

Stanowisko do badań nieniszczących z zastosowaniem aktywnej termografii w podczerwieni

Abstract. In article has been presented the stand for non - destructive research using infrared thermography. A stand consists of a thermal imaging camera, halogen lamps, desktop with IrNDT software, DAQ data acquisition card and AT IRXBOX hardware module used for recording of thermographs and sources of heat - induction (**Stand for non – destructive testing using active infrared thermography**).

Streszczenie. Zaprezentowano stanowisko do badań nieniszczących z zastosowaniem aktywnej termografii w podczerwieni. Stanowisko składa się z kamery termowizyjnej, lamp halogenowych, komputera stacjonarnego z oprogramowaniem IrNDT, karty akwizycji danych DAQ, oraz modułu sprzętowego AT IRXBOX służącego do sprzętowego wyzwalania rejestracji termografów i źródła wymuszenie cieplnego.

Keywords: active thermography, non – destructive testing, laboratory stand, thermal imaging cameras.

Słowa kluczowe: termografia aktywna, badania nieniszczące, stanowisko laboratoryjne, kamery termowizyjne.

Wstęp

Termografia aktywna w podczerwieni pozwala na pomiar temperatury danej próbki za pomocą promieniowania elektromagnetycznego. Dzięki tej technice możliwa jest detekcja, zapis, przetwarzanie oraz przedstawienie graficzne promieniowania podczerwonego transmitowanego przez badaną próbkę. Wynikiem badań są termogramy ilustrujące rozkład temperatury na powierzchni testowanej próbki. Badania, podczas których nie dochodzi do zmian właściwości danego obiektu nazywa się badaniami nieniszczącymi. Termografia aktywna pozwala na wykrywanie oraz charakteryzując nieciągłości materiałowych badanej próbki. Oprócz wykrywania defektów możliwe jest również oszacowanie parametrów defektów takich jak: kształt, głębokość czy opór cieplny.

Główne metody badań termografii aktywnej

W procedurach termografii aktywnej wykorzystuje się źródło wymuszenia cieplnego. Wymuszenie cieplne zmienia dynamicznie temperaturę powierzchni badanej próbki. Możliwe jest wówczas zaobserwowanie nieciągłości materiałowych (defektów).

Główne metody badań termografii aktywnej klasyfikuje się następująco [1]:

- termografia impulsowa (*Pulsed Thermography*) polegająca na wytworzeniu impulsu wymuszenia cieplnego o określonym przebiegu czasowym dla powierzchni badanej próbki. Próbka poddana równomiernemu ogrzewaniu impulsem cieplnym zaczyna przewodzić ciepło w głąb, zmieniając tym samym rozkład temperatury na powierzchni. Na podstawie rozkładu temperatury powierzchni badanej próbki można określić głębokość położenia nieciągłości materiałowej, ponieważ nieciągłości umiejscowione głęboko pod powierzchnią płytki pojawiają się później i przy mniejszym kontraście temperaturowym.

- metoda długiego impulsu (*Step Heating*) polegająca na nagrzewaniu powierzchni próbki i kontrolowaniu jej przez cały czas trwania wymuszenia. W tej metodzie wymuszenie jest małej mocy aby nie doszło do zdeformowania lub zniszczenia próbki.

- termografia wibracyjna (*Vibrothermography*) polegająca na badaniu próbki stymulowanej drganiami mechanicznymi. Drgania te generowane są przez fale ultradźwiękowe. Energia mechaniczna wygenerowana przez fale zamienia się w ciepło podczas napotkania w próbce defektu, w wyniku czego powstaje tarcie wewnętrzne oraz efekt piezokaloryczny.

- termografia lock-in (*Lock-in Thermography*) zwana również synchroniczną, polegająca na wykorzystaniu harmonicznego strumienia ciepła. Wzbudzenie cieplne ma formę sinusoidalną. Na podstawie znanej częstotliwości wzbudzenia oraz otrzymanej odpowiedzi układu można określić jej amplitudogram oraz fazogram. Termografia lock-in dzieli się na cztery wiodące techniki: metodę standardową, metodę czteropunktową, metodę wariacyjną oraz metodę najmniejszych kwadratów.

Metody aktywnych badań termograficznych można klasyfikować wg:

- a) rodzaju źródła impulsu cieplnego;
- b) wzajemnego położenia źródła ciepła i urządzenia rejestrującego temperaturę obiektu,
- c) kształtu oraz wymiarów strefy intensyfikacji ciepła i rejestracji temperatury.

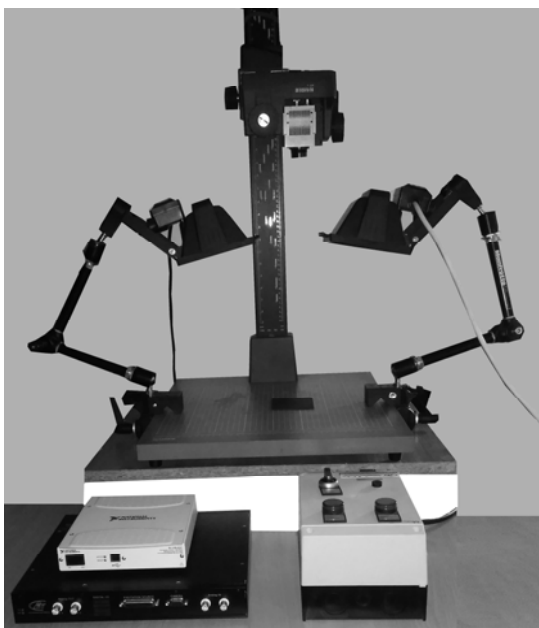
Metoda wzajemnego położenia źródła ciepła i urządzenia rejestrującego temperaturę badanego obiektu [2] jest najczęściej stosowana i dzieli się na:

- a) refleksyjną (*reflection*), zwaną również jednostronną. Metoda ta polega na ustawieniu źródła ciepła oraz urządzenia rejestrującego temperaturę po jednej stronie badanego obiektu,
- b) transmisyjną (*transmission*), która polega na ustawieniu źródła ciepła oraz urządzenia rejestrującego temperaturę po przeciwnych stronach badanego obiektu,
- c) cieplną stymulację przy użyciu wewnętrznego źródła (przy pomocy np. prądów wirowych, ultradźwięków czy pobudzenia mechanicznego).

Budowa stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne służące do badań nieniszczących z wykorzystaniem termografii aktywnej [3] znajduje się w Katedrze Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej. Stanowisko laboratoryjne składa się z kamery IRS336 – NDT, źródła ciepła (lamp halogenowych) oraz komputera stacjonarnego z zainstalowanym oprogramowaniem do termowizyjnych badań nieniszczących IrNDT. Do komputera stacjonarnego doprowadzona jest karta akwizycji danych DAQ (NI USB – 6251). Dodatkowo zamontowano moduł sprzętowy AT IRXBOX służący do sprzętowego wyzwalania rejestracji termogramów oraz akwizycji źródła stymulacji cieplnej. Zainstalowano również oprogramowanie LabVIEW firmy National Instruments, które umożliwia tworzenie nowych algorytmów wykrywania defektów w próbkach.

Stanowisko znajduje się w całkowicie zaciemnionym pomieszczeniu. Pomieszczenie to działa jak komora, która ma na celu zminimalizowanie wpływu promieniowania otoczenia. Fotografie stanowiska zaprezentowano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Stanowisko do badań nieniszczących z zastosowaniem aktywnej termografii przy użyciu dwóch lamp halogenowych



Rys. 2. Stanowisko do badań nieniszczących z zastosowaniem aktywnej termografii przy użyciu lampy halogenowej o mocy 2,5 kW

Kamera IRS336-NDT firmy Automation Technology to kompaktowa kamera na podczerwień zaprojektowana do zastosowań NDT. Ma wysoką czułość temperaturową, posiada niechłodzony detektor mikrobolometryczny FPA o rozdzielczości przestrzennej 336 x 256 pikseli, pole widzenia FoV 25 ° x 19°, f/1.25, a częstotliwość odświeżania wynosi 60Hz. Transfer danych odbywa się

poprzez interfejs Gigabit Ethernet (GigE), protokół komunikacyjny jest zgodny z GigE Vision GenICam. GigE Vision 2.0 jest obecnie najpopularniejszym standardem przesyłania danych po sieci Ethernet. Pozwala na natychmiastowe i bezawaryjne przesyłanie danych pomiędzy kamerą a komputerem. Pozwala na przesył danych w czasie rzeczywistym z prędkością do 100 MB/s przy maksymalnej długości kabla do 100 metrów bez zakłóceń.

GiGE Vision składa się z następujących elementów:

- protokół GVCP (GiGE Vision Control Protocol), który określa kanały strumieniowe, mechanizmy przesyłania obrazu oraz danych konfiguracyjnych. Odpowiada również za sposób nadzoru i konfigurację urządzeń;
- protokół GVSP (GigE Vision Stream Protocol), który obejmuje określenie typów danych oraz metody przesyłania obrazów przy użyciu GigE;
- mechanizm wykrywania urządzeń GigE, pozwalający uzyskanie adresów IP urządzeń;
- plik opisu XML oparty na schemacie sformułowanym przez standard GenICam, umożliwiający dostęp do obsługi kamery i strumieni obrazów termowizyjnych.

Kamera termowizyjna jest połączona z modulem sprzętowym AT IRXBOX, który odpowiedzialny jest za sprzętowe wyzwalanie oraz synchronizację rejestracji obrazów i źródła wymuszenia cieplnego. Moduł posiada cyfrowe wejścia i wyjścia 24V optoizolowane, oraz po 1 wejściu i wyjściu analogowym optoizolowanym.

AT IRXBOX działa jako generator funkcji dla termografii Lockin oraz generator impulsów dla termografii impulsowej. Do stanowiska jest również podłączona karta pomiarowa USB-6251 firmy National Instruments. Jest to terminal DAQ z serii High Speed USB. Posiada 16 wejść analogowych, 2 wyjścia analogowe oraz 24 cyfrowe wejścia / wyjścia. Urządzenie opiera się na technologii NI Signal Streaming i umożliwia próbkowanie z prędkością do 1.25 MS/s przy pomiarach jednokanałowych.

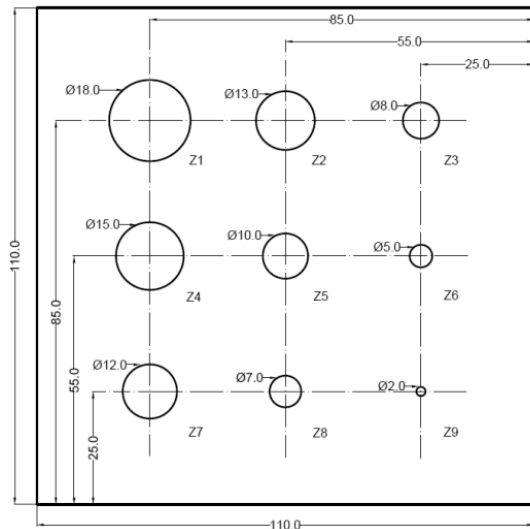
Źródłem wzbudzenia są lampy. Dwie lampy halogenowe o mocy po 500 W każda oraz jedna lampa halogenowa 2,5 kW z zintegrowanym wzmacniaczem. Lampy zasilane są napięciem 230 VAC. Regulacja mocy od 0% do 100%. Na wyposażeniu stanowiska są również dwie wysokoenergetyczne lampy błyskowe, każda o energii błysku 1000 J.

Wykrywanie oraz charakteryzacja defektów badanych próbek są możliwe dzięki oprogramowaniu zainstalowanemu na komputerze stacjonarnym. Zainstalowano specjalistyczne oprogramowanie do termowizyjnych badań nieniszczących IrNDT oraz środowisko LabVIEW firmy National Instruments. Oprogramowanie badawcze pozwala na przeprowadzenie oraz analizę badań czy tworzenie nowych algorytmów do wykrywania defektów.

Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne mające na celu wykrywanie nieciągłości materiałowe analizowanych próbek zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym do badań nieniszczących z wykorzystaniem termografii aktywnej [4]. Do badań użyto próbki poliwęglanowej o wymiarach 110x110 mm. Od spodniej strony próbki nawiercono dziewięć nieprzelotowych otworów. Defekty powietrzne zrobiono na głębokościach: $z_1 = 3,56$ mm, $z_2 = 2,97$ mm, $z_3 = 2,10$ mm, $z_4 = 3,18$ mm, $z_5 = 2,35$ mm, $z_6 = 1,48$ mm, $z_7 = 2,66$ mm, $z_8 = 1,85$ mm, $z_9 = 0,83$ mm względem wierzchniej strony próbki. Głębokość defektów powietrznych została zmierzona głębokocięmiernikiem mikrometrycznym Mitutovo Digimatic Depth No.329-250-10. Próbka poliwęglanowa została pokryta na powierzchni

lakierem o pasmowym współczynniku emisyjności $\epsilon \approx 0,98$. Na rysunku 3 zilustrowano wymiary oraz rozmieszczenie defektów powietrznych wykonanych w próbce poliwęglanowej.



Rys. 3. Wymiary i rozkład defektów utworzonych w próbce

Metodyka badań eksperymentalnych

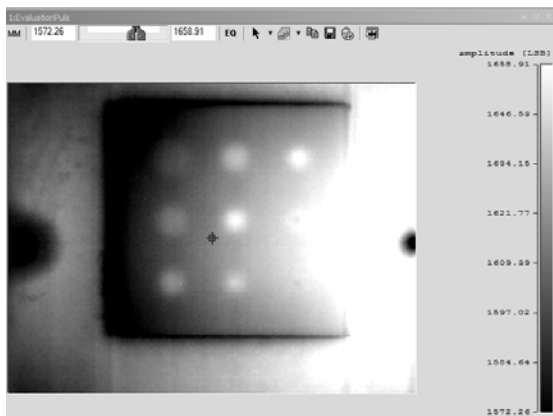
Badania eksperymentalne przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie próbkę poliwęglanową ogrzewano za pomocą jednej lampy halogenowej długim impulsem cieplnym o mocy 250 W. Czas trwania impulsu trwał 30s. Fazy nagrzewania oraz stygnięcia były sobie równe i wynosiły po 30s. Częstotliwość próbkowania ustalono na 3 Hz. Zarejestrowano sekwencje termogramów powierzchni badanej próbki.

Drugi etap badań polegał na ogrzewaniu powierzchni badanej próbki długim impulsem cieplnym [5] o mocy 500W, a fazy nagrzewania i stygnięcia miały parametry identyczne jak w etapie pierwszym. Zarejestrowano sekwencje termogramów powierzchni badanej próbki.

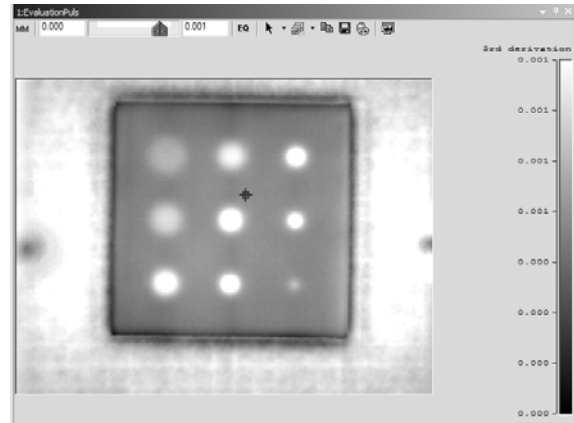
Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone poprzez dobranie metodą prób i błędów parametrów rejestracji sekwencji termogramów oraz źródła wymuszenia. Po odpowiednim doborze parametrów rejestracji oraz źródła wzbudzenia przeprowadzono analizę uzyskanych sekwencji.

Wyniki badań eksperymentalnych

Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla próbki poliwęglanowej. Termogramy powierzchni próbki zarejestrowano w chwili czasowej $\tau = 55s$.



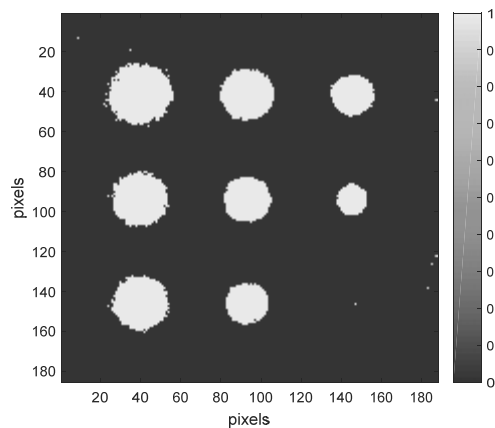
Rys. 4. Analiza sekwencji termogramów z wykorzystaniem jednej lampy (z zastosowaniem oprogramowania IrNDT)



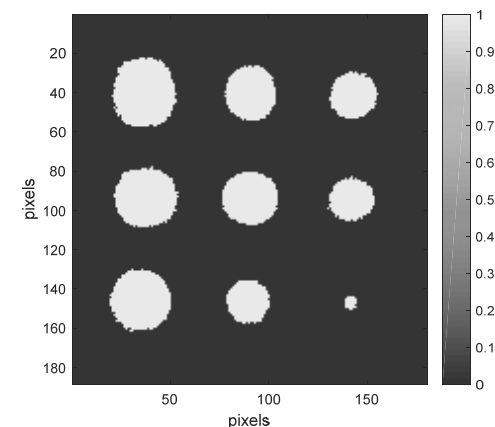
Rys. 5. Analiza sekwencji termogramów z wykorzystaniem dwóch lamp (z zastosowaniem oprogramowania IrNDT)

Wyniki przetwarzania sekwencji eksperymentalnych

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki przetwarzania sekwencji termogramów zarejestrowanych w badaniach eksperymentalnych. Na rysunku 6 zaprezentowano wynik binaryzacji termogramu z wykorzystaniem jednej lampy, który został zarejestrowany w chwili czasowej $\tau = 55s$. Natomiast rysunek 7 ilustruje wynik binaryzacji termogramu z wykorzystaniem dwóch lamp, zarejestrowanego również w chwili czasowej $\tau = 55s$.



Rys. 6. Wynik binaryzacji termogramu z wykorzystaniem jednej lampy ($\tau = 55s$)



Rys. 7. Wynik binaryzacji termogramu z wykorzystaniem dwóch lamp ($\tau = 55s$)

Do przetwarzania sekwencji wykorzystano oprogramowanie wykorzystujące metody cyfrowego przetwarzania obrazów. W dalszej kolejności przeanalizowano uzyskane sekwencje termogramów.

Wykorzystano oprogramowanie Matlab w celu uzyskania zwiększonego kontrastu cieplnego między badaną próbką a defektem. Do tego celu wykorzystano metody progowania lokalnego.

Zwiększenie widoczności defektów na badanej próbce zostało zrealizowane dzięki wykorzystaniu lokalnych metod progowania, m.in. metody *Median* oraz metody *Gaussian*.

Błędy klasyfikacji w obszarze tła oraz defektu zostały oznaczone na podstawie zdefiniowanej mapy defektów (obrazu ilustrującego rzeczywiste defekty).

Wnioski

Stanowisko do badań nieniszczących z wykorzystaniem termografii aktywnej pozwala na wykrywanie defektów w badanych materiałach. Dzięki zastosowaniu różnych metod progowania możliwe jest efektywniejsze wykrycie defektów, które początkowo są mało widoczne na zarejestrowanych termogramach badanych próbek. Podczas analizy przeprowadzonych badań zauważono niejednorodności nagrzania powierzchni próbki. Znaczne niejednorodności zaobserwowano podczas nagrzewania próbki jedną lampą w początkowej fazie nagrzewania oraz w końcowej fazie stygnięcia. Zastosowanie dwóch lamp halogenowych zmniejszyło niejednorodności nagrzania powierzchni badanej próbki, jednakże nie udało się ich uniknąć. Zastosowana w niniejszych badaniach metoda refleksyjna spowodowała zatem zmniejszenie dokładności wykrywania defektów za pomocą prezentowanych metod.

Najdokładniejsze wyniki binaryzacji otrzymano w końcowej fazie stygnięcia przy wykorzystaniu metod wykorzystujących filtry medianowe oraz dolnoprzepustowe Gaussa. W przypadku korzystania metody *Median* błędy klasyfikacji wynosiły 13,5 % w obszarze defektów oraz 1,1 % dla obszaru tła. Wykorzystanie metody *Gaussian* pozwoliło na obniżenie błędów klasyfikacji odpowiednio do 7,0% w obszarze defektu oraz do 0.58% w obszarze tła.

Zaobserwowano wzrost błędu klasyfikacji wraz ze wzrostem czułości algorytmu oraz wydłużenie czasu działania algorytmu przy korzystaniu z dużych okien sąsiedztwa.

Korzystając z algorytmów utworzonych w środowisku LabVIEW możliwe jest wykrywanie defektów badanych materiałów w czasie rzeczywistym. Dzięki temu możliwa jest bieżąca ocena efektywności wykrywania defektu z jednoczesną możliwością zmiany parametrów akwizycji oraz sterowania źródłami wymuszeń cieplnych. Możliwe jest również znaczne skrócenie czasu oświetlonego na dobór optymalnych parametrów akwizycji i sterowania wymuszeniami cieplnymi.

Autor:

mgr inż. Olga Sochacka, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: o.sochacka@el.pcz.czest.pl

LITERATURA

- [1] Maldague X. P., Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, John Wiley&Sons, Inc., New York, (2001)
- [2] Świdzki W., Szabra D., Wójcik J., Nondestructive evaluation of aircraft components by thermography using different heat sources, QIRT, (2002), 79-83
- [3] Dudzik S., Sochacka O., Zastosowanie metod progowania lokalnego do wykrywania defektów z użyciem termografii aktywnej, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 59 (2018), 43-46
- [4] Dudzik S., Jakubas A., Diagnostics of the Fe \$-based soft magnetism composites using active thermography, 2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), (2018)1-4
- [5] Dudzik S., Wyznaczanie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych i aktywnej termografii dynamicznej, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, (2013), 60-62