

Termowizja i termografia w diagnostyce kominów przemysłowych.

Przykłady, możliwości

Dr inż. Jerzy Sendkowski, Biuro Budowlane ANKRA Sp. z o.o., Kielce,
mgr inż. Anna Tkaczyk, mgr inż. Łukasz Tkaczyk, Biuro Budowlane BAUKO s.c., Kielce

1. Wprowadzenie

Prezentowana praca jest publikacją z zastosowania termowizji i termografii w diagnostyce obiektów budowlanych. Podstawy termowizji i termografii omawiają liczne publikacje, najbardziej aktualne, mające zastosowanie w diagnostyce obiektów budowlanych, które podano w zestawieniu bibliograficznym [1]–[16]. Ważne z punktu widzenia diagnostyki specjalnych obiektów budowlanych, jakim są kominy przemysłowe, jest przytoczenie definicji termowizji i termografii.

Termowizja w podczerwieni to bezkontaktowy pomiar różnic temperatur na powierzchniach badanych obiektów, przedmiotów, wyrobów, urządzeń emitujących i transportujących energię ciepłą, pomiaru ścieżek termalnych przy użyciu urządzeń pomiarowych. Pomiar ten zależy od emisyjności badanych powierzchni, emisyjności otoczenia, warunków otoczenia, odbicia, wpływu atmosfery itp.

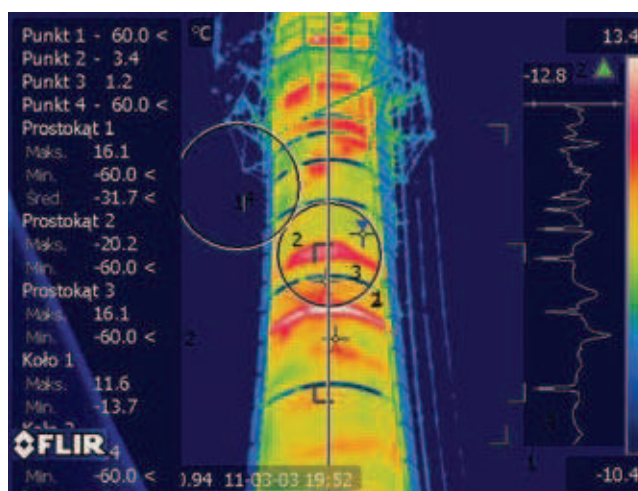
Termografia w podczerwieni to nauka o zbieraniu i analizie informacji o rozkładzie temperatur uzyskanych z urządzeń bezkontaktowego zobrazowania temperatury [1]. Zatem postrzeganie termowizji i termografii, jako badania różnic temperatur na powierzchniach badanych obiektów daje podstawy do wykorzystania diagnostycznego, badawczego termowizji i termografii w przemyśle i nauce.

2. Przykłady zastosowania termowizji w diagnostyce kominów

Pierwszym przykładem jest komin o nietypowej konstrukcji i wysokości 40 m. Trzon komina stanowi dwupłaszczowa konstrukcja stalowa z blach o początkowych grubościach (nominalnych grubościach) rzędu 8 mm. Komin posiada trzon, którego średnica nie jest stała po wysokości. Do 15 m komin ma stałą średnicę równą 3,0 m. Na wysokości od 15 do 20 m średnica komina jest zbieżna. Od wysokości 20 do 40 m średnica komina jest stała i jego zewnętrzna średnica wynosi 2,5 m. Komin zakotwiony jest w fundamencie za pomo-

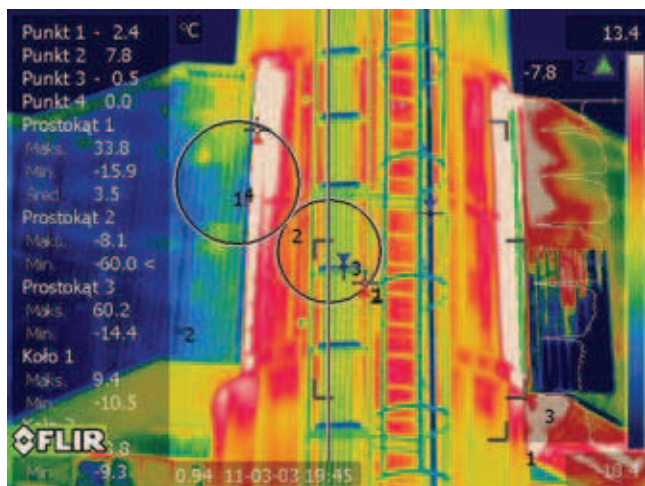


Rys. 1a. Termogram stalowego komina dwupłaszczowego z wymurówką

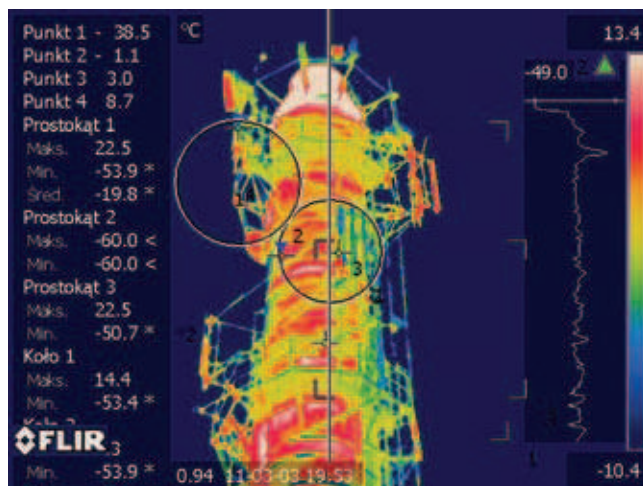


Rys. 1b. Termogram stalowego komina dwupłaszczowego z wymurówką

cią 24 śrub M30. Komin posiada wymurówkę wewnętrzną na całej wysokości oraz dwa pomosty robocze. Jeden na wysokości 27 m, drugi na wysokości około 38 m. Na rysunkach od 1a do 1d pokazano termogramy komina wykonane przez autorów, przy użyciu kamery ter-



Rys. 1c. Termogram stalowego kominu dwupłaszczowego z wymurówką



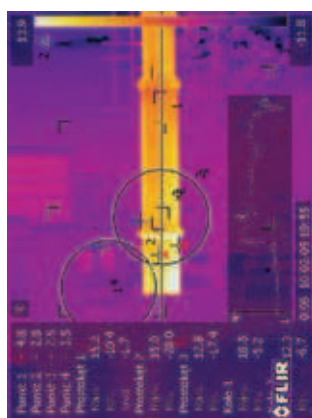
Rys. 1d. Termogram stalowego kominu dwupłaszczowego z wymurówką

mowizyjnej ThermoCAM™ S.C. 640. Istotnym rezultatem wykonanych badań termowizyjnych była ocena stanu grubości stalowego płaszcza, stanu wymurówki kominu, stanu wymurówki kominu na połączeniach kołnierzowych, wyznaczenie miejsc o największym ubytku grubości płaszcza, wyznaczenie miejsc perforacji płaszcza kominu. Ponadto na podstawie przeprowadzonych badań termowizyjnych stwierdzono nieszczelności przewodów spalinowych oraz nieszczelności połączenia przewodów spalinowych z trzonem kominu. Dało to podstawę do wyboru miejsc, wytypowania punktów pomiarowych grubości płaszcza kominu. Badania termowizyjne umożliwiły kompleksową ocenę stanu technicznego kominu i podanie wytycznych do opracowania projektu wzmocnienia oraz remontu kominu i jego wymurówki.

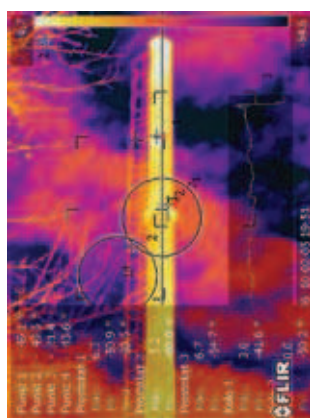
Innym przykładem są badania termowizyjne kominu stalowego bez wymurówki. Badany komin jest typową wolnostojącą konstrukcją o wysokości 30 m. Trzon kominu stanowi rura stalowa z blach o początkowych grubościach (nominalnych grubościach) 13, 10 i 8 mm. Komin posiada trzon, którego średnica jest stała po wy-

sokości i wynosi 80 cm. Komin zakotwiony w fundamencie za pomocą 24 śrub M36. Komin posiada jeden pomost do pomiarów spalin. Komin składa się z 5 segmentów. Segment dolny oznaczono symbolem S1, ostatni na górze natomiast symbolem S5. Połączenia międzysegmentowe wykonano za pomocą 18 śrub M16. Termogramy, wykonane przez autorów, przy użyciu kamery termowizyjnej ThermoCAM™ S.C. 640 badanego kominu pokazano na rysunku 2.

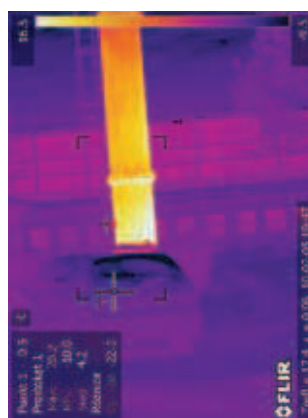
Przeprowadzone badania termowizyjne wykazały zróżnicowaną grubość płaszcza kominu zarówno po wysokości, jak i po obwodzie. Pozwoliły na wnikliwą ocenę stanu technicznego kominu. Ponadto pokazały niedostatki w kształtowaniu geometrycznym kominu. Dotyczy to stref połączeń kołnierzowych i uźebrowania pierścieni kołnierzowych. Uzyskano silną korelację pomierzonych różnic temperatur (izoterm) z grubością ścianek płaszcza kominu. Wyselekcjonowano obszary o najmniejszej grubości ścianki płaszcza oraz istotnych i ważnych informacji do oceny stanu granicznej nośności. Przeprowadzone badania termowizyjne dały podstawę do wyznaczania niezbędnych pomiarów sprawdzają-



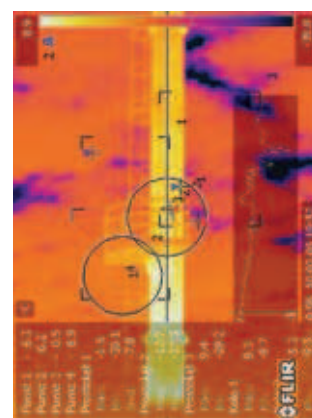
Rys. 2a. Termogram kominu stalowego bez wymurówki



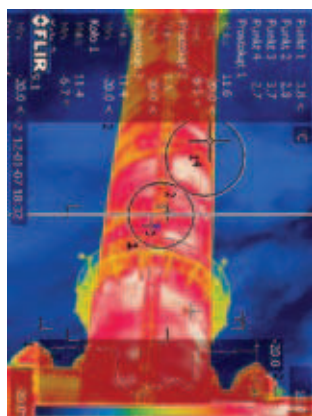
Rys. 2b. Termogram kominu stalowego bez wymurówki



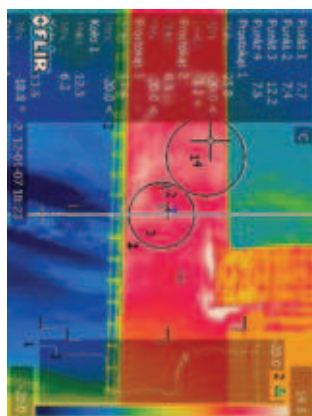
Rys. 2c. Termogram kominu stalowego bez wymurówki



Rys. 2d. Termogram kominu stalowego bez wymurówki



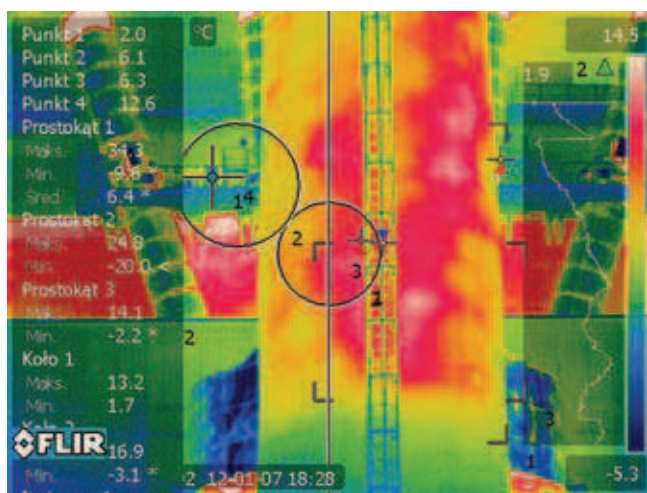
Rys. 3a. Termogram komina żelbetowego nr 1



Rys. 3b. Termogram komina żelbetowego nr 1

cych grubości płaszczu metodami ultradźwiękowymi (ważne z uwagi brak dostępu do obszarów pomiarowych). Wyeliminowały lub istotnie ograniczyły potrzebę użycia technik alpinistycznych w pomiarach inwentaryzacyjnych komina.

Na rysunku 3 pokazano termogramy komina żelbetowego nr 1 o wysokości $H = 100$ m wykonane przez autorów, przy użyciu kamery termowizyjnej ThermoCAM™ S.C. 640. Średnica zewnętrzna płaszczu trzonu komina jest stała i wynosi 590 cm, średnica wewnętrzna płaszczu komi-



Rys. 3c. Termogram komina żelbetowego nr 1

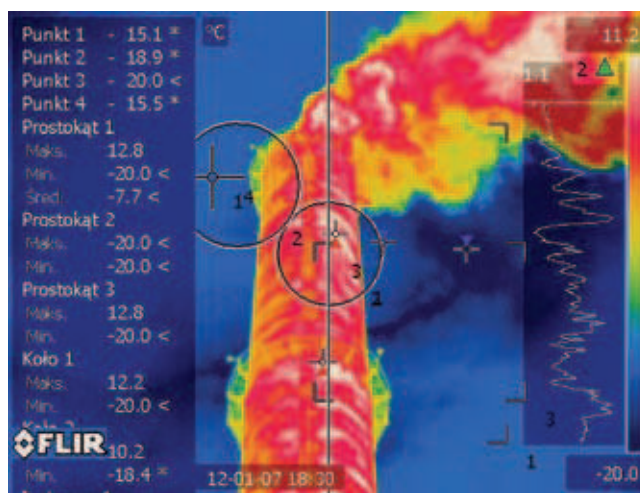
na wynosi 490 cm, grubość płaszczu żelbetowego wynosi od 15 cm do 30 cm. Komin wykonano, jako monolityczny za pomocą szalunków przestawnych, użytkowany od roku 1974. Inne dane techniczne komina: temperatura gazów przy wlocie z czopucha do komina – ok. 110°C , płaszcz żelbetowy komina z betonu ok. B30 (wg oceny z 1999 r.), izolacja z wełny szarej w miękkich matach gr. 8 cm, wykładzina z cegły gr. 12 cm ceramicznej kl. I o $R_c = 150$, w części szczytowej cegła klinkierowa.

Przeprowadzone pomiary termowizyjne pozwoliły zidentyfikować stan izolacji cieplnej w przedmiotowym kominie, miejsca tzw. obsunięć, ubytków, czy zawilgocenia. Pozwoliły na ocenę delaminacji miejsc naprawczych,

miejsc odspojenia otuliny zbrojenia, miejsc lokalnych ubytków płaszczu żelbetowego w wyniku destrukcji żelbetowego trzonu komina.

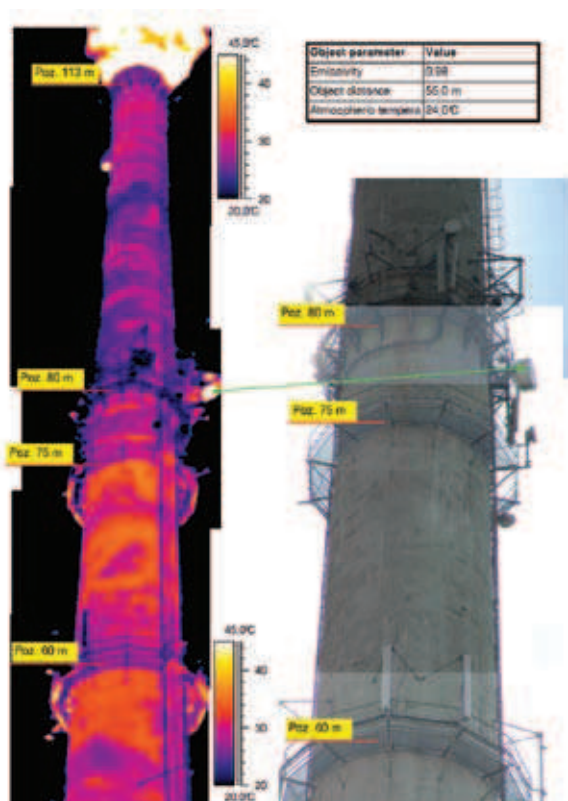
Na rysunku 4 pokazano termogram komina żelbetowego nr 2 o wysokości $H = 120$ m. Średnica zewnętrzna płaszczu trzonu komina na wysokości 120 m wynosi 450 cm, średnica wewnętrzna płaszczu komina wynosi 380 cm, grubość płaszczu żelbetowego wynosi 15 cm. Średnica zewnętrzna płaszczu trzonu komina w podstawie wynosi 780 cm, średnica wewnętrzna płaszczu komina wynosi 720 cm, grubość płaszczu żelbetowego wynosi 30 cm. Komin wykonano, jako monolityczny za pomocą szalunków przestawnych, użytkowany od roku 1975. Komin wykonany wg dokumentacji z betonu dawniej określonego, jako $R_w 200$ i zbrojony stalą St0 $Q_r = 2500$ i 34GS o $Q_r = 4000$. Inne dane techniczne komina: temperatura gazów przy wlocie z czopucha do komina – ok. 100°C , płaszcz żelbetowy komina z betonu ok. B20 (projektowany $R_w 200$ kg/cm^2), izolacja z wełny żużlowej, wykładzina z cegły ceramicznej kl. I o $R_c = 150$.

Przeprowadzone badania termowizyjne wykazały ubytki izolacji termicznej i stały się podstawą podjęcia decyzji o remoncie komina z wymianą izolacji termicznej i wymurówki wewnętrznej. Ponadto dały podstawę do aktywnej naprawy żelbetowego trzonu komina (zarówno od strony wewnętrznej, jak i zewnętrznej) przy użyciu



Rys. 3d. Termogram komina żelbetowego nr 1

nowoczesnej chemii budowlanej. Termowizja i termografia daje ciekawe rezultaty w badaniach kominów ceramicznych. Z przeprowadzonych przez autorów badań termowizyjnych kominów różnych typów wynika ich niezwykła przydatność w diagnostyce i ocenie stanu technicznego. Uzyskuje się niezliczoną ilość potrzebnych informacji. Wykonywane okresowe badania termowizyjne i porównywanie rozkładu temperatur dla różnych okresów diagnostycznych świadczą o procesie i tempie destrukcji. Uzyskiwane rozkłady temperatur dają podstawę do wnioskowania o stanie technicznych izolacji ciepłej i wymurówki. Dają również podstawy do określenia prawidłowej eksploatacji kominów umożliwiającą



Rys. 4. Termogram badanego kominia żelbetowego wykonany przez BIS Izomar Sp. z o.o. z 2007 roku

cej bezawaryjną pracą konstrukcji kominów, poprzez wykrywanie i lokalizację miejsc zagrożonych. Służą do ilościowej oceny stopnia zużycia izolacji termicznej czy też wymurówki ogniotrwałej. Służą ocenie wykonywanych prac bieżących, jak i do kontroli prac naprawczych. Badania termowizyjne kominów, jak widać, służą zapobieganiu ewentualnej awarii i określają zakres remontów. Przeprowadzone badania termowizyjne pozwalają z dużą dokładnością ocenić stan techniczny kominów, określić czas ich przyszłej pracy, warunki bezpiecznej eksploatacji, pozwalają określić rozpoczęcie momentu remontu kominów oraz ich zakres. Służą przyszłym pracom projektowym. Wsparcie badań termowizyjnych stosownym oprogramowaniem daje duże możliwości obróbki obrazów. Daje możliwość szczegółowej analizy obserwowanych zjawisk, jak również diagnostyki kominów. Uzyskane rezultaty obróbki komputerowej to barwne obrazy (termogramy) otrzymane i widoczne na monitorze komputera, z wartościami temperatur przyporządkowanymi poszczególnym barwom. Natomiast cyfrowa rejestracja obrazów daje możliwości ich łączenia, analizowania i przetwarzania. Otrzymane obrazy termalne (termogramy) dają możliwość sporządzania w formie barwnych wydruków, obszernej dokumentacji. Wykonując badania termograficzne kominów można stwierdzić, że na uzyskane wyniki pomiarów mają wpływ: poziom pola temperaturowego zarówno prowadzonych gazów, jak również poziom pola temperaturowego otoczenia, prędkość i kierunek wiatru, ciśnienie

atmosferyczne i wilgotność powietrza, właściwości emisyjne materiałów kominów, istniejące powłoki na powierzchni trzonów kominów. Istotna jest także temperatura otoczenia, czy pozorna temperatura nieboskłonu. Potrzebna jest znajomość ekwiwalentnej temperatury otoczenia, jako że prowadzimy pomiary w otwartej przestrzeni. W badaniach termograficznych kominów temperatura otoczenia ma charakter lokalny, stąd też należy korzystać z wykresów podanych w pracy [2] w celu wyznaczania ekwiwalentnej lokalnej wartości temperatury otoczenia, dającej w konsekwencji poprawę wyników termowizyjnych kominów.

3. Możliwości badawcze termowizji i termografii

Niezwykle ciekawe rezultaty daje termografia aktywna, gdzie badany obiekt poddaje się wymuszeniu mechanicznemu, cieplnemu, optycznemu lub akustycznemu. Bada się odpowiedź cieplną obiektu budowlanego (komin) na to wymuszenie [4]. Termografia aktywna (impulsowa i synchroniczna) pozwala wyznaczyć nieznanne parametry termiczne, jakim są rezystancja termiczna (opór termiczny), efuzyjność lub dyfuzyjność oraz grubość i głębokość defektów badanych elementów, struktur kominów. W efekcie drogą badań z użyciem termografii aktywnej można uzyskać np. grubość powłoki trzonu kominu. A jest to grubość powłoki nie tylko punktowa, ale wręcz całego trzonu. Oczywiście pomiary te wsparte są stosownym oprogramowaniem i aparaturą wprowadzającą wymuszenie optyczne czy też akustyczne. Termografia akustyczna natomiast wykorzystuje pobudzenie badanego obiektu falą akustyczną. Okazuje się, że uzyskuje się większy kontrast niż stosowanie termowizji aktywnej (synchronicznej), ponieważ analizuje się fazę sygnału odpowiedzi cieplnej badanego obrazu w odróżnieniu od jej amplitudy.

Termowizja impulsowa jest obecnie jedną z najpopularniejszych nieniszczących metod badania materiałów kompozytowych. Badania polegają na zastosowaniu lampy, lasera itp. do generowania impulsu lub serii impulsów wymuszenia cieplnego, których czas trwania dobiera się w zależności od przewodności cieplnej badanego materiału kompozytowego. Stosuje się metody transmisyjne (dwustronne), jak i odbiciowe (jednostronne). Rejestrowane są sekwencje (termogramów) z jednakowym odstępem czasu między obrazami. Po wyłączeniu źródła promieniowania obiekt schładza się do temperatury otoczenia. W fazie schładzania wyznaczany jest rozkład pola temperaturowego na powierzchni badanego obiektu, który poddawany jest analizie. W zależności od cech cieplnych badanego materiału, obiektu i ukrytych pod powierzchnią defektów wyznacza się obszary, w których występują lub mogą występować defekty, strefy o zróżnicowanym rozkładzie pola temperaturowego. Strefy o dużym gradiencie zmian pola temperaturowego wskazują na występowanie defektów materiału (dysoncje, inkluzje, delaminacje itp.). Do wyznaczania ob-

szarów z defektami zwykle wykorzystuje się specjalne techniki przetwarzania termogramów (obrazów).

W diagnostyce obiektów budowlanych (elementów konstrukcyjnych) wykorzystuje się również termografię impulsową. Dostarcza się do powierzchni obiektu pewną ilość energii cieplnej. Powoduje to okresowy wzrost temperatury badanego obiektu na powierzchni i w głębi materiału. W procesie nieustalonego przewodzenia wielkość i tempo zmian temperatury zależne jest m.in. od dyfuzyjności cieplnej (zwanej inaczej współczynnikiem wyrównywania temperatur) ogrzanego materiału obiektu, struktury. Obecność obszarów z defektami charakteryzuje się inną dyfuzyjnością cieplną niż obszary bez defektów, powodujących zakłócenie w nieustalonym przepływie ciepła, widoczne na powierzchni w postaci anomalii rozkładu temperatury. Zatem obserwując pole temperaturowe na powierzchni stygnącego obiektu, elementu konstrukcyjnego, próbki uwiadcniają się położenia defektów.

Do badania parametrów termicznych materiałów włóknistych, włókienniczych i materiałów anizotropowych stosuje się termowizję z wykorzystaniem luster. Do materiałów włóknistych dostarczana jest energia cieplną i mierzy się rozkład pola temperaturowego po obu stronach materiału. Następnie wyznacza się tzw. drogą odwrotnego zagadnienia termicznego (równanie Kirchhoffa-Fouriera) przewodność cieplną, ciepło właściwe i gęstość badanego materiału.

4. Podsumowanie

Wykorzystanie termowizji w diagnostyce kominów przemysłowych pozwala na uzyskanie cennych informacji, niemożliwych do uzyskania innymi nieniszczącymi metodami. Istotnie uwiarygadnia przeprowadzone inne pomiary nieniszczące w inwentaryzacji stanu technicznego różnych typów kominów przemysłowych. Pozwala na szybsze uzyskiwanie niezbędnych informacji w procesie identyfikacji aktualnego stanu technicznego. Daje podstawy i wyznacza kierunki prac utrzymaniowych i remontowych obiektów budowlanych, jakimi są kominy przemysłowe, niezależnie od rodzaju zastosowanych materiałów budowlanych, z których powstały, i zastosowanych technologii ich wznoszenia.

Zastosowanie termowizji w nieniszczących badaniach diagnostycznych obiektów technicznych polega na dostarczeniu energii cieplnej i pomiarze zmian temperatury badanego obiektu w czasie. Wartości zmian pola temperaturowego zależą od parametrów struktury, lokalnych wartości przewodności cieplnej, gęstości oraz ciepła właściwego.

Stosuje się:

- termowizję z pobudzeniem synchronicznym, ang. lock-in,
- termowizję z pobudzeniem impulsowym,
- termowizję z pobudzeniem zmiennym skokowo.

Dostarczanie energii odbywa się poprzez pobudzenie optyczne, akustyczne, mikrofalowe, prądami wirowymi

(indukcyjne), mechaniczne, konwekcyjne i inne.

W wyniku wielkiego potencjału możliwości wykorzystania termowizji i termografii w diagnostyce obiektów budowlanych można wyznaczać:

- kształty i grubości materiałów badanych obiektów diagnostycznych,
- występowanie defektów (rozmiar i głębokość występowania) pęknięć, rozwarstwień i innych defektów wewnętrznych materiałów,
- cech materiałowych badanych obiektów diagnostycznych (przewodność cieplną, ciepło właściwe i gęstość badanego materiału).

Zastosowanie termowizji i termografii daje możliwość uzyskiwania cennych informacji przydatnych w diagnostyce wszelkich obiektów budowlanych, w których występuje wymiana ciepła, inaczej $T > 0$.

Jest jedną z najszybciej rozwijających się narzędzi diagnostycznych. Ilość publikacji naukowych, publikacji technicznych z zastosowaniem termowizji i termografii uwiarygadnia postawioną tezę.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Więcek B., De My G., Termowizja w podczerwieni, Podstawy i zastosowania, Wydawnictwo PAK, 2011 r.
- [2] Kruczek T., Wyznaczenie radiacyjnej temperatury otoczenia przy pomiarach termowizyjnych w otwartej przestrzeni, PAKa, nr 11/2009
- [3] Wróbel A., Wróbel A., Kędziński M., Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych kominów przemysłowych – cz. I, Inżynier Budownictwa 2/2012, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [4] Wróbel A., Wróbel A., Kędziński M., Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych kominów przemysłowych – cz. II, Inżynier Budownictwa 3/2012, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [5] Wróbel A., Termowizja w pomiarach inwentaryzacyjnych obiektów budowlanych, Rozprawy Monograficzne, nr 209, Wydawnictwa AGH, Kraków 2010
- [6] Wróbel A., Termografia w budownictwie cz. 1. Inżynier Budownictwa 3/2010, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [7] Wróbel A., Termografia w budownictwie cz. 2. Inżynier Budownictwa 4/2010, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [8] Wróbel A., Wróbel A., Kontrola termograficzna izolacyjności ciepłej nowo wzniesionych budynków mieszkalnych cz. 1. Inżynier Budownictwa 2/2011, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [9] Wróbel A., Wróbel A., Kontrola termograficzna izolacyjności ciepłej nowo wzniesionych budynków mieszkalnych cz. 2. Inżynier Budownictwa 3/2011, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [10] Żurawski J., Izolacyjność termiczna ścian a jakość energetyczna budynków. Inżynier Budownictwa 1/2009, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [11] Żurawski J., Izolacyjność termiczna ścian a jakość energetyczna budynków. Inżynier Budownictwa 2/2009, Miesięcznik Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa
- [12] Termowizja – wszystko, co musisz wiedzieć, aby prawidłowo wykonać pomiar, EC Training Center, Kraków 1–2 marzec 2012 r.
- [13] Osiały J., Zastosowanie termowizji w przemyśle szklarskim, Świat Szkła nr 5 i 6 2009 r.
- [14] Termowizja w przemyśle szklarskim, Świat Szkła, styczeń 2010 r.
- [15] Jaworski J., Termografia budynków, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000
- [16] Instrukcja obsługi ThermaCAMTM S.C. 640