

## STATYSTYCZNA OCENA DANYCH W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH METODAMI TERMOGRAFII W PODCZERWIENI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono statystyczne kryteria zwiększające efektywność wykrywania defektów w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych z zastosowaniem metod termografii w podczerwieni, tworzenia map defektów i rozpoznawania obrazów. Przeanalizowano również wpływ szumów i zakłóceń na wyniki tych badań. Przedstawiono szereg przykładowych wyników badań eksperymentalnych ilustrujących analizowane zagadnienia.

### 1. Wstęp

Metody i techniki badań nieniszczących służą do wykrywania nieciągłości materiałowych (defektów), oceny właściwości materiałów i pomiarów wymiarów obiektów, bez powodowania zmian ich właściwości użytkowych [1]. Obiektami technicznymi badań nieniszczących są m.in. obiekty wykonane z materiałów kompozytowych.

Każda metoda badań nieniszczących zawiera fazę wykrycia defektu i fazę oceny jego parametrów (defektometrię). Faza wykrycia defektu jest wówczas zakończona, kiedy obiekt kontrolowany przez operatora sprzętu diagnostycznego lub automatyczne urządzenie kontrolne albo uzna, że kontrolowany obiekt jest bez wad (tzn. zgodnie z wymaganiami jakości), albo zostanie podjęta decyzja, że kontrolowany obiekt zawiera wady. Na tym stadium obróbki wyników badań nieniszczących parametrów wad nie ocenia się, a proces podjęcia decyzji ma charakter statystyczny. W stadium defektometrii, stosując metody matematyczne rozwiązania zagadnienia odwrotnego, ocenia się parametry defektów i stopień ich ważności (zagrożenia) z punktu widzenia niezawodnego funkcjonowania kontrolowanego obiektu. W badaniach cieplnych obróbka danych zgodnie z przedstawionymi powyżej fazami nie jest jeszcze opracowana wystarczająco, szczególnie dla prognozowania czasu użytkowania wyrobu. W większości przypadków stopień zagrożenia wykrytych wad ocenia się na bazie istniejących norm i standardów.

W badaniach cieplnych wnioski o jakości wyrobów wyciąga się na podstawie:

- amplitudy wykrytych anomalii temperaturowych,
- właściwości ich rozwoju w funkcji czasu,
- morfologii pola temperatury na powierzchni badanego obiektu.

Do wykrycia ukrytych defektów na podstawie ich temperaturowych „śladów” na powierzchni badanego obiektu konieczne jest żeby:

- termo-fizyczne charakterystyki defektów różniły się od termo-fizycznych charakterystyk podstawowego materiału obiektu badań (lub na powierzchni styku materiałów, w tym jednakowego typu, miałyby miejsce specyficzny warunek graniczny np. pojawił się kontaktowy opór),
- wady powinny tworzyć maksymalne zaburzenia dla tych strumieni ciepła, które powodują powstanie anomalii temperaturowych.

Z ostatniego warunku wynika, że badania cieplne są efektywne przy wykrywaniu wypełnionych gazem wadach o dużej powierzchni, których zasadnicza powierzchnia jest położona prostopadłe do strumieni cieplnych generowanych przez źródło ciepła. Takimi wadami w materiałach kompozytowych są:

- rozwarstwienia między warstwami kompozytu i nieciągłości zasadniczego materiału,
- płaskie pęknięcia,
- wtrącenia obcego materiału,
- miejscowe zmiany charakterystyk termofizycznych materiału,
- strefy anomalii spowodowane zawilgoceniem (podwyższeniem wilgotności),
- lokalne ubytki materiału (np. korozja),
- miejsca kontaktu dwóch materiałów o podwyższonym oporze cieplnym (np. wady tzw. kissing „całujące się”).

## 2. Statystyczne wskaźniki podjęcia decyzji

Schemat badań nieniszczących można rozpatrywać zgodnie z rys.1. Wejściową informację dostarcza kontrolowany obiekt, którego stan (jakość) powinien ocenić operator lub automatyczne urządzenie (system) stosując odpowiednią metodę badań nieniszczących. Wyjściową informacją są cztery możliwe wyniki diagnostyki lub dwie pary wyników informujące czy obiekt zawiera lub nie zawiera ukrytych wad. Wniosek może być prawdziwy-pozytywny PP (prawda: <<wada jest>>, wniosek: <<wada jest>>), fałszywy-przeczący FPr (prawda: <<wada jest>>, wniosek: <<wady nie ma>>), prawdziwy-przeczący PPr (prawda: <<wady nie ma>>, wniosek: <<wady nie ma>>) i fałszywy-pozytywny FP (prawda: <<wady nie ma>>, wniosek: <<wada jest>>). Zgodnie z rachunkiem prawdopodobieństwa odpowiednie pary wniosków dają w sumie 100%:  $PP + FPr = 100\%$  i  $PPr + FP = 100\%$ . Wniosek prawdziwy-pozytywny charakteryzuje się prawdopodobieństwem poprawnego wykrycia wady (correct detection)  $P_{c.d.}$ , a fałszywy pozytywny prawdopodobieństwem fałszywego alarmu (false alarm)  $P_{f.a.}$ . Należy zauważyć, że  $P_{c.d.} + P_{f.a.} \neq 100\%$ . W badaniach nieniszczących, jak będzie to pokazane poniżej, najczęściej stosuje się strategię podjęcia decyzji Neymana-Pearsona zgodnie z którą ustala się wartość  $P_{f.a.}$  i ocenia  $P_{c.d.}$ .

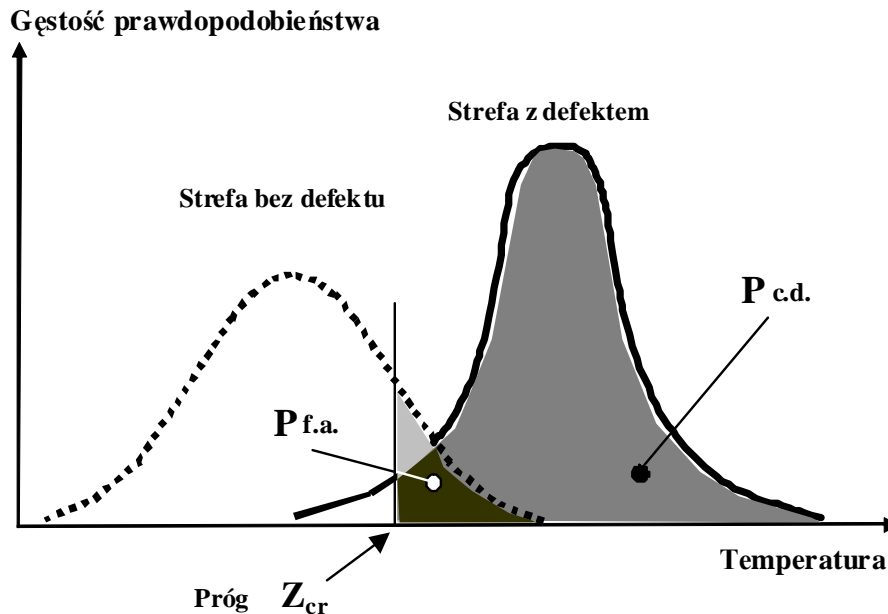
Najprostszy przypadek podjęcia decyzji w jednowymiarowej przestrzeni informacyjnych cech przedstawiono na rys.2. Decyzję podejmuje operator lub automatyczne urządzenie na poziomie pikseli obrazu termowizyjnego (termogram) z wykorzystaniem temperatury jako parametru informacyjnego. Każda strefa na powierzchni kontrolowanego obiektu charakteryzuje się specyficznym punktowym rozkładem amplitudy. Może więc być sklasyfikowana jako „bez defektów” lub „z defektem”. W wyniku tej klasyfikacji powstaje binarna mapa defektów.

W statystyce podjęcie decyzji sprowadza się do sprawdzenia zerowej ( $H_0$ ) i alternatywnej ( $H_A$ ) hipotezy:

$$H_0 : \overline{T}_d = \overline{T}_{nd} \quad \text{i} \quad H_A : \overline{T}_d \neq \overline{T}_{nd} \quad (1)$$

gdzie:  $\overline{T}_d$ ,  $\overline{T}_{nd}$  - odpowiednio średnie temperatury strefy z defektem i bez defektu.





Rys.2. Statystyka podjęcia decyzji

Określoną w ten sposób wartość  $\hat{z}$  porównuje się z krytyczną wartością  $z_{cr}$ , którą oblicza się z równania:

$$\alpha = P_{f.a.} = 1 - F(z_{cr}) \quad (4)$$

gdzie  $F(z_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{cr}} e^{-x^2/2} dx$  jest funkcją rozkładu, a  $\alpha$  prawdopodobieństwem tego, że wartość standardowej normalnej zmiennej  $z$  przyjmuje wartość większą od  $z_{cr}$  ( $\alpha$  jest prawdopodobieństwem fałszywego alarmu  $P_{f.a.}$ ).

Dwie porównywane strefy uważa się za statystycznie różne, jeśli  $\hat{z} \geq z_{cr}$ . Należy zauważyć, że opisane podejście jest nie zawsze słuszne przy analizie wartości pikseli. Zbyt duża liczba pikseli w zobrazowaniu praktycznie zawsze potwierdza statystyczną różnicę między strefami. Dlatego kryterium  $Z$  rekomendowane jest do porównaniu różnych technik badań nieniszczących lub algorytmów obróbki danych: najbardziej efektywną technikę (algorytm) zapewnia największa wartość  $\hat{z}$ .

Dla porównania rozkładów, niepodporządkowanych rozkładowi normalnemu, używa się innych statystycznych parametrów np. kryterium  $D$  - Kołmogorowa-Smirnowa (Колмогорова-Смирнова) (tab. 1).

W charakterze informacyjnych parametrów można używać nadmiar temperatury powierzchni, absolutny spadek temperatury  $\Delta T$  w stosunku do umownego-bez defektów punktu lub bieżący kontrast  $C^{nm}$ . Niepokryte metalowe powierzchnie zobrazowane w podczerwieni często tworzą fałszywe defekty spowodowane obecnością rdzy, brudu, zadrapań itp. W tym przypadku statystyczny rozkład informacyjnych parametrów w strefach z defektami i bez defektów może być podobny. Istotna zbieżność tych rozkładów może

oznaczać praktycznie niemożliwość wykrycia ukrytych defektów. Drugim skrajnym przypadkiem jest pełne rozdzielenie statystycznych rozkładów strefach z defektem i bez defektu, ma to miejsce w przypadku występowania bardzo dużych defektów. W innych przypadkach należy podjąć decyzję zgodnie z wybranym progiem co prowadzi do kombinacji wartości  $P_{c.d.}$  i  $P_{f.a.}$ , które przyjmują wartości od 0 do 1.

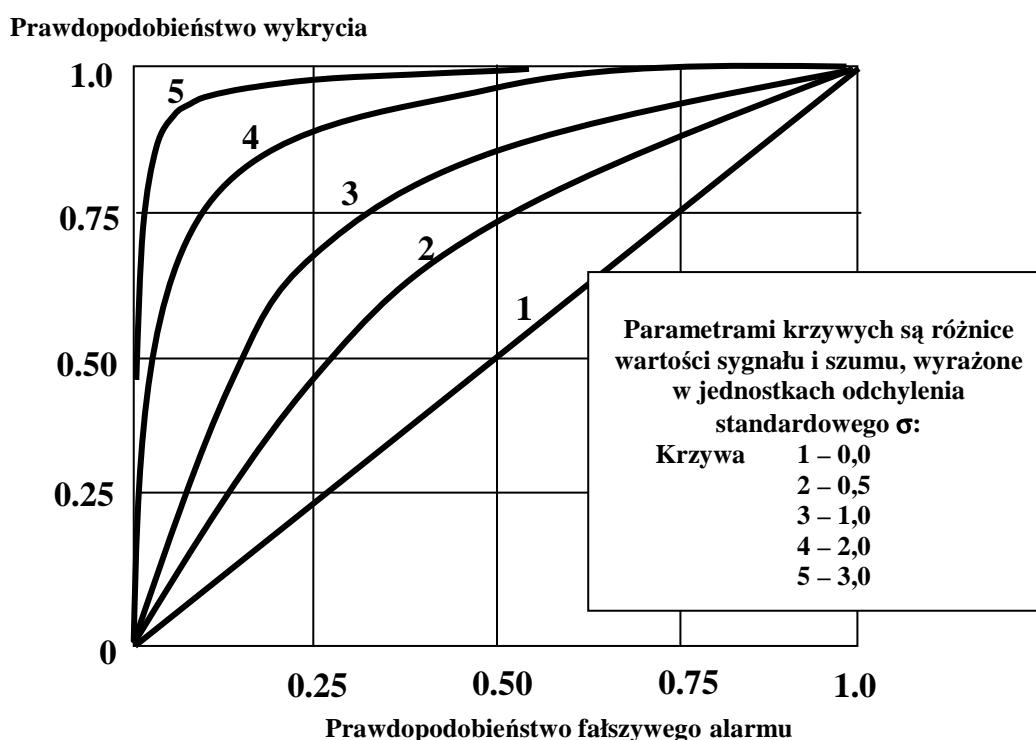
**Tabela 1**

**Statystyczne kryteria porównania dwóch rozkładów**

Kryterium	Wzór	Uwaga
Stosunek sygnał/szum	$S = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}}$	Wartości $S > 1$ oznaczają obecność statystycznych różnic między dwoma rozkładami. Kryterium stosuje się do rozkładów normalnych.
Kryterium Z	$\hat{z} = \frac{ \bar{T}_d - \bar{T}_{nd} }{\sqrt{\frac{\sigma_d^2}{n_d} + \frac{\sigma_{nd}^2}{n_{nd}}}}$	Kryterium stosuje się do rozkładów normalnych.
Kryterium D	$\hat{D} = \max \left  \left( \frac{F_d}{n_d} - \frac{F_{nd}}{n_{nd}} \right) \right $ gdzie $F_d$ i $F_{nd}$ są to doświadczone skumulowane częstotliwości	Maksymalną wartość kryterium D porównuje się do krytycznej wartości $D_{cr}$ , którą $n_d + n_{nd} > 35$ określa się z równania [2]: $D_{cr} = K_\alpha \sqrt{\frac{n_d + n_{nd}}{n_d \cdot n_{nd}}}$ gdzie $K_\alpha$ - stała zależna od poziomu wartości $\alpha$ (tabela [2]); np. $K_\alpha = 0,136$ jeśli $\alpha = 0,05$ . Kryterium D stosuje się do każdego rozkładu
Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu $P_{f.a.}$	Wartość $P_{f.a.}$ liczbowo określa się jako pole pod krzywą rozkładu „bez defektów” z prawej strony od wybranego progu $z_{cr}$ (rys.2).	Decyzję o statystycznej różnicy dwóch obszarów przyjmuje się z poziomem wartości $\alpha$ równym $P_{f.a.}$
Prawdopodobieństwo prawidłowego wykrycia $P_{c.d.}$	Wartość $P_{c.d.}$ liczbowo określa się jako pole pod krzywą rozkładu „z defektami” z prawej strony od wybranego progu $z_{cr}$ (rys.2).	Ryzyko należy przyjąć jako fałszywą zerową hipotezę równą $\beta = 1 - P_{c.d.}$

Związek między  $P_{c.d.}$  i  $P_{f.a.}$  można przedstawić w postaci roboczej charakterystyki detektora parametrem którego jest stopień przesunięcia rozkładów „z defektami” i „bez defektów”, wyrażony w jednostkach odchylenia standardowego. Przykład roboczych charakterystyk pokazany jest na rys.3.

Przy praktycznym porównaniu metod badań nieniszczących często wykorzystuje się zależność  $P_{c.d.}$  od wymiarów defektu (probability of detection – POD), uśrednioną przez kilku operatorów co powoduje zminimalizowanie wpływu czynnika ludzkiego na wynik. Przykład takiego podejścia przedstawiony jest na rys.4 zależności prawdopodobieństwa prawidłowego wykrycia w zależności od wielkości defektu wykonano stosując metodę ultradźwiękową, termografię w podczerwieni i metodę holograficzną badając oderwanie warstwy plastra komórek wykonanych ze stopu tytanu od poszycia grubości 0,15 mm wykonanego z tego samego materiału [3]. Statystyczne dane otrzymano z 12 wzorców. Każdy z nich miał 12 ukrytych defektów. Dane były uśrednione jako wynik wykrywania defektów przez dwóch operatorów. Widać, że metoda ultradźwiękowa jest najlepsza dla oceny małych defektów (o wymiarze  $< 1,5$  mm), jednak termografia w podczerwieni okazała się skuteczniejsza dla defektów o większych wymiarach. Wyniki uzyskane metodą holograficzną okazały się najgorsze dla wszystkich typów defektów.



**Rys.3. Robocze charakterystyki detektora**

Do analizy termogramów W.A. Baranow (B.A.Баранов) zaproponował proste kryterium defektoskopii, znane z teorii rozpoznawania obrazów jako kryterium Tanimoto [4]:

$$B = \frac{N_{r.d.} - N_{m.d.}}{N_{r.d.} - N_{f.d.}} \quad (5)$$

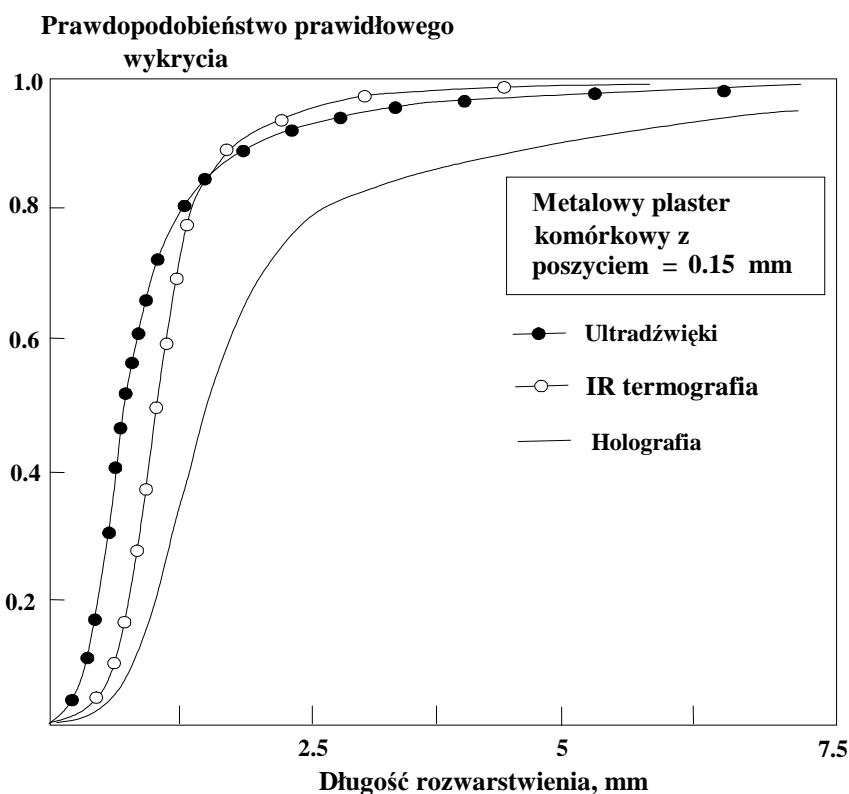
gdzie  $N_{r.d.}$ ,  $N_{m.d.}$ ,  $N_{f.d.}$  - ilość prawdziwych, przypuszczalnych i fałszywych defektów wybranych przez operatora na zobrazowaniu. Ocena wiarygodności badania nieniszczącego według kryterium Tanimoto zależy zarówno od pominiętych jak i fałszywych defektów. Wartość  $B=100\%$  jest tylko możliwa jeśli  $P_{c.d.}=100\%$  i  $P_{f.a.}=0$ . To kryterium należy

stosować przy porównaniu różnych metod badań nieniszczących i procedur obróbki danych w odniesieniu do wzorców standardowych.

Wykorzystanie kryterium Tanimoto opisano w pracy [5] na przykładzie obróbki wyników uzyskanych z badania tworzywa węglowego jednostronną metodą termografii w podczerwieni. Próbka z tworzywa węglowego zawierała 9 defektów teflonowych o wymiarach 3x3; 6x6 i 12x12 mm, które położone były na różnych głębokościach pod powierzchnią próbki (0,25; 1,25 i 2,5 mm). Uśrednione wyniki uzyskane od 11 operatorów przedstawione są w tabeli 2.

Przedstawiono następujące wnioski:

- ilość oznaczeń fałszywych defektów była nieduża (przyczyną mogło być regularne rozmieszczenie defektów);
- różnorodne formy graficznego przedstawienia danych (kolorowe, czarno-białe i ich kserokopie) nie miały istotnego wpływu na wiarygodność wykrycia defektu;
- najwyższe wartości  $B$  uzyskano przy analizie czasogramu i jego pochodnej.



Rys.4. Krzywe prawdopodobieństwa prawidłowego wykrycia defektów trzema metodami badań nieniszczących [3]

### 3. Mapa defektów

Mapa defektów jest binarnym zobrazowaniem w którym pikselom w strefie uszkodzenia przypisuje się wartość „1”, a pikselom w strefie bez defektów wartość „0”. Mapa defektów zbudowana dla konkretnego obszaru na powierzchni badanego obiektu

charakteryzuje się statystycznymi wskaźnikami  $P_{f.a.}$  i  $P_{c.d.}$ , które pojawiają się po wprowadzeniu progu binaryzacji (progu podjęcia decyzji). W badaniach nieniszczących najczęściej wykorzystuje się kryterium Neymana-Pearsona, zgodnie z którym ustala się wartość  $P_{f.a.}$ , co jest równoważne przyjęciu progu podjęcia decyzji  $z_{cr}$ , po czym określa się  $P_{c.d.}$ . Najprostszy algorytm zbudowania mapy defektów można przedstawić następującym warunkiem:

$$T(i, j) = 1 \text{ jeśli } T(i, j) \geq T_{thr} \text{ inaczzej } T(i, j) = 0 \quad (6)$$

gdzie  $T(i, j)$  - wykorzystywany parametr informacyjny;  $T_{thr}$  - próg podjęcia decyzji.

**Tabela 2**

**Wyniki wykrywania defektów metodą termografii w podczerwieni w tworzywie węglowych z zastosowaniem kryterium Tanimoto [5]**

Opis zobrazowania	$B$ , %	$\sigma_B$ , %
Wyjściowy termogram	8,9	3,41
Wyjściowy termogram po wyrównaniu histogramu (kolorowy)	52,2	1,6
Wyjściowy termogram po wyrównaniu histogramu (czarno-biały)	57,8	1,4
Wyjściowy termogram po wyrównaniu histogramu (kserokopia)	44,4	0
Po normalizacji na maksimum nagrzewania	63,3	3,2
Czasogram	65,6	1,1

Zbudowana w ten sposób mapa defektów, zgodnie ze strategią Neymana-Pearsona, charakteryzuje się ustalonymi wartościami  $P_{f.a.}$  i  $P_{c.d.}$ .

Przykłady map defektów, otrzymane w wyniku obróbki danych badań nieniszczących wzorca wykonanego z tworzywa węglowego (tabela 2) pokazano na rys.5.

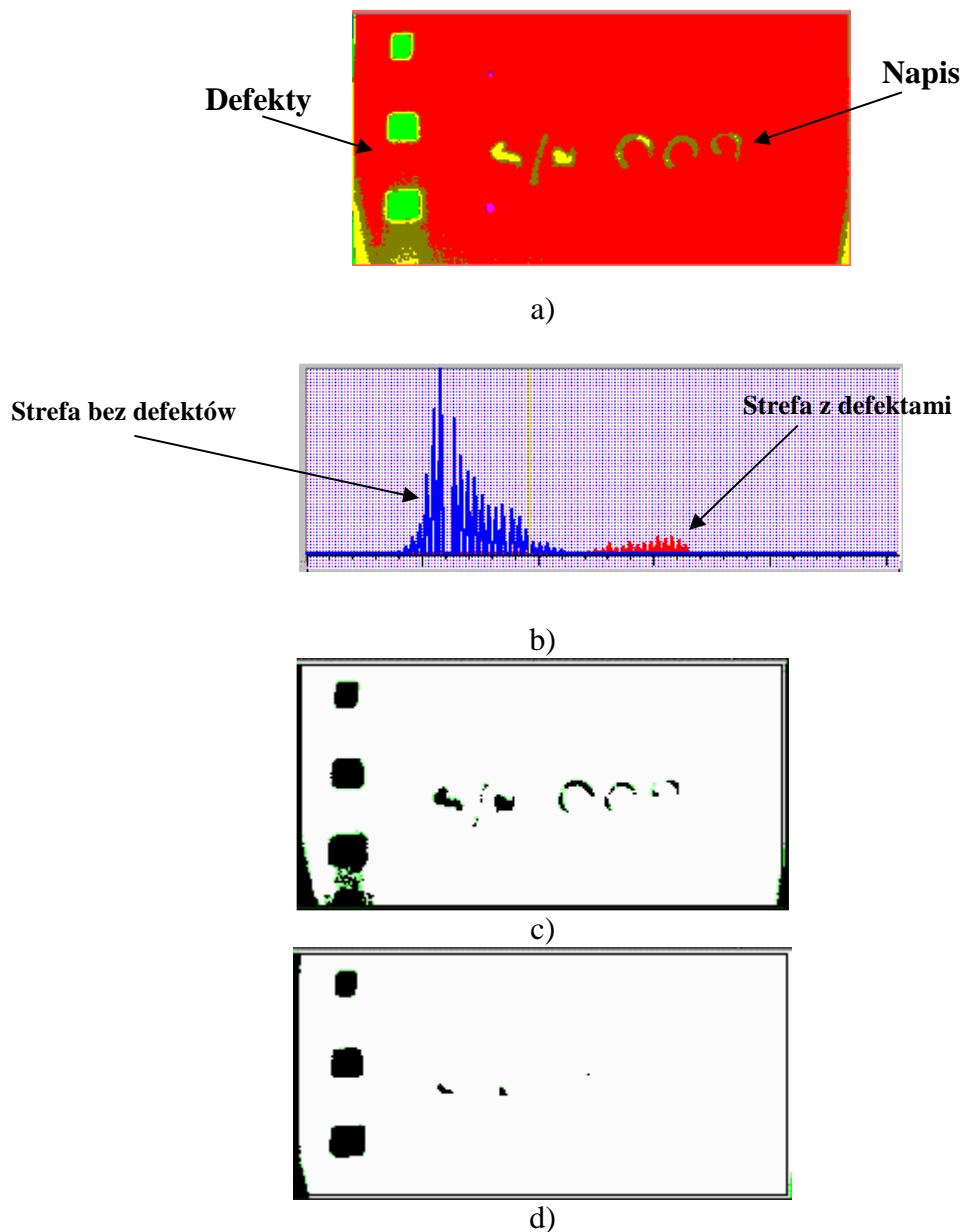
Na wyjściowym termogramie można wyróżnić 3 defekty o kwadratowym kształcie, a także napis wykonany białą farbą na powierzchni wzorca (rys. 5 a). Porównanie a priori widocznych stref z defektami i tła wykazało, że stosunek sygnał/szum dla wszystkich trzech defektów jest jednakowy i wynosi  $S = 5,5$  (rys. 5 c). Umieszczając między dwoma rozkładami próg podjęcia decyzji można określić prawdopodobieństwa  $P_{f.a.}$  i  $P_{c.d.}$ . Obniżenie progu fałszywych alarmów osiągnięte poprzez przesunięcie progu w prawo (rys. 5 b) pozwala usunąć temperaturowy ślad napisu, ale równocześnie zmniejsza wymiary uszkodzonych stref (porównanie map defektów na rys. 5 c i 5 d).

#### 4. Rozpoznawanie obrazów w badaniach cieplnych

W najprostszym przypadku decyzję o jakości obiektu przyjmuje się na podstawie jednego parametru informacyjnego np. temperatury. W charakterze przykładu rozpatrzone będzie wykrycie miejsc korozji w stalowej próbce (rys. 6 a). W przypadku kiedy histogramy temperatury w strefie z defektem i bez defektu częściowo pokrywają się co obniża pewność podjęcia decyzji, w celu poprawy można wprowadzić drugi parametr informacyjny np. czas optymalnej obserwacji  $\tau_m(\Delta T_m)$ . Oczywiście, że w ogólnym przypadku strefa z defektami i bez defektów mogą pokrywać się względem jednego parametru, ale będą istotnie rozdzielone względem innego parametru. Np. defekty położone głębiej charakteryzują się małymi



sygnałami  $\Delta T_m$  i długimi czasami  $\tau_m$ , kiedy dla powierzchniowych anomalii współzależność tych dwóch parametrów jest przypadkowa. Na rys. 6 b) przedstawione jest graficznie, podjęcie decyzji na podstawie dwóch cech. W tym przypadku granica podziału stref wyznacza krzywa na powierzchni parametry która określa się na podstawie obserwacji wychodząc od wymaganych wskaźników  $P_{f.a.}$  i  $P_{c.d.}$ . Jako jeszcze jeden informacyjny parametr może służyć charakterystyczny geometryczny wymiar analizowanej temperaturowej anomalii  $h$  (rys.6 a), co na przykład pozwala poprawić automatyczne oddzielenie sygnałów spowodowane zewnętrznymi zadrapaniami i wewnętrznymi defektami o dużych powierzchniach.



**Rys.5. Wyniki statystycznej obróbki wzorca z tworzywa węglowego**  
a) termogram wyjściowy  
b) rozkład amplitud pikseli  
c) mapa defektów ( $P_{f.a.}=10\%$ ,  $P_{c.d.}=100\%$ ,  $S=5,5$ )  
d) mapa defektów ( $P_{f.a.}=5\%$ ,  $P_{c.d.}=100\%$ ,  $S=5,5$ )

W ogólnym przypadku każda strefa na powierzchni wyrobu (zarówno z defektami, jak i bez defektów) może charakteryzować się w procesie badań nieniszczących  $N$  parametrami: decyzja o stopniu różnicy odpowiednich statystycznych podziałów będzie podejmowana w  $N$ -wymiarowej przestrzeni informacyjnych wskaźników. W ten sposób optymalne wykrycie defektów przedstawia sobą standardowe zadanie rozpoznawania obrazów w wielowymiarowej przestrzeni wskaźników, które sprowadza się do określenia parametrów hiperpłaszczyzny rozdzielającej strefy z defektami i bez defektów.

Ważnym warunkiem podwyższenia efektywności podjęcia decyzji za pomocą wprowadzenia dodatkowych parametrów informacyjnych jest słaba ich korelacja między sobą. Na przykład strefy z defektem i bez defektu na rys. 6 b) mają podobny rozkład pikselowych amplitud ale bardzo różnią się wg parametru  $\tau_m$ .

Ukryte defekty można wykryć heurystycznie lub przy pomocy automatycznego urządzenia. W pierwszym przypadku decyzję podejmuje operator na podstawie algorytmów, które do końca nie są poznane. Związek techniki otrzymywania termogramów w podczerwieni i właściwości ich wzrokowego rozpoznawania szczegółowo przeanalizował D. Lloyd [6]. W praktyce automatyczne rozpoznawanie najczęściej sprowadza się do prostego progowego urządzenia; również opracowano złożone komputerowe algorytmy rozpoznawania obrazów. W ostatnich latach w badaniach nieniszczących do rozpoznawania obrazów wykorzystywane są sieci neuronowe.

## 5. Szumy w badaniach cieplnych

Zadawalające wyniki badań laboratoryjnych uzyskiwane na standardowych wzorcach nie zawsze udaje się zrealizować przy badaniu rzeczywistych wyrobów. Szumy i zakłócenia pojawiają się zarówno w samym obiekcie kontroli jak i w otaczającym środowisku i w samej rejestrującej aparaturze. Szumy mogą nakładać się na prawdziwy temperaturowy sygnał  $T$  (addytywny szum  $\tilde{A}$ ) lub mnożyć się z nim (multiplikatywny szum  $\tilde{M}$ ):

$$u(x, y, \tau) = \tilde{M} T(x, y, \tau) + \tilde{A} \quad (7)$$

Oczywiście, że rejestrujemy sygnał  $u \equiv T$  tylko jeśli  $\tilde{M} \equiv 1$  i  $\tilde{A} \equiv 0$ .

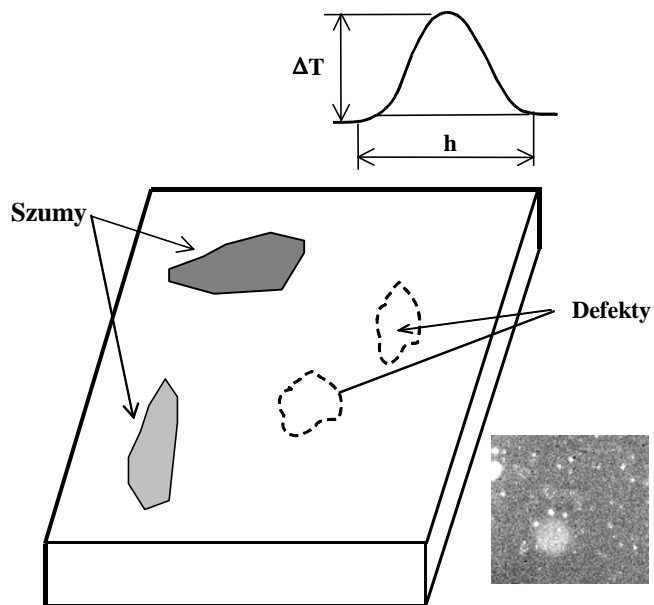
Najlepszą procedurą badawczą jest taka procedura, w której czułość metody ogranicza tylko promieniowanie detektora, tj.  $\tilde{M} \equiv 1$  i  $\tilde{A} \rightarrow \min$ . Graniczną wielkością rejestrowanego sygnału jest temperaturowa rozdzielczość kamery termowizyjnej  $\Delta T_{res}$ , wynosząca w nowoczesnym sprzęcie  $0,01^\circ\text{C}$ . Dalszą poprawę rozdzielczości temperaturowej można osiągnąć na drodze zastosowania metody akumulacji. Tym nie mniej w naturalnych warunkach konwekcja powietrza i obce źródła promieniowania tworzą szum, który w przybliżeniu jest na poziomie  $0,1^\circ\text{C}$ , można to uznać za granicę czułości badań termograficznych w warunkach rzeczywistych.

Każdy rodzaj szumu można wyrazić w jednostkach temperatury. Wyróżniając szum strukturalny ( $\sqrt{\Delta \bar{T}_{str}^2}$ ), aparaturowy ( $\sqrt{\Delta \bar{T}_{app}^2} = \Delta T_{res}$ ) i zewnętrzny ( $\sqrt{\Delta \bar{T}_{ext}^2}$ ). Stosunek sygnał/szum można przedstawić jako:

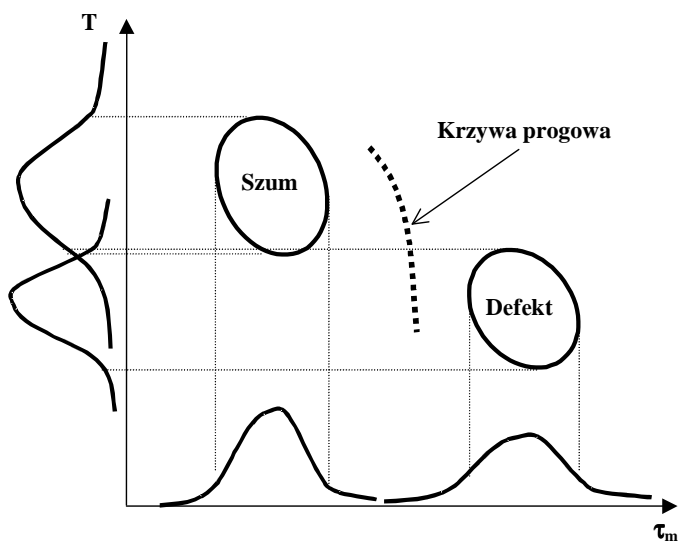
$$S = \frac{\Delta T(\tau)}{\sqrt{(\Delta \bar{T}_{res})^2 + (\Delta \bar{T}_{str})^2 + (\Delta \bar{T}_{ext})^2}} \quad (8)$$

Przy wykorzystaniu czasowych parametrów ekwiwalentny szum można ocenić zgodnie z wyrażeniem:

$$\Delta T = \frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} \Delta \tau \quad (9)$$



a)



b)

**Rys.6. Rozpoznawanie obrazów w badaniach termograficznych**  
**a) wykrycie ukrytej korozji**  
**b) przestrzeń dwuwymiarowa informacyjnych wskaźników**

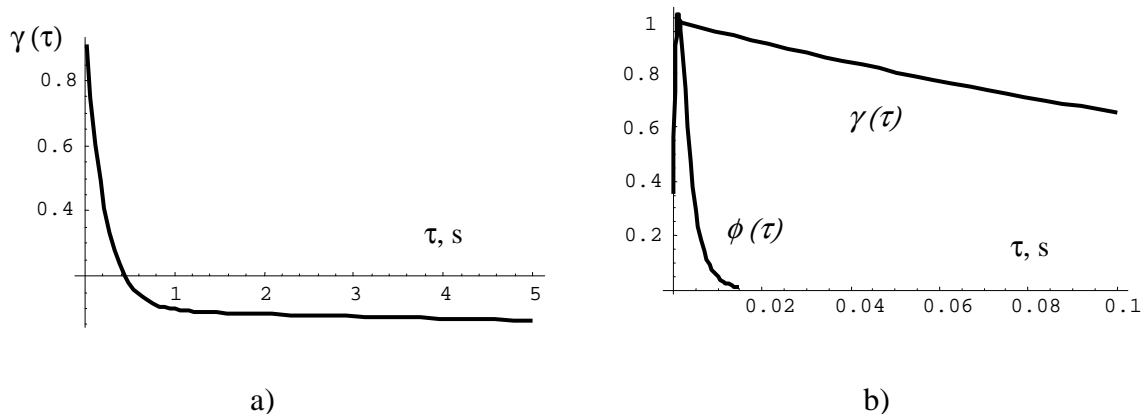
Szum od otaczającego środowiska powstaje ze strumieni promieniowania ciepłego od otaczających przedmiotów, albo jest odbity od badanego obiektu, albo bezpośrednio trafia w obiektyw kamery termowizyjnej. Źródłami tego szumu są urządzenia nagrzewające, słońce, lampy elektrycznego oświetlenia itp. Jego wpływ jest osłabiany poprzez zastosowanie ekranów, filtrów, blend itp. Trudniej eliminuje się promieniowanie odbite od kontrolowanego obiektu. W aktywnych badaniach termograficznych podstawowym źródłem zewnętrznego szumu jest źródło nagrzewające badany obiekt. Np. przy optycznym nagrzewaniu metali szczytkowe promieniowanie lamp może poważnie zniekształcić wygląd termogramu i doprowadzić do nieprawidłowej oceny parametrów defektu, jeśli wykorzystuje się czysto temperaturowe modele cieplnej defektometrii. Jeśli współczynnik emisji wyrobu ma małą wartość, a pokrycia na „czarno” nie można zastosować, należy ocenić udział odbitego promieniowania i wprowadzić korygującą funkcję zmiany temperatury w czasie przed zastosowaniem algorytmów identyfikacji.

Na rys. 7 pokazana jest charakterystyka promieniowania impulsowej lampy firmy Bowens o energii 2,4 kJ. Charakterystyka  $\gamma(\tau)$  na rys. 7 a) zarejestrowana za pomocą długofalowej kamery termowizyjnej ThermoCam SC 3000 pokazuje, że znaczna część energii dostarczana jest do obiektu badań w ciągu pierwszej sekundy, przy czym pełna moc promieniowania  $\phi(\tau)$ , głównie w widocznej części widma, występuje w czasie do 10 ms (rys. 7 b). Szczytkowe promieniowanie spowodowane nagrzanym szkłem lampy i jego odbicie od elementu badanej próbki może istotnie zniekształcić wyniki identyfikacji temperaturowych parametrów defektu. Dla funkcji nagrzewania można zastosować następującą aproksymację:

$$\gamma(\tau) = 0,8933 \cdot e^{-4,761\tau} + 0,09082 \cdot e^{-0,08477\tau} \quad (10)$$

$$\phi(\tau) = \frac{-0,00174\tau^2 + 3,52 \cdot 10^{-5}\tau + 4,39 \cdot 10^{-9}}{\tau^4 + 0,00272\tau^3 + 2,40 \cdot 10^{-5}\tau^2 + 6,02 \cdot 10^{-8}\tau + 7,08 \cdot 10^{-11}} \quad (11)$$

gdzie czas  $\tau$  wyrażony jest w s.



**Rys. 7. Czasowe charakterystyki impulsowej lampy firmy Bowens**

**a -  $\gamma(\tau)$  charakterystyka nagrzewania**

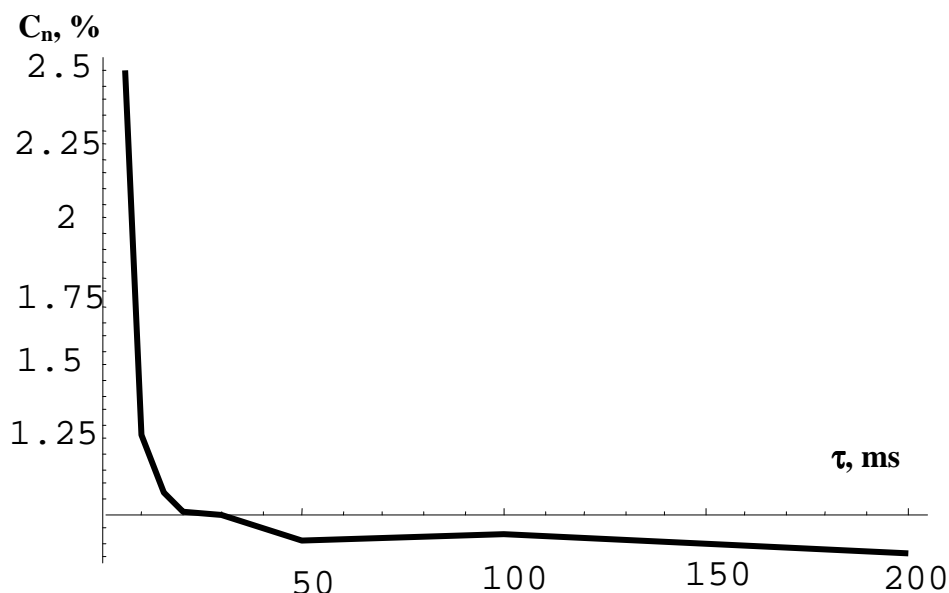
**b -  $\phi(\tau)$  charakterystyka energii nagrzewania w całym zakresie spektralnym**

W metodach pasywnej termografii zewnętrzne źródła promieniowania ciepłego mogą tworzyć fałszywe sygnały, które operator będzie traktował jako wskaźniki defektów. Zewnętrzne promieniowanie odbija się nie tylko od metalowych, ale i gładkich niemetalicznych powierzchni.

Największy wpływ na wyniki badań nieniszczących z zastosowaniem metod termograficznych ma poziom szumów strukturalnych wytwarzanych przez kontrolowany obiekt. Szумы te powstają w wyniku zarówno powierzchniowych jak i objętościowych fluktuacji fizycznych właściwości materiałów. Niejednorodności objętościowe zwykle nie są istotne z punktu widzenia poziomu szumów ponieważ mogą one być oznaką występowania wewnętrznego defektu. Duże trudności sprawiają zarówno w metodach aktywnych jak i pasywnych termograficznych badań nieniszczących powierzchniowe fluktuacje emisyjnych właściwości badanego obiektu, które mogą się zmieniać przestrzennie, czasowo i spektralnie. Amplituda szumu może być wyrażana w jednostkach temperaturowych, ale bardziej wskazane są jednostki względne, które w mniejszym stopniu zależą od mocy ogrzewania.

Typowym podejściem do oceny szumów jest ocena standardowego odchylenia dynamicznego sygnału temperaturowego w strefie bez defektów  $\sigma_n(\tau)$  i bieżącego kontrastu szumu  $C_n^{nm}$ . Dla ściśle multiplikatywnego zakłócenia, określanego tylko przez źródło nagrzewania, kontrast szumu nie powinien zmieniać się w czasie. W praktyce na skutek działania różnych czynników, w tym wpływu addytywnych szumów, kontrast szumu zmienia się w czasie podczas ogrzewania/stygnięcia wyrobu. Tym nie mniej, w wielu przypadkach można uważać, że względny szum powierzchni obiektu badań jest stały w czasie i określać się go jako uśredniony kontrast w czasie dla określonej strefy  $C_n^{nm} = \sigma_n(\tau)/T(\tau)$ .

Na rys.8 przedstawiono zachowanie się kontrastu szumu podczas badań termoizolacyjnego ceramicznego pokrycia łopatek turbiny metodą impulsowej termografii w podczerwieni. Widać, że szумы pokrycia nie są ściśle multiplikatywne na skutek tego, że po upływie około 25 ms po impulsie nagrzewającym, mimo strukturalnych zakłóceń, występuje szum addytywny np. wywołany przez odbite szczątkowe promieniowanie gorących elementów lampy impulsowej lub innymi czynnikami. Więc, najwyższej wartości stosunku sygnał/szum można oczekiwać dla tych sygnałów, które pojawiają się przez 25 ms i więcej po impulsie nagrzewającym kiedy  $C_n \sim 1\%$ . Należy zauważyć, że w badaniach eksperymentalnych z innymi pokryciami szum osiągał wartość do 5%.



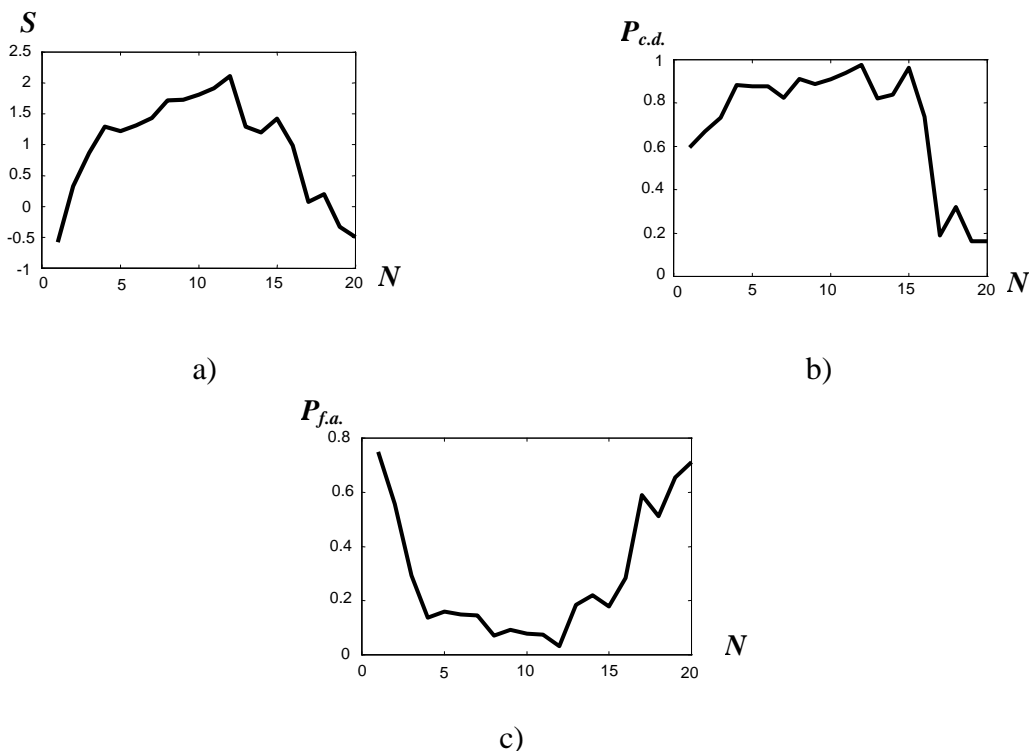
**Rys.8. Przebieg zmian kontrastu szumu w czasie podczas badań termograficznych pokrycia o grubości 250 μm (kamera termowizyjna JADE firmy CEDIP, nagrzewanie impulsowe lampą ksenonową)**

Wartość  $C_n^{run}$  zależy od materiału, stanu jego powierzchni, a także wymiaru strefy przestrzeni w granicach której uśredniany jest szum. Oczywiście, że największą dyspersję ma pikselowa funkcja  $T(i, j, \tau)$ , jednak w praktyce zawsze dokonuje się uśrednienia w pewnej strefie. Należy zauważyć, że analogia ze współczynnikiem promieniowania  $\varepsilon$  jest zasadnicza, ponieważ własne fluktuacje  $\varepsilon$  i współczynnika tłumienia  $\alpha \approx \varepsilon$  wnoszą podstawowy wkład w szum.

Z analizy porównawczej różnego typu materiałów wynika że:

- najmniejsze szумы powodują materiały dielektryczne i pokrycia sadzą,
- największe szумы pojawiają się w miejscach korozji metali,
- metale np. miedź mogą mieć niski poziom szumów powierzchniowych (jednak powodują silne zakłócenia na skutek odbitego promieniowania),
- niskoczęstotliwościowa filtracja nieznacznie obniża poziom szumu, zaś wysokoczęstotliwościowa filtracja istotnie go zwiększa.

Przy optymalizacji badań termograficznych konkretnego wyrobu rekomenduje się analizowanie zmian w czasie stosunku sygnał/szum  $S(\tau) = \Delta T(\tau) / \sigma_n(\tau) = C(\tau) / C_n(\tau)$ , a nie oddzielnych parametrów  $\Delta T(\tau), C(\tau), \sigma_n(\tau), C_n(\tau)$ . Moment czasu, kiedy następuje maksymalna wartość  $S$  jest optymalnym czasem badań termograficznych. Ilustrację tej sytuacji przedstawiono na rys.9 (rozwarstwienie o wymiarze 6 mm w tworzywie węglowym na głębokości 1,25 mm). Wykresy przedstawione na rys.9 pozwalają na wybór zobrazowania z najlepiej widocznym defektem –  $N=12$ .



**Rys.9. Wybór optymalnego momentu do wykrycia defektu w tworzywie węglowym ( $N$  – numer zobrazowania):**  
**a – stosunek sygnał/szum;**  
**b – prawdopodobieństwo prawidłowego wykrycia;**  
**c – prawdopodobieństwo fałszywego alarmu.**

## 6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy dotyczącej statystycznej oceny danych w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych metodami termowizyjnymi należy stwierdzić, że:

- zwiększenie liczby parametrów informacyjnych do oceny jakości obiektu zwiększa prawdopodobieństwo podjęcia prawdziwej decyzji, zwiększając tym samym prawdopodobieństwo wykrycia defektów;
- w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni różnica temperatury  $\Delta T$  między strefą z defektem, a strefą bez defektu powinna wynosić więcej niż 0,1 °C, co umożliwi wykrycie defektu bez stosowania specjalnych metod obróbki termogramów;
- szумы strukturalne mają największy wpływ na wyniki badań termograficznych, a ich wpływ w wielu przypadkach może być trudny do kompensacji;
- wybór odpowiedniego statystycznego kryterium porównania dwóch rozkładów może decydować o skuteczności wykrywania defektów w danym wyrobie;
- doświadczenie i wiedza operatora ma decydujący wpływ na prawidłowość podejmowania decyzji przy wykrywaniu defektów.

Niniejszy artykuł powstał podczas realizacji pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2007-2009 w ramach Projektu Badawczego Habilitacyjnego Nr 508-O/0012/32, przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- [1] Lewińska-Romicka A. „Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii” WN-T, Warszawa 2001
- [2] Sachs L. Applied Statistics. New York: Springer-Verlag, 1982, 220 p.
- [3] Taylor J.O., Dupont H.M. “Inspection of metallic thermal protection systems for the X-33 launch vehicle using pulsed infrared thermography” // Proc. SPIE ‘Thermosense-XX’, 1998, V. 3361, pp. 301-310
- [4] Вавилов В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. М., Радио и связь, 1984, 162 с
- [5] Vavilov V.P. Infrared techniques for materials analysis and nondestructive testing. // Infrared Methodology and Technology, Monograph Series "Intern. Advances in NDT", ed. by X.Maldague, Gordon & Breach Science Publisher, U.S.A.. 1994, pp. 230-309
- [6] Ллойд Д. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978, 410 с.

## Statistical Evaluation of Data in Nondestructive Testing of Composite Materials by IR Thermography Methods

**Summary:** Statistical criteria improving effectiveness of detection of defects in nondestructive testing of composite materials by IR thermography methods and creating defect maps and recognition of pictures are presented in the paper. The influence of noises and disturbances on results of these testing was analyzed. Some exemplary results of experimental tests are also presented to illustrate presented problems.