

dr inż. Waldemar ŚWIDERSKI*
prof. Vladimir VAVILOV**
* Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
** Tomsk Polytechnic University

PRZETWARZANIE TERMOGRAMÓW ORAZ OBRÓBKA DANYCH W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH METODAMI TERMOGRAFII W PODCZERWIENI

Streszczenie: W artykule przedstawiono metody stosowane w przetwarzaniu termogramów oraz obróbce danych służące w badaniach nieniszczących do poprawy zobrazowania poszukiwanych defektów w badanych obiektach. Stosowane są zarówno standardowe techniki, które powszechnie używa się przy obróbce obrazów, jak i techniki specjalne wykorzystywane z reguły przy analizie termogramów.

THERMOGRAMS AND DATA PROCESSING IN NONDESTRUCTIVE TESTING BY IR THERMOGRAPHY METHODS

Abstract: Thermogram and data processing methods used to correct presentations of defects detected in objects by nondestructive testing are presented in this paper. Standard techniques, which are generally used in image processing, as well as special techniques used mainly in thermogram analysis are presented too.

1. Wstęp

Ogromny rozwój metod analizy obrazu wskazuje, że znajdują one istotne i ważne zastosowania. Wśród korzyści z wprowadzenia metod analizy obrazu należy wymienić przede wszystkim powtarzalność i odtwarzalność wyników analizy oraz jej obiektywizację, przyspieszenie pracochłonnych badań i rozszerzenie możliwości badawczych. Zwłaszcza rozwój techniki komputerowej spowodował rozwój metod analizy obrazu, które decydują o interesującym nas źródle informacji.

Obraz po wprowadzeniu go w formie cyfrowej do komputera wymaga różnych zabiegów doskonalących jego jakość co powoduje konieczność jego przetworzenia. Cechą charakterystyczną procesu przetwarzania obrazu jest fakt, że zarówno na wejściu algorytmu przetwarzającego informację jak i na jego wyjściu występuje obraz. Obrazy na wyjściu powinny być wolne od zakłóceń oraz posiadać wyraźnie zaznaczone interesujące nas cechy. Po procesie doskonalenia i przetwarzania obrazu następuje jego analiza. Wynikiem analizy obrazu są dane jakościowe i ilościowe opisujące określone cechy obrazu. W procesie analizy pełny obraz zawierający setki subtelnych szczegółów zostaje zastąpiony przez ograniczony zbiór cech, podatny na zastosowanie metod i algorytmów rozpoznania [1].

W technice podczerwieni do rejestracji używa się kamery termalnej. Kamera termalna przetwarza niewidzialne promieniowanie podczerwone, pochodzące od obserwowanego obiektu na obraz podczerwieni przetwarzający rozkład intensywności promieniowania

temperaturowego zwany termogramem. Poszczególne wartości temperatury przedstawione są na termogramie za pomocą palety barwnej lub odcieniach szarości. Każdemu pikselowi obrazu (termogramu) odpowiada zarejestrowana wartość temperatury. Analiza wyników badań termograficznych polega na obróbce sekwencji obrazów w podczerwieni za pomocą algorytmów, które obliczają różnice w czasie zachowania się temperatury nad defektami i poza nimi. Przy tym obiektem obróbki jest niestacjonarna funkcja $T(i, j, \tau)$. Zastosowanie złożonych algorytmów ma na celu podwyższenie stosunku sygnał/szum i tym samym polepszenie wykrywania defektów. W wielu przypadkach ten cel można osiągnąć, obrabiając oddzielne obrazowania w podczerwieni niezależnie jeden od drugiego, tj. w tym przypadku obiekt obróbki stanowi funkcja $T(i, j)$, opisująca oddzielnie wzięte obrazowanie. Oczywiście, że fizyka niestacjonarnej wymiany ciepła nie odgrywa przy tym istotnej roli a obrazowanie obrabia się jak zbiór punktów o określonej amplitudzie i wzajemnym układzie (morfologią). W artykule zostaną rozpatrzone tylko niektóre ogólne sposoby rozpowszechnione w badaniach termograficznych. Pod cyfrową obróbką obrazowania rozumiemy analizę i przekształcenia obrazowania wykonane za pomocą oprogramowania komputerowego. Należy zauważyć, że każda obróbka obrazowania prowadzi do zniekształcenia i chodzi tylko o to aby to zniekształcenie było korzystne z punktu widzenia celu badań nieniszczących czyli wykrycia defektów i oceny ich parametrów.

Format obrazowań w podczerwieni może zmieniać się od 128x128 do 1024x1024 punktów, obecnie najbardziej popularnym jest format 320x240 punktów. Ze zwiększeniem formatu polepsza się szczegółowość obrazowania. Każdy piksel (punkt) obrazowania może być przedstawiony albo w postaci arytmetycznej, na przykład przedstawiając istniejące temperatury obiektu, albo w postaci bajtów (w tym przypadku liczba bitów w pikselu może być 8; 12; 14 lub 16). Czym więcej bitowy sygnał, tym większy dynamiczny zakres (rozpiętość) może on odtwarzać, dlatego w ostatnich modelach kamer termowizyjnych wykorzystuje się 14-bitowe przedstawienie sygnału. Format i ilość bitów sygnału określa wymiar pliku, zawierającego jedno obrazowanie, dlatego długie sekwencje obrazowań mogą powodować czysto techniczne problemy na skutek dużej ilości danych.

Obróbka obrazowań (termogramów) w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni zawiera następujące etapy:

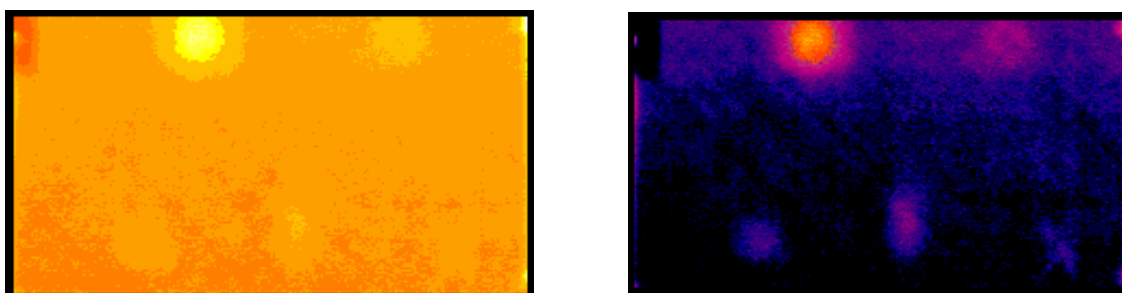
- cyfryzację i kompresję danych (*digitization & compression*);
- polepszenie, przywrócenie i rekonstrukcję (*enhancement, restoration & reconstruction*);
- dopasowanie (aproksymację), opisanie i rozpoznanie (*matching, description & recognition*).

2. Standardowe techniki przetwarzania termogramów

Pojęcie „jakość obrazowania” związane jest z celem do jakiego ma służyć. Dlatego pod polepszeniem obrazowania (*enhancement*) rozumiemy procedury, które powodują jego zmiany, które bardziej są do przyjęcia przez końcowego użytkownika. Dlatego w statystycznym sensie celem badań nieniszczących jest poszukiwanie określonych „wzorów” na tle zakłóceń. Jakość obrazowania często ocenia się na podstawie specjalnych wzorców, które zawierają obszary stopniowych lub skokowych zmian sygnału uzyskanych z wykorzystaniem np. maski szczelinowej [2] (w optyce takie wzorce nazywa się testami kreskowymi). Do poprawy jakości termogramów stosuje się szereg standardowych metod stosowanych w obróbce cyfrowej obrazów, z których główne opisane są poniżej.

2.1. Modyfikacja skali odcieni (zmiana histogramu)

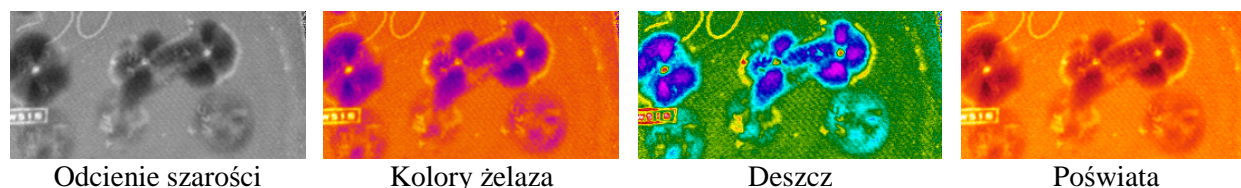
Współczesne kamery termowizyjne rejestrują najczęściej obraz (termogram), w których każdy punkt (piksel) opisany jest za pomocą 14 bitów. Jednak bardzo często w badaniach nieniszczących każde zobrazowanie charakteryzuje się rozkładem wartości amplitud przedstawionych w każdym pikselu obrazu w stosunkowo wąskim zakresie. Do optymalnego zobrazowania należy rozciągnąć histogram między maksymalnymi i minimalnymi wartościami. Zwykle zobrazowanie zawiera strefy anomalne o wysokiej (zakłócenia) lub niskiej (tło) amplitudzie sygnałów, które nie zawierają użytecznej informacji z punktu widzenia badań nieniszczących. Dlatego do obejrzenia mało kontrastowych szczegółów termogram powinien być przedstawiony w określonym zakresie amplitud wewnątrz całego histogramu (rys. 1). Oprogramowanie współczesnych kamer termowizyjnych zawiera odpowiednie funkcje (automatyczne lub ręczne), które umożliwiają wybór odpowiedniego zakresu poprawiającego kontrastowość zobrazowania.



Rys.1. Poprawa jakości zobrazowania cieplnego (termogramu) na drodze zmiany zakresu histogramu (defekty w tworzywie węglowym)

2.2. Wybór kolorowej palety

Zobrazowania cieplne (termogramy) są „pseudokolorowymi” czyli związek palety kolorów z temperaturą jest wybierany przez operatora kamery. Oprogramowanie kamer termowizyjnych zawiera z reguły kilka palet kolorów (rys.2). W praktyce najczęściej wykorzystuje się palety „kolory żelaza” (*iron*) i tęcza (*rainbow*). Przy prawidłowym doborze palety można przedstawić strefy ze zbliżonymi temperaturami za pomocą kontrastowych kolorów, jednak nie należy przeceniać znaczenia palety kolorów do podwyższenia wiarygodności wykrycia ukrytych defektów w trakcie badań nieniszczących metodami termografii w podczerwieni. Jeżeli na termogramie jest dużo szczegółów to kontrastowe kolorowe palety mogą przeszkadzać w wyszukiwaniu stref z defektami. Dlatego wielu operatorów kamer woli mieć do czynienia z czarno-białymi termogramami. Z doświadczenia autorów artykułu wynika, że w badaniach nieniszczących paletę „iron” można rozpatrywać jako kompromis między kontrastowy kolorowym a czarno-białym (odcienie szarości) zobrazowaniem (termogramem).



Rys.2. Różne palety kolorów (termogram laminatu szklanego po badaniach V_{50} [3])

2.3. Poprawa ostrości zobrazowania

Pod „ostrością zobrazowania” rozumiemy zdolność odtwarzania małych wymiarowo szczegółów i granic przejścia między strefami z różną amplitudą. W badaniach termograficznych powierzchniowe odbicia ukrytych defektów rozmywają się na skutek dyfuzji cieplnej, przy czym ten efekt przejawia się tym mocniej, czym jest większa głębokość położenia defektów, wyższa przewodność cieplna materiału i dłuższy czas rejestracji. „Rozmywanie” zobrazowania powoduje pogorszenie postrzegania szczegółów w termogramie przez operatora i stwarza trudności przy defektometrii. Ponieważ proces wyrównywania temperatury w strefie gradientów temperaturowych można interpretować jak całkowanie po przestrzennej współrzędnej, należy oczekiwać, że ostrość zobrazowania można podwyższyć, stosując operację różniczkowania (*sharpening*). Rzeczywiście, przy obróbce zobrazowania często stosuje się filtry wysokich częstotliwości (*high-pass filter*), które wybiórczo przepuszczają sygnały z wysokim gradientem, usuwając tym samym nisko częstotliwościowy trend, spowodowany nierównomiernym nagrzewaniem, zaświeczeniami, niejednorodnościami materiału itp. czynnikami (rys.3).



Rys.3. Poprawa ostrości zobrazowania defektów za pomocą wysokoczęstotliwościowej filtracji (zobrazowanie symulacyjne)

Przykład prostego cyfrowego filtru wysokiej częstotliwości:

$$\mathbf{A}_{3 \times 3} = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

gdzie 3×3 oznacza wymiar maski, zastosowanej do filtracji. Filtracja w postaci (1) jest dwuwymiarowa, ponieważ realizowana jest w przestrzeni dla dwóch powierzchniowych współrzędnych. Analogiczne filtry, tylko jednowymiarowe, mogą być stosowane i we współrzędnej czasu. Należy powiedzieć, że operacja filtracji w przestrzeni nie oznacza, że automatycznie realizowana jest filtracja w czasie i na odwrót.

Przy wykorzystaniu prostych filtrów wysokiej częstotliwości możliwe jest pojawienie się niepożądanych efektów, związanych ze zmianą znaku pochodnej. Można tego uniknąć

stosując procedurę odliczania od wyjściowego zobrazowania laplasjanu $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$,

który przedstawia sobą liniowy operator pochodnej, niezależny od kierunku. W cyfrowej formie ta procedura zapisuje się w następującej postaci:

$$T(i, j) - \nabla^2 T(i, j) = 5T(i, j) - [T(i+1, j) + T(i-1, j) + T(i, j+1) + T(i, j-1)] \quad (2)$$

Filtry wysokiej częstotliwości, wykorzystujące pierwszą lub drugą pochodną sygnałów, mają tendencję do zwiększania szumów. W badaniach termograficznych filtry te rekomenduje się do stosowania z wyrównanymi funkcjami, co łatwo zrobić w czasie, ale trudno – w przestrzeni.

Jeszcze jednym filtrem, który podkreśla słabe kontrasty, jest filtr statystyczny, który oblicza dyspersję sygnału na obszarze ograniczonym wybraną maską.

2.4. Wygładzanie

Wygładzanie (*smoothing*) jest operacją odwrotną do poprawy ostrości. Stosuje się ją, kiedy zobrazowanie zawiera nieprzyjemny dla wzrokowego postrzegania wysoko częstotliwościowy szum, charakterystyczne wymiary, które są mniejsze od wymiarów szukanych defektów (ten warunek jest konieczny do tego, żeby nie „wygładzić” samego defektu). Wygładzanie realizuje się za pomocą kilku typów filtrów (procedur), z których najbardziej rozpowszechnione to:

- 1) filtr niskich częstotliwości (*low-pass filter*);
- 2) filtr medianowy (*median filter*);
- 3) uśrednienie w czasie (*averaging*).

Przykłady filtru niskich częstotliwości:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{9} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{C} = \frac{1}{25} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Czym jest większy wymiar maski filtru, tym na większej płaszczyźnie zachodzi wygładzanie sygnału; maski o wymiarach większych niż 12x12 praktycznie nie są stosowane, ponieważ doprowadzają one do zbyt znacznych zniekształceń wyjściowego zobrazowania.

Filtry wysokich i niskich częstotliwości zmieniają histogramy zobrazowania czego nie powoduje filtr medianowy, który pozostawia histogram niezmienionym. Filtr ten jest efektywny do usunięcia jedno pikselowych szumów (typu „sól i pieprz”), które na przykład często powstają w słabej jakości cyfrowych zobrazowaniach.

Wyjaśnimy zasadę pracy filtru medianowego w jednowymiarowym wariancie (stosując do filtracji temperaturowych sygnałów w czasie). Przypuśćmy, że pikselowe amplitudy rozłożone są w następującym porządku: 32 215 71. Medianowy filtr zmienia amplitudy pikseli w kolejności ich wzrostu: 32 71 215. Filtry medianowe są bardzo przydatne do eliminacji szumów. Ich podstawowe zalety to:

- do filtrowanego obrazu nie wprowadza się nowych wartości, co pozwala zachować ostre krawędzie;
- wartości nadmiernie odbiegające od pozostałych oraz lokalne szumy nie wpływają na wynik.

Uśrednienie odczytów sygnału w czasie, prowadzi z jednej strony do podwyższenia rozdzielczości temperaturowej w wyniku obniżenia nieskorelowanych szumów, ale z drugiej strony pogarsza rozdzielczość w czasie.

2.5. Wydzielenie granic obszarów

Wydzielenie granic obszarów jest typowym zadaniem segmentacji obrazów, które rozwiązuje się za pomocą gradientowych filtrów. Filtr Sobela realizuje dwuwymiarowy przestrzenny pomiar gradientu w wyjściowym obrazie. Wynikiem jego zastosowania jest ciemne pole z wyraźnie widocznymi granicami obszarów, gdzie ma miejsce maksymalny gradient sygnału.

$$\mathbf{G} = \begin{matrix} \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_4 & P_5 & P_6 \\ P_7 & P_8 & P_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \times 3 \end{matrix} \end{matrix}$$

praktyczny wzór obliczenia gradientu ma postać:

$$G = |(P_1 + 2P_2 + P_3) - (P_7 + 2P_8 + P_9)| + |(P_3 + 2P_6 + P_9) - (P_1 + 2P_4 + P_7)|. \quad (4)$$

Efektywnym gradientowym filtrem jest laplasjan, jednak jest on bardzo czuły na szumowe fluktuacje sygnału. Częściej wykorzystuje się kombinację laplasjanu i funkcji Gaussa (*LoG* filtr).

Funkcja Gaussa ma postać:

$$h(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

gdzie $r^2 = x^2 + y^2$ lub $r^2 = i^2 + j^2$.

Maskę filtru, która związa się z podstawowym obrazem otrzymuje się w wyniku zastosowania drugiej pochodnej (laplasjanu) do funkcji Gaussa:

$$\nabla^2 h(r) = -\left[\frac{r^2 - \sigma^2}{\sigma^4}\right] e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}. \quad (6)$$

Synteza obrazowania z $\nabla^2 h(r)$ jest ekwiwalentna wygładzaniu funkcji Gaussa i kolejnemu obliczeniu drugiej pochodnej, co prowadzi do nowego obrazowania, w którym skraje obszarów przedstawione są podwójnymi krawędziami. Dokładną granicę obszarów znajduje się między tymi krawędziami i określa się ją za pomocą tego lub innego filtra, ustalającego przejście funkcji przez zero.

Przy obróbce obrazów stosuje się centrowany w stosunku do zera filtr *LoG* :

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

Prostym sposobem wydzielenia obszarów na obrazach jest jego binaryzacja. Zamienia ona obrazy wieloodcieniowe na obrazy czarno-białe (binarne) bez pośrednich odcieni szarości. Globalny lub lokalny (pływający) próg binaryzacji wybiera się na podstawie histogramu obrazowania, po czym piksele, położone po prawej stronie od progu obrazowane są białym kolorem (1), a piksele po lewej stronie progu, przedstawiane są na czarno (0).

2.6. Filtracja morfologiczna

W klasycznej postaci morfologiczna filtracja jest operacją logiczną, stosowaną w binarnych obrazach i zmieniającą kształt obszarów zainteresowania (*region of interest* - *ROI*). Pozwala ona na najbardziej złożone operacje i pozwala otrzymać z obrazu wiele cennych i wydałoby się trudnych do uzyskania informacji. Modyfikację pikseli wykonuje się w przedziałach przemieszczonego na obrazie strukturalnego elementu, który może mieć różny kształt i wymiary; w charakterze prostego strukturalnego elementu można wykorzystać maskę 3x3. Morfologiczna obróbka oparta jest na kombinacji dwóch fundamentalnych procedur, nazywanych *erozją* (*erosion*) i *dylatacją* (*dilation*). Dylatacja powoduje „narastanie” obiektu, ponieważ w centrum strukturalnego elementu ulokowana jest jedynka, jeśli element pokrywa choćby jeden jedynkowy piksel obrabianego obrazu. Odpowiednio, erozja „zjada” obiekty, ponieważ strukturalny element dodaje do obiektu zerowe piksele, jeśli element pokrywa chociaż jeden zerowy piksel tła. Przy erozji, na przykład, jedynkowy piksel, otoczony kilkoma zerowymi, staje się także zerowym, dlatego taka procedura efektywnie usuwa jedno-pikselowe szumy. Ponieważ erozja „zjada” krawędzie jedynkowego obszaru, po niej stosuje się dylatację, która powoduje „narastanie” granicznych pikseli, ale nie odbudowuje usuniętych jedno-pikselowych stref.

Morfologiczna filtracja także jest stosowana do wieloodcieniowych obrazów. Przy tym dylatacja oznacza umieszczenie w centrum strukturalnego elementu maksymalnej amplitudy pikselowej z tej części obrazu, która pokryta jest tym elementem. Odpowiednio, erozja zawiera minimalną wartość.

2.7. Rekonstrukcja obrazu

Rekonstrukcja (*restoration*) obrazu zwykle oznacza jego dopasowanie do pewnego modelu. W badaniach termograficznych to najczęściej wyrażane jest w postaci aproksymacji, na przykład wielomianowej, czasowego rozwoju temperatury.

Technika aproksymacji (*fitting*) pikselowych funkcji rozwoju temperatury w czasie $T_{ij}(\tau)$ stała się bardzo popularna z powodu następujących czynników:

- całkowicie tłumi wysokoczęstotliwościowy szum;
- ułatwia zastosowanie takich matematycznych operacji jak dzielenie, obliczenie pochodnych; przekształcenie Fouriera itd.;
- sekwencje obrazów w podczerwieni o dowolnej długości zastępuje obrazami rozkładu współczynników, liczba których, jak wiadomo, nie przekracza sześciu; przy tym zachowuje możliwość odbudowy pochodnej sekwencji, ale nie zawierającej wysokoczęstotliwościowego szumu;
- głębokość położenia defektów może być związana z oddzielnymi współczynnikami rozkładu podobnie do analogicznych zależności składowych spektrum Fouriera.

Idea dopasowywania temperatury eksperymentalnych danych do odpowiednich matematycznych modeli była wykorzystana przez P. Vernotte jeszcze w 1937 r. w eksperymentach do określenia termofizycznych charakterystyk materiałów [4]. Procedury nieliniowej filtracji pozwalają otrzymać optymalne oceny od razu kilku parametrów badań termograficznych, takich jak wymiar i głębokość położenia defektów, termofizyczne charakterystyki, tłumienia energii i intensywności powierzchniowej wymiany ciepła.

W charakterze aproksymacyjnych funkcji wykorzystuje się wielomiany różnych stopni [5] i kombinacje funkcji wykładniczych [6].

2.8. Odejmowanie i dzielenie obrazów

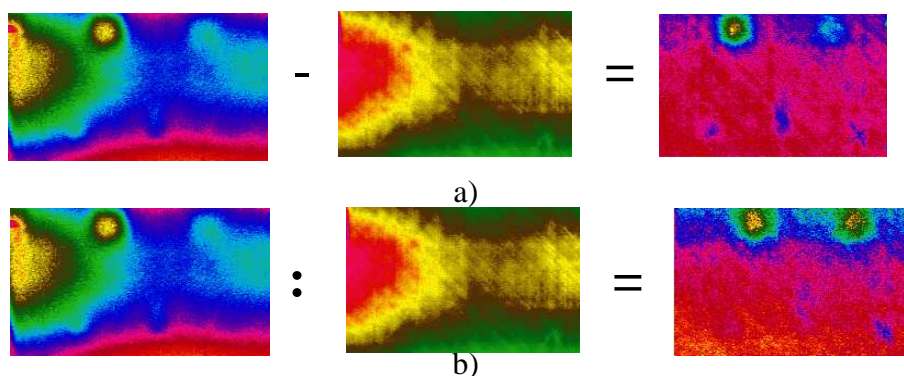
W szeregu przypadkach proste arytmetyczne operacje, takie jak odejmowanie (*subtraction*) i dzielenie (*dividing*), zdolne są istotnie obniżyć zakłócenia, które są specyficzne dla badań termograficznych (rys. 4). Na przykład, odejmowanie jest efektywne w przypadku addytywnego szumu, który w równej mierze występuje w obu obrazach. Dzielenie z kolei obniża multiplikacyjne zakłócenia, spowodowane na przykład fluktuacjami promieniowania, jednak w tym przypadku konieczne jest operowanie tylko z nadmiarem temperatury nagrzewania godząc się na wzrost wysokoczęstotliwościowego szumu.

3. Specjalne techniki obróbki danych

3.1. Maksigram

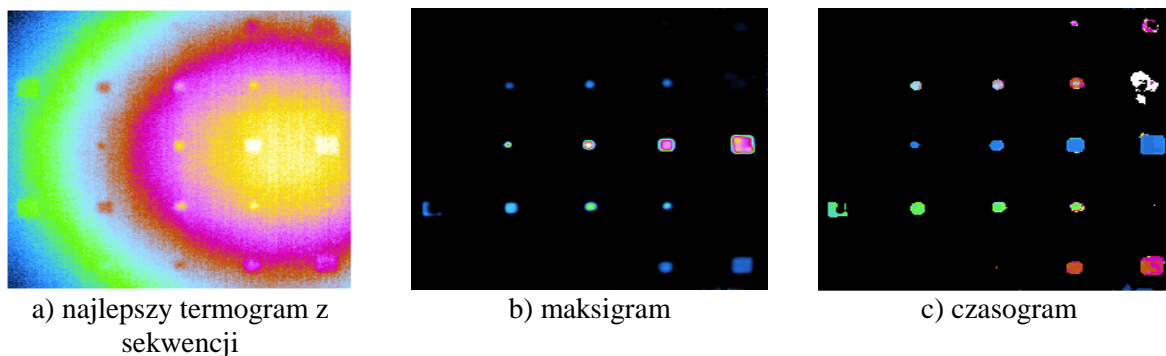
Maksigram jest „sztucznym” obrazowaniem, powstałym z sekwencji zarejestrowanych termogramów, które pokazuje strukturalne niejednorodności badanego obiektu w stosunku do wybranego wzorca (wybrany piksel $\{i_{ref}, j_{ref}\}$ z obszaru powierzchni poza strefą defektów) i jest ich optymalnym ujawnieniem oraz charakteryzuje się maksymalnym stosunkiem sygnał/szum. W porównaniu z pojedynczymi termogramami, wybranymi z zarejestrowanej sekwencji, maksigram zawiera o wiele więcej informacji dotyczących podpowierzchniowych defektów w materiale. Amplituda sygnału w poszczególnych pikselach przedstawiona jest w różnych momentach czasu rejestrowanych termogramów w sekwencji, wówczas kiedy występuje maksymalna różnica sygnału temperatury zgodnie z równaniem:

$$\Delta T_m(i, j, \tau_m) = [T(i, j, \tau) - T_{ref}(i_{ref}, j_{ref}, \tau)]_{\max} \quad (8)$$



Rys.4. Odejmowanie (a) i dzielenie (b) obrazowań (defekty w postaci teflonowych wstawek w tworzywie węglowym)

Na rys.5 przedstawiony jest przykładowy maksigram z badań 10 warstwowej próbki kompozytu CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*) o grubości 2 mm zawierającej 25 defektów w postaci cienkich wstawek teflonowych w kształcie kwadratów o różnych wymiarach boku od 3 mm do 15 mm znajdujących się na różnych głębokościach pod powierzchnią próbki.



Rys.5. Wyniki z badań 10 warstwowego kompozytu CFRP z 25 defektami w postaci wstawek z teflonu o różnych wymiarach i znajdujących się na różnej głębokości pod powierzchnią [7]

3.2. Czasogram

Czasogram odzwierciedla rozkład charakterystycznych czasów wymiany ciepła w obiekcie w stosunku do wzorca. Faktycznie, każdy piksel czasogramu zawiera numer kolejnego zobrazowania, któremu odpowiada maksymalna wartość ΔT . Po porównaniu z odpowiednim maksigramem, czasogram charakteryzuje się bardziej stromym frontem przestrzennego rozkładu sygnału $\tau_{m,i,j}$ i dlatego lepiej odzwierciedla rzeczywiste wymiary defektów. Ważną cechą czasogramu jest prawie „płaskie” zachowanie się sygnału $\tau_m(i, j)$ w środkowej części defektu i obecność charakterystycznego wyrzucenia z większymi wartościami czasów zwłoki na krańcach defektów, co prowadzi do pojawienia się artefaktów (fałszywych defektów). Czasogramy są istotnym wynikiem nieliniowej obróbki wyjściowych temperaturowych informacji i w przypadku nieprawidłowego wyboru punktu wzorcowego może nie odzwierciedlać obecności wewnętrznych defektów. Na rys.5 przedstawiony jest przykład czasogramu uzyskany w trakcie badań opisanych w pracy [7].

Przestrzenno-czasowa fluktuacja temperatury doprowadza do syntezy zaszumionego maksigramu i czasogramu z powodu następujących przyczyn:

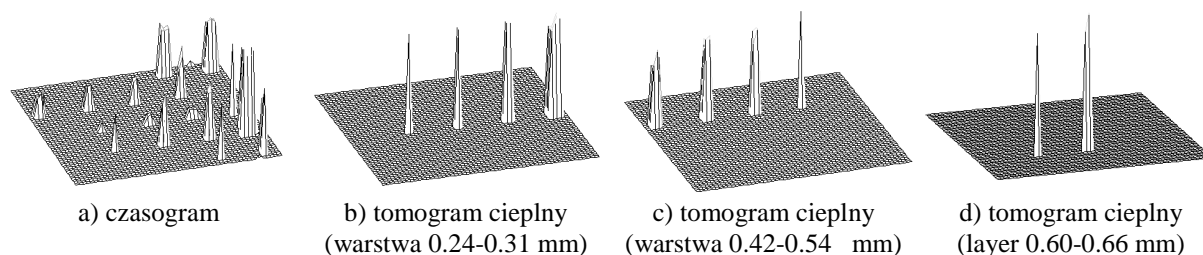
- punkty w strefie bez defektów charakteryzują się rozrzutem wartości ΔT_m i τ_m , ponieważ w ogólnym przypadku one nie zawsze są identyczne z wybranym wzorcowym punktem;
- chaotyczny rozkład maksimów ΔT_m w czasowym rozwoju sygnałów temperaturowych doprowadza do pojawienia się szumowych odczytów w czasogramach, które nie są związane z głębokością położenia defektów.

3.3. Tomografia cieplna

Zobrazowanie badanego materiału (obiektu) warstwa po warstwie nazywane jest metodą tomografii, która jako metoda tomografii rentgenowskiej a następnie tomografii komputerowej (*Computer Tomography*) wykorzystując promieniowanie X została zastosowana jako technika diagnostyki medycznej. Idea metody tomografii cieplnej (*thermal tomography*) i jej zastosowania w nieniszczących badaniach termograficznych powstała w latach 80-tych ubiegłego wieku [9].

Vavilov i Shiryaev w 1986 r. zaproponowali zastosowanie tzw. Dynamicznej Ciepłej Tomografii (DDT) [10]. Główna idea DDT jest taka, że czasy optymalnej obserwacji, tj. czasy kiedy maksymalne różnice sygnału temperaturowego występują nad wadami, mogą zostać użyte do charakteryzacji tych defektów. Bardziej głębokie defekty pojawiają się na nagrzewanej powierzchni z opóźnieniem w czasie, dlatego obraz rozkładu czasowych zwłok

można przebudować w obraz rozkładu głębokości defektów. Zastosowany algorytm pozwala na „krojenie” próbek na cienkie warstwy ze znanymi współrzędnymi głębokości warstwy pod powierzchnią badanej próbki. Podstawowa idea polega na tym, że dowolna dynamiczna funkcja temperatury może zostać scharakteryzowana przez pewien ściśle określony punkt w jego czasowej zmianie. Fizycznie odnosi się to do zachowania się w czasie nadmiaru sygnału temperatury ΔT zdefiniowanego jako różnica temperatury między każdym punktem termogramu T i temperatury w wybranym punkcie odniesienia T_{nd} , który znajduje się w strefie bez defektów. Na rys.6 przedstawiony jest przykład zastosowania tomografii cieplnej wielowarstwowej próbki CFRP z wewnętrznymi defektami w postaci kwadratowych wstawek z teflonu [7].



Rys.6. Przykład zastosowania tomografii cieplnej [7]

Tomografia cieplna pozwala na:

- wykonanie warstwowej analizy obiektu kontroli;
- zmniejszenie wpływu powierzchniowych szumów na jakość termogramu;
- polepszenie wykrywania ukrytych defektów;
- określenie głębokość położenia defektów z zadawalającą dokładnością.

Teoretycznie maksymalna liczba warstw, które można wydzielić w ciele stałym za pomocą tomografii cieplnej, powinna być równa liczbie zobrażeń w sekwencji, w praktyce jednak z powodu obecności szumów i temperaturowej rozdzielczości kamery termowizyjnej, grubość wydzielenia warstwy zwiększa się ze wzrostem głębokości, ale nie przewyższa 4...6 warstw.

W pracy [11] została zaproponowana tzw. adaptacyjna tomografia cieplna oparta na podwarstwowym adaptacyjnym wykreślaniu profili termofizycznych charakterystyk. Wykorzystano w niej algorytm, który zakłada, że:

- eksperymentalne funkcje zmian temperatury w czasie rejestruje się z małym interwałem $\Delta \tau$;
- termofizyczne charakterystyki zasadniczego materiału są wcześniej znane;
- dla pierwszego kroku po czasie głębokość przenikania energii cieplnej jest mała i wyrób rozpatruje się w charakterze półograniczonego ciała bez defektów;
- eksperymentalne wartości temperatury liczy się krok po kroku z interwałem $\Delta \tau$, porównując z danymi obliczeniowymi i modyfikując je na każdym kroku i w każdym pikselu, zmieniając wartości przewodności cieplnej.

Algorytm, oparty na jawnym obliczeniowym schemacie rozwiązania równania przewodności cieplnej, wykorzystuje wzór rekurencyjny, który zawiera obliczenia na poprzednich czasowych krokach wartości grubości i przewodności temperaturowej warstw. Na każdym parzystym kroku określa się grubość kolejnej warstwy, a na każdym nieparzystym kroku oblicza się przewodność temperaturową danej warstwy. W ten sposób, przesuwając się w głąb wyrobu, możliwe jest zbudowanie pikselowego rozkładu przewodności temperaturowej w zakresach oddzielnych warstw. Do podziału wyrobu na N warstw potrzeba mieć sekwencję z $2N - 1$ termogramów.

Dany algorytm nie otrzymał rozwinięcia przez ograniczenia, nakładane na kroki w czasie i przestrzeni. Faktycznie udawało się wydzielić tylko 3...4 warstwy, po czym algorytm

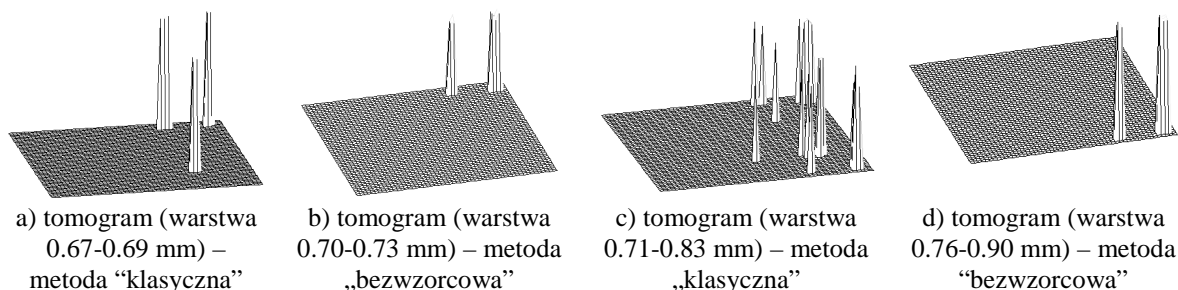
rozchodził się. Zastosowanie niejawnego schematu obliczeniowego okazało się niemożliwe przez konieczność odtwarzania na każdym kroku wszystkich warstw wyrobu aż do tylnej powierzchni.

Jeżeli znany jest związek przesunięcia fazy z głębokością położenia i grubości defektu można zastosować tzw. fazową tomografię zaproponowaną w pracy [12]. Tomogramy były otrzymane na podstawie wydzielenia na fazogramie pikseli charakteryzujących się określonymi wartościami faz co odpowiadało określonym współrzędnym warstw.

Efektywność „klasycznej” tomografii cieplnej (DTT), opisaną wcześniej, istotnie zależy od stopnia jednorodności nagrzewania lub jakości normalizacji danych wejściowych, ponieważ jest konieczne wybieranie wzorcowej wartości sygnału temperaturowego.

Oczywiście, że jakościowa ocena jest niemożliwa bez wzorca, tym nie mniej, można wprowadzić do rozpatrzenia model cieplny zachowania temperatury w strefach bez defektów, który będzie jednym i tym samym dla wszystkich pikseli zobrazowania. Przy tym analizie podlegają tylko odchylenia eksperymentalnych wartości temperatury od wartości przypisanych modelowi. Takie podejście nazywane jest „bezwzorcową” tomografią cieplną opisaną w pracy [7].

W tej metodzie aproksymuje się ewolucję sygnałów bez defektów i z defektami w czasie za pomocą dwóch wielomianów: 2-ego i 6-ego stopnia i określa różnicowy sygnał jako $\Delta T_{ijf} = T^{(6)}_{ijf} - T^{(2)}_{ijf}$, gdzie górny indeks oznacza stopień wielomianu. Taka operacja może być zastosowana w każdym pikselu i nie wymaga wyboru wzorcowego punktu (przypuszcza się, że wielomian 2-ego stopnia opisuje ewolucję bezdefektowych wartości temperatury, a wielomian 6-ego stopnia dodatkowo opisuje dewiacje sygnału w obszarach z defektami). Ponieważ w czasowym rozwoju różnicowego sygnału powstają miejscowe ekstrema, spowodowane istnieniem ukrytych defektów, dane podejście może być wykonane dla realizacji „bezwzorcowej” tomografii. Na rys.7 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych za pomocą metody „klasycznej” i „bezwzorcowej” tomografii cieplnej [7].



Rys.7. Porównanie wyników zastosowania „klasycznej” i „bezwymiarowej” tomografii cieplnej [7]

Jak widać na rys.7 tomogramy otrzymane metodą „klasyczną” zawierają fałszywe sygnały w postaci artefaktów, których nie ma przy zastosowaniu metody „bezwzorcowej”.

3.4. Transformata Fouriera

Transformata Fouriera (FT - Fourier Transform) jest operacją pozwalającą przedstawić funkcję w postaci sumy wielu funkcji sinus i cosinus. Rozłożenie funkcji na te składowe, nazywane również analizą spektralną, stanowi podstawowe narzędzie w analizie sygnałów, szczególnie przydatne w przypadku analizy procesów zależnych od czasu. W analizie obrazów transformata Fouriera jest wykorzystywana najczęściej w trzech podstawowych typach przekształceń [19]:

- detekcji lub ilościowym opisie tych cech obrazu, które są znacznie lepiej widoczne i łatwiejsze do analizy w spektrum Fouriera niż w samym obrazie;
- operacji, które ze względów obliczeniowych są łatwiejsze do wykonania właśnie w dziedzinie częstotliwości;
- wzmocnieniu lub usunięciu składowych, odpowiadających np. szumom a następnie poprzez tzw. odwrotną transformatę Fouriera odtworzyć skorygowany obraz.

Szczególnym odróżnieniem transformaty Fouriera wykorzystywanej w badaniach termograficznych od standardowych procedur obróbki dwuwymiarowych zobrazowań jest jej „jednomierność” ponieważ dostosowuje się do rozwoju sygnałów w czasie. Transformatę Fouriera w badaniach termograficznych wykorzystuje się do badania dynamiki zmian temperatury w sekwencjach zobrazowań w podczerwieni. Trudność w interpretacji zobrazowań fazy (fazogramy) i amplitudy (amplitudogramy) w analizie Fouriera wynika z tego, że wyniki przekształcenia Fouriera zależą zarówno od wielkości interwału $\Delta\tau$ między zobrazowaniami danych temperaturowych jak i od liczby tych interwałów.

W metodzie impulsowo fazowej termografii wykorzystuje się dyskretną transformatę Fouriera (DFT - Discrete Fourier Transform) [24, 25]:

$$F_n = \Delta\tau \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta\tau) \exp\left(\frac{j2\pi k}{N}\right) = \text{Re}_n + j\text{Im}_n \quad (8)$$

gdzie:

- n – numer harmonicznej,
- N – liczba zobrazowań w sekwencji,
- j - jednostka urojona,
- k - liczba zobrazowań,
- Re_n i Im_n - rzeczywista i urojona część funkcji.

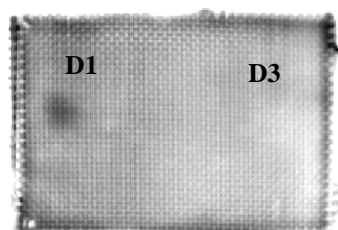
Z części rzeczywistej i urojonej funkcji F_n (8) dla każdego punktu termogramu można wyznaczyć fazy i amplitudy dla poszczególnych fal o danej częstotliwości zgodnie z wyrażeniami:

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad \text{i} \quad \Phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n}\right) \quad (9)$$

W badaniach nieniszczących ze względu na stosunkowo długi czas obliczeń z wykorzystaniem dyskretnej transformaty Fouriera (8) w praktyce wykorzystuje się algorytm szybkiej transformacji Fouriera (FFT – Fast Fourier Transform) [26] co znacznie skraca czas obliczeń z wykorzystaniem np. środowiska MatLab.

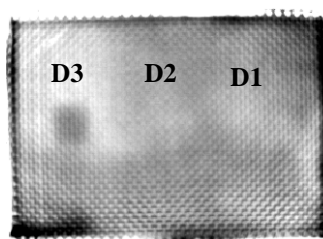
Na rys. 8 przedstawiono przykładowe wyniki [27] z badania metodą impulsowo fazowej termografii 4 warstwowej próbki tkaniny aramidowej połączonej żywicą z trzema defektami w postaci cienkich wstawek teflonowych umieszczonych między warstwami tkaniny.

Metoda odbiciowa



f = 0,33 Hz

Metoda transmisyjna



f = 0,4 Hz

Rys.8. Fazogramy próbki kompozytu aramidowego z optymalnymi wynikami uzyskane z zastosowaniem przekształcenia Fouriera.

3.5. Analiza falkowa

Analiza falkowa lub transformata falkowa (wavelet transforms) była opracowana w 80-tych latach ubiegłego wieku początkowo jako narzędzie do analizy sejsmogramów. W badaniach termograficznych analiza falkowa była po raz pierwszy wykorzystana przez zespół X. Maldague w charakterze alternatywy dla przekształcenia Fouriera [13, 14].

Transformacja falkowa umożliwia jednocześnie przedstawienie czasowych oraz częstotliwościowych sygnałów i prowadzi do aproksymacji sygnałów przez wyodrębnienie ich charakterystycznych elementów strukturalnych. W odróżnieniu od transformacji Fouriera, transformacja Falkowa dokonuje rozbicia sygnału na sygnały elementarne zwane falkami (*wavelets*), które są przebiegami ciągłymi oscylacyjnie o różnych czasach trwania i o zróżnicowanym widmie [31]. Niedogodnością transformaty Fouriera, która jest najbardziej popularną analizą sygnałów temperaturowych jest to, że przejście z układu czas-wartość do układu częstotliwość-wartość powoduje utratę informacji o czasie. Zaś transformata Falkowa umożliwia analizę zmiany częstotliwości sygnału w funkcji czasu. Analiza falkowa jest przydatnym narzędziem w analizie krótkich sygnałów czasowych, danych przejściowych lub złożonych obrazów.

Ogólny wzór transformaty falkowej ma postać:

$$U(a,b) = \frac{1}{w(a)} \int_{-\infty}^{+\infty} g\left(\frac{\tau-b}{a}\right) f(\tau) d\tau \quad (10)$$

gdzie:

a – współczynnik skali,

b – współczynnik przesunięcia,

$U(a, b)$ – współczynnik falkowy,

g – funkcja falkowa,

$g\left(\frac{\tau-b}{a}\right)$ – jądro przekształcenia,

$f(\tau)$ – badany sygnał,

$w(a) = a$ lub $w(a) = \sqrt{a}$.

Współczynnik skali a decyduje o tym jaką pseudo-częstotliwość reprezentuje falka i przyjmuje wartości >0 . Jest on odwrotnie proporcjonalny do pseudo-częstotliwości falki, czyli wraz ze wzrostem współczynnika a pseudo-częstotliwość falki maleje. Współczynnik

przesunięcia b odpowiada za przesuwanie się funkcji falkowej wzdłuż badanego sygnału. Wraz ze zmianą współczynnika b , funkcja falki jest przesuwana wzdłuż osi czasu. Funkcja $f(\tau)$ jest sygnałem, który chcemy poddać transformacji falkowej. Pełen zbiór falek użytych do dekompozycji sygnału składa się z falki głównej nazywanej również macierzystą (*mother wavelet*), która musi mieć skończoną energię oraz zerową wartość średnią w wyniku czego ma postać krótkotrwałej oscylacji, oraz pozostałych przebiegów, które są jej kopiami przesuniętymi w czasie oraz „rozciągniętymi” i „ściśniętymi” na osi czasu [32].

W badaniach termograficznych wykorzystuje się podstawową funkcję Morleta, która jest funkcją o postaci sinusoid modulowanych funkcjami Gaussa. Parametry rozkładu nazywane są współczynnikiem translacji Tr (*translation*) i współczynnikiem skali S (*scale*), wówczas wzór na przekształcenie falkowe (W) ma postać:

$$W(S, Tr) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\tau) h_{S, Tr}(\tau) d\tau \quad (11)$$

gdzie $h_{S, Tr}$ jest funkcją falkową, która związana jest z macierzystą funkcją wyrażeniem:

$$h_{S, Tr}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{S}} h\left(\frac{\tau - Tr}{S}\right) \quad (12)$$

Ponieważ skalujący czynnik związany jest z częstotliwością, a czynnik translacji – z czasem, w metodzie funkcji falkowej nie traci się informacji o czasie, koniecznej do oceny głębokości położenia defektów.

Falkowe przekształcenie można rozpatrywać jako korelację między sygnałem i odskalowaną macierzystą funkcją. Jeśli $F_T(\omega)$ jest obrazem Fouriera sygnału $T(\tau)$, a $F_h(\omega)$ - obrazem Fouriera funkcji $h(\tau)$, to przekształcenie falkowe można rozpatrywać jak odwrotne przekształcenie Fouriera od wytworzonych pokazanych obrazów i wówczas:

$$W(S, Tr) = \frac{\sqrt{S}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_T(\omega) F_h(\omega) e^{-j\omega Tr} d\omega \quad (13)$$

Interwały czasu i częstotliwości powinny spełniać zasadę nieokreśloności (nieoznaczności) Heisenberga:

$$\Delta\tau \Delta\omega \geq 1/2 \quad (14)$$

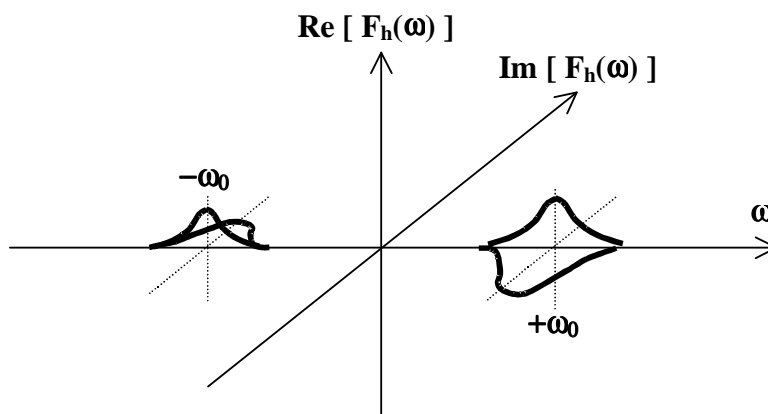
Macierzystą funkcję Morleta określa się jako:

$$h(t) = \exp(-j\omega_0 \tau) \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right), \quad (15)$$

gdzie ω_0 - wymiar funkcji falowej Morleta.

Funkcja Morleta powstała na bazie przekształcenia Fouriera dokonującego analizy częstotliwości w oknie Gaussa opisującego czasowe parametry. Na rys. 9 pokazany jest obraz Fouriera od funkcji Morleta, który zawiera dwie gaussowskie funkcje rozsunięte na ω_0 i $-\omega_0$ w taki sposób że, skalujący czynnik pozwala badać różne częstotliwości przy czasach, określonych czynnikiem translacji. Z uwzględnieniem zasady Heisenberga, każdy obraz falkowy określony jest wewnątrz prostokąta $\Delta\tau \Delta\omega$ wokół S i Tr . Pokazane ograniczenie dokładności pozycjonowania funkcji falkowej wpływa na wybór ω_0 . Nieokreśloność

wartości ΔTr i głębokości położenia defektu l wzrasta ze zwiększeniem ω_0 i zmniejszeniem $\Delta\omega$.



Rys.9. Przekształcenie Fouriera funkcji Morleta

Falkowe przekształcenie dekoreluje jednowymiarowy sygnał (funkcję czasu) w dwuwymiarowy sygnał (funkcję czasu i skalującego czynnika), co prowadzi do wzrostu objętości towarzyszących obliczeń. Dla ich skrócenia wykorzystuje się dwa wiadome w badaniach termograficznych wyrażenia, które wiążą:

$$\text{czas obserwacji z głębokością położenia defektu } \tau = \frac{l^2}{\alpha} \quad \text{i} \quad (16)$$

$$\text{długość dyfuzji cieplnej z częstotliwością } \mu = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}.$$

Kombinacja tych wyrażen przy warunku $l = \mu$ prowadzi do warunku:

$$\tau = \frac{2}{\omega}. \quad (17)$$

Czynnik translacji Tr odpowiada czasowi obserwacji τ a skalujący czynnik $S = \omega_0 / \omega$. Powiązanie tych dwóch parametrów daje stosunek:

$$S = \frac{\omega_0}{2} Tr. \quad (18)$$

Wykorzystanie ostatniego wyrażenia pozwala zachować wymiary analizowanego sygnału, obliczając wartości skalującego czynnika S dla każdej wartości Tr . Wartości Tr ograniczone są czasem pomiaru, dlatego:

$$W(S, Tr) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\tau) \frac{1}{\sqrt{0,5 \omega_0 Tr}} h\left(\frac{\tau/Tr-1}{0,5 \omega_0}\right) d\tau. \quad (19)$$

Tak jak i w przypadku obrazu Fouriera, obraz falkowy zawiera rzeczywistą i urojoną część, dlatego pozwala określić fazowe charakterystyki w przestrzeni obrazów (co pozwoliło przenieść tą metodę do impulsowej fazowej termografii). Falkowe obrazy charakteryzują się tymi samymi własnościami co i obrazy Fouriera. Fazy przekształceń falkowych wykorzystuje się do wykrywania defektów, przy czym segmentację defektów realizuje się za pomocą

operatora Sobela. Kalibrowanie czynnika translacji (różnica pikselowych wartości Tr) pozwala ocenić głębokość położenia defektów [33].

Czynnik translacji, będący w istocie analogiem czasu, zapewnia maksimum «widoczności» defektów określonego wymiaru na określonej głębokości. Dlatego, żeby nie wprowadzać podwójnej kalibracji do wymiarów defektu i głębokości, zaproponowano wykorzystanie wczesnych czasów obserwacji, przy których sygnały temperaturowe słabo zależą zarówno od poprzecznych wymiarów defektów jak i od ich grubości, zachowując silną zależność od ich głębokości położenia.

Analiza falkowa stanowi pewne uogólnienie analizy Fouriera. W tej ostatniej, sygnał rozkładany jest na sumę lub całość sygnałów sinusoidalnych, których sens fizyczny jest stosunkowo łatwy do zinterpretowania. Niestety sinusoidy te są jednorodne w czasie, podczas gdy sygnał wyjściowy nie zawsze. W szczególności może on mieć postać oscylacji, których amplituda i częstość zmienia się w czasie a ta niejednorodność nie znajduje czytelnego odzwierciedlenia w transformacji. Stosowanie transformacji Fouriera na oddzielnych, skończonych przedziałach osi czasowej, nie zawsze daje zadawalające rezultaty. Falki, posiadające możliwość płynnej zmiany skali i położenia, przy zachowaniu kształtu funkcji dają tu większe możliwości.

Jednak w badaniach termograficznych metoda funkcji falkowych jest stosunkowo słabo zbadana, a jej wyższość – dyskusyjna, ponieważ zmiany różnicowych sygnałów $\Delta T(\tau)$ w czasie noszą nie impulsowy a wygładzony charakter.

3.6. Metoda rekonstrukcji termograficznego sygnału

Przy jednostronnych impulsowych badaniach termograficznych sygnały temperaturowe nad typowymi defektami w stadium schładzania zmieniają się wolniej, niż w strefach bez defektów, z powodu mniej intensywnego odprowadzania ciepła w głąb wyrobu przez defekt. Z tej przyczyny na równi z analizą funkcji temperaturowych $T(\tau)$ interesująca jest analiza zmian w czasie pierwszej ($\partial T(\tau)/\partial \tau$) i drugiej ($\partial^2 T(\tau)/\partial \tau^2$) pochodnej od temperatury. Wyższość analizy pochodnych od analizy funkcji temperaturowych jako czysto matematycznej operacji jest oczywista, tym nie mniej, S. Shepard i inni wykonali próbę wyjaśnienia ich roli z punktu widzenia analizy dyfuzji ciepła [5]. Opracowali oni koncepcję „sztucznej obróbki” (*synthetic processing*) danych impulsowych badań termograficznych, które są realizowane komercyjną aparaturą firmy Thermal Wave Imaging. W ostatnim czasie także używany jest termin „rekonstrukcji sygnału termograficznego” (*Thermographic Signal Reconstruction – TSR*) [30].

Zgodnie z autorami koncepcji, w strefach bez defektów strumień ciepły, nie wzbudza się pod wpływem defektów, jest jednowymiarowy i opisany równaniem:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (20)$$

rozwiązanie którego dla powierzchni równomiernie nagrzewanej półograniczonego ciała ma kanoniczną postać:

$$T(z=0) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi\tau}}. \quad (21)$$

Nad słabo przewodzącym ciepło defektem strumień ciepły wpada w „pułapkę” i zaczyna się głównie rozchodzić w poprzecznych kierunkach w stronę bardziej niskich

„bezdefektowych” temperatur. Wówczas dyfuzję ciepła w strefach z defektami można obliczyć zgodnie z dwuwymiarowym równaniem:

$$\nabla_{x,y}^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (22)$$

W ten sposób, proces trójwymiarowej dyfuzji ciepła można umownie rozdzielić na „normalną” i „poprzeczną” fazę. Przejście z jednej fazy do drugiej związane jest z koncepcją optymalnego czasu obserwacji (optimal observation time, peak slope time), przy czym w ramach metody „sztucznej obróbki” czas obserwacji określa się na podstawie zachowania pochodnych.

Ponieważ obliczenie pochodnej od zaszumionej funkcji wzmacnia szum (w wyniku poszerzenia częstotliwościowego spektrum sygnału), istotnym momentem metody jest wielomianowa aproksymacja eksperymentalnych funkcji $T(\tau)$ z zastosowaniem logarytmicznej aproksymacji. Logarytmiczne przedstawienie:

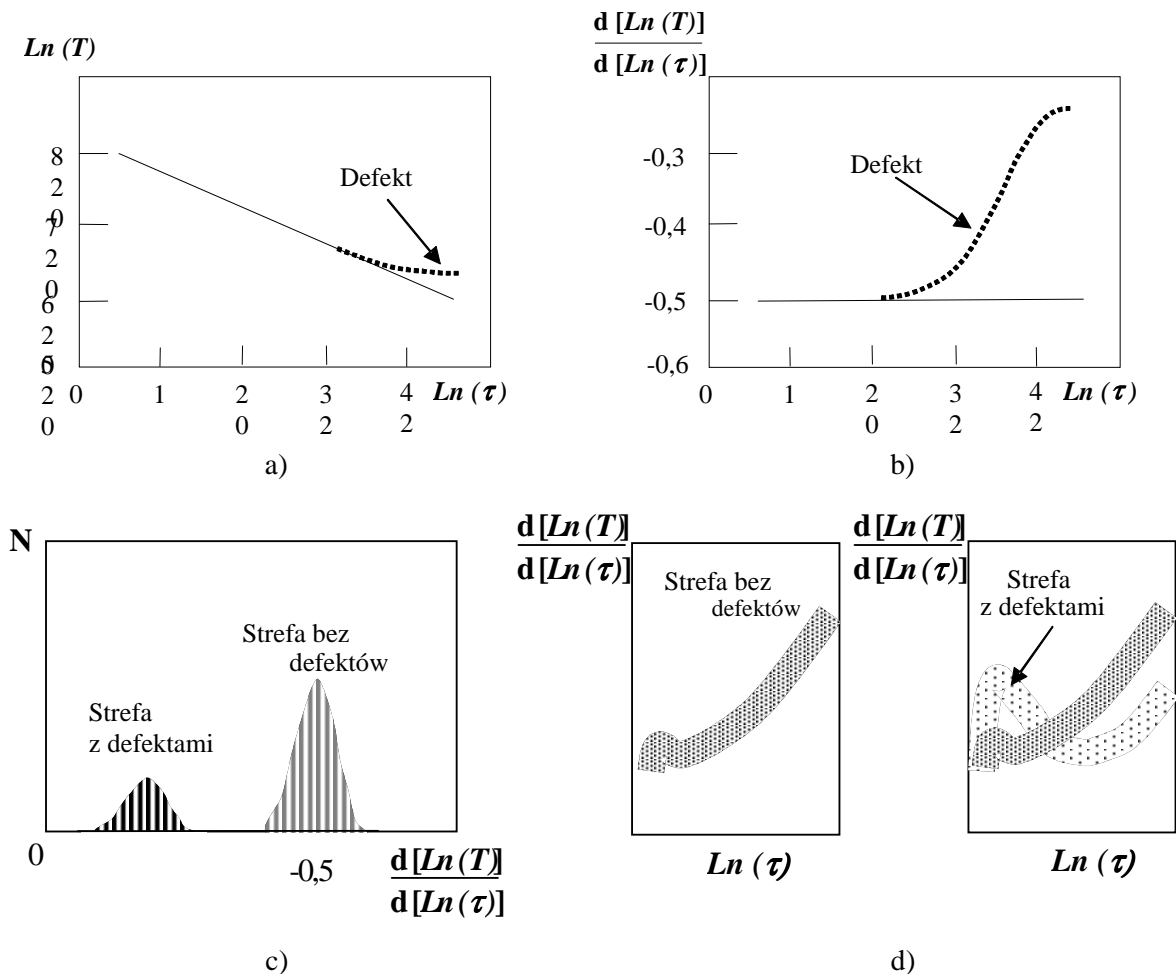
- 1) obniża wpływ końcowej długości impulsu nagrzewającego;
- 2) doprowadza zachowanie „bezdefektowych” pikseli do liniowej funkcji z pochyleniem -0.5;
- 3) działa jak filtr niskiej częstotliwości, tłumiąc wysokoczęstotliwościowy szum systemu podczerwieni i pozostawiając niezmiennione nisko częstotliwościowe efekty, związane z defektami.

Drugim krokiem procedury jest odbudowanie sekwencji za pomocą wielomianów wg wzoru:

$$\begin{aligned} T(\tau) \rightarrow \text{Ln } T(\tau) &= A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + \dots \\ (x = \text{Ln } \tau) & \\ T &= e^{A_0 + A_1 x + \dots}. \end{aligned} \quad (23)$$

To powoduje, że:

- 1) „sztuczne” funkcje $T(\tau)$ wolne są od wysokoczęstotliwościowych szumów;
- 2) do nich łatwo zastosować operacje pobrania pochodnych, integrowania, przekształcenia Fouriera itp.;
- 3) charakterystyczne punkty w czasowym rozwoju sztucznego sygnału mogą być analizowane algebraicznie;
- 4) w wyniku wykorzystanie wielomianów o niedużej liczbie współczynników obróbka danych odbywa się szybciej i same dane wymagają mniejszej pamięci komputerowej.



Rys. 10. Metoda rekonstrukcji sygnału termograficznego opracowana przez firmę Thermal Wave Imaging [30]:

- a – wykres zmian temperatury powierzchni we współrzędnych logarytmicznych;
- b – wykres zmian pochodnej temperatury w czasie;
- c – histogram strefy z defektami i bez defektów;
- d – „ślady” histogramu zmian pochodnej temperatury.

W jednym z opatentowanych przez firmę Wave Imaging wariantów metody rekonstrukcji sygnału zaproponowano analizowanie dynamicznych histogramów logarytmów pochodnych temperaturowych w różnych częściach kontrolowanego obiektu. Przejście od funkcji temperaturowej $T(i, j, \tau)$ do histogramu funkcji $d[Ln(T)]/d[Ln(\tau)]$ pozwala zrealizować wyżej wspomniana wyższość sztucznej obróbki sygnału i wykonać wyniki obróbki niezależnie od przypadkowych zmian położenia kamery termowizyjnej i zwrotów stref kontroli po porównaniu ze wzorcem. Na rys. 10 a) pokazano zmiany temperatury powierzchniowej w czasie po nagrzewaniu impulsowym we współrzędnych logarytmicznych; pierwsza pochodna tej funkcji przedstawiona jest na rys. 10 b). Istnienie napełnionych gazem defektów doprowadza do odchylenia wykresu temperatury od linii prostej co podkreśla pochodna. Histogramy logarytmów pochodnych w strefach z defektami i bez defektów dobrze są rozdzielone, przy czym histogram części bez defektów jest centrowany względem wartości -0,5 (rys. 10 c). Jeśli wybrać charakterystyczne wartości histogramu i pokazać ich zależność od $Ln(\tau)$ dla całej sekwencji termogramów w podczerwieni to można otrzymać specyficzne zobrazowanie pokazane na rys. 10 d) dla strefy bez defektów i z defektami i nazywane

„śladami” histogramu logarytmicznych pochodnych. Lewe zobrazowanie na rys. 10 d) może służyć jako wzorzec przy przyjęciu rozwiązania o jakości oddzielnych części wyrobu.

„Sztuczna” obróbka sygnałów pozwoliła otrzymać jakościowe zobrazowania wewnętrznej struktury szeregu kontrolowanych obiektów np.: łopatek turbiny, paneli samolotowych itp.

3.7. Normalizacja dynamicznej termografii

W badaniach termograficznych termin «normalizacja» oznacza dzielenie dynamicznych termogramów w celu stłumienia efektu nierównomiernego nagrzewania. Ten termin pojawił się w pracy [20]. Rozróżniamy typy normalizacji:

- 1) normalizację wszystkich zobrazowań w sekwencji w wybrane zobrazowanie, które nazywa się „normalizującym”;
- 2) trójwymiarową (3D) normalizację, która przewiduje dzielenie dwóch sekwencji, z których jedna jest eksperymentalna a druga - obliczeniowa.

Dla sekwencji zobrazowań w podczerwieni $T(i, j, \tau)$, otrzymanych w impulsowej procedurze badań termograficznych (długotrwałość nagrzewania τ_h). W wielu przypadkach optymalną będzie procedura badań termograficznych, przy której defekty pojawiają się tylko w stadium schładzania, tj. kiedy $\tau_m > \tau_h$. Wówczas wzór normalizacji na jedno zobrazowanie ma następującą postać:

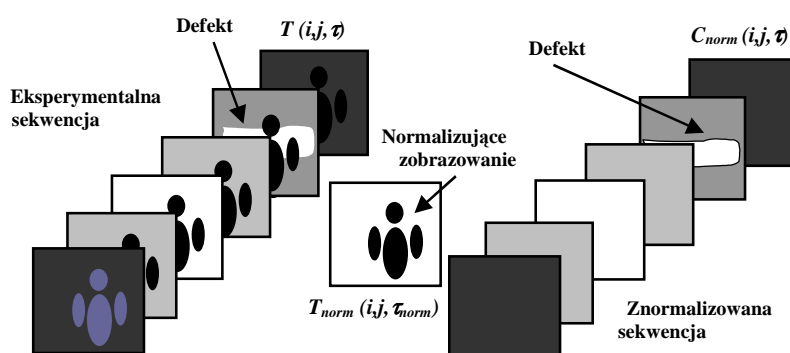
$$C_{norm}(i, j, \tau) = \frac{T(i, j, \tau) - T_{init}(i, j)}{T_{norm}(i, j, \tau_{norm}) - T_{init}(i, j)}, \quad (24)$$

gdzie:

$C_{norm}(i, j, \tau)$ - normalizowany kontrast;

$T_{init}(i, j)$ - początkowa temperatura wyrobu, która w ogólnym przypadku może zmieniać się od punktu do punktu (przy nagrzewaniu równa temperaturze otoczenia T_a);

$T_{norm}(i, j, \tau_{norm})$ - normalizujące zobrazowanie.

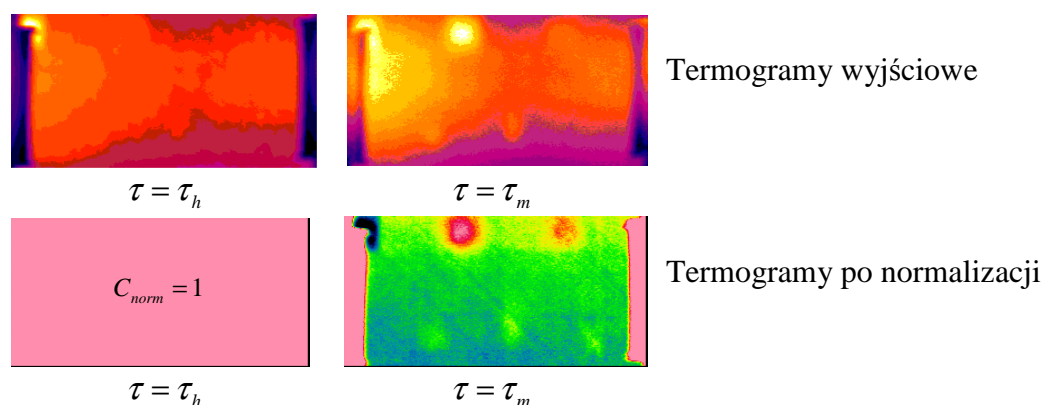


Rys.11. Normalizacja sekwencji na jedno zobrazowanie w dynamicznej termografii

Widać, że normalizowany kontrast faktycznie przedstawia sobą stosunek między dwoma nadmiarami temperatury. Jeśli normalizujące zobrazowanie wybrano w ten sposób, że sygnały powierzchniowe od wewnętrznych defektów jeszcze nie zdążyły się rozwijać, to w idealnym przypadku wszystkie normalizowane zobrazowania powinny prezentować sobą równomierne tło z temperaturowymi odbiciami od defektów w momencie czasu, zbliżonym do τ_m . Na przykład, przy krótko czasowym (impulsowym) nagrzewaniu w charakterze

normalizującego często wybiera się termogram na końcu nagrzewania. Schemat normalizacji na jedno zobrazowanie pokazano na rys.11.

Przykład normalizacji sekwencji termogramów, otrzymanej przy impulsowych badaniach termalnych kompozytu węglowego, przedstawiony jest na rys.12. Na końcu nagrzewania wyjściowy termogram wyraźnie pokazuje nierównomierne nagrzewanie dwoma lampami, z których bardziej mocny strumień wytwarzała lewa lampa (patrz górny lewy termogram na rys.12). Temperaturowe odbicie nierównomiernego nagrzewania zachowuje się do momentu optymalnej kontroli $\tau = \tau_m$. Normalizację przeprowadzono na termogramie z końca nagrzewania ($\tau = \tau_h$). Przy tym normalizowany kontrast przy $\tau = \tau_h$ staje się równym jedności (patrz dolne lewe zobrazowanie), w tym czasie jak normalizowany termogram przy $\tau = \tau_m$ pokazuje defekty bardziej wyraźnie w porównaniu z wyjściowym termogramem.

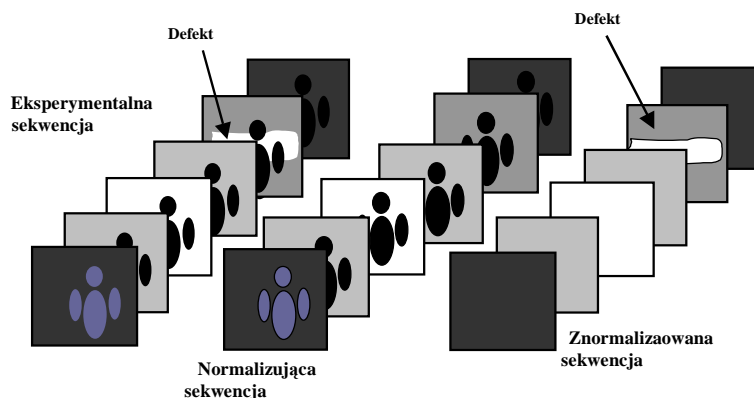


Rys.12. Przykład normalizacji na jedno zobrazowanie termogramów kompozytu węglowego z wewnętrznymi defektami

Na podstawie doświadczeń z zastosowania procedury normalizacji wynika, że daje ona zadawalające wyniki gdy:

- powierzchnia kontrolowanego obiektu jest jednorodna, a niejednorodny jest sam strumień nagrzewania;
- na kontrolowanej powierzchni znajdują się obszary o różnych zdolnościach pochłaniających, wówczas na ich granicach ma miejsce dyfuzja ciepła w „poprzecznym” kierunku, co obniża efektywność standardowej normalizacji.

Istota zaproponowanej przez V.P.Vavilova metody trójwymiarowej normalizacji wynika z tego, że wykorzystuje się nie jedno normalizacyjne zobrazowanie, na przykład przy $\tau = \tau_h$ a sekwencję zobrazowań stanowiących “bezdefektową replikę” zasadniczej eksperymentalnej sekwencji. Normalizującą sekwencję wykonuje się obliczając teoretyczne oczekiwane zmiany temperatury powierzchni obiektu kontroli bez defektów, przy czym w charakterze maski nagrzewania $Q(i, j)$ wykorzystuje się jedno z zobrazowań eksperymentalnej sekwencji, w której ukryte defekty jeszcze się nie pojawiły; na przykład przy impulsowym nagrzewaniu w charakterze maski nagrzewania wybiera się termogram $T(i, j, \tau_h)$. Inaczej mówiąc, przy trójwymiarowej normalizacji wykonuje się dzielenie dwóch sekwencji, z których jedna jest eksperymentalną i zawiera zarówno rozwijające się w czasie sygnały od ukrytych defektów jak i sygnały spowodowane niejednorodnym pochłanianiem i dyfuzją ciepła a druga sekwencja jest obliczeniową i zawiera tylko efekty niejednorodnego nagrzewania i dyfuzji ciepła (rys.13).



Rys.13. Przykład trójwymiarowej normalizacji

3.8. Metoda analizy głównych składowych

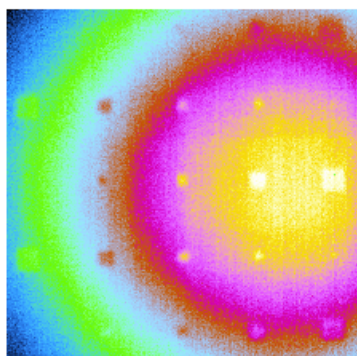
Analiza głównych składowych (*Principal Component Analysis – PCA*) jest przekształceniem zamieniającym dużą ilość informacji zawartej we wzajemnie skorelowanych danych wejściowych w zbiór statystycznie niezależnych składników według ich ważności. Stanowi zatem formę kompresji stratnej, znanej w teorii informacji jako transformata Karhuena-Loevego [15]. Jest stosowana w statystycznych procedurach, które w ostatnich latach są coraz bardziej rozpowszechniane w zagadnieniach rozpoznawania obrazów i kompresji danych, szczególnie przy bardzo dużych objętościowo analizowanych danych [29].

W badaniach termograficznych metoda głównych składowych stosowana jest stosunkowo niedawno. PCA wykorzystuje metodę dekompozycji do wydobycia przestrzennej i czasowej informacji z macierzy danych termograficznych. Trójwymiarową macierz (sekwencję zarejestrowanych termogramów) przekształca się w dwuwymiarową, w której wartości czasu rozmieszczone są w kolumnach, a przestrzenne dane w wierszach. Następnie dwuwymiarową macierz poddaje się dekompozycji i wynikowa macierz może być znów przedstawiona w postaci sekwencji obrazów.

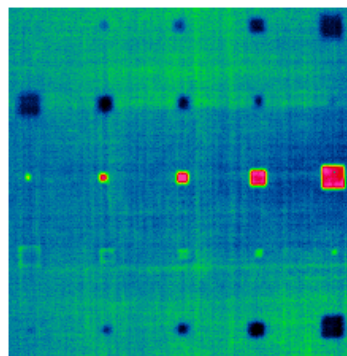
Najczęstszym zastosowaniem opisywanej metody jest redukcja wymiaru danych. Zadanie to polega na opisanie danych o dużym wymiarze (dużej liczbie cech) przy pomocy mniejszej liczby cech, jednocześnie zachowując maksimum informacji. W przypadku PCA informacja ta jest mierzona wariancją. Analiza składowych głównych umożliwia opisanie wielowymiarowych danych przy pomocy małej liczby nieskorelowanych współrzędnych (wyznaczonych przez wektory własne macierzy kowariancji), zachowując rozrzut między danymi. Wymiar nowej przestrzeni będzie zależał od tego, jak dużą część wariancji będziemy chcieli zachować [27].

Metodę PCA wykorzystano m.in. w pracy [29] do oceny porowatości tworzywa węglowego, z którego wykonane są komórkowe panele samolotów. Wstępną obróbkę danych przeprowadzono za pomocą dwuwymiarowego przekształcenia falkowego, które było zastosowane do danych otrzymanych w dziedzinie czasu. Porowatość określano w pośredni sposób drogą obliczenia przewodności temperaturowej w każdym punkcie próbki. Na rys. 14 przedstawiono przykładowe wyniki [7] z badania metodą dynamicznej termografii (*DTT*) wielowarstwowej próbki CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*) z defektami w postaci teflonowych wstawek. W pracy [7] porównano wyniki uzyskane różnymi metodami obróbki danych m.in.: analizą głównych składowych (*PCA*), tomografią cieplną, fazowo impulsowej termografii (*PPT*). Najlepszy wynik uzyskano stosując metodę PCA (dla 2 składowej) poprawiając stosunek sygnał/szum dla najlepszego zobrazowania z sekwencji z wartości 1 do

9,5 umożliwiając wykrycie podpowierzchniowego defektu, który za pomocą innych metod był trudny do wykrycia.



Optymalny obraz z sekwencji (SNR=1)



Obraz po analizie PCA (2-składowa) (SNR=9,5)

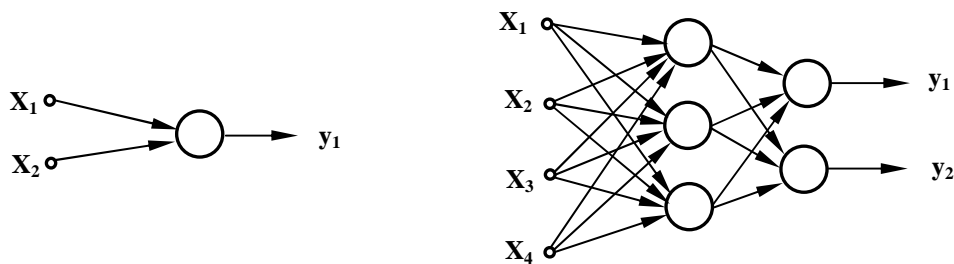
Rys.14. Wyniki z obróbki danych z badań wielowarstwowego kompozytu (CFRP) [7]

3.9. Elementy sztucznej inteligencji w badaniach termograficznych (sieci neuronowe)

Sztuczne sieci neuronowe, zwane w skrócie sieciami neuronowymi, stanowią intensywnie rozwijającą się dziedzinę wiedzy stosowaną w wielu obszarach nauki. Mają właściwości pożądane w wielu zastosowaniach praktycznych: stanowią uniwersalny układ aproksymacyjny odzwierciedlający wielowymiarowe zbiory danych, mają zdolność uczenia się i adaptacji do zmieniających się warunków środowiskowych, zdolność uogólniania nabytej wiedzy, stanowiąc pod tym względem system sztucznej inteligencji. Podstawą działania sieci neuronowych są algorytmy uczące, umożliwiające zaprojektowanie odpowiedniej struktury sieci i dobór parametrów tej struktury, dopasowanych do problemu podlegającemu rozwiązaniu. Najczęściej stosowanymi rodzajami sieci są: jednokierunkowe jednowarstwowe, jednokierunkowe wielowarstwowe (rys.15) oraz rekurencyjne (w których występuje sprzężenie zwrotne między warstwami wyjściową i wejściową) [8].

Sieci neuronowe mogą być z powodzeniem stosowane do analizy obrazów, mogą one wyłonić z analizowanego obrazu jego najważniejsze cechy i zakwalifikować je do odpowiedniej kategorii (klasy). W badaniach termograficznych, gdzie bardzo często mamy do czynienia z wynikami, które są bardzo zaszumione jest szerokie pole do zastosowania sieci neuronowych. Sieć neuronowa może być efektywnym narzędziem w rozpoznawaniu i kwalifikacji defektów dzięki jej zdolności uczenia się w określaniu małych różnic między identyfikowanymi klasami co uzyskuje się w wyniku treningu na odpowiednich próbkach treningowych (wzorcowych), które można otrzymać eksperymentalnie lub teoretycznie (za pomocą symulacji komputerowej).

Przykładami zastosowania sieci neuronowych w badaniach termograficznych są prace prowadzone w NASA (USA) przez zespół D. Prabhu [16, 17]. W pracy [16] poświęconej wykrywaniu rozwarstwień między aluminiowymi listwami połączonymi na zakładkę zastosowano sieć neuronową z 20-oma wejściowymi neuronami i jednym wyjściowym. Aluminiowe panele były nagrzewana lampą kwarcową, a zarejestrowane sekwencje były najpierw uśredniane w celu stłumienia szumów. Następnie dla każdego piksela obrazu obliczono pochodną temperatury w czasie i zastosowano sieć neuronową. Wyniki zastosowania sieci neuronowej były zbieżne z danymi z badań ultradźwiękowych, które przeprowadzono w celu porównania wyników.



a) prosta jednokierunkowa jednowarstwowa

b) jednokierunkowa dwuwarstwowa

Rys. 15. Schematy sieci neuronowych

W pracy [18] opisano neuronową sieć do obróbki danych badań nieniszczących otrzymanych metodą fazowej termografii. Uczenie sieci odbywało się na obliczeniowych danych, a eksperymentalne wartości głębokości defektów określano na drodze analizy 32 fazowych lub amplitudowych zobrażeń. Było wypróbowanych 80 struktur sieci neuronowej. Sieć z dwiema warstwami powodowała istotne błędy dla defektów znajdujących się małych głębokości pod powierzchnią badanego wyrobu na skutek małej zmienności fazy sygnału. Lepsze wyniki były otrzymane siecią z trzema warstwami. Przy eksperymentalnym sprawdzeniu możliwy błąd określenia głębokości położenia defektów tą siecią nie przewyższał 10%.

3.10. Synteza danych

Łączenie badań termograficznych z innymi metodami badań nieniszczących (synteza danych) jest celowe w następujących przypadkach:

- 1) badania termalne spełniają rolę metody skryningowej (przesiewowej) wyprzedzając wyniki próby za pomocą bardziej dokładnych metod badań nieniszczących;
- 2) eksperymentalna aparatura charakteryzuje się wspólnymi elementami;
- 3) synteza wyników kontroli różnymi metodami badań nieniszczących doprowadza nie do ich mechanicznego dodania a do nowej jakości.

Połączenie pierwszego typu jest możliwe, na przykład przy wykryciu zawilgoceń i wody w komórkowych panelach a także udarowych uszkodzeń i rozwarstwień w kompozytach. Za pomoc badań termograficznych lokalizuje się podejrzane strefy, po czym bardziej dokładną kontrolę prowadzi się, na przykład za pomocą ultradźwięków. W analogiczny sposób kontroluje się nitowane połączenia aluminiowych lotniczych paneli, przy czym w charakterze zasadniczej metody badania występuje kontrola prądami wirowymi.

Połączenie drugiego typu ma miejsce, na przykład przy zastosowaniu badań termograficznych i laserowej interferometrii (np. *shearography*). Właściwości badań termograficznych i interferometrii pozwalają opracować aparaturę badań, w której kontrolowany obiekt obciąża się optycznym impulsem i rejestruje się do dwóch kanałów zobrażenia cieplnego i holograficznego.

Łączenie danych trzeciego typu związane jest z nowym podejściem do badań nieniszczących w dziedzinach charakteryzujących się złożonością i różnorodnością obiektów kontroli. Jest zrozumiałe, że wynik syntezy danych (*data fusion*) nie jest zwykłym sumowaniem wyników z różnych metod a tworzy nową jakość. Koncepcja zbieżności (spływu) danych, otrzymanych za pomocą różnych sposobów, dobrze jest znana w technice wojskowej [23]. W badaniach nieniszczących pierwsze prace datowane są w 1994 r. [21], jednak największa liczba publikacji odnosi się do ostatniej dekady [22, 23].

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono główne metody analizy obrazów (termogramów) i danych stosowane w badaniach nieniszczących za pomocą termografii w podczerwieni. Celem pracy było pokazanie jakie możliwości poprawy wykrywania defektów w złożonych strukturach materiałowych daje zastosowanie odpowiedniej metody przetwarzania. Jak wynika z przedstawionych metod niektóre z nich stosunkowo niedawno zaczęły być stosowane do analizy danych z badań termograficznych. Autorzy artykułu sądzą, że dalszy rozwój techniki komputerowej i informatyki przyczyni się do powstania nowych metod, które umożliwią wydobycie informacji o defekcie znacznie poniżej poziomu szumów niż jest to możliwe dotychczas i spowoduje to wzrost zainteresowania termograficznymi badaniami nieniszczącymi oraz ich zastosowanie w nowych aplikacjach.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr 0 T00C 022 27 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

- [1] W. Świdorski, D. Szabra "Examples of processing image methods using in infrared thermograms problems" Materiały z Międzynarodowej Konferencji OSAV'2004 /Saint Petersburg/ str. 121-135
- [2] W. Świdorski, V. Vavilov „Wyznaczanie termofizycznych charakterystyk materiałów metodami termografii w podczerwieni” Biuletyn WAT (przyjęty do druku)
- [3] W. Świdorski, D. Szabra, M. Szudrowicz „IR Thermography Methods for Evaluation of Internal Defects in Light Composite Armours” 16th International THERMO Conference, Budapest, 2009 na CD
- [4] P.Vernotte “Mesure de la conductibilite thermique des isolants. methode de touthau” Chaleur et industrie, 1937, No.208, pp.331-337
- [5] S. Shepard “Advances in pulsed thermography” Proc. SPIE “Thermosense-XXIII”, 2001, Vol. 4360, pp. 511-515
- [6] P. Delpesh , J.-C. Krapez, D. Balageas “Thermal defectometry using the temperature decay rate method” Proc. Eurotherm Seminar No. 42 “Quant. Infrared Thermography QIRT’94”, Sorrento, Italy, August 23-26, 1994,pp. 220-225
- [7] W. Świdorski “The characterization of defects in multi-layered composite materials by thermal tomography methods” Acta Physica Polonica A, Vol.115, Number 4, 2009, pp. 800-804
- [8] S. Osowski “Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym” WN-T, Warszawa, 1996
- [9] A. Rosencwaig, A. Gersho “Thermal-wave imaging” Science, Vol. 218, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science, 1982, pp. 223-228
- [10] X.P.V. Maldague “Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing” John Wiley & Sons, USA, 2001, p. 428
- [11] V.Vavilov, X. Maldague, B. Dufort, A.I. Ivanov “Adaptive thermal tomography algorithm” Proc. SPIE "Thermosense-XV", 1993, Vol. 1933, pp. 166-173
- [12] В. П. Вавилов, С. Маринетти “Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье” Дефектоскопия, 1999, №2, С. 58-72
- [13] F. Galmiche, S. Vallerand, X. Maldague “Wavelet transform applied to pulsed phase thermography” Proc. V-th Workshop on Advances in Infrared Technology and Applications, CNR, Venice, Italy, 1999, pp. 117-122
- [14] F. Galmiche, X. Maldague “Depth defect retrieval using the wavelet pulse phased thermography” Proc. Eurotherm Seminar No. 64 Quant. IR Thermography, Reims, France, 2000, pp. 194-199.

- [15] A. Cichocki, R. Unbehauen „Neural Networks for Optimization and Signal Processing“ J. Wiley, New York, 1993
- [16] D. R. Prabhu, P. A. Howell, H. I. Syed, W. P. Winfree “Application of artificial neural networks to thermal detection of disbonds” Rev. Progress in Quant. NDE, Plenum Press, New York, 1992, Vol.11, pp. 1331-1338
- [17] D. R. Prabhu, W. P. Winfree “Neural network based processing of thermal NDE data for corrosion detection” Rev. Progress in Quant. NDE, Plenum Press, New York, 1993, Vol. 12, pp. 1260-1265
- [18] X. Maldague X. et al. “A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments” Rev. Generale de Termique, Sept. 1998, Vol. 37, No. 2, pp. 708-716
- [19] L. Wojnar, M. Majorek „Komputerowa analiza obrazu” Computer Scanning Systems Ltd., Warszawa, 1994
- [20] A. Bendada, D. Maillat, A. Degiovanni “Nondestructive transient thermal evaluation of laminated composites: discrimination between delaminations, thickness variations and multidelaminations” Proc. Eurotherm Seminar 27 “Quant. InfraRed Thermography QIRT’92”, 1992, France, pp. 218-223.
- [21] X. E. Gros, P. Strachan, D. W. Lowden, I. Edwards “NDT data fusion” Proc. 6th European Conf. NDT, 1994, Vol. 1, pp. 355-364
- [22] L. K. Shark, B. J. Matuszewski, J. P. Smith, M. R. Varley “Automatic feature-based fusion of ultrasonic, radiographic and shearographic images for aerospace NDT” Insight, Sept. 2001. Vol. 43, No. 9, pp. 607-615
- [23] W. Świdorski, K. Dragan „Multimode NDE approach for structure health assessment of composite elements in aerospace applications” Acta Physica Polonica A (w druku)
- [24] X. P. Maldague and S. Marinetti 1996, “Pulse Phase Infrared Thermography,” *J. Appl. Phys.*, 79(5), 1996, pp. 2694-2698
- [25] K. R. Castleman “*Digital Image Processing*”, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1996, New York
- [26] J. W. Cooley and J. W. Tukey “An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series” Mathematics of Computation, 1965, 19(90), pp. 297-301
- [27] W. Świdorski “Możliwości wykrywania metodami termografii w podczerwieni bardzo cienkich wad w materiałach kompozytowych stosowanych w lekkich osłonach balistycznych” Inżynieria Materiałowa (w druku)
- [28] A. Ciliberto, G. Cavaccini, O. Salvetti et al. “Porosity detection in composite aeronautical structures” Infrared Physics & Technology, 2002, Vol. 43, pp. 139-143
- [29] S. Hermosilla-Lara, P.-I. Joubert, D. Placko et al. “Enhancement of open-cracks detection using a principal component analysis/wavelet technique in photothermal nondestructive testing” Intern. Conf. Quant. Infrared Thermography QIRT’02, Dubrovnik, Croatia, 2002, pp. 12-13.
- [30] S. Shepard, J. Lhota, Y. Hou, T. Ahmed “Gold standard comparison of thermographic sequence data” Insight, April 2004, Vol. 46, No. 4, pp. 210-213
- [31] J. T. Białoszewski “Falki i aproksymacje”, WNT, Warszawa, 2000
- [32] S. Brol, W. Grzesik “Zastosowanie ciągłej transformaty Falkowej do oceny profili chropowatości powierzchni po obróbce zahartowanej stali AISI52100” Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol. 26, nr 2, 2006, str. 103-113
- [33] F. Galmiche, X. Maldague “Depth defect retrieval using the wavelet pulse phased thermography” Proc. Eurotherm Seminar No. 64 “Quant. IR Thermography”, Reims, France, 2000, pp. 194-199

