenia ciepła [3]. Dodatkowymi parametrami, które badania mogłyby wskazać, są np. właściwości cieplne badanych wtrąceń i głębokości ich zalegania [1, 2]. Termografia aktywna ma szansę w przyszłości stać się powszechną metodą badania elementów żelbetowych i przegród budowlanych [12], co z pewnością mogłoby się przyczynić do lepszego poznawania konstrukcji budynków i ratowania zabytków - poprzez prowadzenie na nich badań nieniszczących.

Literatura

1. Chudzik, S., Minkina, W., Koncepcja wykorzystania metody termofalowej oraz pomiarów termowizyjnych do wyznaczania parametrów cieplnych materiałów termoizolacyjnych, *PAK*, 2013, vol. 59, 9, s. 920-923.
2. Dudzik, S., Minkina, W., Dwuetapowy algorytm wyznaczania głębokości defektów z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej, *PAK*, 2013, vol. 59, 9, s. 998-1001.
3. Jaremkiewicz, M., Odwrotne zagadnienia wymiany ciepła występujące w pomiarach nieustalonej temperatury płynów, Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2011.
4. Maierhofer, Ch., Brink, A., Rollig, M., Wiggenhauser, H., Quantative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering - Experimental results and numerical simulations, *Construction and Building Material*, 2005, 19, pp. 731-737.
5. Maierhofer, Ch., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., Hillemeier, B., Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures, *Cement & Concrete Composites*, 2006, 28, 393-401.
6. Maldague, X., Marinetti, S., Pulse phase infrared thermography, *Journal Applied Physics*, 1996, 79, pp. 2694-2698.
7. Maldague, X., Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
8. Nahant, M., Paez, S., Van Leeuwen, J., Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering, International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 27-30 Quebec, 2010.
9. Noszczyk, P., Badania obiektów budowlanych – możliwości zastosowania termografii aktywnej. Zagadnienia poruszane przez młodych naukowców 2, Tom 2, Kraków, 2015, s. 644-547.
10. Nowak, H., Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2012.
11. Nowak, H., Kucypera, M., Wybrane problemy badań przegród budowlanych metodą termografii aktywnej, *Inżynieria i Budownictwo*, 2010, 12, 682-687.
12. Nowak, H., Noszczyk, P., Lokalizacja wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych za pomocą termografii aktywnej, *Materiały Budowlane*, 2014, 9, 56-59.
13. Oliferuk, W., Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń. Biuro Gamma, 2008.
14. PN-EN 13187, Właściwości cieplne budynków – jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni, 2001.
15. Rybiński, J., Bednarek, M., Jokiel, A., Stanowisko badawcze do wykrywania i identyfikacji defektów podpowierzchniowych metodą fali cieplnej. Katedra Nauk Ścisłych SGSP, 2010.
16. Richter R., Maierhofer, Ch., Kreutzbruck, M., Numerical method of active thermography for reconstruction of back wall geometry, *NDT&E International*, 2013, 54.
16. Suszyński, Z., Termografia aktywna – modele, metody pomiaru, przetwarzanie obrazów termograficznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2014.
17. Szymanik, B., Frankowski, P., Chadt, T., Chelliah, C., Detection and Inspection of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures Using Active Infrared Thermography with Microwave Excitation and Eddy Current Sensors, *Sensors*, 2016, 16, 234.
18. Wiggenhauser, H., Active IR-applications in civil engineering, *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43, pp. 233-238.