

prof. dr hab. inż. Henryk Nowak*
mgr inż. Paweł Noszczyk*

Lokalizacja wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych za pomocą termografii aktywnej

Identification of material inclusions in the building envelope using active thermography

Streszczenie. Artykuł porusza zagadnienie badań przegród budowlanych za pomocą termografii aktywnej. Szczególny nacisk położono na jej zastosowanie do wykrywania różnego rodzaju wtrąceń materiałowych w ścianach. Podane są przykłady wykorzystania termografii aktywnej oraz opis wykonywanego badania modelowej przegrody z wtrąceniami z materiałów znacznie różniących się współczynnikiem przewodzenia ciepła i pojemnością cieplną, tj. ze styroduru, stali oraz granitu. Porównano ze sobą i poddano analizie otrzymane termogramy dla każdego rodzaju wtrącenia. Artykuł zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań oraz wskazuje możliwości rozwoju i zastosowania tego typu badań w budownictwie.

Słowa kluczowe: przegroda budowlana, wtrącenia materiałowe, termografia aktywna.

Abstract. Paper contains problem of building envelope investigation with active thermography. Mainly emphasized is its application to detection of many different material inclusions in wall. Examples of active thermography application and description of experimental investigation has been shown on model envelope with inclusion of materials significantly different thermal conductivity and heat capacity of styrofoam, steel and granite. Thermograms received for every kind of inclusion have been compared and analyzed. Finally, summary and conclusion have been shown along with prospects of development and practical application of this kind of investigation in construction.

Keywords: building envelope, material inclusions, active thermography.

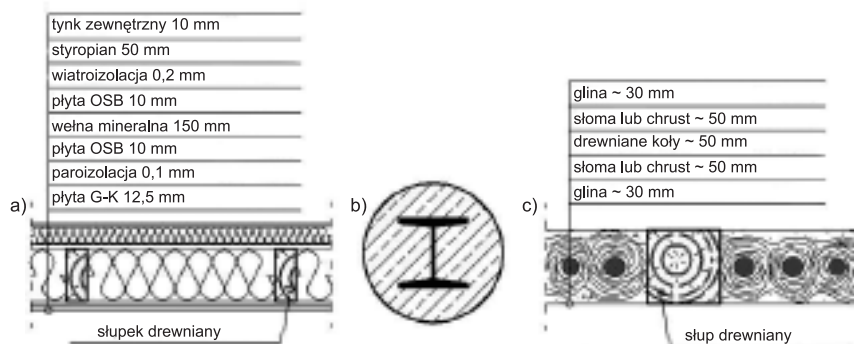
Podstawowym wymaganiem przy jakościowych badaniach budynków metodą termowizyjną jest występowanie naturalnej różnicy temperatury powietrza po obu stronach badanego elementu. Różnica ta powinna wynosić co najmniej 15 °C, co bardzo często jest sporym utrudnieniem w przeprowadzeniu prawidłowych pomiarów w nieogrzewanych budynkach zabytkowych. W takiej sytuacji pomocna może okazać się termografia aktywna [2], która może być stosowana niezależnie od panującej różnicy temperatury po obu stronach przegrody. Obecnie badania termowizyjne (pasywne) są powszechnie wykorzystywane w budownictwie do określania jakości wykonania izolacji termicznej budynku [4]. Badania te wskazują „słabe” miejsca w obudowie budynku, w których dochodzi do zwiększonego przepływu ciepła przez mostki cieplne. Termografia aktywna umożliwia prowadzenie takich badań bez względu na panujące warunki atmosferyczne. Standardowy pomiar kamerą termowizyjną wykonuje się podczas naturalnej różnicy temperatury powietrza po obu

stronach przegrody. Natomiast termografia aktywna różni się tym, że do badanego układu wprowadzamy dodatkowe źródło ciepła bądź chłodu, które nagrzewa lub chłodzi badaną ścianę i zachodzi wówczas zjawisko wymuszonego przepływu ciepła. Termografia aktywna może być wykonywana w trybie odbiciowym, gdzie kamera i źródło ciepła są po tej samej stronie przegrody lub w trybie transmisyjnym, kiedy te urządzenia znajdują się po przeciwnych jej stronach [2].

Termografia aktywna umożliwia wykrywanie różnego rodzaju defektów i wtrąceń materiałowych występujących w przegrodach budowlanych. W przy-

padku, gdy nie dysponujemy dokumentacją techniczną budynku, często nie jesteśmy w stanie określić budowy przegród bez wykonywania odkrywek, które należą do grupy badań niszczących. Taki zabieg byłby niemożliwy w obiektach zabytkowych z uwagi na ochronę konserwatorską i wówczas pomocne mogą być badania termograficzne [1, 7]. Przykładowe przegrody lub elementy, które mogłyby zostać poddane badaniom, przedstawiono na rysunku 1.

W artykule przedstawiono opis badań modeli ściany z różnymi wtrąceniami materiałowymi za pomocą metody termografii aktywnej w trybie odbiciowym oraz wybrane wyniki badań.

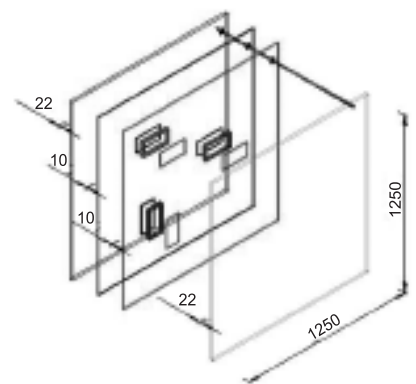


Rys. 1. Możliwości zastosowania termografii aktywnej w badaniach przegród budowlanych. Schematy ścian: szachulcowej (a, c); obetonowanego kształownika stalowego (b)

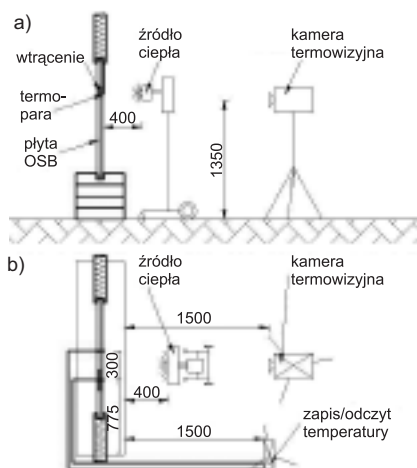
* Politechnika Wroclawska, Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania

Opis badań

Wykonano model przegrody, który składał się z czterech płyt OSB. Wewnętrzne dwie płyty miały grubość po 10 mm, w każdej z nich wykonano otwory w celu umieszczenia wtrąceń materiałowych grubości 20 mm. Po obu stronach modelowej przegrody znajdowały się płyty OSB grubości 22 mm każda. Łącznie element miał grubość 64 mm. Wewnątrz umieszczono trzy wtrącenia materiałowe o znacznie różniących się właściwościach cieplnych: ze stali; granitu oraz styroduru, których współczynniki przewodzenia ciepła wynosiły odpowiednio 50,0 W/mK, 2,80 W/mK oraz 0,033 W/mK. Dzięki temu można było porównać możliwość detekcji mocno różniących się wtrąceń. Każde wtrącenie miało te same wymiary 200 x 100 x 20 mm. Schemat modelowej przegrody przedstawiono na rysunku 2. Dodatkowo, wewnątrz przegrody umieszczono czujniki temperatury w dwóch charakterystycznych przekrojach badanego elementu: jednorodnym oraz z wtrąceniem. W każdym przekroju termopary były umieszczone w czterech punktach, tj. na powierzchniach badanego elementu oraz po obu stronach wtrącenia. Model przegrody został pionowo umieszczony na podwyższeniu ze styropianu. W celu uniknięcia bezpośredniego nagrzewania się tylnej powierzchni badanego elementu (na skutek włączonego promiennika ciepła po przeciwnej stronie przegrody), zastosowano styropianową ramkę szerokości 50 cm, która stykała się z powierzchnią boczną badanego modelu. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3. Znajdują się na nim kamera termowizyjna w odległości 150 cm od powierzchni badanej



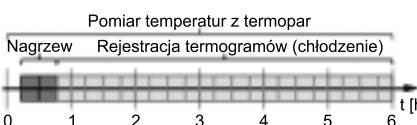
Rys. 2. Schemat modelu badanej przegrody budowlanej



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: a) widok boczny; b) rzut

go elementu oraz źródło ciepła w postaci promiennika ciepła o mocy 1 kW usytuowane 40 cm od modelu przegrody. Dodatkowo na schemacie przedstawiono również urządzenie do pomiaru i zapisu temperatury z czujników.

Przeprowadzone doświadczenie składało się z zasadniczych trzech części (rysunek 4). Najpierw rejestrowano przez 10 min temperaturę z czujników w celu potwierdzenia braku przepływu ciepła przez przegrodę. Drugim etapem było ogrzewanie powierzchni przegrody przez okres 30 min do temperatury ok. 80 °C. Po fazie ogrzewania następowała najważniejsza część eksperymentu – faza ochładzania po wyłączeniu źródła ciepła. W tej fazie podczas oddawania ciepła z przegrody do otoczenia rejestrowa-



Rys. 4. Schemat przeprowadzonego doświadczenia w skali czasowej z podziałem na główne etapy

no cyklicznie termogramy co 1 min. Czas badania był uzależniony od rodzaju wtrącenia (czasu stygnięcia) i wynosił od około czterech do sześciu godzin. Przez wszystkie trzy etapy doświadczenia temperatury z termopar były zapisywane co 10 s. Każde wtrącenie było badane oddzielnie. Kolejno badano wtrącenia ze styroduru, stali oraz granitu, umieszczając je w takiej samej pozycji i w tym samym otworze wewnątrz modelowej przegrody. Przeprowadzone badanie zostało wykonane w trybie odbiciowym termografii aktywnej, a więc źródło ciepła i kamera termowizyjna znajdowały się po tej

samej stronie badanego elementu. Z uwagi na charakter wykorzystanego źródła ciepła w postaci długiego impulsu cieplnego oraz sekwencyjną metodę rejestracji termogramów przy nieustalonym przepływie ciepła w czasie, badanie tego typu zalicza się do termografii aktywnej impulsowej.

Wybrane wyniki badań

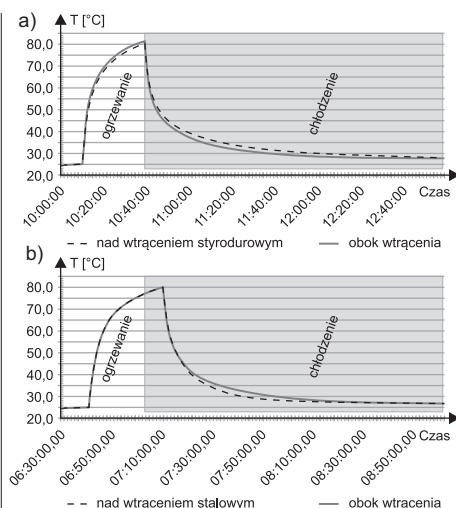
Głównym celem przeprowadzanych badań było sprawdzenie możliwości wykrywania powierzchniowych wtrąceń materiałowych w przegrodzie. Rozkład temperatury w czasie na powierzchni badanego elementu przedstawiono na rysunku 5. Przez pierwsze 10 minut widoczny był brak pobudzenia cieplnego. Temperatura powierzchni ściany była stała i wynosiła 25 °C. Następnie przez okres 30 min temperatura powierzchni płyty rosła w wyniku ogrzewania. Początkowy przyrost temperatury (do 10 min od momentu rozpoczęcia ogrzewania) jest znacznie szybszy od przyrostu temperatury w drugiej połowie ogrzewania modelowej przegrody (po 5 min temperatura powierzchni elementu przekraczała 55 °C, a następnie zwiększyła się do ok. 80 °C). Na rysunku 5a widoczna jest faza 3 – stygnięcie powierzchni po wyłączeniu ogrzewania (obszar jasnoszary). Charakterystycznym momentem w tej fazie jest okres od ok. 20 min od rozpoczęcia ochładzania się elementu do ok. 60 min. W tym czasie widoczna jest znaczna różnica temperatury powierzchni nad wtrąceniem styrodurowym (obszar cieplejszy) i powierzchni w przekroju jednorodnym (obszar chłodniejszy). Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku wtrącenia stalowego (rysunek 5b), gdzie powierzchnia badanego elementu nad wtrąceniem w czasie fazy stygnięcia ma temperaturę niższą niż powierzchnia w przekroju jednorodnym.

Pomocne w analizie otrzymanych wyników jest zastosowanie obróbki danych w postaci kontrastów temperaturowych. Najprostszym przykładem kontrastu jest kontrast absolutny definiowany jako:

$$C_a(t) = T_p(t) - T_{pj}(t) \quad (1)$$

gdzie:
 $T_p(t)$ – temperatura w dowolnie wybranym punkcie na powierzchni (nad wtrąceniem);
 $T_{pj}(t)$ – temperatura na powierzchni nad jednorodnym obszarem.

Innym sposobem przedstawienia wyników jest kontrast standardowy, który pokazuje różnice temperatury w cha-



Rys. 5. Wykres temperatury na powierzchni płyty OSB (od strony nagrzewanej) w punkcie nad wtrąceniem: a) styrodurowym; b) stalowym (linia przerywana) oraz w miejscu bez wtrącenia (linia ciągła); miejsce bez wtrącenia znajduje się 200 mm od krawędzi wtrącenia po jego prawej stronie

Charakterystycznych miejscach badanego elementu w odniesieniu do panujących warunków początkowych:

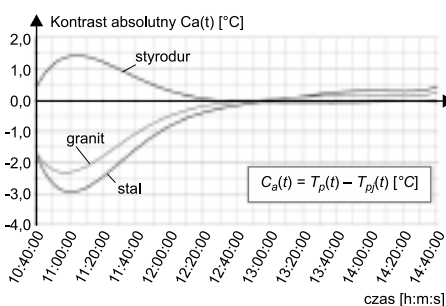
$$C_s(t) = \frac{T_p(t) - T_p(t_0)}{T_{pj}(t) - T_{pj}(t_0)} \quad (2)$$

gdzie:

- $T_p(t)$ – temperatura w dowolnie wybranym punkcie na powierzchni (nad wtrąceniem);
- $T_p(t_0)$ – temperatura przed stymulacją cieplną badanej powierzchni w dowolnym miejscu;
- $T_{pj}(t)$ – temperatura w punkcie powierzchni nad jednorodnym obszarem;
- $T_{pj}(t_0)$ – temperatura przed stymulacją cieplną w punkcie badanej powierzchni nad obszarem jednorodnym.

Na rysunku 6 przedstawiono wykres wartości kontrastu absolutnego w czasie w przypadku wszystkich trzech wtrąceń materiałowych. Maksymalne wartości kontrastu (najwyższa różnica temperatury) przypadają na okres od ok. 20 do 30 min od rozpoczęcia etapu ochładzania się elementu. W przypadku wtrącenia ze styroduru kontrast przyjmuje wartość ok. 1,5 °C. Znak dodatni świadczy, że powierzchnia nad wtrąceniem jest obszarem charakteryzującym się temperaturą wyższą od obszaru jednorodnego. Zjawisko to jest wynikiem bardzo małego współczynnika przewodzenia ciepła styroduru ($\lambda = 0,033 \text{ W/mK}$) i jego małej pojemności cieplnej w stosunku do obszaru z płyty OSB ($\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$). W wyniku różnicy tych parametrów przepływ ciepła przez wtrącenie styrodurowe jest mniej intensywny, co charakteryzuje się wyższą temperaturą na po-

wierzchni nad wtrąceniem od temperatury w przekroju jednorodnym. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku wtrąceń z granitu oraz stali. Kontrast absolutny przyjmuje wartości ujemne na poziomie -2,4 °C (granit) oraz -3,0 °C (stal). Oznacza to, że obszary z wtrąceniami mogą być rozpoznane jako powierzchnie chłodniejsze od przekroju jednorodnego. Ciekawym aspektem jest również występowanie „odwróconego” kontrastu temperaturowego. Szczególnie jest on widoczny w przypadku wtrąceń z granitu i stali. Charakteryzuje się on tym, że po ok. 2,5 h od rozpoczęcia stygnięcia powierzchni ujemny kontrast temperaturowy (dla stali i granitu) przechodzi na stronę dodatnią, a wtrącenie można tym razem obserwować jako obszar o temperaturze wyższej od obszaru jednorodnego. Takie zjawisko jest wynikiem różnej pojemności cieplnej badanych materiałów. Stal i granit charakteryzują się dużo większą pojemnością

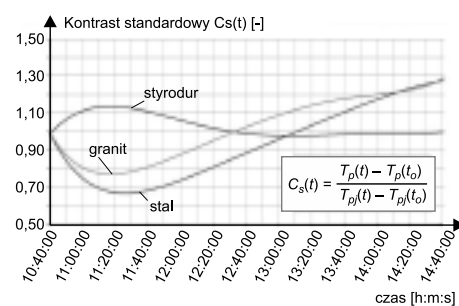


Rys. 6. Kontrast absolutny (wzór 1) dla temperatury powierzchni przegrody z defektem różnego rodzaju

cieplną od styroduru oraz płyty OSB, w wyniku czego nagrzewają się i stygną (oddają ciepło) znacznie dłużej od otaczającego je materiału jednorodnego.

W celu zobrazowania dynamiki zmian temperaturowych zachodzących na powierzchni badanego elementu w stosunku do warunków początkowych posłużono się kontrastem standardowym (rysunek 7). Układ wartości maksymalnych jest podobny jak w przypadku kontrastu absolutnego.

W przypadku wtrącenia ze styropianu wartość tego kontrastu dąży do 1,0 już po ok. 2 h od rozpoczęcia stygnięcia elementu. Oznacza to taką samą dynamikę stygnięcia obszaru jednorodnego i obszaru nad wtrąceniem. Inna sytuacja ma miejsce w przypadku wtrąceń z granitu i stali. W obu przypadkach wartość kontrastu standardowego zwiększa się wraz z czasem (po ok. 40 min od rozpoczęcia



Rys. 7. Kontrast standardowy (wzór 2) dla temperatury powierzchni przegrody z defektem różnego rodzaju

stygnięcia). Jest to wynikiem szybkiego powrotu temperatury w przekroju jednorodnym do temperatury panującej w warunkach początkowych przed rozpoczęciem badania. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przekroju z wtrąceniem. Dynamika stygnięcia badanych przekrojów jest ściśle powiązana z pojemnością cieplną użytych materiałów. Im większa pojemność cieplna elementu, tym materiał nagrzewa się i stygnie dłużej.

Zaprezentowane wyniki przedstawiono jako średnie temperatury dla obszarów, a nie punktów, obszary te miały po równe powierzchnie użytych wtrąceń (200 x 100 mm). Oba obszary (z wtrąceniem oraz jednorodny bez wtrącenia), z których liczone średnią temperaturę, znajdowały się symetrycznie w stosunku do najbardziej ogrzanego obszaru przez promiennik ciepła. Dzięki temu obie powierzchnie były nagrzewane w identyczny sposób, co pozwoliło wiarygodnie zinterpretować wyniki. Średnia temperatura powierzchni była odczytywana z termogramów (rejestrowanych co 1 min) za pomocą programu ThermoCAM Researcher Professional 2.10. Po ok. 30 min widoczny jest najwyższy kontrast temperaturowy. Obszar dla styropianu charakteryzuje się powierzchnią o temperaturze wyższej niż materiału jednorodnego, natomiast obszary dla stali i granitu zaznaczają się jako pola o temperaturze niższej. Najlepiej widoczne jest wtrącenie stalowe (z uwagi na największą różnicę współczynnika λ w stosunku do płyty OSB i najwyższą pojemność cieplną), obszar niższej temperatury jest na tyle wyraźny w stosunku do przekroju jednorodnego, że można w przybliżeniu określić geometrię wtrącenia. Dodatkowo, po ok. 180 min widoczny jest „odwrócony” kontrast temperaturowy, który sugeruje różnicę w pojemności cieplnej użytych wtrąceń materiałowych.

Podsumowanie

Badany element ma częściowo zbliżoną budowę do konstrukcji ściany szkieletowej, w której warstwa wierzchnia jest często w postaci płyt OSB usztywniających konstrukcję. Doświadczenie wykazało przydatność metody termografii aktywnej do lokalizacji różnego rodzaju wtrąceń materiałowych, które w obiektach budowlanych występują w postaci mostków termicznych. Przy względnie krótkim czasie badania, obserwator może zlokalizować wady w obudowie termicznej budynku bez względu na temperaturę w otoczeniu badanego elementu. **Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:**

- najbardziej widoczny kontrast temperaturowy występuje po ok. 30 min od wyłączenia promiennika ciepła (okres, po którym najwyraźniej widać wtrącenia);
- w przypadku wtrącenia stalowego dodatkowo po ok. 180 min następuje moment odwróconego kontrastu temperaturowego, kiedy to ponownie dobrze widoczne jest wtrącenie. Obszar nad wtrąceniem charakteryzuje się temperaturą wyższą niż obszar materiału jednorodnego, co spowodowane jest głównie dużą pojemnością cieplną wtrącenia;
- pomiary wykonane za pomocą termografii aktywnej w trybie odbiciowym potwierdzają przydatność metody do lokalizacji płytkich wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych.

Przy wykonywaniu badań doświadczalnych napotkano wiele problemów [3, 5]. Pierwszym z nich jest zbudowanie poprawnego modelu przegrody, który najlepiej oddaje rzeczywiste parametry przegród budowlanych. Istotny jest również problem wysokiej temperatury powierzchni (ok. 80 °C), szczególnie w przypadku stosowania termografii aktywnej w badaniach obiektów zabytkowych. Konieczne będzie znaczne obniżenie temperatury podczas badań z jednoczesnym zachowaniem dobrej jakości kontrastów temperaturowych w charakterystycznych przekrojach badanego elementu, tj. nad wtrąceniem oraz w miejscu jednorodnym materiałowo. Podczas badań zauważono również poważny problem, który polega na zmniejszeniu się widocznych różnic zaburzeń pola temperatury nad wtrąceniem wraz ze wzrostem głębokości ich zalegania. Otrzymane wyniki można zestawić z wy-

nikami uzyskanymi w pracy [6], w której badano podobny model przegrody z wtrąceniami umieszczonymi ponad dwa razy płycej (10 mm od powierzchni elementu).

Największą zaletą badań termografią aktywną jest niewątpliwie jej nieniszczący charakter dokonywania pomiaru, dzięki czemu przewiduje się dużą możliwość jej zastosowania w obiektach zabytkowych. Celem dalszych badań jest przeprowadzenie pomiarów w budynkach już istniejących, co pozwoli ocenić funkcjonalność i przydatność metody termografii aktywnej w przypadku wykonywania badań terenowych. Ponadto celem prowadzonych badań jest rozwiązanie problemu odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła. W zagadnieniach odwrotnych warunki brzegowe, takie jak głębokość zalegania wtrącenia materiałowego czy jego właściwości cieplne, wyznaczone są na podstawie pomiaru temperatury w wybranych punktach badanego elementu. Do odwrotnych zagadnień wymiany ciepła można zaliczyć również zagadnienie optymalizacji czasu nagrzewania i ochładzania elementów konstrukcyjnych [8], co przyczyniłoby się do zwiększenia zainteresowania wykorzystaniem termografii aktywnej.

Literatura

- [1] Maierhofer Ch., Brink A., Rollig M., Wigenhauser H., Quantative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations. Construction and Building Materials, vol. 19, 2005.
- [2] Maldague X., Marinetti S., Pulse phase infrared thermography, J. Appl. Phys., 79, 1996.
- [3] Minkina W., Wybrane problemy współczesnej termografii i termometrii w podczerwieni, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011.
- [4] Nowak H., Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012
- [5] Nowak H., Kucypera M., Wybrane problemy badań przegród budowlanych metodą termografii aktywnej, Inżynieria i Budownictwo, nr 12, 2010.
- [6] Nowak H., Kucypera M., Zastosowanie termografii aktywnej w nieniszczących badaniach przegród budowlanych, Energia i Budynek, nr 7, 2011.
- [7] Oliferuk W., Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń. Biuro Gamma, Warszawa 2008.
- [8] Taler J., Duda P., Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.



AGOCEL - Power of Innovation

- znaczna redukcja wydatków na system zagęszczający
- produkty z tej grupy silnie zagęszczają, stabilizują oraz obniżają koszty produkcji (farby, tynki, kleje)



RETENMAIER POLSKA
SP. z o.o.
ul. Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7b
02-366 Warszawa
Tel. +48 (22) 608 51 09
Fax +48 (22) 608 51 51