

prof. dr hab. inż. Henryk Nowak<sup>1\*)</sup>  
dr inż. Łukasz Nowak<sup>1)</sup>  
mgr inż. Paweł Noszczyk<sup>1)</sup>

## Nieniszczące badania przegród budowlanych za pomocą termografii aktywnej

### *NDT of building envelope with active thermography*

DOI: 10.15199/33.2015.10.19

(Oryginalny artykuł naukowy)

**Streszczenie.** Jedną z nieniszczących metod badania przegród budowlanych o nieznannej strukturze jest termografia aktywna w trybie odbiciowym. Metodę tę zastosowano do badania modeli ściany betonowej, z płyt OSB oraz płyt g-k z zamodelowanymi wtrąceniami materiałowymi o znacznie różniących się właściwościach cieplnych. Badanie w komorach klimatycznych polegało na nagrzewaniu modelu ściany impulsem ciepła o mocy 7,2 kW, a następnie rejestrowaniu termogramów podczas stygnięcia ściany, w stałych odstępach czasu za pomocą kamery termowizyjnej. Na podstawie zarejestrowanego na termogramach rozkładu temperatury wnioskowano o właściwościach cieplnych i położeniu defektów powierzchniowych.

**Słowa kluczowe:** przegrody budowlane, badania termowizyjne, termografia aktywna.

**Abstract.** One of the non-destructive testing methods of building envelope of unknown structure is active thermography in reflective mode. This method was used to test model of the concrete wall and model made of oriented strand board (OSB) and drywall with the inclusions of materials with significantly different thermal properties. The study in climatic chambers consisted on heating the model wall heat pulse of 7,2 kW, and then recording the thermograms during cooling wall, at regular intervals, using a thermal imaging camera. Based on the thermograms recorded temperature distribution requested thermal properties and location of subsurface defects.

**Keywords:** building envelope, thermographic survey, active thermography.

Tradycyjne termowizyjne badania budynków i innych obiektów budowlanych polegają na identyfikacji rozkładu temperatury na ich powierzchniach granicznych, tj. na powierzchni zewnętrznej i od strony pomieszczenia, bez kontrolowanej zewnętrznej ingerencji i stymulacji cieplnej w ich stan termodynamiczny [3]. Na podstawie otrzymanego powierzchniowego rozkładu temperatury (termogramu) badanej przegrody budowlanej wnioskuje się o stanie izolacyjności cieplnej przegrody (ocena jakościowa). W praktyce oznacza to, że termiczną obudowę budynków bada się „w stanie takim, jaki jest”, bez dodatkowego kontrolowanego wymuszenia termicznego. Tego typu badania budynków są badaniami klasycznymi, od wielu lat najczęściej stosowanymi i umownie określanymi jako „termografia w podczerwieni” lub „badania termowizyjne”.

Termografia aktywna służy do wykrywania defektów lub wtrąceń materiałowych w przypowierzchniowej warstwie badanego materiału (przegrody bu-

dowlanej) oraz do wyznaczania nieznanymi właściwościami cieplnymi materiałów tworzących badany element. Metoda aktywna termografii w podczerwieni polega na świadomym i kontrolowanym zewnętrznym wymuszaniu (wzbudzeniu) cieplnym badanego elementu źródłem ciepła o dużej mocy, rzędu kilku lub kilkudziesięciu kW, w celu wywołania kontrastu termicznego między obszarami zawierającymi defekty (wtrącenia) materiałowe a obszarem jednorodnym i na cyklicznej rejestracji obrazów termalnych podczas stygnięcia elementu po wyłączeniu stymulującego źródła ciepła [1, 2, 4, 5, 6]. Niejednorodności w budowie przegród są widoczne w postaci zróżnicowanych obszarów termalnych, których temperatura różni się od temperatury pozostałej części badanej przegrody, co wynika z ich odmiennych właściwości przewodzenia ciepła. Pomiar rozkładu temperatury na powierzchniach przegrody można prowadzić zarówno po stronie pobudzanej (tzw. tryb odbiciowy), jak i po stronie tylnej (tzw. tryb transmisyjny) [7, 8]. Tryb transmisyjny termografii aktywnej jest stosowany do wykrywania wtrąceń materiałowych (defektów) położonych głęboko, tj. bliżej nienapromieniowywanej strony ba-

danej przegrody. Natomiast tryb odbiciowy jest wykorzystywany do wykrywania wtrąceń materiałowych (defektów) położonych płytko pod napromieniowywaną cieplnie powierzchnią.

W artykule przedstawiono wyniki badań ściany z bloczków betonowych oraz modeli przegród z płyt gipsowo-kartonowych i płyt OSB ze świadomie wprowadzonymi wtrąceniami materiałowymi na różnej głębokości, z materiałów znacznie różniących się przewodnością cieplną, za pomocą metody termografii aktywnej w trybie odbiciowym. Celem badań była ocena skuteczności tej metody do identyfikacji rozmiarów i głębokości zalegania defektów materiałowych.

### Opis badań i przykładowe wyniki

Badania przeprowadzono na modelach przegród z płyt OSB o łącznej grubości 64 mm i płyt g-k o łącznej grubości 66 mm oraz w komorach klimatycznych w laboratorium Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, w których zbudowano przegrodę grubości 310 mm z bloczków betonowych. Wtrącenia materiałowe zostały wykonane z materiałów znacznie różniących się współczynni-

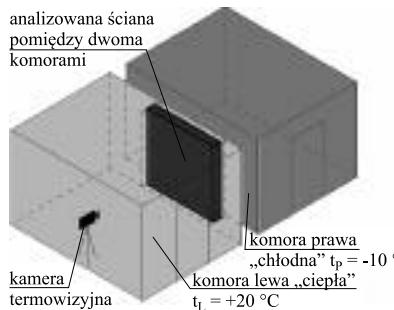
<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:  
e-mail: henryk.nowak@pwr.edu.pl

kiem przewodzenia ciepła, tj. z polistyrenu ekstrudowanego ( $\lambda = 0,33$  [W/mK]), granitu ( $\lambda = 3,5$  [W/mK]) oraz stali ( $\lambda = 50,0$  [W/mK]), każde z nich o wymiarach 200 x 100 x 20 mm. Stanowiska badawcze przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

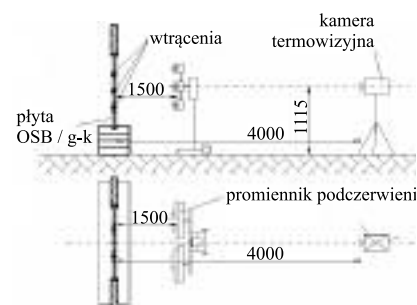
Wtrącenia materiałowe zostały umieszczone w ścianie z bloczków betonowych (2,0 x 2,0 m) na głębokości 40 oraz 60 mm. W modelach przegrody z płyt OSB oraz płyt g-k (oba o wymiarach 1,20 x 1,20 m) te same wtrącenia były umieszczone pod warstwą materiału jednorodnego grubości 22 mm. Schemat geometryczny badanych przegród budowlanych i miejsca występowania defektów przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

W przypadku modelowej przegrody wykonanej z bloczków betonowych badanie przegród z wtrąceniami polegało na nagrzewaniu ich powierzchni od strony wtrąceń (ciepła strona) promiennikami podczerwieni o sumarycznej mocy 7,2 kW. Czas nagrzewania wynosił 40 min, a równomierność nagrzewania przegrody o powierzchni 2,0 x 2,0 m była realizowana przez



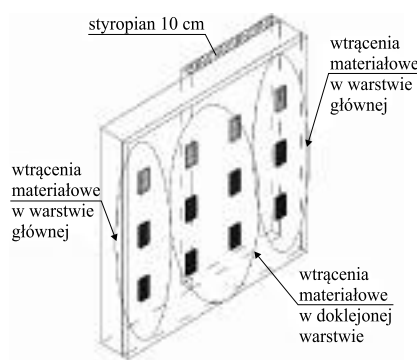
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do badań przegrody z bloczków betonowych w komorach klimatycznych

Fig. 1. Scheme of test stand in climatic chamber model made from concrete blocks



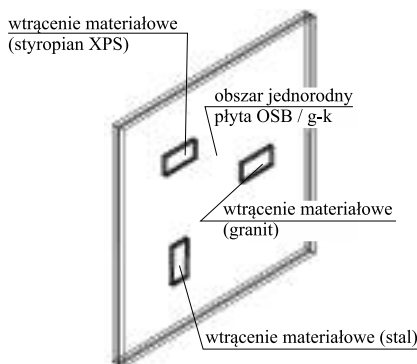
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do badań modeli przegród z płyt OSB oraz płyt g-k

Fig. 2. Scheme of test stand for wall model made from OSB board and drywall



Rys. 3. Schemat budowy badanej przegrody z bloczków betonowych

Fig. 3. Diagram of tested concrete block wall drywall



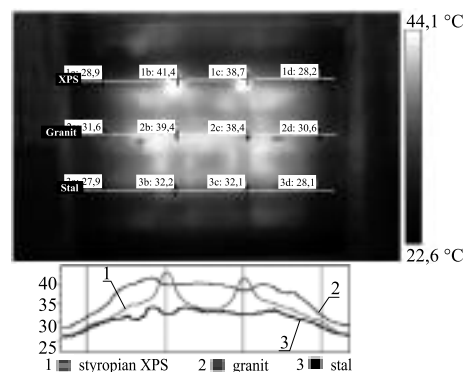
Rys. 4. Schemat budowy badanej przegrody z płyt g-k oraz płyt OSB

Fig. 4. Diagram of tested OSB board wall and drywall

ustawianie ramienia statywu z promiennikami podczerwieni na zmianę w trzech pozycjach co ok. 5 min. Po zakończeniu nagrzewania powierzchni ściany rejestrowano rozkład temperatury stygnącej powierzchni przegrody za pomocą kamery termowizyjnej. W celu przyspieszenia procesu stygnięcia przegrody i ukierunkowania przepływu ciepła przez nią, zdecydowano się na włączenie komory prawej (zimnej) w trybie chłodzenia o temperaturze powietrza  $t_p = -10$  °C. Termogramy rejestrowano w odstępach 15 min. (kamery FLIR P65 oraz FLIR B360). Badania modeli przegród z płyt g-k oraz płyt OSB nie były wykonywane w komorach klimatycznych. Po obu stronach modelu występowały naturalne warunki temperaturowe, tj. 20°C. Tak jak w przypadku przegrody betonowej doświadczenie podzielono na dwa etapy. W pierwszym nagrzewano powierzchnię (tym samym promiennikiem podczerwieni) przez 30 min z odległości 0,5 m i 1,0 m od powierzchni przegrody. W drugim etapie rejestrowano

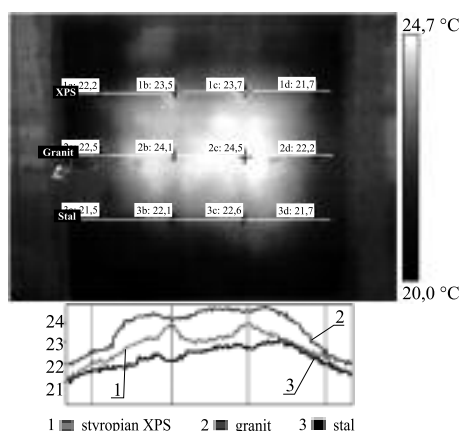
cyklicznie termogramy co 60 s do momentu wyrównania pola temperatury na całej powierzchni badanego elementu, tj. przez 5 h. Przykładowe wyniki badania w komorach klimatycznych ściany z bloczków betonowych z wtrąceniami materiałowymi przedstawiono na rysunkach 5 i 6, na których widoczne są termogramy ściany tuż po wyłączeniu promienników podczerwieni ( $t = 0$  min) oraz w trakcie stygnięcia ściany po upływie 120 min. Natomiast pod termogramami przedstawiono przebieg temperatury powierzchni ściany wzdłuż poziomych linii pomocniczych biegnących na poziomie wtrąceń materiałowych w czasie jej stygnięcia.

Wyniki dla modelu z płyt OSB i g-k pokazano na rysunku 7 w postaci termogramów w charakterystycznych momentach przeprowadzanego pomiaru (stygnięcia przegrody). Na rysunku 7e i 7f



Rys. 5. Rozkład pola temperatury przegrody betonowej w przypadku czasu stygnięcia  $t = 0$  min

Fig. 5. Distribution of surface temperature for concrete wall for cooling time  $t = 0$  min



Rys. 6. Rozkład pola temperatury przegrody betonowej w przypadku czasu stygnięcia  $t = 120$  min

Fig. 6. Distribution of surface temperature for concrete wall for cooling time  $t = 120$  min

pokazano różnicę lokalizacji wtrąceń w odniesieniu do początkowej temperatury ogrzania elementu. Wystarczające było nagrzanie elementu do temperatury 50 °C (rysunek 7e), aby móc zlokalizować położenie przekrojów z wtrąceniami. Nagrzewanie do wysokiej temperatury (90 °C – rysunek 7f) wymuszało zbliżenie promiennika ciepła do badanego elementu, co w konsekwencji spowodowało nierównomierne ogrzanie powierzchni. Jest to widoczne w postaci trzech poziomych pasów, które zostały ogrzane nieco mocniej od pozostałej części elementu, co w konsekwencji zaburzyło lokalizację wtrąceń w modelu przegrody. Do opisu zmian pola temperatury w czasie używa się również bardzo często różnego rodzaju kontrastów temperaturowych [2, 7].

sowania tej metody w praktyce. Na podstawie badań i wyników sformułowano następujące wnioski:

- metoda jest skuteczna w przypadku lokalizacji wtrąceń materiałowych znajdujących się wewnątrz ściany betonowej w odległości do 5 + 6 cm od strony nagrzewanej powierzchni ściany;
- w przypadku wtrąceń ukrytych pod warstwą płyty OSB lub płyty g-k o grubości ok. 22 mm najlepiej widoczne wtrącenia są po 20 – 30 min od rozpoczęcia stygnięcia elementu;
- do lokalizacji wtrąceń (model OSB i g-k) nie jest wymagane nagrzewanie powierzchni do wysokiej temperatury. W przypadku modelowej przegrody (lokalizacja wtrąceń do 20 – 30 mm pod powierzchnią tynków i wykończeń drewnianych) wystarczająca jest temperatura nagrzania powierzchni do ok. 50 °C;

• analizę termogramów zaleca się przeprowadzić profesjonalnym programem komputerowym, np. ThermoCAM Researcher Pro.

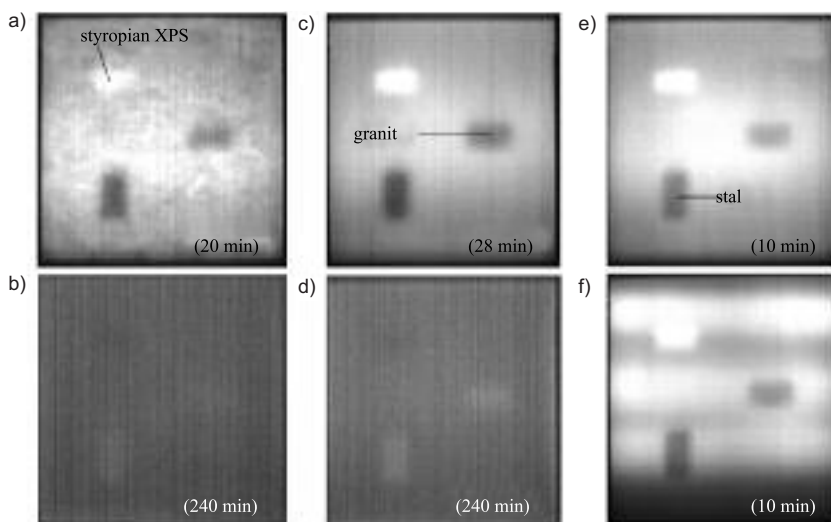
W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych. Dalszym etapem badań będzie analiza zagadnień odwrotnych przewodzenia ciepła. Aby zidentyfikować rozmiary i głębokość zalegania wtrącenia materiałowego w ścianie metodą termografii aktywnej w trybie odbiciowym, niezbędne jest zastosowanie odpowiedniego modelu matematycznego opisującego związek między czasowo-przestrzennym rozkładem temperatury a sygnałem diagnostycznym [9, 10, 11, 12].

*Wszystkie fotografie i rysunki – Autorzy*

## Literatura

- [1] Maierhofer Ch., Brink A., Rollig M., Wiggenghauser H. Quantative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations. *Construction and Building Material*, vol. 19, 2005.
- [2] Maierhofer Ch., Arndt R., Rolling M., Rieck C., Walther A., Scheel H., Hillemeier B., Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, Issue 4, April 2006.
- [3] Maldague X., Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [4] Maldague X., Marinetti S.: Pulse phase infrared thermography. *Journal Applied Physics*, 79, (1996), 2694 – 2698.
- [5] Nowak H., Kucypera M., Application of active thermography for detecting material defects in the building envelope. *Infrared Camera Applications Conference: InfraMation 2010, Proceedings Vol. 11, November 8 – 12, 2010, Las Vegas, NV, USA*, 369 – 380.
- [6] Nowak H., Kucypera M., Wybrane problemy badań przegród budowlanych metodą termografii aktywnej. *Inżynieria i Budownictwo* 12/2010, 682 – 687.
- [7] Nowak H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.*
- [8] Oliferuk W., Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń. *Biuro Gamma, Warszawa 2008.*
- [9] Ozisik M. N., Orlande H. RB., *Inverse Heat Transfer. Fundamentals and Application*. Taylor & Francis 2000.
- [10] Duda P., Taler J.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, WNT, Warszawa, 2003.
- [11] Richter R., Maierhofer Ch., Kreutzbruck M.: Numerical method of active thermography for reconstruction of back wall geometry. *NDT&E International* 54 (2013) str. 189 – 197.
- [12] Wiggenghauser H.: Active IR-applications in civil engineering. *Infrared Physics & Technology* 43 (2002), str. 233 – 238.

*Przyjęto do druku: 20.08.2015 r.*



**Rys. 7.** Wybrane termogramy analizowanych modeli przegród w przypadku różnego czasu stygnięcia: (a, b) model z płyt OSB, (c, d) model z płyt g-k, (e, f) model z płyt g-k z nagrzewaniem z odległości 1,5 m i 0,5 m

*Fig. 7. Selected thermograms for analyzed wall models for different cooling time: (a, b) OSB board model, (c, d) drywall model, (e, f) drywall model preheated from a distance of 1,5 m and 0,5 m*

## Podsumowanie i wnioski

Termografia w podczerwieni jest bardzo wydajnym i skutecznym narzędziem do oceny ukrytych defektów materiałowych w przegrodach budowlanych przez lokalizację powierzchniowych anomalii rozkładu temperatury na granicznych powierzchniach przegród. Przeprowadzone badania ściany betonowej oraz modeli przegród z płyt g-k i OSB z zamodelowanymi wtrąceniami materiałowymi, metodą termografii aktywnej w trybie odbiciowym, pozwalają na uogólnienie wniosków, dotyczących przydatności sto-

• zaleca się, aby do równomiernego nagrzewania ściany stosować promienniki podczerwieni o kilku lampach i sumarycznej mocy 6 – 7 kW, a czas nagrzewania ściany nie powinien być krótszy niż 40 – 45 min (przegrody masywne) lub 30 min (przegrody lekkie) z odległości ok. 1,0 m od badanej ściany;

• wskazane jest rejestrowanie termogramów stygnącej ściany min. co 10 min, przy czym w zależności od masy przegrody badanie to powinno trwać co najmniej 8 h (masywne przegrody) lub 5 h (lekkie przegrody);