

METODY I TECHNIKI TERMOGRAFII W PODCZERWIENI W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Streszczenie: W artykule, na podstawie prac naukowo-badawczych autora oraz danych literaturowych, przedstawiono stosowane metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych. Podano ich możliwości, zalety oraz ograniczenia wynikające zarówno z fizyki wykorzystywanych zjawisk, struktury badanych obiektów jak i stosowanej aparatury pomiarowej.

NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS AND TECHNIQUES OF COMPOSITE MATERIALS BY IR THERMOGRAPHY

Summary: Nondestructive testing methods and techniques of composite materials by IR thermography on basis of scientific and research works of author as well as literature data are presented in the paper. Their possibilities and advantages as well as limitations resulting both with used physics phenomena and structure of testing objects and used measuring apparatus are presented too.

1. Wstęp

Metody i techniki badań nieniszczących służą do wykrywania nieciągłości materiałowych i oceny właściwości materiałów bez powodowania zmian ich właściwości użytkowych. Są one stosowane w przemyśle ze względu na konieczność zapewnienia wysokiej jakości półwyrobów, wyrobów końcowych, urządzeń i konstrukcji jak również w diagnostyce. Obiektami technicznymi badań nieniszczących są różnego typu złącza i połączenia (spawane, zgrzewane, lutowane, klejone itp.) oraz obiekty wykonane z materiałów kompozytowych jak również różnego typu powłoki i pokrycia [1].

Materiał kompozytowy jest tworzywem powstałym w wyniku połączenia co najmniej dwóch materiałów, z których jeden wiążący stanowi osnowę, a inne spełniają rolę wzmacniającą i są wprowadzane np. w postaci ziarnistej, włóknistej lub warstwowej. W wyniku połączenia tych materiałów powstaje struktura, której własności (np. mechaniczne, cieplne itp.) są niemożliwe do osiągnięcia w materiałach wyjściowych [2]. Cenną cechą kompozytów jest możliwość projektowania ich struktury w kierunku założonych właściwości, które przewyższają właściwości tradycyjnych materiałów (np. metali). Dlatego jest szerokie zainteresowanie i dynamiczny rozwój zastosowań materiałów kompozytowych w przemyśle zbrojeniowym. Ze względu na specyfikę struktury materiałów kompozytowych tradycyjne metody badań nieniszczących (np. radiologiczne, ultradźwiękowe) mogą być nieskuteczne w wykrywaniu wewnętrznych wad lub uszkodzeń, które mogą występować w tych materiałach. Powoduje to zainteresowanie innymi metodami badań nieniszczących, które mogą być bardziej skutecznego w tego typu aplikacjach. Bardzo często parametry termofizyczne

materiałów z których zbudowana jest struktura materiału kompozytowego oraz występujących w nim wad i uszkodzeń znacznie się różnią. Pozwala to na skuteczne zastosowanie metod i technik termografii w podczerwieni do wykrywania tego typu nieciągłości materiałowych w kompozytach.

2. Termografia w podczerwieni pasywna i aktywna

Termografia w podczerwieni jest dziedziną techniki zajmującą się detekcją, rejestracją, przetwarzaniem i wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt, jako wynik otrzymujemy obraz (termogram) będący odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu [3]. Należy zauważyć, że wszystkie ciała stałe, ciecze i gazy, których temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego (0 K) wysyłają promieniowanie podczerwone.

Badania nieniszczące z zastosowaniem termografii w podczerwieni można podzielić na procedury badań pasywnych i aktywnych [4, 5]. W procedurach pasywnych obiekt badań charakteryzuje się polem temperatury powstałym w procesie jego funkcjonowania. Dlatego procedury pasywne stosowane są głównie do badań nieniszczących urządzeń lub ich elementów w trakcie funkcjonowania lub krótko po jego zakończeniu, kiedy nadmierne różnice w rozkładzie temperatury na ich powierzchni mogą świadczyć o ich wadliwości. W wyniku obciążeń mechanicznych lub cieplnych, powstałych w trakcie funkcjonowania obiektu badań, defekty wypromieniowują lub pochłaniają energię cieplną dlatego można je diagnozować (identyfikować) metodami pasywnymi.

W procedurach aktywnych wykorzystuje się dodatkowe źródło cieplnej stymulacji (nagrzewania lub chłodzenia) obiektu. Defekty materiałów, mające przed rozpoczęciem badania jednorodną temperaturę, z zasady równą temperaturze otoczenia, nie tworzą „użytecznych” sygnałów temperaturowych i wymagają nagrzewania lub ochładzania całego badanego obiektu lub jego części. W trakcie badania tworzą dynamiczne pole temperatury, a wyniki badania istotnie zależą od czasu obserwacji. Aktywne metody wymagają bardzo często również specjalnych procedur obróbki danych.

Z punktu widzenia badań materiałów kompozytowych do ich diagnozowania w większości przypadków będą stosowane procedury badań aktywnych.

3. Metody aktywne

Metody aktywnych badań termograficznych mogą być klasyfikowane następująco wg:

- a) wzajemnego położenia źródła cieplnej stymulacji i urządzenia do rejestracji temperatury,
- b) rodzaju źródła cieplnej stymulacji,
- c) kształtu i wymiarów strefy stymulacji ciepła i rejestracji temperatury.

Najczęściej stosowana jest klasyfikacji (a) wg wzajemnego położenia źródła ciepła i urządzenia do rejestracji temperatury, w której występuje podział na następujące metody:

- a) odbiciową (reflection),
- b) transmisyjną (transmission),
- c) cieplna stymulacja za pomocą wewnętrznego źródła.

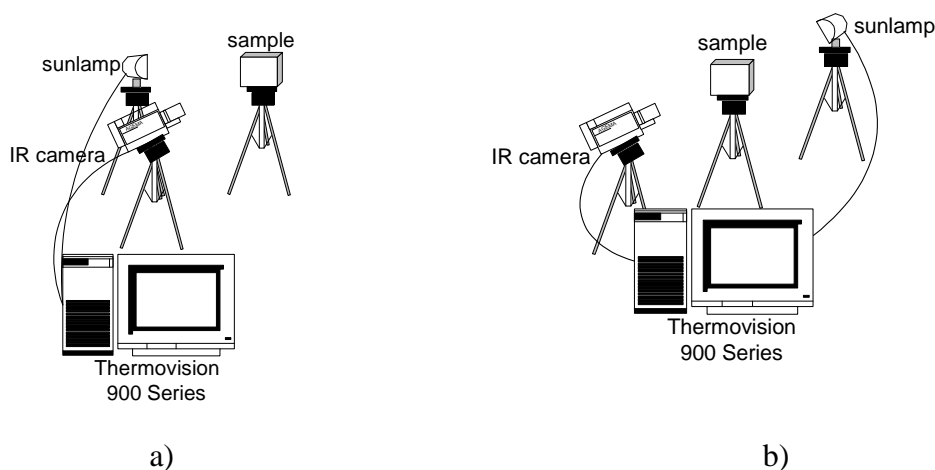
Wzajemne położenie źródła cieplnej stymulacji i urządzenia rejestrującego temperaturę wpływa na wykrywalność defektów i jest ważne z punktu widzenia praktycznej realizacji badania. Stymulację cieplną badanego obiektu można wykonać na drodze nagrzewania lub chłodzenia, co z punktu widzenia termodynamiki jest równoważnościowe przy jednakowej mocy strumienia ciepła. Jednakże, uwzględniając osiągniętą gęstość strumieni ciepła, a także

czynnik technologiczności i możliwe przeszkody, bardziej praktyczne jest nagrzewanie. Największą gęstość mocy w strefie stymulacji zapewnia nagrzewanie promieniowaniem optycznym, generowane różnego typu lampami i laserami. Najbardziej prostym sposobem można nagrzać powierzchnię badanego obiektu za pomocą elektrycznych lamp żarowych. Osiągana gęstość nagrzewania może stanowić do kilku kW/m^2 w strefie o średnicy 1 m przy łatwo regulowanej długości nagrzewania.

Metoda odbiciowa, nazywana również procedurą jednostronną, polega na tym, że źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdują się po tej samej stronie badanego obiektu (rys. 1 a) [6]. Wadą tej metody jest nierównomierne nagrzewanie całej powierzchni badanego obiektu co utrudnia wykrywanie defektów oraz zakłócenia spowodowane odbitym promieniowaniem.

Metoda transmisyjna, nazywana również procedurą dwustronną, polega na tym, że źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdują się po przeciwnych stronach badanego obiektu (rys.1 b) [6]. Wymaga ogrzewania całego wyrobu i nie może być zastosowana do grubych obiektów badań. Wpływ nierównomiernego nagrzewania jest znacznie mniejszy.

Stymulacja cieplna za pomocą **wewnętrznych źródeł ciepła** (np. pobudzenie mechaniczne, ultradźwięki, mikrofałe, prądy wirowe) wykazuje brak zakłóceń optycznych, a także to, że temperaturowe anomalie powstają tylko w obszarach z defektami w wyniku tarcia ścianek pęknięć, tworzenia stref plastycznej deformacji i innych mechanicznych efektach.



Rys.1. Schemat stanowiska do badań metodą odbiciową (a) i transmisyjną (b)

Innym podziałem jest podział wg rodzaju źródła stymulacji cieplnej, którym może być źródło:

- promieniowania optycznego,
- prądów wirowych,
- prądu elektrycznego,
- promieniowania bardzo wysokiej częstotliwości,
- wewnętrznego nagrzewania/chłodzenia gazem lub płynem,
- zewnętrznego nagrzewania/chłodzenia powietrzem,
- drgań mechanicznych.

Jako źródła promieniowania optycznego oprócz wspomnianych wcześniej lamp żarowych i laserów często stosowane są lampy błyskowe dużej mocy (flash tubes) dające dużą gęstość energii na powierzchni badanego obiektu. Lasery są zdolne zabezpieczyć praktycznie dowolną gęstość energii jednak niska sprawność, duże wymiary i wysoka cena ograniczają ich wykorzystanie w badaniach laboratoryjnych.

Wyroby kompozytowe przewodzące prąd elektryczny można nagrzewać za pomocą prądów wirowych, pobudzanych induktorami. Gęstość pochłanianej mocy promieniowania cieplnego jest niższa, niż w przypadku nagrzewania źródłami promieniowania optycznego, jednak nagrzewanie indukcyjne nie powoduje zaburzeń w wyniku odbitego promieniowania i pozwala np. nagrzewać metale przez niemetaliczne powierzchniowe warstwy. Mogą być wykorzystywane prądy o stosunkowo wysokiej częstotliwości do ok. 100 kHz. Może być również do nagrzewania wykorzystywany prąd elektryczny. Tego typu nagrzewanie nie stwarza również zaburzeń optycznych i jest efektywne przy wykrywaniu pęknięć, położonych prostopadle do kierunku przepływu prądu. Wadą jest zapewnienie kontaktu przy wprowadzaniu do badanego wyrobu dużych prądów.

Nagrzewanie promieniowaniem bardzo dużej częstotliwości rekomendowane jest przy wykrywaniu obszarów podwyższonej wilgotności w porowatych niemetalach.

Za pomocą cieczy lub gazu można nagrzewać lub chłodzić obiekt wykorzystując zjawisko konwekcji. Można np. przez obiekt przepuszczać gorącą lub zimną wodę, nagrzewać za pomocą strumienia gorącego powietrza czy szybko schładzać powierzchnię badanego obiektu za pomocą par ciekłego azotu. Nagrzewanie gazem w procedurze jednostronnych badań termograficznych w wielu przypadkach nie jest gorsze od optycznego nagrzewania dzięki niskiemu poziomowi zakłóceń, powstających na skutek oddziaływania odbitego promieniowania.

Można również dokonać klasyfikacji metod ze względu na kształt i wymiary strefy stymulacji ciepła i rejestracji temperatury na:

- rozłożone (powierzchniowe) nagrzewanie,
- punktowe nagrzewanie,
- liniowe nagrzewanie.

W ostatnich latach metoda nagrzewania o rozłożonym rozkładzie energii na powierzchni badanego wyrobu wydaje się najbardziej popularna dzięki pojawieniu się na rynku nowej generacji kamer termowizyjnych, wykorzystaniu dużej mocy impulsowych nagrzewaczy i opracowaniu efektywnych algorytmów obróbki termogramów.

Przy punktowym nagrzewaniu i ciągłym skanowaniu powierzchni obiekt nagrzewa się w małej strefie, a temperatura jest rejestrowana z pewnym opóźnieniem, wielkość którego zależy od głębokości, na której występuje defekt. Przy zewnętrznym nagrzewaniu ciągłe skanowanie zapewnia maksymalne kontrasty temperaturowe nad wewnętrznymi defektami i jest szczególnie przydatne do wykrycia pęknięć, położonych prostopadle do powierzchni obiektu badań. Podstawową wadą nagrzewania punkowego jest niska wydajność badań.

Przy nagrzewaniu liniowym obiekt nagrzewa się w wąskim długim pasie, a strefa nagrzewania przemieszcza się po powierzchni wyrobu. Liniowe nagrzewanie jest szczególnie przydatne przy wykrywaniu pionowych, w stosunku do powierzchni badanego obiektu, pęknięć.

3.1. Główne metody aktywnych badań termograficznych

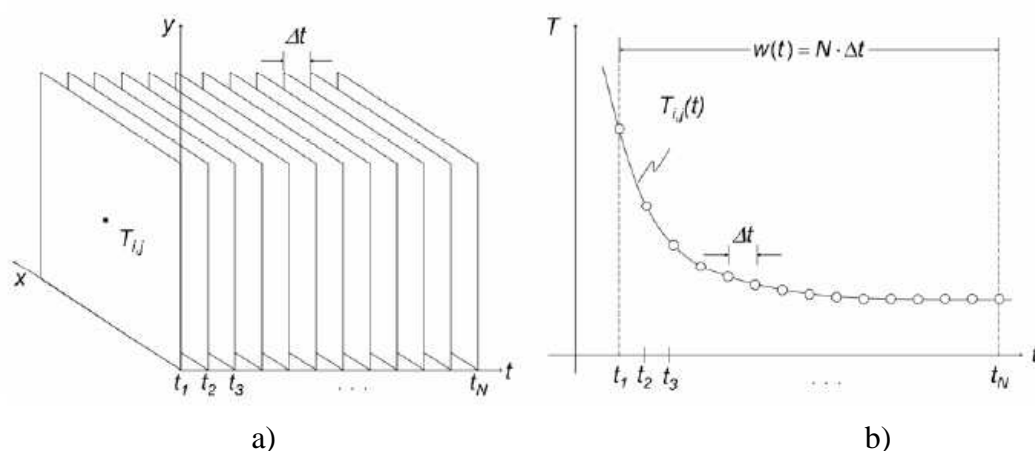
X. Maldague [4] przedstawia następujące główne metody aktywnych badań termograficznych:

- termografię impulsową (Pulsed Thermography – PT),
- metodę długiego impulsu (Step Heating – SH),
- termografię lock-in (Lock-in Thermography – LT),
- termografię wibracyjną (Vibrothermography – VT).

3.1.1. Termografia impulsowa

Termografia impulsowa jest jedną z najbardziej popularnych obecnie metod stosowanych w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych. Badania tego typu

polegają na zastosowaniu lampy, lasera itp. do generacji impulsu (lub serii impulsów) wymuszenia cieplnego, który trwa od kilku milisekund dla materiałów o wysokiej przewodności cieplnej (np. metale) do kilku sekund w przypadku materiałów o niskiej przewodności cieplnej. Można również użyć impulsu schładzającego powierzchnię badanego obiektu (np. strumień zimnego powietrza, ciekłego azotu itp.). Termografia impulsowa może być realizowana zarówno metodą odbiciową jak i transmisyjną. Rejestrowana jest sekwencja obrazów (termogramów) z jednakowym odstępach czasu między obrazami (rys.2). Po wyłączeniu źródła promieniowania obiekt schładza się do temperatury otoczenia. W fazie stygnięcia wyznaczany jest rozkład temperatury na powierzchni badanego obiektu, który poddawany jest analizie. W zależności od parametrów cieplnych badanej struktury materiału oraz występujących w niej ukrytych pod powierzchnią wad strefy o wyższej lub niższej temperaturze na powierzchni będą wskazywały strefy, pod którymi mogą występować wady materiału. Często do wskazania stref z wadami trzeba zastosować specjalne techniki obróbki termogramów.



Rys.2. (a) 3D macierz temperatury w dziedzinie czasu (b) przebieg zmian temperatury punktu ze strefy bez defektu o współrzędnych (i,j) [7]

Na podstawie rozkładu temperatury na stygnącej powierzchni można określić głębokość położenia defektu, ponieważ defekty położone głębiej pod powierzchnią ujawniają się później i przy mniejszym kontraście temperaturowym. Relacja ta opowiada (w przybliżeniu) czasowi obserwacji t (ujawnienia wady) jako funkcji kwadratu podpowierzchniowej głębokości wady z :

$$t \approx \frac{z^2}{\alpha} \quad (1)$$

gdzie:

α – dyfuzyjność cieplna materiału

3.1.2. Metoda długiego impulsu

W przeciwieństwie do metody impulsowej w metodzie z zastosowaniem długiego impulsu grzewczego do pobudzania cieplnego obiektu zmiany rozkładu temperatury na powierzchni są monitorowane zarówno podczas całego procesu ogrzewania jak i schładzania [29]. Metoda ta jest często w literaturze angielskojęzycznej nazywana jako time-resolved infrared radiometry lub TRIR. Stosowana gęstość energii do pobudzania cieplnego jest zdecydowanie niższa niż przy metodzie impulsowej. Stosunkowo wolne nagrzewanie pozwala badać wielowarstwowe struktury (np. zawierające ceramikę) i oceniać połączenia między warstwami, wykrywać ukrytą korozję w złożonych konstrukcjach lotniczych oraz charakteryzować i oceniać grubość warstw. Typowym źródłem grzewczym stosowanym w

tej metodzie jest laser Argonowy (długość fali – 0,514 μm), który ogrzewa powierzchnię badanego obiektu punktowo lub liniowo. Długość impulsu grzewczego jest sterowana za pomocą akustyczno-optycznego modulatora. Analizując szybkość zmian temperatury na powierzchni można ocenić grubość warstw w strukturze wielowarstwowej ponieważ różnice w przewodności cieplnej w poszczególnych warstwach wpływają na spadek lub wzrost szybkości zmian temperatury na powierzchni w trakcie ogrzewania długim impulsem to można zmierzyć czas charakterystyczny t_c dla równomiernego przyrostu temperatury i z zależności (2) określić grubość warstwy L .

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

3.1.3. Termografia lock-in

W termografia lock-in nazywanej również termografią synchroniczną lub modulacyjną znanej również jako termografia fali cieplnej [4] jako pobudzenie cieplne badanego obiektu wykorzystuje się harmoniczny strumień ciepła. Pobudzenie cieplne obiektu ma charakter sinusoidalny i na podstawie znanej częstotliwości sygnału pobudzającego i zarejestrowanej odpowiedzi układu można wyznaczyć jej amplitudę i kąt przesunięcia fazowego (amplitudogram i fazogram) [8, 9].

Są cztery główne techniki w metodzie lock-in:

- **metoda standardowa**, którą można nazwać „klasyczną” – opiera się na wielokrotnym wymnożeniu zarejestrowanego sygnału odpowiedzi badanego obiektu $s(t)$ na wymuszenie cieplne z sygnałem referencyjnym (fazę p_f i kwadraturę q_f) przesuniętym o 90° względem pobudzenia [10]. Amplituda A i faza φ wchodzące w skład sygnału $s(t)$ o częstotliwości f obliczane są z zależności:

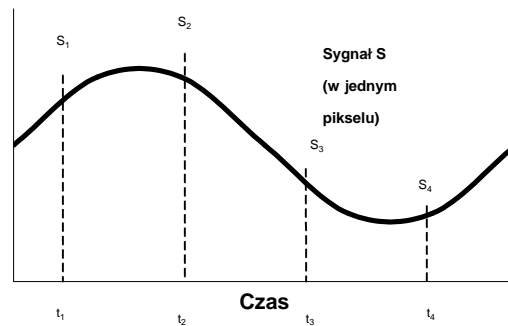
$$\text{tg}(\varphi - \varphi_r) = \frac{SQ_f}{SP_f} \quad A = \frac{2}{N} \sqrt{SP_f^2 + SQ_f^2} \quad (3)$$

gdzie:

$$SP_f = \sum_{i=1}^N s(t_i) p_f(t_i) \quad SQ_f = \sum_{i=1}^N s(t_i) q_f(t_i) \quad (4)$$

$$p_f(t) = \sin(2\pi ft + \varphi_r) \quad q_f(t) = \cos(2\pi ft + \varphi_r) \quad (5)$$

- **metoda 4-ro punktowa** [8, 9] – w której falę cieplną w formie sinusoidy wzbudza się za pomocą lampy grzewczej lub ultradźwiękami [11], w trakcie jednego cyklu, są rejestrowane cztery termogramy, które dokładnie odpowiadają kolejnym przesunięciom w fazie o 90° (rys.3). Wyzwalanie kamery termowizyjnej jest zsynchronizowane ze źródłem pobudzenia. W algorytmie obliczeń zastosowano transformację Fouriera czasowo zależnej amplitudy każdego z pikseli termogramu.



Rys.3. Cykl fali cieplnej

Faza i amplituda jest następnie obliczana dla każdego piksela obrazu zgodnie z następującymi równaniami [9]:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right) \quad (6)$$

$$A = \sqrt{[S_1 - S_3]^2 + [S_2 - S_4]^2} \quad (7)$$

Na rys.4 przedstawiono przykłady zastosowania tej metody do wykrywania defektów w materiałach kompozytowych [12]



Rys. 4. Zdjęcie (a) fragmentu kompozytu typu plaster miodu z uszkodzeniem w postaci oderwania kilku komórek z rdzenia kompozytu od pokrycia, fazogram (b) tego fragmentu z widocznym uszkodzeniem (jasna plama) wykonany metodą optyczną termografią lock-in (4-ro punktową) z $f = 0,03$ Hz

Obraz kąta przesunięcia fazowego (fazogram) przedstawia bezpośrednio opóźnienie między pobudzającym strumieniem ciepła, a polem temperatury generowanym jako odpowiedź na to pobudzenie. Wiadomo, że fazogram niesie w sobie więcej informacji o strukturze obiektu niż amplitudogram. Fazogram jest też mniej wrażliwy na zmiany współczynnika emisyjności, nierównomierności w nagrzewaniu próbki oraz lokalne zmiany temperatury.

- **metoda wariacyjna** [13] oparta na założeniach analizy statystycznej, nie wymaga synchronizacji sygnału, powoduje to jednak dostarczenie informacji tylko o amplitudzie sygnału. Przy założeniu, że zakłócenia od aparatury pomiarowej i użytecznego sygnału są przypadkowe i że sygnał pobudzenia cieplnego jest sinusoidalny to amplitudę można wyznaczyć z zależności:

$$A = \sqrt{2(V_s - V_b)} \quad (8)$$

gdzie:

V_s - wariancja sygnału eksperymentalnego,

V_b - wariancja zakłócenia

- **metoda najmniejszych kwadratów** [14], w której zarówno amplituda i przesunięcie fazowe sygnału odpowiedzi jest wyznaczone w procesie minimalizacji błędu średniokwadratowego między sygnałem mierzonym i teoretycznym. Fazę i amplitudę wylicza się z zależności:

$$\operatorname{tg} \Delta \varphi = \frac{\overline{SQ_f}(\overline{N} - \overline{Q_{2f}}) - \overline{SP_f} \overline{P_{2f}}}{\overline{SP_f}(\overline{N} + \overline{Q_{2f}}) - \overline{SQ_f} \overline{P_{2f}}} \quad (9)$$

$$A = 2 \frac{\overline{SP_f} \cos \Delta \varphi + \overline{SQ_f} \sin \Delta \varphi}{\overline{N} - \overline{Q_{2f}} \cos 2\Delta \varphi + \overline{P_{2f}} \sin 2\Delta \varphi} \quad (10)$$

gdzie:

P_{2f} i Q_{2f} – dotyczy funkcji odniesienia o podwójnym impulsie

$$\overline{SP_f} = SP_f - P_f S / N$$

$$\overline{SQ_f} = SQ_f - Q_f S / N$$

$$\overline{P_{2f}} = P_{2f} - 2P_f Q_f / N$$

$$\overline{Q_{2f}} = Q_{2f} + (P_f^2 - Q_f^2) / N \quad (11)$$

$$\overline{N} = N - (P_f^2 + Q_f^2) / N$$

3.1.4. Termografia wibracyjna

Termin termografii wibracyjnej (vibrothermography) powstał w 90-tych latach ubiegłego wieku do oznaczenia procedur badań cieplnych przeznaczonych do oceny ukrytych niejednorodności strukturalnych materiałów na podstawie powierzchniowych pól temperaturowych przy cyklicznych mechanicznych obciążeniach. Podobną procedurę można realizować przy dźwiękowym i ultradźwiękowym pobudzeniu materiału, ponieważ źródłem istotnego podwyższenia temperatury jest wewnętrzne tarcie ścianek defektu przy ich pobudzeniu falami mechanicznymi. Jeśli cykliczne obciążenia działają w przedziałach sprężystości materiału i szybkość ich zmian jest duża, to straty ciepła w wyniku przewodności cieplnej są małe i po zdjęciu obciążenia wyrób wraca do pierwotnego kształtu i temperatury.

Najczęściej wykorzystywana jest stymulacja ultradźwiękowa. Przy tym udaje się realizować zarówno zasadę optymalnego nagrzewania, jak i metodę synchronizacji funkcji nagrzewania i rejestrowanych temperaturowych odczytów. Metoda ta została opracowana niezależnie przez grupę G. Busse (Uniwersytet w Stuttgarcie, Niemcy) pod nazwą «synchroniczna ultradźwiękowa termografia» (ultrasonic lock-in thermography) [15-16], a także R.Tomas, R.Fawro i inni (USA) [17], którzy wykorzystują termin «dźwiękowe zobrazowanie w podczerwieni» (sonic IR imaging lub thermosonics). W USA obecnie wykorzystuje się termin VibroIR lub SonicIR [18].

Zmiany temperatury materiału z powodu termosprężystego efektu określa się, analizując zmiany powstającego pola cieplnego. Dla podwyższenia czułości metody sygnały temperatury uśrednia się w czasie, także stosując zasadę synchronizacji, przy czym wzorcowy

sygnał generuje się czujnikiem mechanicznych naprężeń. Wówczas system termowizyjny syntezuje dwa typy zobrazowania, znajdujących się w fazie, jak i poza fazą ze wzorcowym sygnałem. Oczywiście, że obraz mechanicznych naprężeń odpowiada zobrazowaniu w fazie.

Ważną informacją jest, że odchyłka temperatury materiału, poddanego czysto harmonicznym obciążeniami o częstotliwości ω , zawiera dwie składowe o częstotliwościach ω i 2ω . Pierwsza harmoniczna temperaturowej odchyłki jest funkcją amplitudy cyklicznych obciążeń i średniego obciążenia, wówczas gdy druga harmoniczna jest określona kwadratem amplitudy obciążenia. Analizując obie harmoniczne, można określić zarówno amplitudy cyklicznych obciążeń, jak i średnie obciążenie.

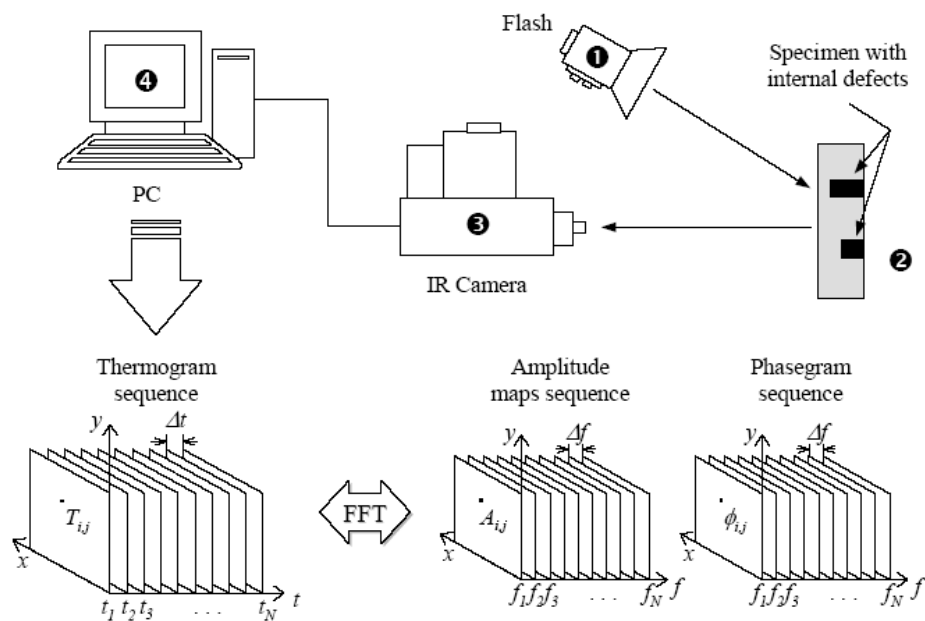
Proces zobrazowania temperaturowych gradientów zależy od częstotliwości mechanicznego obciążenia, co prowadzi do koncepcji *lokalnego rezonansu mechanicznego* [32]. Na przykład, na określonych częstotliwościach obciążenia rozwarstwienia materiałach kompozytowych wibrują nie w fazie z zasadniczym materiałem, dlatego analiza odpowiednich rezonansowych częstotliwości dostarcza informację o wymiarach i głębokości położenia defektów.

3.2. Inne metody i techniki aktywnych badań termograficznych

3.2.1. Termografia impulsowo-fazowa

Metoda impulsowo fazowej termografii (pulse phase thermography), zaproponowana przez X.Maldague, S.Marinetti i J.Kytjure [19, 20], oparta jest na zastosowaniu przekształcenia Fouriera do transformacji funkcji zmian temperatury w czasie $T_{ij}(\tau)$. Impulsowo fazowa termografia jest uogólnieniem metody modulowania (impulsowych lub okresowych) fal cieplnych, które rozchodzą się w głąb wyrobu od punktu cieplnego wzbudzenia i doznają przestrzennego i czasowego zniekształcenia w miejscu istnienia wewnętrznych defektów.

Impulsowa fazowa termografia jest uosobieniem idei uwzględnienia totalnych różnic w procesach czasowego rozwoju temperatury w strefach bez defektu i z defektem. Wiadomo, że pochłonięty przez powierzchnię ciała stałego impuls energii cieplnej dowolnego kształtu (przeważnie impuls prostokątny lub impuls Diracka) charakteryzuje się spektrum częstotliwości, które przenikają w głąb ciała, doznających rozproszenia energii (w amplitudzie) i opóźnienia w czasie (przesunięcie w fazie). Oddzielne częstotliwościowe składowe impulsu cieplnego tworzą zbliżony kształtem do koła sygnał w strefie defektu. Proces ten można traktować jak rozchodzenie się cieplnych pakietów, przemieszczających się między powierzchniami wyrobu i defektu. Ze wzrostem głębokości przenikania pakietu cieplnego ilość wysokoczęstotliwościowych składowych w spektrum dynamicznej temperatury zmniejsza się. W ten sposób, warstwa wyrobu spełnia rolę swoistych częstotliwościowych filtrów. Oznacza to, że przypowierzchniowy obszar wyrobu może sondować falami cieplnymi o stosunkowo wysokiej częstotliwości, a głębsze defekty głównie wykrywać niskoczęstotliwościowymi falami. Przy tym specyficzną informację niesie przesunięcie fazy między pobudzającą i rejestrowaną falą. Na rys.5 przedstawiony jest schemat układu pomiarowego stosowanego w impulsowo fazowej termografii.



Rys.5. Schemat układu pomiarowego impulsowo fazowej termografii [33]

W impulsowo fazowej termografii zarejestrowana w trakcie pomiarów sekwencja termogramów jest poddana obróbce z użyciem przekształcenia Fouriera:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-f2\pi k/N} = \text{Re}_n + \text{Im}_n \quad (12)$$

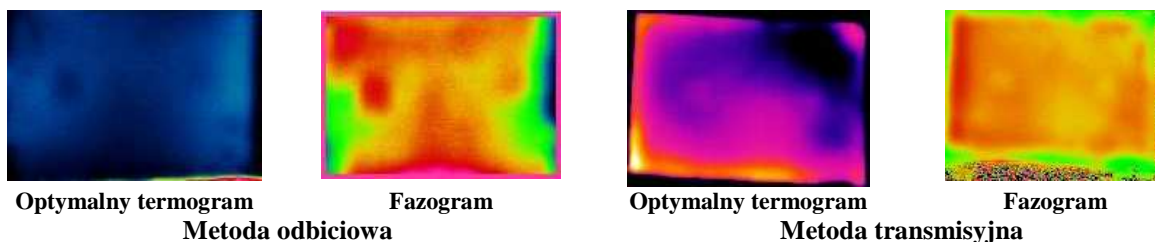
gdzie:

- n – oznacza przyrost częstotliwości ($n = 0, 1, \dots, N$),
- Δt – czasowy przedział próbkowania,
- Re_n i Im_n – rzeczywista i urojona część przekształcenia.

Ze względu na czasochłonność obliczeń do badań nieniszczących zależność (12) nie jest praktycznie stosowana. Do obliczenia amplitudy i fazy stosuje się uproszczoną formę przekształcenia zgodnie ze wzorami:

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad \text{ i } \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right) \quad (13)$$

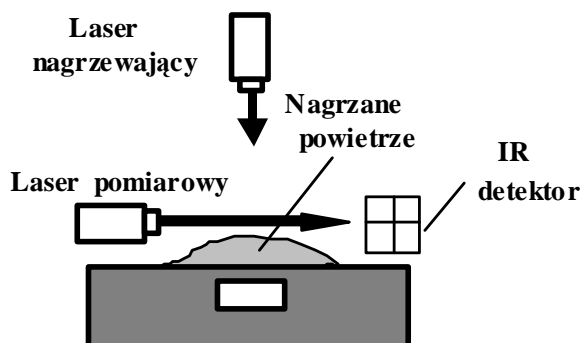
Na rys.6 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane w trakcie badań eksperymentalnych [31], metodą impulsowo fazowej termografii, próbki kompozytu składającego się z trzech warstw aramid (grubość – 0,6 mm) połączonych żywicą formaldehydową (grubość warstwy – 0,04 mm). Defekty były symulowane przez folię teflonową (grubość – 0,04 mm).



Rys.5. Wyniki eksperymentalne badania próbki kompozytu aramidowego z zastosowaniem metody impulsowo fazowej termografii [31]

3.2.2. Metoda «miraż» («mirage» method)

Jest to metoda wykorzystywana najczęściej w badaniach laboratoryjnych, w której obiekt badań pobudzany jest cieplnie za pomocą modulowanego promieniowania laserowego, a anomalia temperaturowe mierzone są po wyłączeniu sondującego laserowego promieniowania przecinającego strefę nagrzewania. Na rys. 6 przedstawiona schemat układu pomiarowego stosowanego w metodzie «miraż».



Rys.6. Schemat układu pomiarowego metody «miraż».

Nad defektem tworzy się obszar przylegającego powietrza o podwyższonej temperaturze, przy przechodzeniu przez niego promień lasera ulega odchyleniu proporcjonalnie do temperatury powietrza [28].

3.2.3. Metoda błyskowa (flash technique)

Badanie, w którym długość pobudzenia cieplnego obiektu badań jest istotnie mniejsza od czasu obserwacji. Przeważnie nagrzewanie odbywa się za pomocą lasera impulsowego lub lampy impulsowej [21]. Metoda ta jest stosowana przy wyznaczaniu termofizycznych charakterystyk materiałów [22].

3.2.4. Metoda echo-impulsowa fal ciepłych (pulse-echo thermal wave approach)

Koncepcja badań nieniszczących, w której sygnały temperaturowe traktowane są jako wynik superpozycji fal ciepłych, odbitych od granicy połączenia materiałów o różnych charakterystykach termofizycznych [30].

3.2.5. Termografia przy wymuszonej dyfuzji cieplnej (forced diffusion thermography)

Metoda termografii, w której strumień promieniowania od wytwarzającej go nagrzewnicy rzutowany jest na badany obiekt przez osłonę ze szczeliną a kontrolowany obiekt przemieszcza się w polu widzenia kamery termowizyjnej. Wykorzystywane jest też nagrzewanie z wykorzystaniem kilku pasm nagrzewania, co pozwoliło modulować sygnał temperaturowy [26].

Przestrzenno-czasowe częstotliwości osłony (maski) można optymalizować dla poszukiwania defektów określonego typu. Strumień ciepła ograniczony liniowym nagrzewaniem można opisać wzorem [26]:

$$Q(x, \tau) = \frac{I}{2} [1 + \cos(2\eta\pi x + \omega\tau)] \quad (14)$$

gdzie:

I - gęstość mocy promieniowania nagrzewacza;
 η - gęstość linii w masce;

ω - częstotliwość.

Strumień ciepła na odległości x oscyluje z częstotliwością ω i przesunięciem fazy $2\eta\pi x$.

Przestrzenny gradient strumienia ciepła także jest podatny harmonicznym drganiom o postaci:

$$\frac{\partial}{\partial x} Q(x, \tau) = \eta \pi I \cos(2\eta \pi x + \omega \tau) \quad (15)$$

Ruchomy temperaturowy rozkład liniowego typu jest analizowany za pomocą kamery termowizyjnej, która rejestruje przyrost temperatury względem średniego poziomu. Wszystkie punkty otrzymanego zobrazowania charakteryzują się określoną fazą. Rozkładając harmoniczną funkcję, można pokazać, że liniowy temperaturowy rozkład jest superpozycją będącej w fazie przestrzennej kosinusoidalnej składowej i nie będącej w fazie czasowej sinusoidalnej składowej:

$$Q(x, \tau) = \frac{I}{2} [1 + \cos(2\eta\pi x) \cos(\omega\tau) + \sin(2\eta\pi x) \sin(\omega\tau)] \quad (16)$$

Przy pojawieniu się w ruchomym polu nagrzewania pęknięcia wszystkie składowe temperaturowego pola doznają odchylenia od regularnego charakteru, co zapewnia jej ujawnienie.

3.2.6. Technika «latającej plamki» («flying spot» technique)

Badanie na drodze skanowania obiektu nagrzewającym strumieniem cieplnym przy synchronicznej rejestracji temperatury w miejscu o ustalonej odległości od punktu nagrzewania (szybkość skanowania odpowiednio wysoka) [23]. Sposób ciągłego skanowania zapewnia maksymalne kontrasty temperatury nad wewnętrznymi defektami i jest szczególnie przydatny do wykrywania pęknięć położonych prostopadle do powierzchni wyrobu ale podstawową wadą jest stosunkowo niska wydajność badania. Szybkość wzajemnego przemieszczania źródła nagrzewania i badanego wyrobu może zmieniać się w szerokich przedziałach (od paru milimetrów do kilku metrów na sekundę) w zależności od charakterystyk termofizycznych badanych materiałów i głębokości ich sondowania. Przy badaniach materiałów kompozytowych szybkość skanowania może wynosić kilka centymetrów na sekundę.

3.2.8. Technika «pełzającej plamki» («crawling-spot» technique)

Technika ta od techniki «latającej plamki» różni się tylko szybkością skanowania, która w tym przypadku jest bardzo niska [24].

3.2.9. Elektromagnetyczna termografia w podczerwieni (electromagnetic IR thermography)

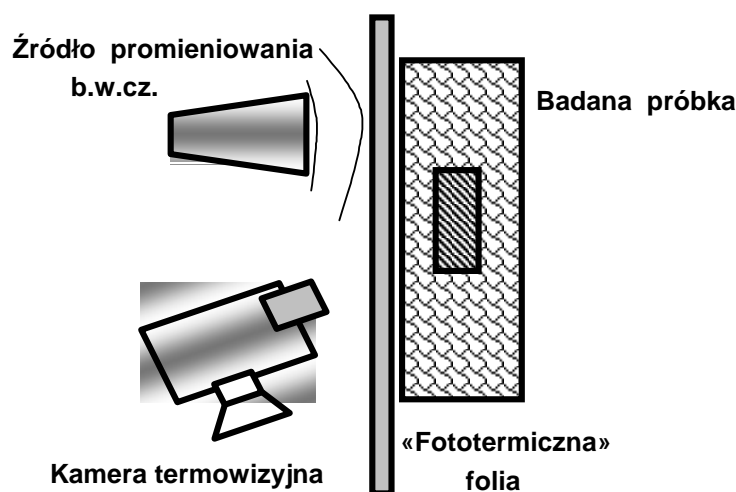
Technika elektromagnetycznej termografii w podczerwieni (ElectroMagnetic InfraRed – EMIR) była zaproponowana przez D. Balageasa i innych [25] na początku lat 90-tych ubiegłego wieku. «Fototermiczna» folia (folia z dielektryka o grubości 10...25 μm , pokryta submikronowym elektroprowadzącą warstwą) pochłania część energii na nią padającego elektromagnetycznego promieniowania milimetrowego/centymetrowego zakresu i przekształca je w ciepło w wyniku efektu fototermicznego. W ten sposób, rozkład temperatury na folii, zapisywany kamerą termowizyjną, odzwierciedla rozkład energii promieniowania bardzo wysokiej częstotliwości. Przyrost temperatury folii ocenia się z następującego wzoru:

$$\Delta T = \frac{W}{C\rho L + 2\alpha}, \quad (17)$$

gdzie:

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

Technika EMIR opracowana została głównie, do badań rozkładu energii strumieni promieniowania wysokiej częstotliwości o dużej mocy. Schemat jej zastosowania w jednostronnych badaniach nieniszczących był przedstawiony na rys. 7. Rozkład temperatury na powierzchni folii jest wynikiem wzajemnego oddziaływania padającej i odbitej fali elektromagnetycznej oczywiście, że taki układ jest przydatny do badania ograniczonego kręgu wyrobów i defektów.



Rys.7. Schemat układu pomiarowego metodą EMIR

4. Podsumowanie

Ze względu na dużą różnorodność struktury kompozytów, możliwość zastosowania wielu kombinacji materiałów o różnych parametrach termofizycznych [34], różnic w zjawiskach fizycznych leżących u podstaw działania metod i technik termograficznych oraz wielu typów nieciągłości, które mogą występować w badanych materiałach kompozytowych, trudno jest wskazać metodę termografii w podczerwieni, która jest najbardziej skuteczna w badaniach nieniszczących tych materiałów. W wyborze metody badawczej mogą być bardzo przydatne analityczne i numeryczne metody modelowania zagadnień nieniszczących badań termicznych [35, 36] dzięki którym można również określić optymalne parametry badań.

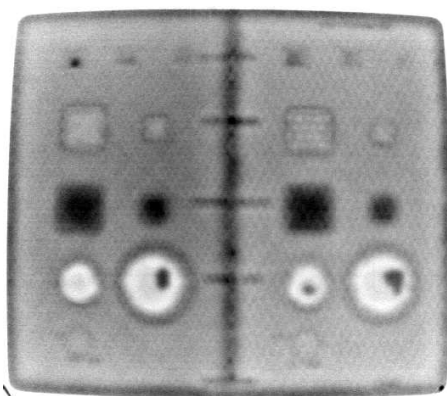
Na podstawie analizy różnych metod termograficznych, które mogą być stosowane w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych można stwierdzić że:

- wykrycie defektów głębiej położonych pod powierzchnią badanego materiału kompozytowego (które charakteryzują się na powierzchni bardziej słabymi sygnałami temperaturowymi) wymaga zastosowania fal cieplnych o niższej częstotliwości;
- stymulacja kompozytu impulsem prostokątnym (lub impulsem Diracka) jest optymalne do wykrycia defektów na całej głębokości kompozytu. W praktyce możliwe są ograniczenia związane z technologiczną dostępnością potrzebnej mocy nagrzewania, spektralnym składzie strumienia nagrzewającego, zapobieganiem przegrzewaniu się badanego materiału, szumami itp.;

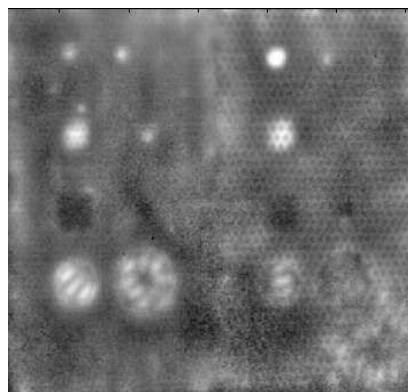
- fazy fal cieplnych nie zależą od emisyjności powierzchni, więc wykorzystanie tego faktu w termografii impulsowo fazowej, lock-in (modulacyjnej) stanowi zaletę tych metod;
- w impulsowo fazowej termografii możliwa jest, w pojedynczym eksperymencie, analiza fazowa kilku fal o różnych częstotliwościach. Dzięki temu można wykryć defekty znajdujące się na różnej głębokości;
- należy podkreślić, że, w odróżnieniu od szeregu innych algorytmów badań termograficznych, na przykład metodą optymalnej obserwacji lub dynamicznej cieplnej tomografii, impulsowa fazowa termografia wymaga akumulacji informacji w ciągu długiego czasu, co pozwala analizować niskie częstotliwości niezbędne do wykrywania głęboko położonych defektów. Z drugiej strony, interwał czasu między sąsiednimi termogramami powinien być mały, żeby zapewnić wysokie częstotliwości w widmie Fouriera, niezbędne do wykrycia podpowierzchniowych defektów (przy spełnieniu tego warunku, centralna część spektrum opada niemal do zera). Dlatego impulsowa fazowa termografia często dotyczy sekwencji, składających się z kilkuset i nawet tysiąca obrazowań, które należy przeanalizować;
- przewagę metody impulsowo fazowej termografii nad innymi metodami należy rozpatrywać na poziomie jakościowym, jednak czułość metody do ukrytych defektów jest na tyle wysoka, że wykorzystuje się ją w charakterze testującej przy sprawdzaniu innych algorytmów;
- wadą lock-in termografii jest konieczność stosowania źródła stymulacji cieplnej o mocy promieniowania zmieniającego się sinusoidalnie;
- należy stwierdzić, że metoda termografii w podczerwieni przy stymulacji wyrobu ultradźwiękami jest perspektywiczna, jednak jej właściwości do tej pory przebadane są słabo; na przykład, w wielu przypadkach, gdzie intuicyjnie oczekuje się pojawienia się dynamicznych temperaturowych sygnałów, takie sygnały nie są rejestrowane. Dynamiczna odpowiedź kontrolowanego obiektu zależy od pobudzającej energii, sposobu „wprowadzenia” sygnału do kontrolowanego obiektu, w szczególności cienkich wyrobów, oraz od cech materiału. Częstotliwość stymulacji ultradźwiękami powinna być zbliżona do własnych częstotliwości wyrobu w celu podwyższenia efektywności generacji ciepła;
- tak jak i w przypadku powierzchniowego optycznego nagrzewania, impulsowe wzbudzenie cieplne pozwala stymulować wyroby częstotliwościami, których otrzymanie jest trudno lub niemożliwe z wykorzystaniem periodycznych fal cieplnych. Przy tym można zbudować większą ilość fazogramów i amplitudogramów, odpowiadających spektrum Fouriera stymulującego impulsu ultradźwiękowego. Głównym brakiem impulsowego ultradźwiękowego pobudzenia jest konieczność przykładania dużej, w porównaniu z modulowanymi ultradźwiękami, mocy sygnałów, co może stawiać w wątpliwość nieniszczący charakter próby i wymaga dodatkowych środków do zapewnienia bezpieczeństwa obsługującego badanie personelu;
- konkurencyjność metody ultradźwiękowej termografii związane jest ze zwiększeniem wprowadzanej energii co spowoduje poszerzenie strefy kontroli, która obecnie wynosi około 1 metra kwadratowego (np. w ciągu kilku minut udaje się skontrolować kilka kwadratowych metrów powierzchni samolotu). Przy wyborze parametrów ultradźwiękowego nagrzewacza konieczne jest zapobieganie tworzenia się stojących fal, w węzłach których możliwe jest przepuszczenie defektów (na termogramach stojące fale widoczne są w postaci regularnych pasm);
- jednym z podstawowych braków metody periodycznej ultradźwiękowej stymulacji jest konieczność zapewnienie dobrego kontaktu między wyrobem a

ultradźwiękowym stymulatorem podczas kilku minut, koniecznych do ujawnienia dość głębokich defektów. Do rozwiązania tego problemu analogicznie z optycznym pobudzeniem zaproponowano wykorzystać do nagrzewania wyrobów krótkie ultradźwiękowe impulsy (niosące określoną częstotliwość), a powierzchniowe pole temperatury przebadać za pomocą kamery termalnej w stadium schładzania (phase angle thermography with ultrasound burst excitation)[15, 16];

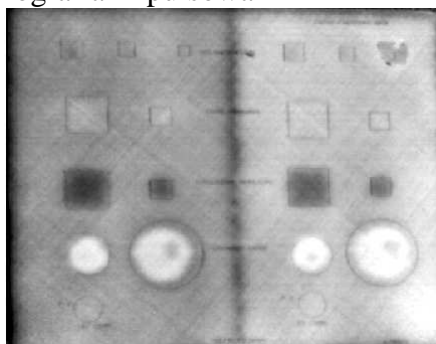
- różnice w sposobach powierzchniowego nagrzewania optycznego i objętościowego nagrzewania ultradźwiękami są następujące: przy powierzchniowym nagrzewaniu nadmierny sygnał temperaturowy powstaje nie tylko nad defektem, ale i w strefach bez defektów, co prowadzi do pojawienia bieżącego szumowego kontrastu, spowodowanymi niejednorodnościami powierzchni. Stymulacja ultradźwiękami stwarza najczęściej temperaturowy sygnał tylko w strefie defektu, a temperatura części bez defektów pozostaje bliska temperaturze otoczenia, co otrzymało nazwę «zasada ciemnego pola» (dark field). W wyniku czego przy innych równych warunkach wzrasta prawdopodobieństwo ujawnienia defektów (obniżają się wymagania kwalifikacji operatora). Jest ważne, że kształt sygnału temperaturowego przy stymulacji ultradźwiękowej nie zawsze pokrywa się z kształtem sygnału, powstającego przy nagrzewaniu powierzchniowym: w wielu przypadkach tylko oddzielne części wewnętrznych defektów generują zauważalną ilość energii cieplnej wskutek tarcia ścianek, dlatego topografia powierzchniowego sygnału temperaturowego może być związana ze strefami rozwinięcia pęknięć i nie ujawniać już "ukształtowanych" defektów;
- optymalna (idealna) stymulacja cieplna obiektu w badaniach termograficznych powinna podwyższać jego temperaturę tylko w przypadku istnienia defektów;
- metoda ruchomego źródła ciepła jest selektywna w stosunku do parametrów defektów, w szczególności w stosunku do głębokości ich położenia, dlatego zapewnienie optymalnych warunków ujawnienia różnych defektów może wymagać wielokrotnego powtórzenia procedury;
- najwyższą czułość do wewnętrznych defektów posiada metoda z wykorzystaniem o dużej mocy skupionej wiązki nagrzewającej jednak z powodu niskiej wydajności badań jest rzadko stosowana;
- metoda ciągłego-działania ruchomego źródła ciepła jest opracowana w kilku modyfikacjach. Jej podstawową cechą jest to, że nagrzewanie istnieje w strefie miejscowej, skanując kontrolowany obiekt od punktu do punktu drogą ciągłego wzajemnego przemieszczania źródła i obiektu. Przy tym nagrzewanie jest trójwymiarowe, co pozwala ujawnić defekty typu pęknięć, położonych prostopadle do badanej powierzchni. W badaniach nieniszczących częściej stosowane jest ciągłe nagrzewanie dużej mocy w strefie o małych wymiarach lub w paśmie, przy czym pomiar temperatury także odbywa się albo w punkcie, albo na dole wiersza skanowania. Wyższą nagrzewania pasmowego w porównaniu z punktowym wynika z: 1) wysokiej efektywności wprowadzenia ciepła z powodu bliskiego położenia nagrzewacza do kontrolowanej powierzchni; 2) dużej równomierności nagrzewania; 3) bardziej niski koszt systemu rejestracji temperatury, jeśli zastosuje się liniowo-skanujące urządzenia. Przy tym można przemieszczać system pomiarowy względem nieruchomego obiektu lub obiekt w pole widzenia systemu. Zasadniczym krytycznym parametrem danej metody jest odległość między strefą nagrzewania a strefą rejestracji temperatury;



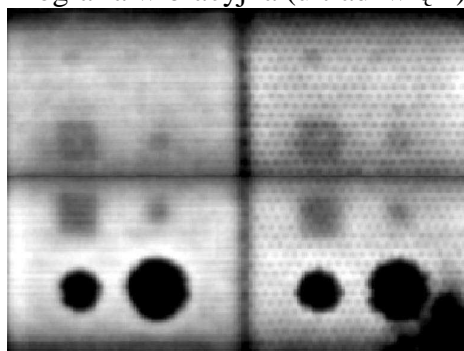
a) termografia impulsowa



b) termografia wibracyjna (ultradźwięki)



c) optyczna termografia lock-in



d) termogram (liniowe pobudzenie prądami wirowymi)

Rys.8. Wyniki nieniszczących badań eksperymentalnych próbki kompozytu typu plaster miodu, z celowo wprowadzonymi wadami, za pomocą różnych metod termografii w podczerwieni [27]

- ważną rolę w badaniach termograficznych odgrywają wzorce czyli obiekty o określonych wymiarach, kształcie i strukturze z wprowadzonymi sztucznie nieciągłościami (wadami). Służą one do doboru metody, ustawienia i kontroli parametrów pracy aparatury, często kalibracji aparatury do badań, oceny jakości zobrazowania oraz możliwości oceny wymiarów nieciągłości obiektów;
- oczywiście o sukcesie w badaniach decydującą rolę może odgrywać dobór aparatury badawczej [37].

Biorąc powyższe stwierdzenia pod uwagę przy wyborze metody badań termograficznych do badania materiałów kompozytowych należy pamiętać o tym, że każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie ponieważ nie zawsze ogólnie przyjęte zasady w tego typu badaniach sprawdzają się. Przykładem są wyniki badań kompozytu typu plaster miodu zamieszczone w pracy [27] (rys.8) gdzie do badań eksperymentalnych zastosowano porównawczo cztery metody: termografii impulsowej, termografii wibracyjnej, optycznej termografii lock-in oraz metody z liniowym pobudzeniem prądami wirowymi. Najlepsze zobrazowanie i wykrycie wszystkich celowo wprowadzonych defektów uzyskano metodą optycznej termografii lock-in i termografii impulsowej, wbrew oczekiwaniom stosunkowo słabe wyniki uzyskano stosując metodę termografii wibracyjnej, jednak w metodą termografii wibracyjnej i zastosowaniem prądów wirowych zlokalizowano defekt (w prawym dolnym rogu), który nie był celowo wprowadzony do struktury materiału kompozytowego ale był niezamierzonym efektem procesu technologicznego wytwarzania próbki do badań.

Literatura

- [1] A. Lewińska-Romicka „Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii” WN-T, Warszawa, 2001
- [2] K. Przybyłowicz, J. Przybyłowicz „Materiałoznawstwo w pytaniach i odpowiedziach” WN-T, Warszawa, 2004
- [3] Praca zbiorowa „Pomiary termowizyjne w praktyce” PAK, Warszawa, 2004
- [4] X. P. V. Maldague „Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing” John Wiley&Sons, Inc., New York, 2001
- [5] K. Dragan, W. Świdorski “Multimode NDE approach for structure health assessment of composite elements in aerospace applications” *Acta Physica Polonica A* (w druku)
- [6] W. Świdorski, D. Szabra, J. Wójcik „Nondestructive evaluation of aircraft components by thermography using different heat sources” *QIRT 2002*, p.79-83
- [7] C. Ibarra-Castanedo “Quantitative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth retrieval with the phase” University Laval, 2005
- [8] D. Wu, G. Busse “Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials” *Revue Generale de Thermique*, Vol. 37, No 8, , pp. 693-703, September 1998
- [9] W. Świdorski „Lock-in Thermography to rapid evaluation of destruction area in composite materials used in military applications” *SPIE vol. 5132*, pp. 506-517, 2003
- [10] Kuo P.K., Feng Z.J., Ahmed T. et al. Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique. // “Photoacoustic and photothermal phenomena”, ed. P. Hess and J. Pelzl, Heidelberg: Springer-Verlag, 1987, pp. 415-418
- [11] J. Rantala, D. Wu, G. Busse „Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites” *Research in Nondestructive Evaluation*, 7, 1996, pp. 215-228
- [12] W. Świdorski “Infrared nondestructive testing in military applications” *Proceedings of NDT in Progress*, pp.289-298, Praga 2005
- [13] S. Offermann, C. Bissieux, J.L. Beaudoin “Statistical treatment applied to infrared thermoelastic analysis of applied and residual mechanical stresses” *Revue Generale de Thermique*, Vol. 37 (8), 1998, pp. 43-48
- [14] J.- C. Krapez, G. Gardette, D. Balageas “Lock-in IR thermography: advantages and problems of some approaches” *Proc. 3rd Int. Workshop on Advanced IR Techn. and Appl.*, Capri (It.), 1995, pp. 219-237
- [15] A. Dillenz, T. Zweschper, G. Busse “Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features” *Insight*, December 2000, Vol. 42, No. 12, pp. 815-817
- [16] A. Dillenz, T. Zweschper, G. Busse “Phase angle thermography with ultrasound burst excitation” *Proc. Eurotherm Seminar No. 64 “QIRT”*, Reims, France, July 18-21, 2000, pp. 247-252
- [17] L. D. Favro, X. Han, Z. Ouyang et al. “IR imaging of cracks excited by an ultrasonic pulse” *Proc. SPIE “Thermosense-XXII”*, 2000, Vol. 4020, pp. 182-185
- [18] M. W. Burke, W. O. Miller “Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory” *Proc. SPIE “Thermosense-XXVI*, 2004, Vol. 5405, pp. 313-321
- [19] X. Maldague, S. Marinetti “Pulse phase infrared thermography”, *J. Appl. Phys.*, 1996, Vol. 79, pp. 2694-2698.
- [20] J.-P. Couturier, X. Maldague “Pulsed phase thermography of aluminum specimens” *Proc. SPIE “Thermosense-XIX”*, 1997, Vol. 3056, pp. 170-175

- [21] Y. O. Troitsky, H. Reiss "Remote nondestructive monitoring of coatings and materials by the flash technique" *High Temperatures-High Pressures*, 2000, Vol. 32, pp. 391-395
- [22] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbot "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity" *J. Appl. Physics*, Sept. 1961, Vol. 32, pp.1679-1684
- [23] C. Gruss, F. Lepoutre, D. Balageas "Nondestructive evaluation using a flying-spot camera" *Proc. 8th Intern. Thermo Conf.*, Budapest, Hungary, June 2-4, 1993, p. 6
- [24] P. G. Bison, A. Bragiotti, C. Bressan et al. "Crawling spot thermal NDT for plaster inspection and comparison with dynamic thermography with extended heating" *Proc. SPIE "Thermosense-XVII"*, Orlando, USA, 1995, Vol. 2423, pp. 145-152
- [25] D. Balageas, P. Levesque "EMIR: a photothermal tool for electromagnetic phenomena characterization" *Rev. Générale Thermique*, 1998, Vol. 37, pp. 725-739
- [26] J. R. Lesniak, B. R. Boyce "Differential thermography applied to structural integrity assessment" *Proc. SPIE "Thermosense-XVII"*, 1995, Vol. 2473, pp. 179-187
- [27] W. Świdorski „Applications of IR Thermography Methods for Nondestructive Evaluation of Honeycomb Type Composite Materials in Aircraft Industry” *Proceedings of the Fourth European Workshop Structural Health Monitoring 2008*, pp.1297-1304
- [28] L. C. Aamodt, J. C. Murphy, *J. Appl. Phys.* 52 (8), str. 4903, (1981)
- [29] J. W. Maclachlan-Spicer, W. D. Kerns, L. C. Aamodt, J. C. Murphy "Time-resolved infrared radiometry(TRIR) of multilayer organic coatings using surface and subsurface heating" in *Thermosense XIII*, *Proc. Soc. of Photo-Opt. Instrumentation Eng. (SPIE)*, 1467, pp. 311-321, 1991
- [30] L. D. Favro, X. Han, Y. Wang, P. K. Kuo, R. L. Thomas "Pulse-echo thermal wave imaging" *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 14, pp. 425-429, 1995
- [31] W. Świdorski, V. Vavilov "Some peculiarities of modeling defects in polyaramide composite materials" *Proceedings of QIRT'06 on CD*, 2006
- [32] L. H. Tenek, E. G. Henneke "Flaw dynamics and vibrothermographic-thermoelastic NDE of advanced composite materials" *Proc. SPIE "Thermosense-XIII"*, 1991, pp. 252-259
- [33] C. Ibarra-Castanedo, D. González and X. Maldague "Automatic algorithm for quantitative pulsed phase thermography calculations"
- [34] W. Świdorski, V. Vavilov „Wyznaczanie termofizycznych charakterystyk materiałów metodami termografii w podczerwieni” *Biuletyn WAT (w druku)*
- [35] W. Świdorski, V. Vavilov „Analityczne i numeryczne modelowanie zagadnień nieniszczących badań termicznych materiałów kompozytowych” *Biuletyn WAT (w druku)*
- [36] W. Świdorski, R. Chachurski „Analiza porównawcza wybranych metod numerycznego modelowania zagadnień nieniszczących badań termicznych materiałów kompozytowych” *Biuletyn WAT (w druku)*
- [37] W. Świdorski „Możliwości wykrywania metodami termografii w podczerwieni bardzo cienkich wad w materiałach kompozytowych stosowanych w lekkich osłonach balistycznych” *Inżynieria Materiałowa (w druku)*