

Paweł NOSZCZYK¹
Henryk NOWAK²

TERMOGRAFIA AKTYWNA JAKO NOWOCZESNA METODA BADAŃ ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

W pracy przedstawiono wykorzystanie termografii aktywnej do nieniszczących badań elementów żelbetowych. Głównym celem opracowania było zbadanie przydatności termografii aktywnej do lokalizacji wtrąceń materiałowych w postaci prętów stalowych w elemencie betonowym. Do pobudzenia cieplnego użyto promiennika podczerwieni ogrzewając badaną powierzchnię długim impulsem ciepła (long pulse thermography). Zastosowano indywidualnie dwa źródła ciepła. Pierwsze z nich składało się z sześciu podłużnych lamp grzejnych łącznie o mocy 6 kW, natomiast drugie źródło ciepła stanowiło szesnastce promienników podczerwieni emitujących energię podczerwoną (każdy o mocy 250 W). Przebadano cztery belki żelbetowe o zróżnicowanej średnicy zbrojenia głównego tj. 12, 16, 20 oraz 25 mm i strzemionach o średnicy 6 mm, w rozstawie co 200 mm. Badaniom poddano również płytę żelbetową o grubości 5 cm zbrojoną siatką z prętów zbrojeniowych o średnicy 8 mm i oczku zbrojenia 100 mm. Badanie składało się z dwóch etapów. Pierwszy polegał na nagrzewie badanej powierzchni, natomiast drugi na cyklicznej rejestracji termogramów. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci termogramów pokazujących różnicę temperatury na powierzchni badanego elementu w miejscu z prętem stalowym i bez pręta (sam beton) w czasie stygnięcia. Przy nagrzewie przez 30 minut, zbrojenie było najlepiej widoczne po około 1-10 minut od rozpoczęcia fazy stygnięcia. Wyniki potwierdzają przydatność użytej metody badań do lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych przy założonych otulinach do 26 mm. Termografia aktywna jako badanie nieniszczące może być alternatywą dla innych znanych metod badawczych, jednakże musi być ona w dalszym ciągu udoskonalana.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, termowizja aktywna, lokalizacja zbrojenia, detekcja prętów stalowych

1. Wprowadzenie

W praktyce budowlanej często występuje potrzeba określenia struktury materiałowej wykonanych elementów budynku, do których można zaliczyć elemen-

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Paweł Noszczyk, Politechnika Wrocławska, Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania, ul. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; tel. 71 320 32 03; pawel.noszczyk@pwr.edu.pl

² Henryk Nowak, Politechnika Wrocławska, Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania, ul. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; tel. 71 320 33 01; henryk.nowak@pwr.edu.pl

ty żelbetowe. W budynkach już istniejących, nieposiadających dokumentacji projektowej (budynki historyczne lub niepełna dokumentacja), gdy zachodzi potrzeba określenia rodzaju zbrojenia, należy wykonać odpowiednie badania inwentaryzacyjne. Mogą to być badania inwazyjne, np. odkrywkowe lub badania nieinwazyjne [1], do których można zaliczyć badania przy użyciu termografii aktywnej. Badania te są znane i rozwijane od lat 90' XX wieku [2]. Wykorzystują one zjawisko promieniowania cieplnego (podczerwonego) i polegają na pobudzeniu cieplnym (ogrzaniu lub ochłodzeniu) badanego elementu i cyklicznej rejestracji termogramów podczas stygnięcia lub ogrzewania się pobudzonej termicznie powierzchni. Występujące zmiany w strukturze materiałowej badanego elementu, tj. np. wtrącenia w postaci prętów stalowych czy pustek powietrznych, powodują zmiany przepływu strumienia ciepła, co skutkuje zaburzeniem rozkładu pola temperatury na powierzchni badanego elementu. Większość publikowanych prac naukowych, z obszaru detekcji wtrąceń materiałowych przy użyciu termografii aktywnej, dotyczy małowymiarowych płytek (grubości do kilku centymetrów) z drobnymi wtrąceniami [3-5].

Aktualnie badania elementów żelbetowych przy użyciu termografii aktywnej nie wyszły poza obszar badań naukowych. W literaturze można spotkać opracowania podobnych zagadnień dla bloków betonowych z dużymi wtrąceniami w postaci prostopadłościennych elementów [6-9], lokalizacją prętów stalowych w betonie z pobudzeniem mikrofalami [10] lub analizy numeryczne [11].

W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania termografii aktywnej do lokalizacji prętów zbrojeniowych w belkach oraz płytach żelbetowych. Zaprojektowane stanowisko badawcze odwzorowywało rzeczywiste elementy żelbetowe spotykane w budynkach. Do pobudzenia cieplnego użyto promienników podczerwieni stymulując badany element długim impulsem cieplnym (long pulse thermography).

2. Opis procedury badawczej

2.1. Budowa stanowiska pomiarowego

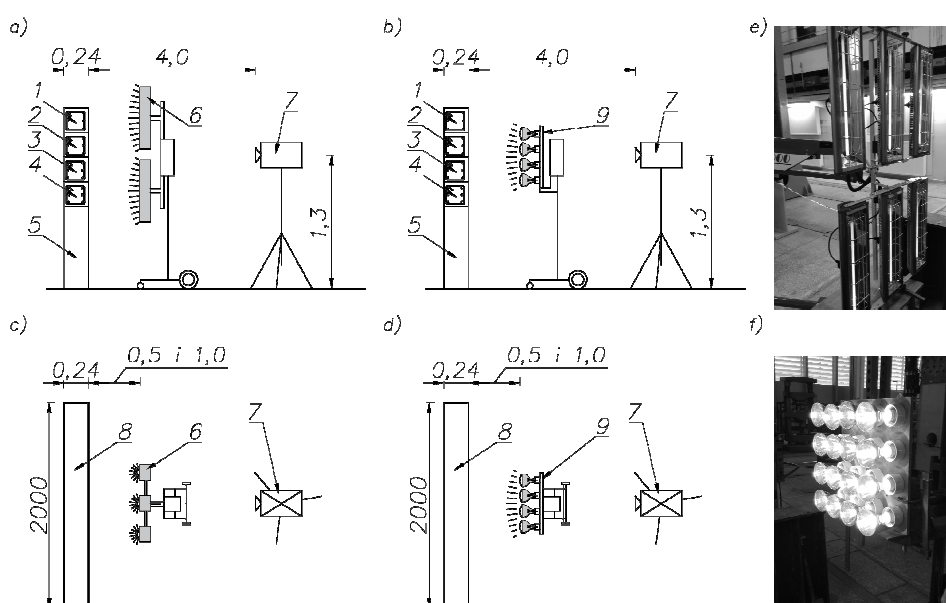
Przebadano cztery belki oraz jedną płytę żelbetową. Przyjęto belki o przekroju poprzecznym 240 x 240 mm i długości 2000 mm, każda z nich miała inne zbrojenie główne, tj. o średnicach 12, 16, 20 oraz 25 mm. Wszystkie belki posiadały strzemiona o średnicy 6 mm w rozstawie co 200 mm. Pobudzeniu cieplnemu i analizie termograficznej został poddany jeden bok, w którym znajdowały się 3 pręty zbrojenia głównego z otuliną 26 mm. Przebadana płyta żelbetowa miała wymiary 1550 x 1550 mm i grubość 50 mm z siatką zbrojeniową o oczku 100 mm i średnicy prętów 8 mm. Na rozkład pola temperatury wpływ miały wymiary geometryczne elementów oraz charakterystyki cieplne badanych materiałów, które zostały podane w tab. 1.

Budowa stanowiska badawczego oraz użytych promienników podczerwieni została przedstawiona na poniższym rys. 1.

Tabela 1. Wartości właściwości cieplnych badanych materiałów, na podstawie [12]

Table 1. The values of thermal properties of the materials tested, based on [12]

Nazwa materiału	Gęstość ρ [kg/m ³]	Ciepło właściwe c_w [J / (kg·K)]	Objętościowa pojemność cieplna $C_{obj} (\rho \cdot c_w)$ [J / (m ³ ·K)]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W / (m·K)]
Beton	2 000	1 000	$2,00 \cdot 10^6$	1,35
Stal	7 900	500	$3,95 \cdot 10^6$	17,0



Rys. 1. Stanowisko badawcze do lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych przy użyciu termowizji aktywnej - źródło ciepła 6x1kW widok z boku (a) źródło ciepła 6x1kW widok z góry (b) źródło ciepła 16x250W widok z boku (c) źródło ciepła 16x250W widok z góry (d) zdjęcie źródła ciepła 6x1kW (e) zdjęcie źródła ciepła 16x250W (f): 1-belka ze zbrojeniem $\varnothing 12\text{mm}$, 2- belka ze zbrojeniem $\varnothing 16\text{mm}$, 3- belka ze zbrojeniem $\varnothing 20\text{mm}$, 4- belka ze zbrojeniem $\varnothing 25\text{mm}$, 5-podparcie belek, 6-promiennik podczerwieni 6x1kW, 7-kamera termowizyjna, 8-badane belki, 9-promiennik podczerwieni 16x250W

Fig. 1. The test stand for the location of steel bars in reinforced concrete elements using active thermography - source of heat 6x1kW side view (a) source of heat 6x1kW top view (b) source of heat 16x250W side view (c) source of heat 16x250W top view (d) image of heat source 6x1kW (e) and image of heat source 16x250W (f): 1- beam reinforcement $\varnothing 12\text{mm}$, 2- beam reinforcement $\varnothing 16\text{mm}$, 3- beam reinforcement $\varnothing 20\text{mm}$, 4- beam reinforcement $\varnothing 25\text{mm}$, 5-prop for beam, 6-infrared lamp 6x1kW, 7-thermovision camera, 8-examined beams, 9- infrared lamp 16x250W

Głównymi elementami stanowiska pomiarowego była kamera termowizyjna, źródło ciepła oraz badane elementy żelbetowe. W pierwszym etapie badań wykorzystywano promiennik podczerwieni firmy Fobo składający się z sześciu podłużnych promienników podczerwieni, każdy o mocy 1kW (rys. 1e). Lampy

były ustawiane zarówno poziomo jak i pionowo względem belek żelbetonowych oraz w dwóch różnych odległościach od ogrzewanej powierzchni tj. 0,5 m oraz 1,0 m. Dla uzyskania bardziej równomiernego ogrzania powierzchni w drugim etapie badań używano lampy grzewczej zbudowanej z 16 promienników podczerwieni, które łącznie miały moc 4kW. Nowe źródło ciepła również było ustawiane 0,5 m i 1,0 m od badanej powierzchni. Przebadana płyta żelbetowa była usytuowana w tym samym miejscu co belki żelbetowe, przy ich badaniach reszta stanowiska pozostawała bez zmian.

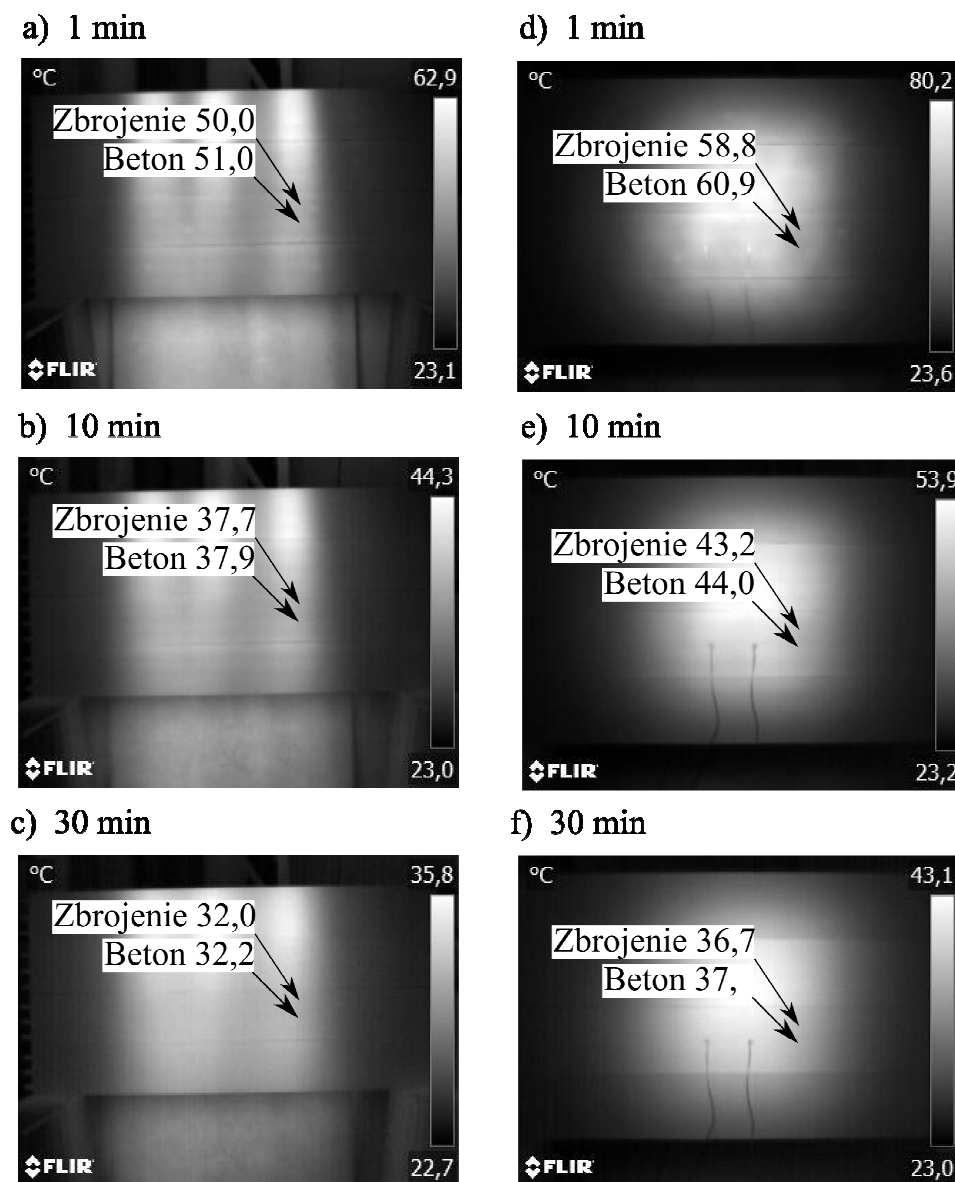
2.2. Metodyka pomiaru termowizyjnego

Do pomiaru użyto kamery termowizyjnej P65 firmy FLIR Systems. Urządzenie to charakteryzuje się rozdzielczością detektora 320 x 240 pikseli oraz czułością na poziomie < 100 mK. Pomiar został wykonany zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami [13-14]. W badaniu można wyróżnić 2 zasadnicze etapy. Pierwszy z nich polegał na ogrzaniu powierzchni badanego elementu promiennikiem ciepła przez określoną długość czasu (elementy były ogrzewane przez 5, 10, 30, 60 a nawet 120 min). W drugim etapie następował proces cyklicznej rejestracji termogramów w odstępach co 10 lub 60 s. Termogramy były rejestrowane do momentu całkowitego ostygnięcia wcześniej ogrzanej powierzchni, tj. temperatura powierzchni była równa temperaturze powietrza wokół elementu. Badanie powtarzano dla różnych czasów nagrzewania powierzchni, różnego usytuowania promiennika podczerwieni względem elementu żelbetowego oraz dla dwóch różnych źródeł ciepła. Wybrane wyniki rozkładu pola temperatury w czasie pokazano w następnym rozdziale.

3. Wybrane wyniki badań i ich analiza

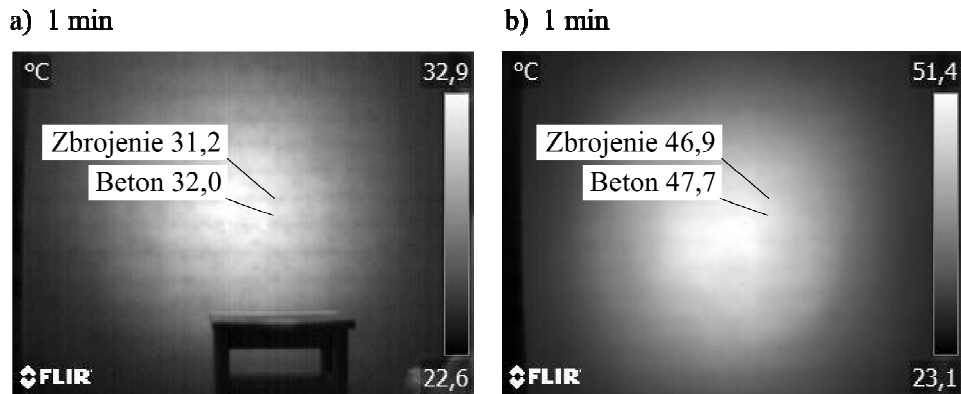
Wybrane wyniki badań zostały przedstawione za pomocą termogramów w paletcie barw grey lub grey10. Nad termogramami podano czasy od momentu rozpoczęcia fazy stygnięcia. Wartości temperatury podano na termogramach w $^{\circ}\text{C}$, dla przekrojów ze zbrojeniem $\varnothing 20$ (oznaczenie "zbrojenie") oraz bez niego (oznaczenie "beton"). Na każdym ze zdjęć termowizyjnych po prawej stronie znajduje się skala temperatur. Na rys. 2. przedstawiono zmianę rozkładu pola temperatury w czasie stygnięcia wcześniej nagrzanej powierzchni belek.

Pokazano dwa źródła ciepła tj. promiennik podczerwieni o sześciu podłużnych lampach grzejnych (a-c) oraz źródło ciepła składające się z 16 promienników podczerwieni (d-f). Dla pierwszej z lamp różnica temperatur na powierzchni w przekroju ze zbrojeniem i bez zbrojenia tuż po wyłączeniu ogrzewania wynosiła 1°C , natomiast dla drugiej lampy $2,1^{\circ}\text{C}$. Wraz z czasem stygnięcia różnice temperatur były coraz niższe. Po około 10-15 minutach zanika możliwość zlokalizowania zbrojenia, a cały element żelbetowy stygnie ponad 20 godzin.



Rys. 2. Termogramy belek żelbetowych dla czasu nagrzewu 30 min z odległości 0,5 m od badanej powierzchni dla różnych czasów stygnięcia, dla lampy o mocy 6x1kW (a-c) oraz dla lampy o mocy 16x250W (d-f)

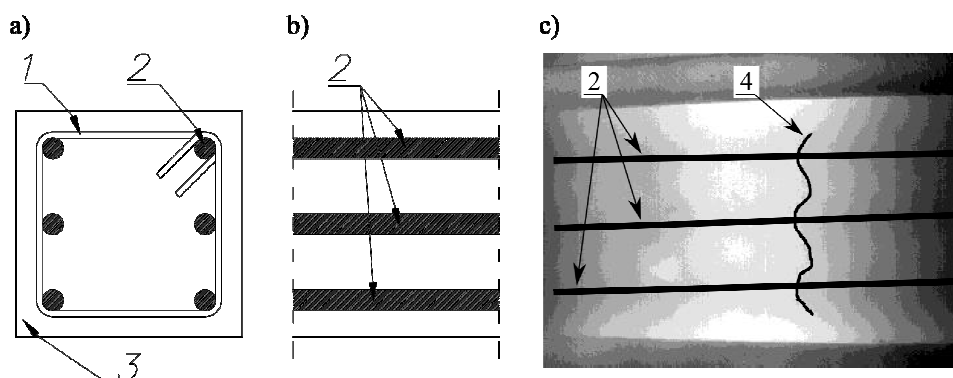
Fig. 2. The thermograms of reinforced beams for 30 min heat up at distance of 0.5 m from the test surface for different time of cooling phase, for lamp with a power 6x1kW (a -c) and for lamp with a power 16x250W (d-f)



Rys. 3. Termogramy płyty żelbetowej (po 1 min stygnięcia) dla czasu nagrzewu 5 min (a) oraz 30 min (b)

Fig. 3. The thermograms of reinforced concrete slab (after 1 min of cooling phase) for 5 min time heated (a) and for 30 min (b)

Na rys. 3 przedstawiono wyniki dla płyty żelbetowej. Po lewej stronie (a) znajduje się termogram dla czasu nagrzewu 5 min natomiast po prawej stronie (b) dla nagrzewu trwającego 10 min. Różnice temperatury w punktach nad zbrojeniem i bez niego wynoszą odpowiednio 1,2 °C oraz 0,8 °C. Zbrojenie w postaci ciemniejszych (zimniejszych) poziomych linii jest lepiej widoczne po lewej stronie. Zatem nie zawsze istnieje potrzeba długiego ogrzewania powierzchni w celu lepszej lokalizacji zbrojenia. Wykonano również dodatkowe zdjęcie termowizyjne z małej odległości, w kadrze znajdowała się tylko belka (ze zbrojeniem o średnicy 20 mm). Na rys. 4 można zaobserwować charakterystyczną fa-



Rys. 4. Belka ze zbrojeniem głównym $\varnothing 20$. Przekrój poprzeczny (a), przekrój podłużny (b) oraz zdjęcie termowizyjne zgodne z przekrojem podłużnym (c): 1 - strzemień, 2 - zbrojenie główne, 3 - beton, 4 - linia zaburzenia pola temperatury

Fig. 4. The beam with the main reinforcement $\varnothing 20$. Cross section (a), longitudinal section (b), and the infrared image in accordance with the longitudinal sectional view (c): 1 - stirrup, 2 - main reinforcement, 3 - concrete, 4 - field disturbance temperature line

lowaną linię (4), która wskazuje zaburzenie pola temperatury. W miejscu występowania stali następuje "wcięcie" niższych temperatur w lewą stronę. Stal w porównaniu do betonu posiada znacznie wyższy współczynnik przewodzenia ciepła oraz wyższą pojemność cieplną. Konsekwencją tego są widoczne chłodniejsze obszary w miejscu występowania w przekroju prętów stalowych.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazują przydatność termowizji aktywnej do lokalizacji prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych. Pręty zbrojeniowe mogą być widoczne zarówno jako różnice temperatury na powierzchni w różnych przekrojach tj. ze zbrojeniem lub bez (rys. 2 i rys. 3) lub jako zaburzenia równomierności temperatury wskazane na rys 4c. Należy pamiętać, że lokalizowane pręty były pod 26 mm warstwą betonu, im otulina zbrojenia będzie większa tym kontrast temperaturowy będzie niższy (detekcja zbrojenia będzie trudniejsza). Wraz z rozwijaniem metody termografii aktywnej oraz uzyskiwaniem lepszych parametrów kamer termowizyjnych, przedstawiona metoda badań może pozwolić na otrzymanie bardziej dokładnych informacji o strukturze materiałowej konstrukcji żelbetowych. Z uwagi na nieniszczący charakter termowizji aktywnej może być ona stosowana również w obiektach zabytkowych. Dalszymi krokami w pracy badawczej będzie rozwiązanie odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła [15-16] oraz rozpoznawanie średnicy zbrojenia w opisanych elementach.

Źródło finansowania i podziękowania

Przedstawiona praca została sfinansowana ze środków programu MŁODA KADRA 2015 na WBLiW PWr. Autorzy pragną podziękować firmie BETARD z Długoleki k/Wrocławia za nieodpłatne wykonanie belek żelbetowych, Prof. Jackowi Kasperskiemu z WM-E PWr za udostępnienie dodatkowej kamery termowizyjnej oraz Laboratorium WBLiW PWr za udostępnienie do badań płyty żelbetowej.

Literatura

- [1] Hoła J., Bień J., Sadowski Ł., Schabowicz K.: Non-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol. 63, No. 1, 2015, pp. 87-96.
- [2] Maldague X., Marinetti S.: Pulse phase infrared thermography. Journal Applied Physics, 79, 1996, pp. 2694-2698.
- [3] Dudzik S., Minkina W.: Dwuetapowy algorytm wyznaczania głębokości defektów z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej, PAK vol. 59, nr 9, 2013.
- [4] Mieloszyk M., Krawczuk M., Malinowski P., Wandowski T., Ostachowicz W.: Active Thermography Method for Delamination Detection and Localisation in Composite Structures, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2012.
- [5] Ohlsson K.E.A., Olofsson T.: Quantative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface, Applied Energy 134, 2014, pp. 499-505.
- [6] 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 28, 2006.

- [7] Milovanović B., Pecur I. B.: Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete, *Journal of Imaging*, 2, 11, 2016.
- [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 QIRT*, Qubec, 2010.
- [9] Cannard H., Mahrez M., Perrin T., Muzet V., Prybyla D., Brachelet F.: The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges, *International Conference on QIRT*, Kraków, 2010.
- [10] Brachelet F., Keo S., Defer D., Breaban F.: Detection of reinforcement bars in concrete slabs by infrared thermography and microwaves excitation, *International Conference on QIRT*, Kraków, 2010.
- [11] Szymanik B., Frankowski P. K., Chady T., Robinson C., Chelliah A. J.: Detection and Inspection of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures Using Active Infrared Thermography with Microwave Excitation and Eddy Current Sensors, *Sensors*, 16, 234, 2016.
- [12] PN-EN ISO 10456:2009: Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
- [13] Nowak. H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [14] PN-EN 13187-2001: Właściwości cieplne budynków – jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni.
- [15] Duda P., Taler J.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, WNT, Warszawa, 2003.
- [16] Ozisik M.N., Orlande H.R.B.: Inverse Heat Transfer. Fundamentals and Application. Taylor & Francis 2000.

ACTIVE IR THERMOGRAPHY AS A MODERN METHOD OF RESEARCH REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Summary

The paper presents the use of active thermography for non-destructive testing of reinforced concrete elements. The main goal of the study was to investigate the method to locate inclusions in the material as steel bars in the concrete element. For thermal stimulation used infrared heating lamp and heated up surface by long impulse. Two heat sources were used individually. The first one consisted of six elongated heating lamp a total power of 6 kW, and the second heat source was composed of sixteen infrared bulbs (each with a power of 250 W). Four reinforcement beams with different diameter of main reinforcement: 12, 16, 20 and 25 mm and stirrups with a diameter of 6 mm, in increments of 200 mm were examined. Also reinforced concrete slab with a thickness of 5 cm and grid reinforced rods of diameter 8 mm were tested. The study consisted of two stages: heat up examined surface, and periodically recording thermograms. The results are shown at thermovision image, it is shown a temperature differences on the surface of the cross-section with steel rod and the cross-section without steel, during cooling process. After 30 minutes heat up, reinforcement bar was visible after about 1-10 minutes from the start of the cooling phase. The results confirm the usefulness the method used to study the location of reinforcement in concrete elements with established lagging up to 26 mm. Active thermography as a non-destructive testing can be an alternative to other well-known research methods, however it must be still improved.

Keywords: non-destructive testing, active thermovision, location of reinforcement, steel bars detection

DOI:10.7862/rb.2016.211

Przesłano do redakcji: 23.05.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.