

Lokalizacja zbrojenia w słupach żelbetowych metodą termowizji aktywnej

Location of reinforcement in reinforced concrete columns using active thermal imaging

dr inż. Paweł Noszczyk (ORCID: 0000-0003-2810-5165), prof. dr hab. inż. Henryk Nowak (ORCID: 0000-0002-3413-2699), Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4895

Streszczenie: W artykule przedstawiono nową, nieniszczącą metodę badawczą lokalizacji zbrojenia w słupach żelbetowych z wykorzystaniem termowizji aktywnej. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły możliwość lokalizacji prętów zbrojeniowych osadzonych głębiej niż ich średnica. Zaproponowana technika pomiarowa polega na ogrzaniu słupa żelbetowego za pomocą promiennika podczerwieni przez okres 120 min do temperatury powierzchni około 80°C, a następnie po wyłączeniu nagrzewu – cyklicznym rejestrowaniu rozkładu pola temperatury na stygnącej powierzchni. Możliwa jest lokalizacja zbrojenia zarówno w sposób jakościowy (wskazanie miejsca ich lokalizacji), jak i ilościowy (wskazanie liczby prętów).

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, termowizja aktywna, słupy żelbetowe, lokalizacja zbrojenia.

Abstract: The article presents a new, non-destructive testing methodology for the location of reinforcement in reinforced concrete columns with the use of active thermography. The conducted experiments confirmed the possibility of locating reinforcing bars embedded deeper than their diameter. The proposed measurement technique consists in heating a reinforced concrete column with an infrared radiator for 120 min to a surface temperature of about 80°C, and then, after switching off the heating, cyclically recording the distribution of the temperature field on the cooling surface. It is possible to locate reinforcement both qualitatively (indicating their location) and quantitatively (indicating the number of bars).

Keywords: non-destructive testing, active thermovision, reinforced concrete columns, location of reinforcement.

1. Wprowadzenie

W obiektach istniejących do badań elementów budowlanych stosuje się zarówno badania niszczące, jak i badania nieniszczące. Do tej drugiej grupy można zaliczyć badania przy użyciu termowizji aktywnej, która umożliwia detekcję różnego rodzaju niejednorodności w strukturze materiałowej badanych elementów budowlanych wykorzystując zaburzony rozkład pola temperatury, spowodowany tymi niejednorodnościami [1–4]. Różne techniki badawcze oraz propozycje ich zastosowań zawarto w normie PN-EN 17119 [5]. Zestawienia aktualnych badań metodą termowizyjną, które dotyczą elementów żelbetowych można znaleźć w pracach [6, 7]. W pracy [8] autorzy stwierdzili, że w elementach betonowych defekty mogą być skutecznie lokalizowane podczas analizy kontrastów temperaturowych do głębokości 0,9 D przy średnicy defektu równej D.

2. Metodyka badań

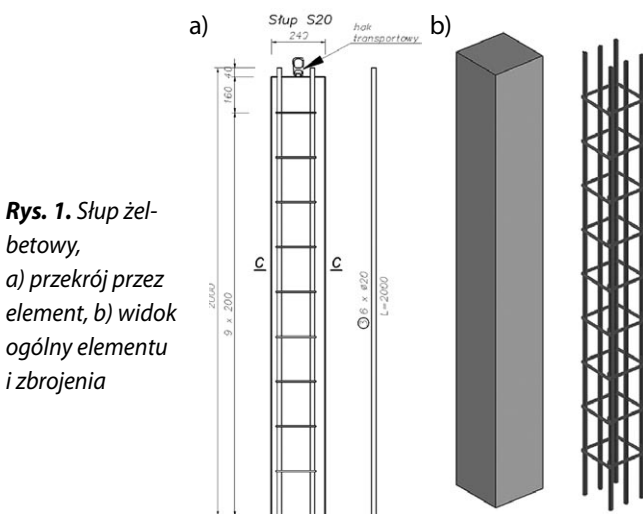
2.1. Elementy badawcze

Elementem badawczym był słup żelbetowy o wymiarach w przekroju 240x240 mm i wysokości 2000 mm (1960 mm żelbetu, ostatnie 40 mm to wystające zbrojenie główne). Słup

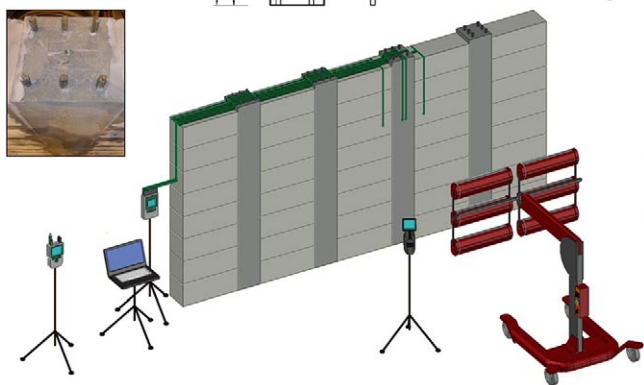
miał strzemiona o średnicy 6 mm w rozstawie 200 mm. Otułina do strzemion (C_{nom}) wynosiła 20 oraz 40 mm (do prętów głównych 26 oraz 46 mm). Pręty zbrojenia głównego ułożone były w jednym rzędzie po 3 sztuki po obu stronach słupa. Przykładowy rysunek słupa S20 (zbrojenie główne o średnicy 20 mm) pokazano na rysunku 1.

2.2. Stanowisko pomiarowe

Słup żelbetowy znajdował się w płaszczyźnie wymurowanej ściany z bloczków z betonu komórkowego o wymiarach 590x240x240 mm. Słupy żelbetowe były zwrócone do kamery termowizyjnej bokiem z 3 prętami. Promiennik podczerwieni o mocy 6x1,2 kW był usytuowany w odległości 0,5 m od słupa żelbetowego. Kamera termowizyjna o rozdzielczości 320x240 pikseli i czułości termicznej 80 mK znajdowała się w takiej odległości od badanej powierzchni, aby cała szerokość słupa żelbetowego znajdowała się w kadrze obiektywu. Dodatkowo na stanowisku badawczym znajdowały się rejestratory temperatury z termopar umieszczonych na przedniej i tylnej powierzchni słupa żelbetowego, laptop do zapisu danych w czasie rzeczywistym oraz czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza wokół stanowiska badawczego. Zdjęcie badanego słupa oraz schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 2.



Rys. 1. Słup żelbetowy,
a) przekrój przez element, b) widok ogólny elementu i zbrojenia



Rys. 2. Zdjęcie badanego elementu oraz schemat stanowiska badawczego

2.3. Procedura badawcza

Badanie doświadczalne podzielono na 3 główne etapy:

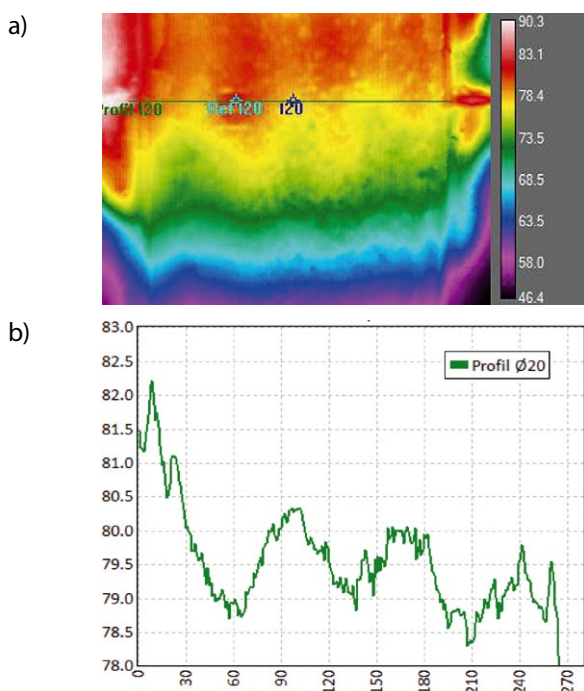
- Etap 1 (przygotowanie): wyznaczenie współczynnika emisyjności badanej powierzchni, pomiar temperatury odbitej, pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza pomiędzy kamerą termowizyjną a badanym elementem oraz wprowadzenie tych danych do ustawień kamery termowizyjnej.
- Etap 2 (nagrzew): włączenie promiennika podczerwieni na określony czas (w przypadku opisywanego pomiaru czas działania promiennika wynosił 120 min).
- Etap 3 (stygnięcie): w momencie wyłączenia źródła ciepła rozpoczęcie cyklicznej rejestracji rozkładu pola temperatury w czasie stygnięcia elementu (w przypadku opisywanego pomiaru termogramy były zapisywane co 20 s).

Czas prowadzonego nagrzewu oraz czas rejestracji termogramów jest zależny od rodzaju badanych materiałów, wymiarów badanego elementu, rodzaju i położenia poszukiwanych wtrąceń materiałowych. Podczas badań budowlanych elementów żelbetowych autorzy zaobserwowali, że czas nagrzewu powinien wynosić co najmniej 30 minut, a zaburzony rozkład pola temperatury na wskutek występowania stalowych prętów zbrojeniowych w elemencie betonowym był widoczny tylko przez pierwsze kilkanaście minut fazy stygnięcia.

3. Wyniki

3.1. Metodyka opracowywania wyników

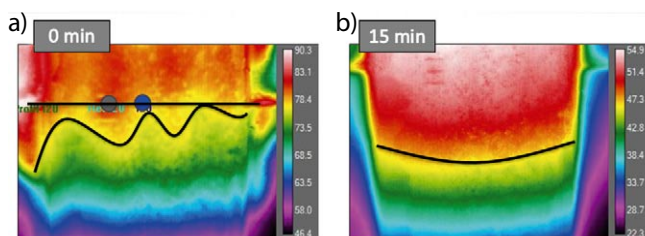
Otrzymane wyniki badań doświadczalnych opracowano za pomocą dedykowanego oprogramowania firmy FLIR: ResearchIR 4 MAX. Temperatury były odczytywane w programie dla punktu pomiarowego o wielkości 3x3 piksele. Przykładowy termogram z badań oraz profil temperatury pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Wybrane wyniki pomiaru temperatury: a) rozkład pola temperatury na termogramie dla czasu 0 min; b) profil temperatury dla czasu 0 min wzdłuż całej szerokości słupa żelbetowego (czasy są podane od momentu wyłączenia źródła ciepła)

3.2. Wyniki

Dla opisanego doświadczenia temperatura powierzchni słupów żelbetowych wzrosła do około 80°C (przy nagrzewie promiennikiem podczerwieni o mocy 6x1,2 kW przez 120 min z odległości 0,5 m). Stalowe pręty zbrojenia głównego umieszczone pod 26 mm otuliną betonową powodowały zaburzenie rozkładu pola temperatury w postaci zakrzywionej linii izoterm (rys. 4a). Zaburzenie to było widoczne



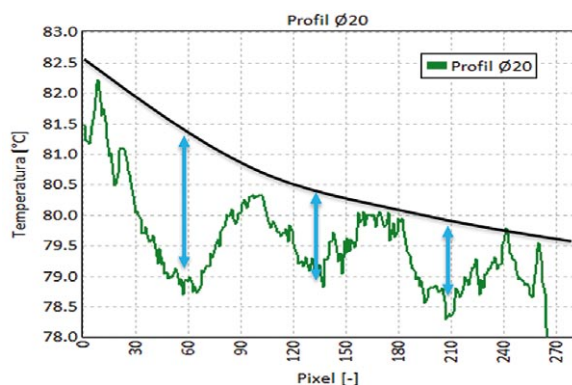
Rys. 4. Wybrane wyniki pomiaru rozkładu pola temperatury na powierzchni słupa żelbetowego: a) dla czasu 0 min; b) dla czasu 15 min (czasy są podane od momentu wyłączenia źródła ciepła)

przez około 10 min od wyłączenia źródła ciepła i już po upływie około 15 min temperatura wyrównywała się na całej szerokości słupa żelbetowego (rys. 4b, linia czarna), co powodowało brak możliwości dalszej lokalizacji prętów zbrojeniowych (rys. 4b). Miejsca występowania zbrojenia są widoczne na termogramie jako obszary chłodniejsze (rys. 4a, niebieska kropka), natomiast przekroje bez prętów stalowych (sam beton) są to obszary charakteryzujące się wyższą temperaturą (rys. 4a, szara kropka). Profil temperatury dla czasu 0 min od wyłączenia źródła ciepła poprowadzono wzdłuż czarnej prostej linii (rys. 4a), natomiast wartości temperatur wzdłuż tego profilu pokazano na rysunku 5. Analiza zdjęć termowizyjnych przez pierwsze kilkanaście minut fazy stygnięcia pozwoliła na jakościową lokalizację położenia prętów zbrojenia głównego jako obszary chłodniejsze w stosunku do przekroju betonowego. Wykonując dodatkową analizę profilu temperatury dokonano oceny ilościowej w postaci liczby prętów zbrojeniowych występujących na badanym boku słupa żelbetowego. Każde występowanie pręta zbrojeniowego jest widoczne na profilu temperatury w postaci odchylenia rzeczywistego profilu temperatury (linia zielona na rysunku 5) od przewidywanego idealnego rozkładu temperatury wzdłuż profilu w przypadku materiału jednorodnego bez wtrąceń (rys. 5 – linia czarna). Na rysunku 5 można zauważyć, że odchylenia rzeczywistego profilu temperatury wynosiły około 2°C od przewidywanego idealnego profilu temperatury. Każde takie wychylenie oznacza występowanie pręta zbrojeniowego i zostało oznaczone strzałką (rys. 5).

4. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły wyciągnąć poniższe wnioski.

- Możliwe jest lokalizowanie na termogramach prętów zbrojeniowych w słupach żelbetowych z warstwą otuliny o grubości do 26 mm, nieniszczącą metodą badań z użyciem termografii aktywnej.
- W słupach żelbetowych pręty zbrojeniowe są możliwe do lokalizacji tylko przez pierwsze 10 min fazy stygnięcia.



Rys. 5. Profil temperatury dla czasu 0 min wzdłuż całej szerokości słupa żelbetowego w miejscu wskazanym na rysunku 4a – czarna linia prosta (czas jest podany od momentu wyłączenia źródła ciepła)

- W celu równomiernego ogrzania powierzchni, należy usytuować promiennik podczerwieni minimum 50 cm od badanej powierzchni.
- W celu zlokalizowania prętów zbrojeniowych wewnątrz słupów żelbetowych nie jest wymagane ogrzewanie powierzchni do wysokich temperatur, tj. ponad 90°C.
- Pręty zbrojeniowe w słupach żelbetowych są najlepiej widoczne od razu po wyłączeniu źródła ciepła.
- Możliwe jest lokalizowanie prętów zbrojeniowych dla głębokości ich położenia wynoszącej powyżej ich średnicy.

5. Podsumowanie

Zastosowana metoda badawcza potwierdziła możliwość lokalizowania prętów zbrojeniowych nieniszczącą metodą badań z użyciem termografii aktywnej w słupach żelbetowych. Zbrojenie może być lokalizowane w sposób jakościowy (lokalizowanie miejsca położenia prętów) jak i w sposób ilościowy (określenie liczby prętów zbrojeniowych). Autorzy wskazują na następujące kierunki dalszych badań:

- lokalizację zbrojenia metodą termografii aktywnej w elementach żelbetowych ze skomplikowaną geometrią zbrojenia (np. zbrojenie w dwóch rzędach),
- badania doświadczalne elementów budowlanych z użyciem innego rodzaju pobudzenia cieplnego np. laser, mikrofała, ciepłe powietrze,
- badania terenowe z wykorzystaniem energii pobudzenia cieplnego promieniowania słonecznego,
- badania ilościowe określające grubość otuliny i średnicę prętów zbrojeniowych.

Podziękowanie

Autorzy składają podziękowanie dr. hab. inż. Jackowi Kasperskiemu z Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej za udostępnienie dodatkowej kamery termowizyjnej do przeprowadzenia badań doświadczalnych oraz firmie BETARD z Długołęki k. Wrocławia, za nieodpłatne wykonanie i transport elementów badawczych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nowak H., Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012
- [2] Wiggenshauser H., Active IR-applications in civil engineering, Infrared Physics and Technology, 2002
- [3] Noszczyk P., Lokalizacja wtrąceń materiałowych w wybranych przegrodach budowlanych za pomocą termografii aktywnej, praca doktorska, listopad 2022
- [4] PN-EN 17119:2019: Badania nieniszczące – Badania termograficzne – Termografia aktywna, 2019
- [5] Noszczyk P., Nowak H., Inverse Contrast in Non-Destructive Materials Research by Using Active Thermography, Materials 12(5)2019
- [6] Milovanović B., Banjad Pečur I., Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete, Journal of Imaging, 2016
- [7] Noszczyk P., Nowak H., Termografia aktywna jako nowoczesna metoda badań elementów żelbetowych, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, z. 63(3/16), 7–9/2016, str. 279–286
- [8] Cotić P., Kolarčić D., Bosiljkov V. B., Bosiljkov V., Jagličić Z., Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography, NDT E Int, 2015