

doi:10.15199/48.2024.04.19

Metody wykrywania defektów z użyciem termografii w podczerwieni

Streszczenie. W pracy przedstawiono stosowane metody termografii w podczerwieni służące do wykrywania defektów. Na podstawie prac naukowo-badawczych autora oraz źródeł literaturowych przedstawiono badania nieniszczące głównie materiałów kompozytowych. Zaprezentowano ich metodykę, możliwości wykorzystania oraz niedoskonałości struktury badanego obiektu oraz stosowanej aparatury pomiarowej

Abstract. The paper presents the infrared thermography methods used for detecting defects. Based on the author's scientific and research works and literature sources, non-destructive tests, mainly of composite materials, were presented. Their methodology, possibilities of use and imperfections of the structure of the tested object and the measuring equipment used were presented (**Methods of detecting defects using infrared thermography**).

Słowa kluczowe: termografia w podczerwieni, metody aktywne, metoda pasywna, badania nieniszczące.

Keywords: infrared thermography, active methods, pasive method, non-destructive testing

Wstęp

Termografia w podczerwieni umożliwia bezkontaktowy pomiar temperatury na powierzchni badanego obiektu w celu zapewnienia jakości wyrobów. Dzięki technice tej możliwe jest wykrywanie nieciągłości materiałowych obiektu bez dokonywania zmian jego właściwości. Obiektem technicznym badań nieniszczących może być część wykonana z materiału kompozytowego, złącze, element konstrukcyjny, element urządzenia pokryty ochronną powłoką czy całe urządzenie. Badania nieniszczące mają zastosowanie w wielu dziedzinach takich jak: budownictwo, przemysł lotniczy, medycyna, energetyka konwencjonalna i jądrowa, przemysł samochodowy, rafinerijny oraz chemiczny.

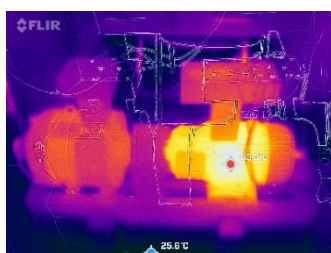
Termografia w podczerwieni

Badania termograficzne w podczerwieni pozwalają na pomiar obiektu technicznego przy pomocy promieniowania elektromagnetycznego. Umożliwiają one detekcję, rejestrację, przetwarzanie oraz prezentację graficzną promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt techniczny. W efekcie uzyskuje się termogram [1] będący odzwierciedleniem temperatury na powierzchni obiektu technicznego.

Obecnie stosuje się trzy sposoby diagnozowania obiektów technicznych przy użyciu termografii pasywnej:

- jednorazowe inspekcje,
- cykliczne inspekcje,
- monitorowanie ciągłe.

Na rys.1 przedstawiono inspekcję termowizyjną zestawu elektromaszynowego przy wykorzystaniu metody pasywnej. Inspekcję wykonano przy użyciu kamery FLIR ONE Pro.



Rys.1. Badanie termograficzne zestawu elektromaszynowego

Metoda aktywna polega na pomiarze temperatury na powierzchni obiektu z wykorzystaniem dodatkowego źródła

ciepłego. Obiekt techniczny mający zazwyczaj temperaturę równą temperaturze otoczenia może ujawnić swoje defekty podczas nagrzewania lub chłodzenia. W konwencjonalnych zestawach pomiarowych korzysta się z następujących źródeł stymulacji cieplnych:

- lampy błyskowe,
- lampy halogenowe,
- prądy wirowe,
- prąd elektryczny,
- nagrzewanie/chłodzenie gazem lub płynem
- drgania mechaniczne

Metody aktywne

Metody aktywne badań termograficznych można klasyfikować według [2]:

- a) rodzaju źródła impulsu ciepłego,
- β) wzajemnego położenia źródła ciepłego i kamery termowizyjnej,
- χ) kształtu oraz wymiarów strefy intensyfikacji ciepła i rejestracji kamery.

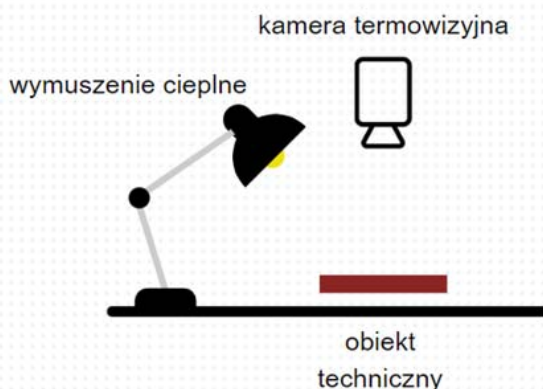
Najpowszechniej stosuje się klasyfikację według wzajemnego położenia źródła ciepłego i kamery termowizyjnej, którą dzieli się na następujące metody:

- refleksyjna, w której obiekt techniczny stymulowany jest przy jednostronnym ułożeniu kamery termowizyjnej oraz źródła stymulacji cieplnej (rys. 2a). W metodzie tej często występuje nierównomierne nagrzewanie całej powierzchni obiektu technicznego, co może utrudniać efektywne wykrywanie defektów.
- transmisyjna, w której stymulowany jest obiekt techniczny przy przeciwstawnym ułożeniu kamery termowizyjnej oraz źródła stymulacji cieplnej (rys. 2b). W metodzie tej występowanie nierównomiernego nagrzewania jest dużo rzadsze. Obiekt techniczny nie może być jednak gruby, aby mogło dojść do ogrzania całego obiektu.
- cieplna stymulacja przy wykorzystaniu wewnętrznego źródła, która wykorzystuje m.in. prądy wirowe, głowice ultradźwiękowe, nagrzewnice.

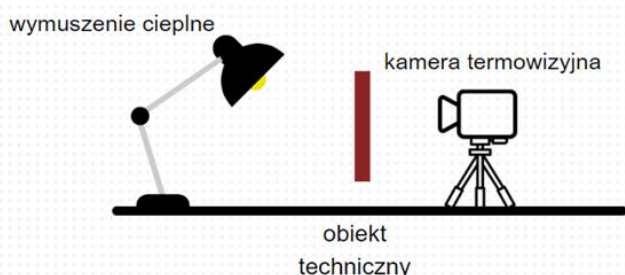
Inny podział metod aktywnych został zaproponowany przez X.P.Maldague w [3]:

- termografia impulsowa
- termografia długiego impulsu
- termografia wibracyjna
- termografia synchroniczna

a)



b)



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań metodą refleksyjną (a) i transmisyjną (b)

Termografia impulsowa (ang. *Pulsed Thermography*) polega na wytworzeniu impulsów wymuszenia cieplnego o krótkim przebiegu czasowym z określoną częstotliwością i energią. Wyznacza się oraz analizuje rozkład temperatury obiektu technicznego po uprzednim równomiernym nagraniu go impulsem cieplnym [4]. Wykrycie defektu na wierzchnich warstwach obiektu technicznego stwierdza się na podstawie różnicy pomiędzy zarejestrowanym przebiegiem przyrostu temperatury a przebiegiem czasowym przyrostu temperatury powierzchni badanego obiektu dla wymuszenia cieplnego w postaci impulsu Diraca. Przebieg ten wyraża równanie [5]:

$$(1) \quad \Delta T(\tau) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi\tau}}$$

gdzie: ΔT – przyrost temperatury obiektu, Q - gęstość energii, e - efuzyjność cieplna materiału obiektu, τ - czas.

Termografia długiego impulsu (ang. *Step Heating*) w przeciwieństwie do impulsowej zakłada monitorowanie całego procesu ogrzewania oraz stygnięcia obiektu technicznego. Wykorzystywana gęstość energii do wymuszenia cieplnego jest dużo niższa niż przy metodzie impulsowej. Typowym wymuszeniem cieplnym wykorzystywanym w tej metodzie jest lampa halogenowa czy laser argonowy. Stosunkowo długie i wolne nagrzewanie umożliwia badanie wielowarstwowych struktur obiektów. Badając szybkość zmian temperatury na powierzchni obiektu można oszacować grubość warstw w strukturze wielowarstwowej [6]. Jest to możliwe dzięki różnicom w przewodności cieplnej w poszczególnych warstwach obiektu technicznego, które wpływają na spadek lub wzrost szybkości zmian temperatury na powierzchni w

trakcie ogrzewania. Wówczas możliwe jest zmierzenie czasu charakterystycznego t_c dla równomiernego przyrostu temperatury oraz obliczyć grubość warstwy L .

$$(2) \quad t_c \approx \frac{0,36L^2}{\alpha}$$

gdzie: α – dyfuzyjność cieplna materiału

Termografia wibracyjna (ang. *Vibrothermography*) polega na ocenie struktur materiałowych obiektów technicznych na podstawie powierzchniowych pól temperatury przy okresowych obciążeniach mechanicznych [7]. Obciążenia mechaniczne można realizować np. przy pomocy fal dźwiękowych lub ultradźwiękowych. Wówczas dochodzi do podwyższenia temperatury obiektu technicznego na skutek wewnętrznej tarcia ścianek defektu oraz efektu piezoelektrycznego. Promieniowane ciepło z obiektu technicznego jest rejestrowane się przy pomocy kamery termowizyjnej.

Termografia synchroniczna (ang. *Modulated Thermography*) zwana również lock-in, oparta jest na teorii fali cieplnej. W metodzie tej źródłem wymuszenia cieplnego jest strumień cieplny o ustalonej częstotliwości. W trakcie badań obiekt techniczny zostaje nagrany przy pomocy lampy, której moc zmienia się okresowo. Jednocześnie rejestruje się sekwencje termogramów przy pomocy kamery termowizyjnej połączonej z urządzeniem do cyfrowej akwizycji danych. Termografia lock-in pozwala na wyznaczenie obrazów amplitudy i przesunięcia fazowego odpowiedzi cieplnej obiektu technicznego pobudzonego przy pomocy strumienia cieplnego. Aby otrzymać amplitudogram oraz fazogram należy zastosować jedną z metod obliczeniowych:

➤ metoda klasyczna (ang. *Standard lock-in method*)– polega na przemnożeniu sygnału odpowiedzi badanego obiektu technicznego $s(t)$ na strumień wymuszenia cieplnego z sygnałami referencyjnymi fazy p_f oraz kwadratury q_f , które są przesunięte względem wymuszenia cieplnego o 90° [6]. Znając wartości próbek N obu sygnałów referencyjnych SP_f oraz SQ_f można wyznaczyć amplitudę A_T oraz fazę φ sygnału z następujących wzorów:

$$(3) \quad A_T = \frac{2}{N} \sqrt{SP_f^2 + SQ_f^2}$$

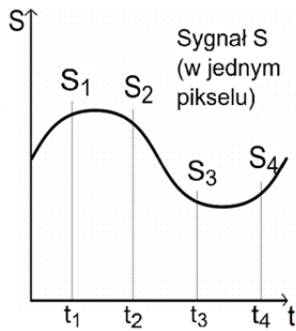
$$(4) \quad \text{tg}(\varphi - \varphi_r) = \frac{SQ_f}{SP_f}$$

gdzie:

$$(5) \quad SP_f = \sum_{i=1}^N s(t_i) \cdot p_f(t_i)$$

$$(6) \quad SQ_f = \sum_{i=1}^N s(\tau_i) \cdot q_f(t_i)$$

➤ metoda czterech obrazów (ang. *Four-bucked method*) polega na równoodległej rejestracji czterech termogramów, które odpowiadają przesunięciom w fazie o 90° strumienia cieplnego w formie sinusoidalnej wzbudzanego w czasie jednego cyklu [5]. Aktywacja kamery termowizyjnej jest zsynchronizowana ze źródłem strumienia cieplnego. W metodzie tej stosuje się transformację Fouriera czasowo zależnej amplitudy każdego z pikseli termogramu.



Rys.3. Cykl fali ciepłej

Następnie amplituda i faza są obliczane dla każdego piksela obrazu przy wykorzystaniu następujących równań:

$$(7) A_T = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2}$$

$$(8) \varphi_T = \arctan \frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}$$

gdzie: S_1, S_2, S_3, S_4 - wartości temperatury powierzchni w chwilach występowania wymuszenia przesuniętego o 90°

➤ metoda wariacyjna (ang. *Variance method*) bazuje na założeniach analizy statystycznej. Aktywacja kamery termowizyjnej nie jest zsynchronizowana ze źródłem strumienia ciepłego. Z tego powodu znana jest jedynie amplituda sygnału. Zakładając, że strumień wymuszenia ciepłego jest sinusoidalny, a zakłócenia pochodzące z urządzeń pomiarowych oraz strumienia są losowe to amplitudę należy wyznaczyć z równania [8]:

$$(9) A = \sqrt{2(V_s - V_b)}$$

gdzie: V_s - wariancja sygnału eksperymentalnego, V_b - wariancja zakłócenia

➤ metoda najmniejszych kwadratów (ang. *Least squared method*) polega na wyznaczeniu amplitudy i przesunięcia fazowego w procesie minimalizacji błędu średniokwadratowego między sygnałem mierzonym a teoretycznym [9]. Amplitudę i fazę oblicza się z następujących równań:

$$(10) \operatorname{tg} \Delta \varphi = \frac{\sqrt{Q_f}(\bar{N} - Q_{2f}) - \sqrt{P_f}P_{2f}}{\sqrt{P_f}(\bar{N} + Q_{2f}) - \sqrt{Q_f}P_{2f}}$$

$$(11) A = 2 \frac{\sqrt{P_f} \cos \Delta \varphi + \sqrt{Q_f} \sin \Delta \varphi}{\bar{N} - Q_{2f} \cos 2 \Delta \varphi + P_{2f} \sin 2 \Delta \varphi}$$

gdzie: P_{2f} i Q_{2f} - dotyczy funkcji odniesienia o podwójnym impulsie.

Alternatywne metody i techniki aktywnej termografii

Termografia impulsowo-fazowa (ang. *Pulsed-phase thermography*), podobnie do termografii impulsowej, polega na wytworzeniu impulsów wymuszenia ciepłego o krótkim przebiegu czasowym z określoną częstotliwością i energią [10]. W trakcie trwania impulsu ciepłego oraz po jego zakończeniu analizuje się rozkład temperatury obiektu w postaci sekwencji termogramów. Sekwencja ta umożliwia stworzyć amplitudogram oraz fazogram. W metodzie tej wykorzystuje się sygnał odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości $F(f)$. W praktyce sygnał ten przedstawia się następująco:

$$(12) F(f) = A_p \Delta \tau_p \frac{\sin(\pi f \Delta \tau_p)}{f \Delta \tau_p}$$

gdzie: A_p - amplituda rzeczywistego impulsu ciepłego, τ_p - czas trwania wymuszenia ciepłego, f - częstotliwość

Generowanie obrazów parametrycznych odbywa się przy pomocy jednowymiarowej dyskretnej transformaty Fouriera. W programach obliczeniowych wdrożona jest w postaci szybkiej transformaty Fouriera. Analiza odpowiedzi ciepłej zewidencjonowanej dla powierzchni obiektu technicznego w dziedzinie częstotliwości może bazować na korelacji:

$$(13) F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) \exp\left(\frac{2\pi i k n}{N}\right) = \operatorname{Re}(n) + i \operatorname{Im}(n)$$

gdzie: $F(n)$ - wynik transformaty dla danego piksela termogramu, n - indeks częstotliwości dyskretnej, $T(k)$ - wartość temperatury dla danego piksela określona na podstawie k -tego termogramu sekwencji (dla k -tej chwili czasowej), N - całkowita liczba próbek termogramów, i - jednostka urojona, $\operatorname{Re}(n)$, $\operatorname{Im}(n)$ - część rzeczywista i urojona dyskretnej transformaty Fouriera dla częstotliwości dyskretnej o indeksie n .

Następnie wylicza się widmo amplitudowe i fazowe transformaty według wzorów:

$$(14) A(n) = \sqrt{\operatorname{Re}(n)^2 + \operatorname{Im}(n)^2}$$

$$(15) \varphi(n) = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(n)}{\operatorname{Re}(n)}\right)$$

Aby wygenerować amplitudogram oraz fazogram należy przeprowadzić dla każdego piksela termogramu powyższe obliczenia.

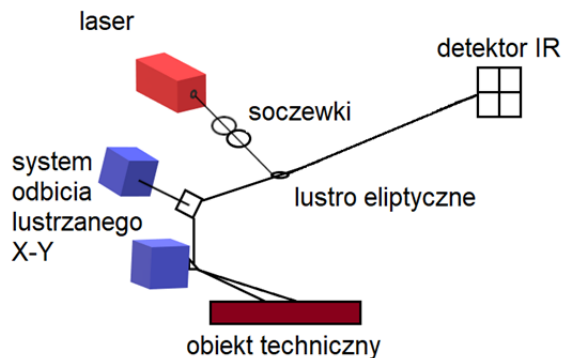
Elektromagnetyczna termografia w podczerwieni (EMIR) łączy w sobie wykorzystanie kamery termowizyjnej oraz ekranu wykonanego z folii fototermicznej, która przekształca część promieniowania elektromagnetycznego wysokiej częstotliwości w ciepło [11]. Przyrost temperatury folii ΔT oblicza się według wzoru:

$$(16) \Delta T = \frac{W}{c\rho L + 2\alpha}$$

gdzie: W - gęstość powierzchniowa pochłoniętej energii, C, ρ, L - charakterystyki termofizyczne i grubość folii, α - zlinearyzowany współczynnik wymiany ciepła na powierzchni folii.

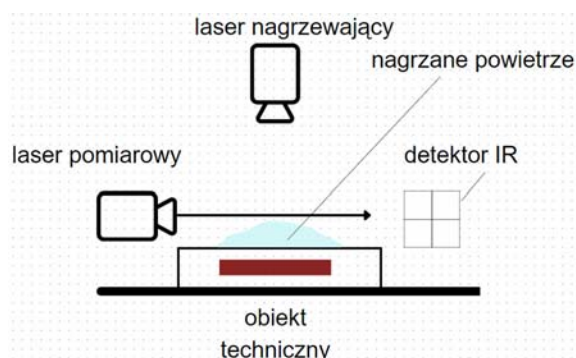
Metoda echo-impulsowa fal ciepłych (ang. *Pulse-echo thermal wave approach*) [12] - to badanie nieniszczące polegające na wykorzystaniu przetwornika wykonanego z materiału piezoelektrycznego, który przekazuje impuls energii mechanicznej do elementu. Energia przechodzi do obiektu odbijając się od tylnej powierzchni i jest wykrywana przez ten sam przetwornik, ukazując sygnał na oscyloskopie z podstawą czasu. Metoda wykorzystywana jest głównie do wykrywania defektów w rurach. Aby skutecznie przetestować obiekt należy odpowiednio dobrać długość fali do wielkości defektu.

Metoda latającej plamki (ang. *Flying spot technique*) - to kolejna technika wykrywania wad powierzchniowych obiektów [13]. W technice tej wykorzystuje się laser, który lokalnie ogrzewa przemieszczający się obiekt. Do wykrywania wad wykorzystuje się czujnik podczerwieni, który zamontowany jest w stałej odległości od lasera. Nowsze wdrożenia tej techniki wykorzystują kamerę termowizyjną zamiast pojedynczego czujnika na podczerwień. Na rys.3 przedstawiono zasadę działania techniki latającej plamki. Wadą tej techniki jest długi czas pomiaru oraz nieżyteczność dla dużych i ciężkich obiektów.



Rys.4. Schemat stanowiska do badań metodą latającej plamki

Metoda mirażu (ang. *Mirage method*) - wykorzystuje strumień wzbudzenia cieplnego do ogrzania obiektu technicznego [14]. Pomiary temperaturowe dokonywane są po wyłączeniu wzbudzenia cieplnego. Metoda ta wykorzystywana była najczęściej do badań laboratoryjnych. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.4.



Rys.5. Schemat układu pomiarowego metody mirażu

Metoda przy wymuszonej dyfuzji cieplnej (ang. *Forced diffusion thermography*)- opisana w [15] przedstawia badanie obiektu, w którym strumień wymuszenia cieplnego jest wytwarzany przez lampy błyskowe lub nagrzewnice. Obiekt techniczny jest badany przez osłonę ze szczelinami i przesuwana się w obszarze działania kamery termowizyjnej. Szerokość i ilość pasm w szczelinie można dowolnie zmieniać do odpowiedniego modulowania sygnału temperaturowego. W każdym obszarze projekcji występuje ciągle przechodzenie gorących linii, co skutkuje quasi-statycznym stanem cyklicznych oscylacji termicznych. Oscylacje te można z łatwością wyznaczyć przy pomocy różnicowej kamery termowizyjnej, która mierzy względną fazę oraz amplitudę.

Podsumowanie

Diagnostyka termiczna jest stosowana w sytuacji gdy na podstawie symptomów temperaturowych możliwa jest identyfikacja stanu badanego obiektu technicznego. Celem otrzymania wiarygodnego rezultatu wykrycia defektu w materiale za pomocą badań nieniszczących, potrzebna jest znajomość celu pomiarów, znajomość praw fizyki oraz walidacja badań różnymi metodami. Dysponując szerokim spektrum wyboru metod badań nieniszczących trudno określić, która jest najbardziej skuteczna. Analizując różne metody termograficzne, można stwierdzić, że:

- metoda pasywna pozwala jedynie na diagnostykę jakościową;

- wykrycie defektu położonego głęboko pod powierzchnią badanego obiektu technicznego wymaga użycia fal cieplnych o niższej częstotliwości;
- fazy fal wymuszenia cieplnego nie zależą od emisyjności powierzchni badanego obiektu, co stanowi zaletę metod impulsowo-fazowej oraz lock-in;
- strumień wymuszenia cieplnego w postaci impulsu Diraca stymulujący obiekt techniczny pozwala na wykrycie nieciągłości na całej głębokości obiektu. Należy jednak zwrócić uwagę na odpowiednią moc nagrzewania, możliwość przegrzania obiektu oraz na szumy;
- metoda impulsowo-fazowa jest jedną z najczęściej wykorzystywanych metod w termografii aktywnej ze względu na wysoką sprawność wykrywania defektów;
- termografia synchroniczna wymaga stosowania sinusoidalnego strumienia wymuszenia cieplnego.

Autor: mgr inż. Olga Kolečka, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: olga.kolecka@pcz.pl

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa, Pomiary termowizyjne w praktyce, wyd. PAK, (2004)
- [2] 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
- [3] X. P. V. Maldague „Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing” John Wiley&Sons, Inc., New York, (2001)
- [4] Sochacka O., Stanowisko do badań nieniszczących z zastosowaniem aktywnej termografii w podczerwieni, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.97 (2021), 174-177
- [5] Dudzik S., Wyznaczanie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej i sztucznych sieci neuronowych, (2013), 55-62
- [6] Świdzki W., Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych, *Wojsko, Problemy Techniki Uzbrojenia*, R.38, z.112,(2009) 75-92
- [7] Renshaw J., Chen J.C., Holland S.D., Thompson R.B., The sources of heat generation in vibrothermography, *NDT&E International*, T.44, W 8, (2011), 736-739
- [8] Offermann S., Bissieux C., Beaudoin J.L., Statistical treatment applied to infrared thermoelastic analysis of applied and residual mechanical stresses, *Revue Generale de Thermique*, Vol. 37 W 8, (1998), 43-48
- [9] Krapez J.C., Gardette G., Balageas D., Lock-in IR thermography: advantages and problems of some approaches, *Proceedings 3rd International Workshop on Advanced Infrared Technologies and Applications*, (1995), 219-237
- [10] Maldague X., Marinetti S., Pulse phase infrared thermography, *Journal of Applied Physics*, Vol.79,(1996), 2694-2698
- [11] Balageas D., Levesque P., Bremond P., Lasserre J.L., Paupert A., Performance of the EMIR (ElectroMagnetic/InfraRed) thermographic technique and improvement, Conference: *Thermographie Kolloquium*, (2005)
- [12] Favro L.D., Han X., Wang Y., Kuo P.K., Thomas R.L., Pulse-Echo Thermal Wave Imaging, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 14A*, (1995), 425-429
- [13] Gruss C., Lepoutre F., Balageas D., Nondestructive Evaluation using a flying-spot camera, *Contrôle non destructif par camera photothermique*, (1993)
- [14] Singh R.N., Negi S.S., Sahay A.K., Rajeshwar V., Mirage Formation in the Infrared Region and Its Effects on Thermal Imaging Applications, *Applications of Photonic Technology*, (1995), 235-240
- [15] Lesniak J.R., Bazile D.J., Stress Photonics, Forced Thermography Technique and Projector Design, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, (1996)