

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

CHARKTERYZACJA NIECIĄGŁOŚCI MATERIAŁOWYCH W MATERIAŁACH KOMPOZYTOWYCH W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH METODAMI TERMOGRAFII W PODCZERWIENI

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości określenia parametrów defektów występujących w materiałach kompozytowych w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni. Przeanalizowano zarówno zagadnienia teoretyczne jak i praktyczne związane z charakteryzacją tych defektów. Przedstawiono przykładowe wyniki numerycznego modelowania procesów przewodzenia ciepła ilustrujące analizowane zagadnienia.

CHARACTERIZATION OF DEFECTS IN COMPOSITE MATERIALS BY IR THERMOGRAPHY NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS

Summary: Possibility of qualification of parameters defects in composite materials by IR thermography NDT methods is presented in the paper. Both theoretical and practical problems connected with characterization these defects was analyzed. Some exemplary results of numerical modeling processes of heat transfer are also presented to illustrate presented problems.

1. Wstęp

Metody i techniki badań nieniszczących służą do wykrywania nieciągłości materiałowych (defektów) oraz oceny struktury materiałów obiektów badanych bez zmiany ich właściwości użytkowych [1]. Obiektami badań nieniszczących mogą być m.in. obiekty wykonywane z materiałów kompozytowych.

Zainteresowanie kompozytami wynika z ich doskonałych parametrów mechanicznych i wytrzymałościowych przy małym ciężarze właściwym. Z jednoczesnym występowaniem tych cech mamy do czynienia w zasadzie tylko w przypadku kompozytów, stąd gwałtownie rosnące w ostatnich latach ich stosowanie w konstrukcjach, dla których cechy te mają pierwszorzędne znaczenie. Są to przede wszystkim konstrukcje lotnicze, samochodowe, a także sprzęt sportowy (łódzie, narty, rakiety tenisowe, rowery), w których kompozyty wykorzystywane są do konstrukcji cienkościennych.

Ze względu na właściwości materiałów kompozytowych, które przewyższają właściwości materiałów tradycyjnych, są one, i będą stosowane w przyszłości, w aplikacjach specjalnych (militarnych), w których są stawiane wysokie wymagania używanym materiałom ze względu na szczególnie trudne warunki, w jakich musi pracować urządzenie.

W każdej metodzie badań nieniszczących występuje faza wykrycia defektu i faza oceny jego parametrów (defektometria). Faza wykrycia defektu jest zakończona wówczas, gdy

operator sprzętu diagnostycznego lub automatyczne urządzenie kontrolne uzna, że kontrolowany obiekt jest bez defektów albo zawiera je. W tym etapie rejestracji wyników nie ocenia się parametrów defektów. W etapie defektometrii, stosując metody rozwiązywania zagadnienia odwrotnego, ocenia się parametry defektów i stopień ich zagrożenia dla niezawodnego funkcjonowania kontrolowanego obiektu. Jednak dane gromadzone w poszczególnych fazach badań nie są dotychczas wystarczająco spożytkowane, szczególnie dla prognozowania czasu użytkowania wyrobu. W większości przypadków stopień zagrożenia występujący wskutek wykrytych defektów ocenia się w oparciu o przyjęte normy.

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

- amplitudy wykrytych anomalii temperaturowych,
- charakterystyki ich rozwoju w funkcji czasu,
- morfologii pola temperatury na powierzchni badanego obiektu [2].

Procedury badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni można podzielić na procedury pasywne i aktywne [3, 4, 5]. Do diagnozowania defektów w materiałach kompozytowych w większości przypadków będą stosowane procedury badań aktywnych.

W procedurach aktywnych stosuje się źródło ciepłej stymulacji (nagrzewania lub chłodzenia) obiektu. Defekty materiałów, mające przed rozpoczęciem badania jednorodną temperaturę, równą temperaturze otoczenia, nie generują „użytecznych” sygnałów temperaturowych i w tym celu wymagają nagrzewania lub ochładzania całego obiektu lub jego części. W trakcie takiego badania powstaje dynamiczne pole temperatury, a wyniki badania jej rozkładu zależą od czasu obserwacji. W aktywnych metodach są zazwyczaj stosowane również specjalne procedury przetwarzania danych [2].

2. Procesy cieplne w badaniach termograficznych

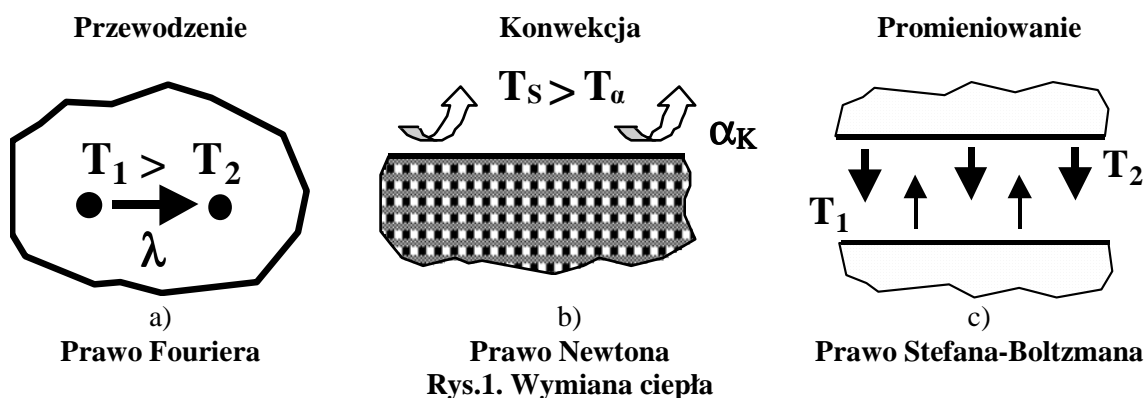
2.1. Przewodzenie, konwekcja i promieniowanie

Energia cieplna przekazywana jest w środowisku przy istnieniu temperaturowych gradientów trzema sposobami: przez przewodzenie (przeważnie, w ciałach stałych), konwekcją (w środowisku cieczy i gazów) i promieniowanie.

Gęstość strumienia ciepła Q w ciele stałym między punktami o różnej temperaturze T_1 i T_2 podporządkowana jest prawu Fouriera (rys. 1a) [8]:

$$Q = -\lambda(T_2 - T_1) / \Delta x \quad (1)$$

wynika z tego, że współczynnik przewodności cieplnej λ , W/(m·K), określa gęstość strumienia ciepła w ciele stałym przy gradencie temperatury równym jeden i charakteryzuje warunki stacjonarnej wymiany, ponieważ w jego wartości nie ma czasu.



Konwekcja oznacza przemieszczenie ciepłych i zimnych warstw gazu lub cieczy. Ochłodzenie (lub nagrzanie) powierzchni ciała gazem lub cieczą opisuje prawo Newtona (rys. 1b):

$$Q = \alpha_K(T_S - T_\alpha), \quad (2)$$

gdzie α_K - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, nazywany w ogólnym przypadku współczynnikiem wymiany ciepła; T_S i T_α - odpowiednio temperatury powierzchni ciała i środowiska (cieczy lub gazowego). Oznaczenie α_K nie jest tak ścisłe jak w przypadku λ , tak jak ten parametr opisuje nie tyle materiał, tylko wzajemne oddziaływanie dwóch różnorodnych środowisk i zależy od ich geometrii.

Dla pionowo zorientowanych powierzchni w pomieszczeniu współczynnik α_K można określić następującym równaniem:

$$\alpha_K = 1.7 \cdot (T_S - T_\alpha)^{1/3} \quad (3)$$

Promieniowanie ciepłe jest strumieniem energii fal elektromagnetycznych emitowanych przez ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego ($0 \text{ K} = 273,16^\circ\text{C}$). Gęstość radiacyjnego promieniowania opisuje prawo Stefana-Boltzmana, które dla wymiany ciepła między dwoma ciałami o temperaturach T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$) ma następującą postać (rys. 1c):

$$Q_{12} = \sigma \cdot F_g \cdot F_\varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (4)$$

gdzie Q_{12} - gęstość wynikowego strumienia ciepła, σ - stała Stefana-Boltzmana ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), F_g - współczynnik geometryczny, F_ε - zredukowany współczynnik promieniowania.

Wymiana ciepła między ciepłym obiektem (T_S), a chłodnym otoczeniem (gazowym) (T_α) zachodzi na drodze konwekcji jak i promieniowania:

$$Q = Q_K + Q_P = \alpha_K \cdot (T_S - T_\alpha) + \sigma \cdot G \cdot (\varepsilon \cdot T_S^4 - \varepsilon_\alpha \cdot T_\alpha^4), \quad (5)$$

gdzie $\varepsilon, \varepsilon_\alpha$ - odpowiednio współczynniki promieniowania obiektu i otoczenia.

W badaniach termograficznych różnica temperatur $T_S - T_\alpha$ jest zwykle mała, a obiekty mają wysoki współczynnik promieniowania ($\varepsilon \cong 1$). Dlatego:

$$\sigma \cdot G \cdot (\varepsilon \cdot T_S^4 - \varepsilon_\alpha \cdot T_\alpha^4) \approx 4 \cdot \sigma \cdot G \cdot \left(\frac{T_S + T_\alpha}{2} \right)^3 \cdot (T_S - T_\alpha) = \alpha_P \cdot (T_S - T_\alpha), \quad (6)$$

gdzie α_P - współczynnik wymiany ciepła poprzez promieniowanie.

Wyrażenia (2) i (6) są jednakowe, jeżeli wprowadzi się współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem $\alpha = \alpha_K + \alpha_P$. Wartość α zależy od kształtu obiektu i jego orientacji w przestrzeni, a także od różnicy temperatury $T_S - T_\alpha$.

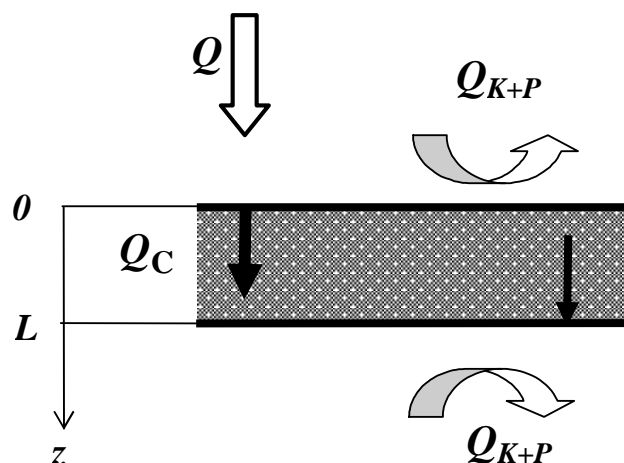
Brak wymiany ciepła na którejkolwiek powierzchni obiektu ($\alpha_K = \alpha_P = 0$) oznacza stan adiabatycznej warunków granicznych. W badaniach termograficznych warunki adiabatyczne

powstają przy badaniach metali i cienkich niemetalu, szczególnie przy krótkich czasach kontroli.

2.2. Warunki graniczne na powierzchni badanych obiektów

Na nagrzewanej powierzchni badanego obiektu w ogólnym przypadku ma miejsce warunek równowagi trzech strumieni: strumienia nagrzewającego Q , strumienia konwekcyjno-radiacyjnego Q_{K+P} i strumienia Q_C , wychodzącego z głębi ciała w wyniku przewodzenia ciepła:

$$Q = Q_{K+P} + Q_C \quad (7)$$



Rys.2. Warunki graniczne na powierzchni kontrolowanego obiektu

Przy rozwiązaniu zagadnienia przewodzenia ciepła typowy zapis przesunięcia warunków brzegowych (7) ma postać:

$$-\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = Q - \alpha [T(z=0) - T_a], \quad (8)$$

gdzie $z = 0$ oznacza powierzchnię przednią obiektu badań. Na tylnej powierzchni ($z = L$, L - grubość wyrobu) nie ma strumienia nagrzewającego, dlatego ma miejsce równowaga dwóch strumieni ciepła:

$$-\lambda \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} = \alpha [T(z=L) - T_a], \quad (9)$$

gdzie zmiana znaku strumienia Q_{K+P} uwarunkowana jest zmianą jego kierunku (rys. 2).

Nieadiabatyyczna wymiana ciepła zawiera wszystkie trzy mechanizmy, opisane powyżej. Trudno jednak jest ocenić konwekcję stanowiącą wymianę ciepła z otoczeniem. W aktywnych procedurach badań termograficznych właściwa moc strumienia nagrzewającego może znacznie przewyższać moc przeciwnego strumienia oddawania ciepła w wyniku konwekcji i promieniowania. W tym przypadku wymiana ciepła jest adiabatyczna i odpowiednie rozwiązanie teorii przewodzenia ciepła przyjmuje prostą postać.

2.3. Wymiana ciepła w defektach na granicach warstw kompozytu

Wiele typowych defektów, będących obiektami badań termograficznych, można rozpatrywać jako cienkie szczeliny gazowe. Strumień ciepła w takich defektach, powstający w wyniku przewodzenia ciepła na skutek różnicy temperatury na powierzchni defektów T_1 i T_2 , opisuje wyrażenie (1). Z teorii wymiany ciepła wiadomo, że konwekcję można pominąć, jeżeli iloczyn kryteriów Grashofa i Prandtla spełnia warunek:

$$\text{Gr Pr} < 1000 \quad (10)$$

Sprawdzenie warunku (10) dla różnicy temperatur $T_1 - T_2 < 100^\circ\text{C}$ prowadzi do następującego warunku dla dopuszczalnej grubości defektu d , przy którym konwekcję można pominąć:

$$d < 6 \text{ mm} \quad (11)$$

Obiekty badań termograficznych w większości przypadków spełniają warunek (11). Strumień radiacyjny w cienkich defektach opisuje się w przybliżeniu wyrażeniem:

$$Q_p \approx 4\sigma T^3(T_1 - T_2), \quad (12)$$

gdzie $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$. Stosunek strumieni ciepła, uwarunkowany konwekcją i promieniowaniem:

$$\frac{Q_k}{Q_p} \approx \frac{K}{4d\sigma T^3}. \quad (13)$$

Dla defektów wypełnionych powietrzem ($\lambda = 0,07 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $T = 330 \text{ K}$ lub 57°C), $Q_k / Q_p > 17$ dla $d < 0,5 \text{ mm}$. Można założyć, że przekazywanie ciepła w cienkich defektach wypełnionych gazem realizowana jest na drodze przewodzenia ciepła.

Należy także zauważyć, że w pierwszym przybliżeniu (przy małych różnicach temperatury ΔT między dwoma środowiskami, wymieniającymi energię cieplną), dla wszystkich trzech mechanizmów przekazania ciepła gęstość strumienia ciepła jest proporcjonalna do różnicy temperatur ($Q \sim \Delta T$).

W ramach modeli przewodzenia ciepła przez defekt istnieją dwa typy warunków granicznych na granicach podziału warstw, wykonanych z różnych materiałów.

W ogólnym przypadku na granicach warstw i i $i+1$ mają miejsce warunki ciągłości strumienia i temperatury w postaci:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}; \quad T_i = T_{i+1}. \quad (14)$$

Przy zastosowaniu warunków (14) rozwiązanie równania różniczkowego przewodzenia ciepła uwzględnia nie tylko zasadniczy materiał, ale również i defekty. Przy tym rozkład temperatury w badanym obiekcie zależy będzie zarówno od przewodności cieplnej jak i od pojemności cieplnej warstwy.

Jeżeli pojemność cieplną $i+1$ warstwy można pominąć, to jej zasadniczą cieplno-fizyczną charakterystyką jest oporność cieplna $R_{i+1} = l_{i+1} / \lambda_{i+1}$. Na granicach warstwy oporowej temperatura zmienia się skokowo, a strumień ciepła pozostaje ciągłym:

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}; \quad T_{i+1} - T_i = R_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}. \quad (15)$$

3. Termofizyczny opis defektu

W badaniach nieniszczących (*NDT – nondestructive testing*) z wykorzystaniem techniki termowizyjnej w celu realizacji zadania diagnostycznego, polegającego na oszacowaniu rozmiarów i głębokości wady w badanym obiekcie, niezbędne jest użycie odpowiedniego modelu matematycznego opisującego relacje pomiędzy czasowo-przestrzennym rozkładem temperatury a cechami badanego obiektu.

Analiza właściwości badań termowizyjnych z użyciem wybranej metody jest związana z rozwiązaniem prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Zagadnienie proste polega na poszukiwaniu odpowiedzi obiektu na zadane pobudzenie cieplne przy określonej strukturze i warunkach brzegowych. Zagadnienie odwrotne polega na odtworzeniu parametrów obiektu na podstawie znajomości parametrów pobudzenia cieplnego i odpowiedzi obiektu.

Niejednorodności struktury dowolnego rodzaju, włączając w to defekty, zniekształcają „wzorcowy” przepływ strumienia ciepła w badanym obiekcie i doprowadzają do miejscowych anomalii temperaturowych, które są przekazywane przez materiał obiektu na jego powierzchnię, gdzie są rejestrowane w postaci sygnałów temperaturowych przez aparaturę do badań termowizyjnych.

W klasycznych modelach badań termicznych rozpatrywane są wewnętrzne defekty jako warstwy materiałów, w których wymiana ciepła jest realizowana wyłącznie przez jego przewodzenie. Jeżeli dla modelu ciała stałego nieadiabaticznego, z podpowierzchniowym defektem w postaci wtrącenia objętościowego materiału obcego, rozpatrzmy problem kontaktowych warunków brzegowych, co prawdziwe są równości:

$$\lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} = \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}; \quad T_{nd} = T_d, \quad (16)$$

$$\text{lub} \quad \lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} = \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}; \quad T_d - T_{nd} = R_d \lambda_d \cdot \frac{\partial T_d}{\partial z} \quad (17)$$

gdzie:

λ - współczynnik przewodności cieplnej,

R – opór termiczny,

indeksy „*nd*” i „*d*” oznaczają odpowiednio wartości w strefie „bez defektu” i w strefie z „defektem”.

Przy zastosowaniu warunku (16) jest konieczne rozwiązanie równania różniczkowego przewodności cieplnej, zarówno w warstwach podstawowego materiału, jak również w defektach, dlatego rozkład temperatury w kontrolowanym obiekcie będzie zależał od przewodności cieplnej i pojemności cieplnej defektu. W badaniach termicznych z zastosowaniem kamery termowizyjnej do rejestracji zmian pola temperatury na powierzchni badanego materiału są stosowane dwie podstawowe procedury badań: jednostronna i dwustronna. Jednostronna procedura polega na tym, że zewnętrzne źródło pobudzenia

ciepłego i kamera termowizyjna znajdują się po tej samej stronie badanej próbki materiału, a w dwustronnej po przeciwnych stronach. Jeśli pojemność cieplna defektu jest porównywalna z pojemnością cieplną kontrolowanego obiektu (dla dwustronnej procedury badań cieplnych) lub warstwy materiału nad defektem (przy jednostronnej procedurze), to może ona istotnie wpływać na wartość sygnału temperaturowego i jego czasowe zmiany podczas nagrzewania/chłodzenia (takie defekty nazywane są pojemnościowymi). Przykładem pojemnościowego „defektu” jest woda w konstrukcjach typu plaster miodu (komórkowy) lub wypełniająca obszar pustki w materiałach porowatych. Wpływ pojemności cieplnej defektu jest znaczny w przypadku rozległych, niegłębokich rozwarstwień w materiałach kompozytowych. Pojemnościowy charakter defektu może być odpowiedzialny za inercję sygnału temperaturowego, gdy strefa defektu nad słabo przewodzącymi ciepło defektami (napętnionymi gazem), w jednostronnej procedurze badań cieplnych, staje się chłodniejsza niż strefy bez defektów, tj. $\Delta T(\tau) < 0$.

Jeśli pojemność cieplną defektu można pominąć, to jego głównym termofizycznym parametrem jest opór termiczny $R_d = d / \lambda_d$ i defekt nazywany jest oporowym (warunki graniczne (17)). Wówczas nie rozwiązuje się równania różniczkowego przewodności cieplnej wewnątrz defektu.

W przypadku kontaktu dwóch chropowatych materiałów jest stosowany termin „stykowego oporu cieplnego”. Oporowe defekty charakterystyczne są dla spawanych połączeń i cienkich pokryć. Wyjątkowo, przy dyfuzyjnym spawaniu możliwe są defekty na granicy spawanych materiałów, przy których jest kontakt materiałów, ale nie nastąpiło ich stopienie. Analogiczne defekty, nazywane w literaturze angielskojęzycznej „całującymi się” (kissing), mogą występować między warstwami kompozytowego materiału.

Modele badań termicznych z defektami oporowymi mają prostszą postać i często są wykorzystywane przy opracowywaniu algorytmów cieplnej defektometrii [6].

4. Warunki ujawnienia sygnałów od wewnętrznych defektów

Ogólnym kryterium porównania różnych procedur badań termograficznych jest stosunek sygnał/szum [2], który określa się jako

$$s = \frac{\Delta T(\tau)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \overline{\Delta T_{i \text{ noise}}^2}(\tau)}}, \quad (18)$$

gdzie:

$\overline{\Delta T_{i \text{ noise}}^2}$ - sygnał szumu od i-tego źródła, wyrażony w stopniach temperatury równoważnej.

Z zależności (18) wynika, że wewnętrzny defekt może być pewnie ujawniony, jeśli w momencie obserwacji sygnał ΔT przewyższa poziom szumów:

$$s > 1 \text{ lub } \Delta T > \sqrt{\sum_{i=1}^N \overline{\Delta T_{i \text{ noise}}^2}} \quad (19)$$

Rozkład szumu zmienia się w czasie, dlatego maksymalna wartość S może wystąpić w momencie w ogólnym przypadku nie pokrywającym się z maksimum $\Delta T(\tau)$ lub $C = \Delta T(\tau)/T(\tau)$.

Rozpatrzmy dwa skrajne przypadki jeżeli:

1) szumy określane są tylko szumami detektora ΔT_{res} to:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i\ noise}^2} = \Delta T_{res}; \quad (20)$$

2) szumy są tylko związane z promiennie-tłumiącymi cechami próbki. Wówczas można je scharakteryzować jako kontrast szumu:

$$C_{noise} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i\ noise}^2(\tau) / T_{nd}(\tau)} = \Delta T_{noise}(\tau) / T_{nd}(\tau), \quad (21)$$

W pierwszym przypadku najlepszy czas obserwacji jest określony wystąpieniem maksymalnego sygnału $\Delta T(\tau_m)$, wówczas pierwszy warunek wykrycia defektu można zapisać w postaci:

$$\Delta T(\tau_m) > \Delta T_{res}. \quad (22)$$

W przypadku drugim najlepsze warunki do wykrycia mają miejsce przy maksymalnym kontraście $C(\tau_m)$ i wówczas drugi warunek wykrycia defektu ma postać:

$$C(\tau_m) > C_{noise}. \quad (23)$$

Zaznaczmy, że maksymalny kontrast temperatury powstaje przy krótkim (impuls Diraca) nagrzewaniu.

Zasadnicza różnica tych warunków polega na tym, że warunek (22) można spełnić na drodze zwiększenia pochłanianej energii W (mocy nagrzewania Q). Warunek (23) nie zależy od W (Q) i uwarunkowany jest wyłącznie powierzchniowymi cechami badanego obiektu.

Trzeci warunek wykrycia defektu wynika z faktu, że badania mają być nieniszczące, w związku z tym bezwzględna temperatura powierzchni próbki na końcu nagrzewania nie może przewyższać progę zniszczenia materiału T_{destr} :

$$T_{abs}(\tau = \tau_h) < T_{destr}. \quad (24)$$

Ponieważ nadmiar temperatury próbki jest proporcjonalny do W (Q), ostatni warunek nakłada ograniczenie na pochłanianą energię. Przegrzanie powierzchni próbki najbardziej prawdopodobne jest przy krótkotrwałym nagrzewaniu, dlatego sytuacja wykrywania defektów wymaga optymalnego wyboru mocy i czasu trwania impulsu cieplnego.

Jeżeli spełnione są przedstawione powyżej trzy warunki to wewnętrzne defekty w materiale kompozytowym mogą być wykryte za pomocą metody termograficznej.

Czwarty warunek wykrycia defektów jest związany z częstotliwością zapisu termogramów f , która powinna być wystarczająco duża, żeby można było zarejestrować wymaganą liczbę termogramów przed osiągnięciem najlepszego czasu obserwacji τ_m . Ten warunek można zapisać w postaci:

$$f \geq (5...10) / \tau_m. \quad (25)$$

W warunkach (22-25) występują parametry:

- 1) aparatury (ΔT_{res} i f);
- 2) wyrobu C_{noise} ;
- 3) nagrzewania (T_{abs});
- 4) defektu (ΔT lub C).

5. Podstawowe funkcjonalne zależności sygnału temperatury od parametrów badanego obiektu i defektu

W celu oszacowania rozmiarów i głębokości defektów, podczas realizacji zadania diagnostycznego, niezbędne jest zastosowanie odpowiedniego dla metody badań cech badanego obiektu modelu matematycznego opisującego zależności czasowo-przestrzenne rozkładu temperatury. Dostępność analitycznych rozwiązań dla problemów przepływu ciepła w ciałach stałych w warunkach występowania wad podpowierzchniowych pozwala na rozwiązanie tzw. problemów odwrotnych, tzn. na otrzymanie informacji o geometrii defektu (głębokości i powierzchni) w oparciu o analizę sekwencji obrazów z powierzchni obiektu, zarejestrowanych w podczerwieni w czasie trwania przejściowego procesu cieplnego.

W celu przedstawienia możliwości oszacowania parametrów defektów w badanych obiektach metodami termograficznymi wykorzystano algorytmy zastosowane w specjalistycznych programach komputerowych do rozwiązania zagadnień badań termicznych opracowane przez V. Vavilova (Multilayer-3 [9] i ThermoCalc-6L [10]).

W klasycznych modelach badań termograficznych sygnał temperatury nad ukrytym defektem ΔT i jego pochodne, na przykład bieżący kontrast temperaturowy $C^{rum} = \Delta T / T_{nd}$, zależą od:

- czasu $\{ \tau, \tau_h \}$;
- parametrów nagrzewania $\{ Q, \tau_h \}$;
- intensywności wymiany ciepła badanego obiektu z otoczeniem $\{ \alpha^F, \alpha^R \}$;
- grubości badanego obiektu $\{ L \}$;
- termofizycznych charakterystyk badanego obiektu $\{ \lambda, a \}$;
- geometrycznych wymiarów defektu $\{ h_x, h_y, h_z = d \}$ i głębokości jego położenia $\{ l \}$;
- termofizycznych charakterystyk defektu $\{ \lambda_d, a_d \}$.

Wynika z tego, że na wykrycie defektów metodą termograficzną wpływ ma 14 parametrów, część z nich, a mianowicie $\{ \alpha^F, \alpha^R \}$, można warunkowo odnieść do kategorii słabo-wpływających w typowych warunkach badania próbki.

5.1. Zmiana sygnału temperatury w czasie

Aktywne badanie termograficzne nazywane się również dynamicznymi (transient, dynamic), ponieważ wykrycie wewnętrznych defektów istotnie zależy od czasu badania, lub czasu obserwacji (observation time). Analiza zmian ΔT i C^{rum} w czasie stanowi także

podstawę do opracowania algorytmów zwiększenia stosunku sygnał/szum, które szeroko są rozpowszechnione we współczesnych badaniach termograficznych.

Na rys. 3 pokazano zmiany temperatury na czołowej (F) i tylnej (R) powierzchni próbki z tworzywa węglowego o grubości 5 mm, nagrzewanej impulsem cieplnym (w danym przypadku próbkę uważa się za izotropową, ponieważ największy wpływ na amplitudę ΔT ma składowa przewodności cieplnej λ_z , skierowana w głąb badanej próbki). Przy krótkoczasowej stymulacji cieplnej, tj. kiedy długość czasu nagrzewania jest istotnie mniejsza od charakterystycznych czasów wymiany ciepła w konkretnej próbce ($Fo_h = a\tau_h/L^2 \ll 0,1$), zauważalna różnica między temperaturą z defektem T_d i bez defektu T_{nd} zaczyna wskazywać na stadium schładzania ($\tau > \tau_h$). Na rys. 4 różnie sygnału temperatury $\Delta T = T_d - T_{nd}$ porównane są z bieżącym kontrastem temperaturowym $C^{rum} = \Delta T / T_{nd}$. Na obu powierzchniach próbki zachowanie się informacyjnych parametrów ΔT i C ujawnia specyficzne maksyma, które występują przy różnych najlepszych czasach obserwacji τ_m . Na powierzchni przedniej (rys. 4 a), w stadium wykrycia, maksymalna wartość ΔT_m występuje wcześniej, niż maksymalna wartość kontrastu C_m . Przeciwnie, jeśli oba maksyma mają miejsce wewnątrz impulsu nagrzewającego, to C_m wyprzedza ΔT_m . W wielu przypadkach, maksymalny stosunek sygnał/szum występuje w momencie maksymalnego kontrastu $\tau_m(C_m)$, który można rozpatrywać jako najlepszy czas badań termograficznych (optimal observation time). Na tylnej powierzchni próbki maksymalny kontrast zwykle występuje przez bardzo krótki czas, kiedy nadmiar temperatury T i temperatura sygnału ΔT są małe. Dlatego w procedurach dwustronnych badań termograficznych (rys. 4 b), najlepszym czasem badania jest taki, przy którym sygnał ΔT zaczyna przewyższać poziom szumów. Zaznaczmy jeszcze raz, że, z obliczeniem wykorzystanego określonego sygnału różnicy temperatury, $\Delta T > 0$ na nagrzewanej powierzchni i $\Delta T < 0$ na tylnej powierzchni dla defektów, przewodność cieplna jest niższa, niż przewodność cieplna zasadniczego materiału. Dla lepiej przewodzących ciepło wtrąceń znak różnicy sygnału temperatury zmienia się na odwrotny.

Od ostatniej reguły są wyjątki, na przykład powodowane przez tak zwaną inwersję cieplną. Inwersja powstaje na przedniej powierzchni przy dużych czasach obserwacji, kiedy warstwa przegrzanego nad defektem zasadniczego materiału zaczyna gwałtowniej stygnąć, niż warstwa bez defektu. Inwersję sygnału temperatury można wskazać nad teflonowymi wstawkami w standardowych modelach z tworzywa węglowego, które często wykorzystuje się w charakterze imitacji pęknięć i rozwarstwień. W tym przypadku przyczyną inwersji może być obecność powietrznych szczelin wokół wstawek i modyfikacja struktury kompozytu przy wprowadzaniu defektów. Amplituda inwersyjnych sygnałów zwykle jest mała, i to zjawisko jest rzadko obserwowane eksperymentalnie. Możliwości, które hipotetycznie prezentuje inwersja dla wydzielenia sygnałów tle zakłóceń, do tej pory nie realizowano. Drugi wyjątek może mieć miejsce w procedurze dwustronnych badań termograficznych cienkich powietrznych rozwarstwień w słabo przewodzących ciepło materiałach; przy tym znak obliczeniowych sygnałów ΔT^R na tylnej powierzchni próbki zależy od wybranej metody badań termograficznych. Jeśli obecność defektu nie zmienia ogólnej grubości wyrobu, tj. defekt zastępuje część zasadniczego materiału, temperatura pod powietrznym defektem może przewyższać temperaturę bez defektu: ($\Delta T^R > 0$). Jeśli ma miejsce rzeczywiste rozwarstwienie, prowadzące do pojawienia się w obszarze z defektem dodatkowego oporu cieplnego, to sygnał temperatury staje się negatywnym ($\Delta T^R < 0$).

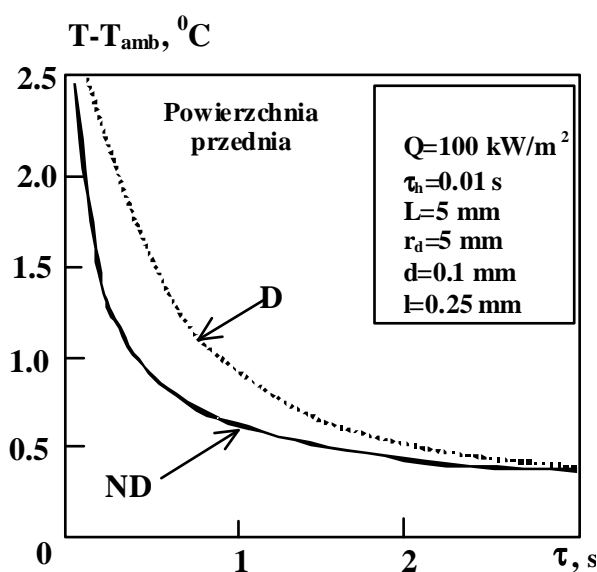
Z powodu dyfuzyjnego charakteru wymiany ciepła w ciele stałym sygnały temperaturowe na przedniej powierzchni zmieniają się w zależności od głębokości położenia defektu l . Ze wzrostem l nie tylko zmniejsza się amplituda ΔT , ale i moment najlepszy do

badania termograficznego następuje po dłuższym czasie (rys. 5 a). Fenomenologicznie to można wyjaśnić, wykorzystując koncepcję fal ciepłych, zgodnie z którą harmoniczne składowe stymulującego ciepłego impulsu przenikają w ciało stałe na różne głębokości, w zależności od częstotliwości, doświadczając przy tym odbicia, interferencji i pochłaniania. Ważną charakterystyką dla dwustronnych procedur badań termograficznych jest to, że charakterystyki ciepłych sygnałów na tylnej powierzchni zależą od grubości wyrobu L i stosunkowo słabo od głębokości położenia defektu l . Należy stwierdzić, że maksymalne wartości ΔT_m i τ_m występują dla defektów, położonych w środku próbki (rys.5 b).

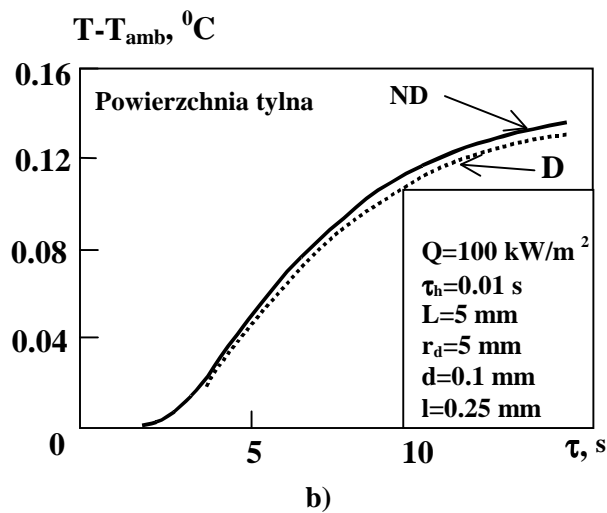
Strumień ciepła w metodzie fal ciepłych często opisywane jest funkcją

$$Q = \frac{Q_m}{2} [1 - \text{Cos}(2\pi f\tau)], \quad (26)$$

która zapewnia nieujemne wartości gęstości strumienia ciepłego podczas nagrzewania. W tym przypadku temperatura powierzchniowa zarówno w strefie bez defektów jak i z defektami ma stałe i harmoniczne składowe (rys. 6 a). Quasi-stacjonarny tryb osiągany jest przez określoną liczbę falowych okresów, które zależą od rodzaju materiału i grubości próbki. Klasyczna fototermiczna (photothermal) metoda, zwykle stosowana jest przy badaniach cienkich materiałów, wymaga 5...10 cykli dla osiągnięcia quasi-stacjonarnego trybu pracy, przy którym analizuje się amplitudę i fazę fal ciepłych. W badaniach termograficznych zastosowano modyfikację tej metody, która otrzymała nazwę synchronicznej termografii (lock-in thermography).

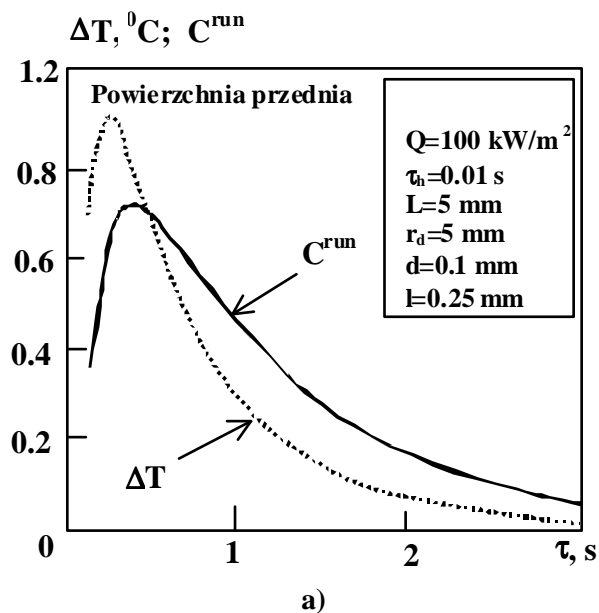


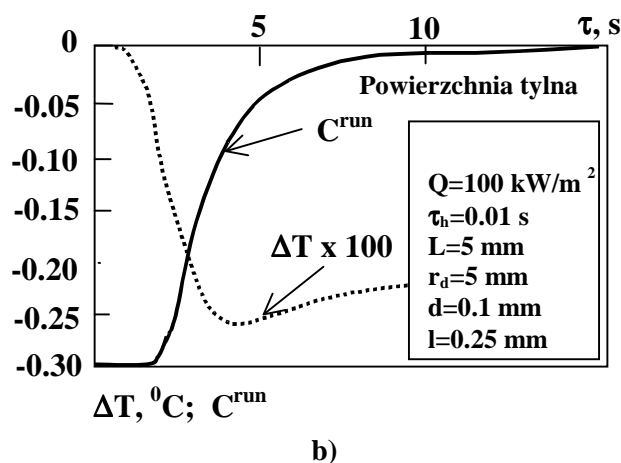
a)



Rys.3. Zmiany sygnału temperatury w czasie na powierzchni kompozytu węglowego o grubości 5 mm w wyniku nagrzewania impulsem cieplnym o czasie trwania 0.01 s (ND – strefa bez defektów, D – strefa z defektami):
a – temperatura na powierzchni przedniej;
b – temperatura na powierzchni tylnej.

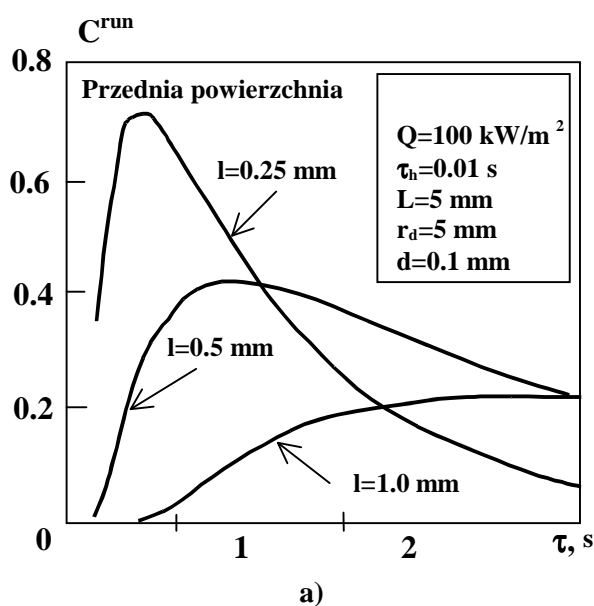
W odróżnieniu od fototermicznej metody, w której realizowany jest potokowy układ skanowania obiektu, termograficzna metoda przewiduje nagrzewanie wyrobu i rejestrację temperatury w dość dużych strefach. Przy badaniach próbek o dużej grubości, na przykład z tworzywa węglowego o grubości 5 mm potrzeba do 80 cykli aby ustalił się quasi-statyczny tryb (rys. 6 a).

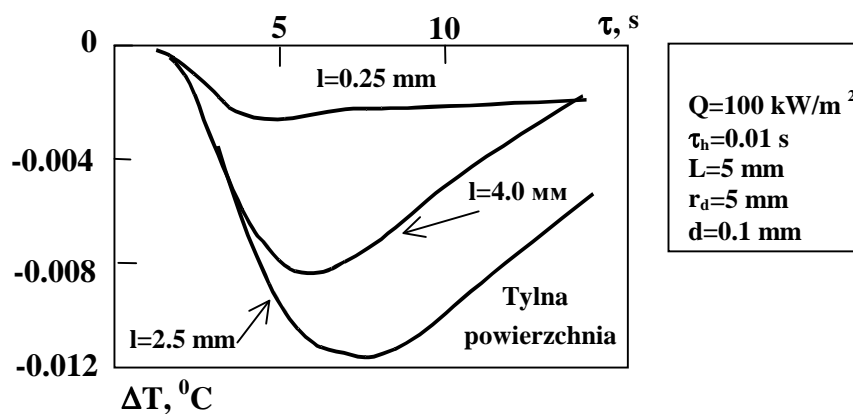




Rys. 4. Zmiany sygnału temperatury w czasie na powierzchni kompozytu węglowego o grubości 5 mm w wyniku nagrzewania impulsem cieplnym o czasie trwania 0.01 s (ND – strefa bez defektów, D – strefa z defektami):
 a – sygnał temperatury i kontrast na powierzchni przedniej;
 b – sygnał temperatury i kontrast na powierzchni tylnej;

Szczególnie godną uwagi charakterystyką powierzchniowych fal ciepłych jest istnienie przesunięcia faz (*phase lag*), zarówno względem funkcji nagrzewania, jak i między falami w obszarach bez defektów i z defektami (rys. 6 b). Na powierzchni półnieskończonego ciała przesunięcie fazy, w strefie bez defektów, powierzchniowej fali ciepłej względem fali nagrzewania jest równe -45° . Fazowe przesunięcia rozpatruje się w charakterze informacyjnego kryterium defektywności ciała, które często zapewnia lepszy stosunek sygnał/szum w porównaniu z temperaturą. Ponieważ faza może być wyrażona w funkcji czasu to analiza sygnałów w przestrzeni fazowej jest identyczna jak analiza w dziedzinie czasu. Wiadomo, że zakłócenia w porównaniu z pomiarem amplitudy mają mniejszy wpływ na pomiary fazy co decyduje o ich szerokim zastosowaniu w technice pomiarowej i badaniach termograficznych.





b)

Rys. 5. Zmiany sygnału temperatury w czasie na powierzchni kompozytu węglowego o grubości 5 mm w wyniku nagrzewania impulsem cieplnym o czasie trwania 0.01 s (ND – strefa bez defektów, D – strefa z defektami):

a – zmiany sygnału temperatury na powierzchni przedniej w zależności od głębokości położenia defektu;

b – zmiany sygnału temperatury na powierzchni tylnej w zależności od głębokości położenia defektu;

Koncepcja bezwzględnych sygnałów temperatury i bezwymiarowych kontrastów temperatury ma również znaczenie w metodzie fal cieplnych. Przykłady zmian ΔT i C w czasie pokazane są na rys. 6 c. Oba parametry informacyjne doznają okresowych drgań. Stała składowa sygnału temperatury wzrasta w czasie w ciągu pierwszych pięciu okresów, ponieważ faktycznie ciało nagrzewa się strumieniem cieplnym, który opisuje funkcja nagrzewania (22). W tym czasie kontrast temperatury szybko osiąga maksimum w 5 s po włączeniu nagrzewania, co odpowiada fali cieplnej o częstotliwości 0,2 Hz (ta częstotliwość zbliżona jest do najlepszej przy wykrywaniu rozwarstwień w tworzywie węglowym na głębokości 1 mm).

5.2. Głębokość położenia defektu

Wpływ głębokości położenia defektu l na najlepsze parametry wykrywania w badaniach termograficznych ilustruje rys. 7 na przykładzie badań próbki z tworzywa węglowego o grubości 5 mm.

Na powierzchni przedniej wartość sygnału temperatury gwałtownie spada wraz ze wzrostem głębokości położenia defektu l (rys. 7 a). Jeśli przyjąć typową rozdzielczość temperatury kamery na podczerwień równą $0,1^\circ\text{C}$, krańcowa głębokość wykrycia wynosi około 3 mm. Ten wniosek jest słuszny dla mocy nagrzewania $Q = 10^6 \text{ W m}^{-2}$, co odpowiada nadwyżce temperatury powierzchniowej na końcu nagrzewania $\sim 110^\circ\text{C}$. Dalsze powiększanie mocy nagrzewania podwyższy ΔT i odpowiednio powiększy krańcowe wartości l , jednak przy tym próbka może ulec zniszczeniu wskutek przegrzania.

Dlatego skrajnie dopuszczalna temperatura odporności termicznej materiału ogranicza podwyższenie mocy nagrzewania do wykrycia głęboko położonych defektów. W przypadku multiplikatywnych zakłóceń powierzchniowych, wzrost temperatury nagrzewania nie doprowadzi do zwiększenia stosunku sygnał/szum na skutek proporcjonalnego wzrastania amplitudy szumu. Najlepszy czas obserwacji τ_m wzrasta z powiększeniem głębokości położenia defektu l , osiągając $\tau_m \sim 10$ s przy $l \sim 3$ mm. Należy zauważyć, że często

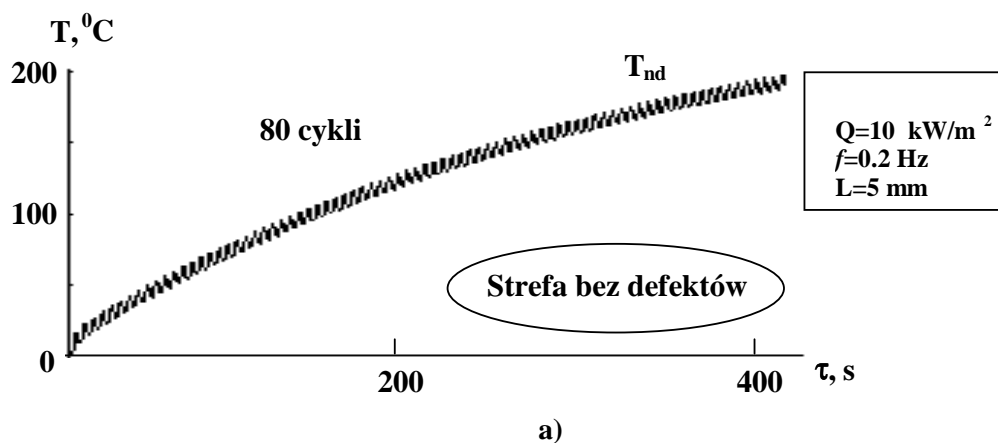
rekomendowany w literaturze stosunek $\tau_m = l^2 / a$, który nie bierze pod uwagę końcowych wymiarów defektów, można wykorzystać tylko w charakterze zgrubnego przybliżenia.

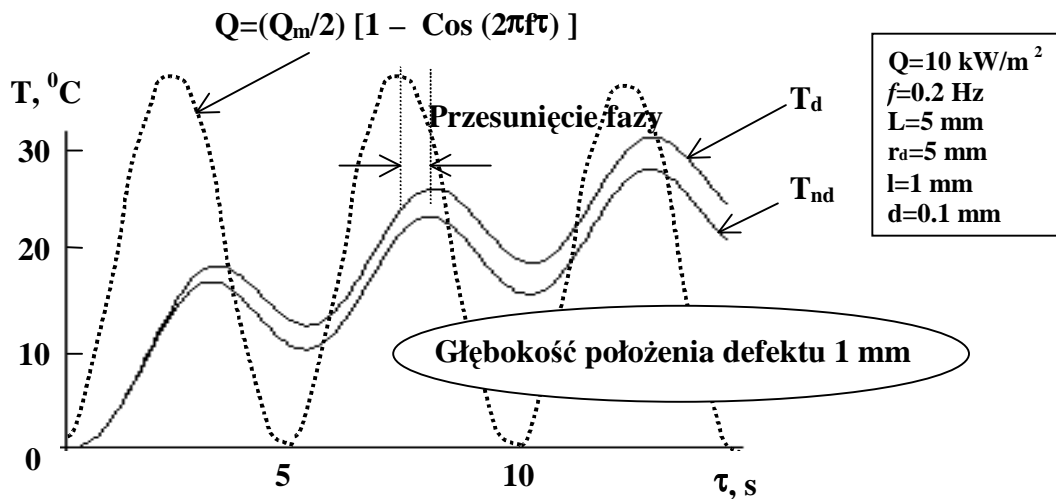
Na tylnej powierzchni wykresy obu funkcji $\Delta T(l)$ i $\tau_m(l)$ są symetrycznymi odnośnie środka próbki $l = 2,5$ mm (rys.7 b). W dwustronnej procedurze badań termograficznych defekty, występujące w środku próbki, tworzą maksymalne wartości ΔT przy maksymalnym czasie τ_m .

5.3. Grubość defektu

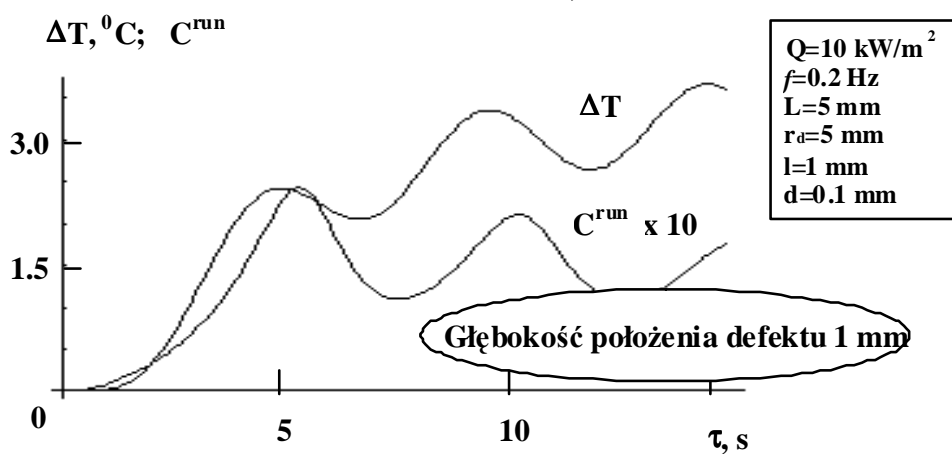
Grubość defektu d w kierunku rozchodzenia się głównego strumienia ciepłego jest w sumie tylko jednym z wymiarów defektu, który istotnie wpływa na ΔT i τ_m . Oddzielne rozpatrywanie parametru d jest celowe przy porównaniu wielowymiarowych i jednowymiarowych zagadnień badań termograficznych, ponieważ wymiary defektów w poprzecznym kierunku widoczne są na badanej powierzchni w jawnej postaci. Jak wynika z rys. 8, ze wzrostem d zwiększa się amplituda sygnału ΔT i wzrasta czas τ_m . Dla przypadku położenia defektu w środku próbki tj. na głębokości $l = 2,5$ mm, odpowiednie zależności podobne są i dla przedniej tylnej powierzchni (rys. 8). Najbardziej parametry ΔT i τ_m zmieniają się przy małych wartościach d , w szczególności, dla cienkich defektów można uważać, że $\Delta T \sim d$. Przy znacznych grubościach defektów odpowiednie zależności wykazują efekt nasycenia.

Przy opracowywaniu algorytmów cieplnej defektometrii defektów decydującym parametrem jest cieplny opór defektu $R_d = d / \lambda_d$, ponieważ grubość defektu d i jego przewodnictwo cieplne λ_d wspólnie wpływają na parametry wykrycia. To wyróżnia parametr d od poprzecznych wymiarów h_x i h_y .



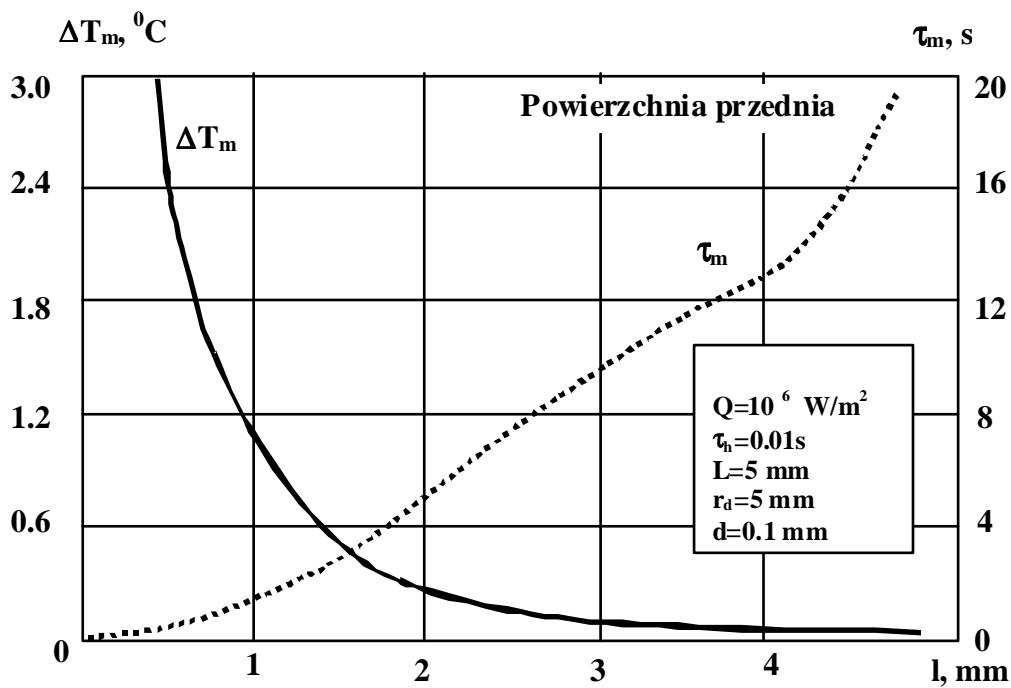


b)

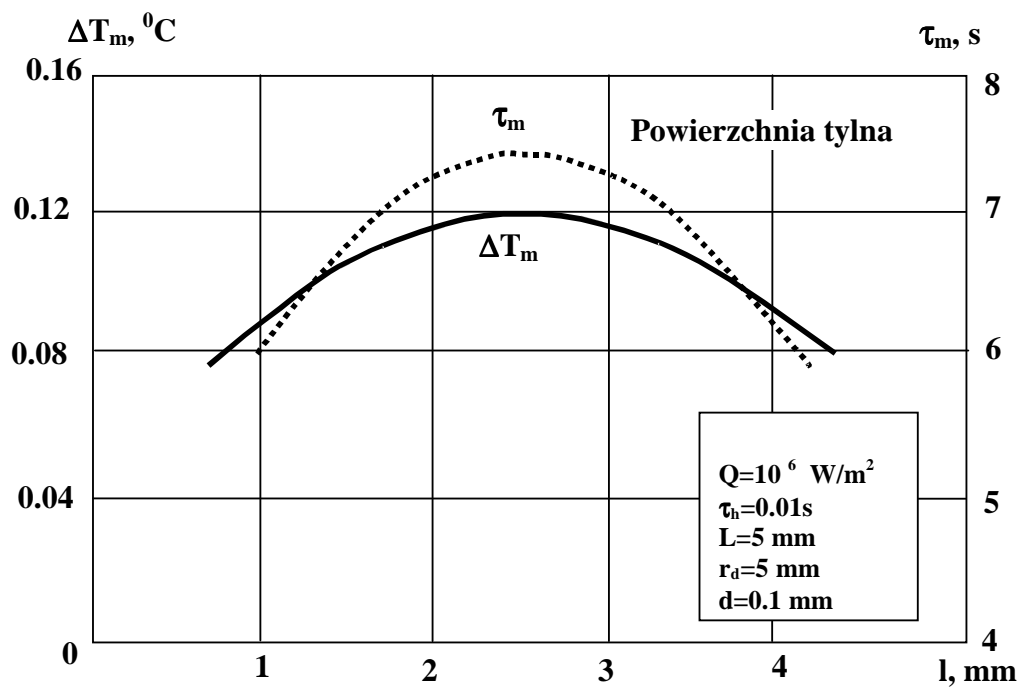


c)

- Rys. 6. Zmiany sygnału temperatury w czasie na powierzchni przedniej próbki z tworzywa węglowego nagrzewanego harmonicznym strumieniem ciepła (defekt wypełniony powietrzem na głębokości 1 mm, częstotliwość nagrzewania $f = 0.2$ Hz)
- a – temperatura na powierzchni przedniej w strefie bez defektów (80 cykli nagrzewania);
 - b – temperatura na powierzchni przedniej w strefach z defektem i bez defektu (3 cykle nagrzewania);
 - c – sygnał temperatury i kontrastu na powierzchni przedniej (3 cykle nagrzewania)



a)



b)

Rys.7. Najlepsze parametry wykrycia defektów w próbce z tworzywa węglowego o grubości 5 mm w zależności od głębokości ich położenia:

- a) powierzchnia przednia;
- b) powierzchnia tylna

5.4. Poprzeczne wymiary i konfiguracja defektu

Warunkowo można powiedzieć, że w nagrzewanym materiale istnieją strumienie ciepłe, rozchodzące się w głąb i w poprzecznych kierunkach. Poprzeczne strumienie ciepłe najbardziej są intensywne na końcach defektów, dzięki czemu obniża się wielkość ΔT dla

małych defektów. Defekty dostatecznie dużych wymiarów charakteryzują się przewagą jednowymiarowego przepływu ciepła przez defekt. Tą tezę zilustrowano na rys. 9 zależności ΔT_m i τ_m od r_d/l . Widać, że w tworzywie węglowym poprzeczny strumień cieplny można pominąć, jeśli $2r_d/l > 5$. Dla aluminium ten warunek wynosi: $2r_d/l > 10$. W literaturze dla badań termograficznych sformułowano przybliżoną regułę, zgodnie z którą za pomocą metody cieplnej można wykryć defekty, poprzecznych wymiarów których graniczny wymiar podwójnie przekracza głębokość ich położenia, tj. $2r_d/l > 2$. Dane na rys. 9 a potwierdzają ten wniosek, ponieważ od wartości $2r_d/l \leq 2$ zaczyna się gwałtowny spadek ΔT_m . Należy powiedzieć, że czasowe parametry (τ_m) są bardziej stabilne od poprzecznych wymiarów defektów, dlatego należy je wykorzystać do oceny właśnie je celowo wykorzystać do oceny l i d .

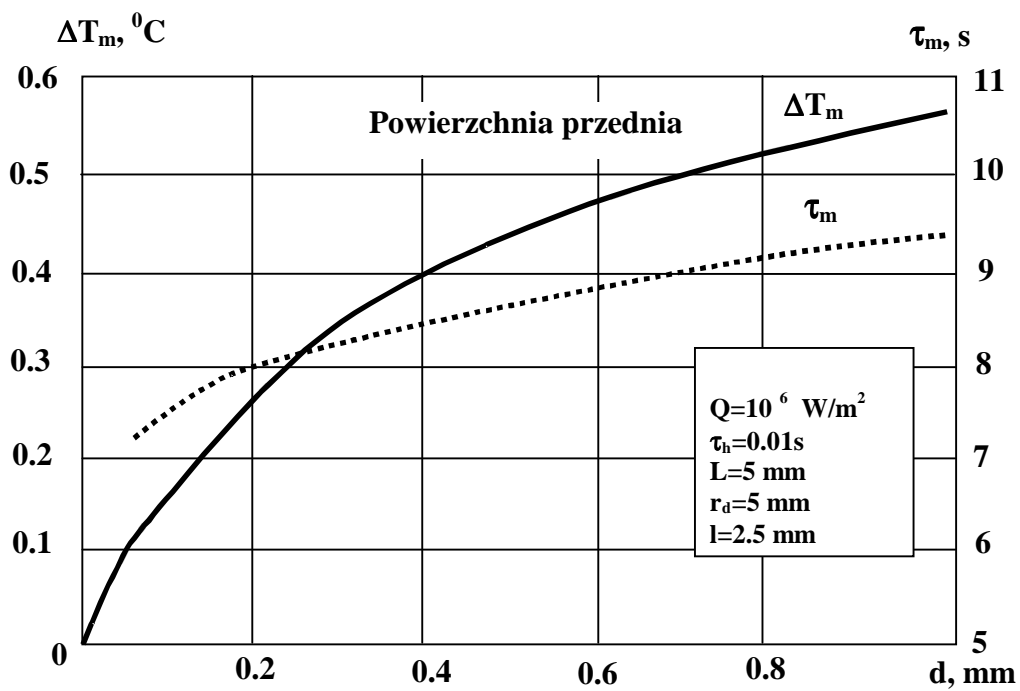
Drugi aspekt analizy dyfuzji ciepła w poprzecznym kierunku odnosi się do wpływu na ΔT konfiguracji defektów przy ich niezmiennych powierzchni, a także wpływu na siebie blisko położonych defektów. Na rys. 10 pokazano termogramy skorodowanej stalowej płyty o grubości 2 mm, otrzymane w trzech czasach obserwacji. Powierzchnia poprzecznego przekroju wszystkich defektów równa jest 25 mm^2 (rys. 10 a). Najlepszy obraz kształtu defektów jest odtworzony przy małych czasach obserwacji (rys. 10 b), kiedy poprzeczny strumień ciepła jest nieznaczny; przy tym wpływ blisko położonych defektów jeden na drugi jest minimalny. Ta cecha badań termograficznych zawiera się w podstawie metody wczesnego wykrycia. Przy najlepszym czasie obserwacji (rys. 10 c) sygnał temperatury osiąga maksimum ΔT_m , jednak przy tym wzrasta intensywność dyfuzji ciepła w kierunkach poprzecznych. W tym momencie pięciokrotna zmiana wymiarów defektu w dół jednej ze współrzędnych prowadzi do pięciokrotnej zmiany ΔT_m , nawet jeśli powierzchnia poprzecznego przekroju defektu jest stała (porównanie sygnałów od Defektu 1 i 3). Przy większych czasach obserwacji dyfuzja ciepła może istotnie zniekształcać powierzchniową temperaturę „odbicia” ukrytych defektów. W materiałach anizotropowych kształt takich odbić może być dodatkowo zniekształcany z powodu różnic w termofizycznych charakterystykach materiału w kierunkach różnych współrzędnych (rys. 10 d); przy tym, na przykład, sygnał temperatury nad defektami kwadratowego kształtu przybiera kształt owalny, co związane jest z anizotropową przewodnością ciepła materiału.

6. Ujawnienie blisko położonych defektów

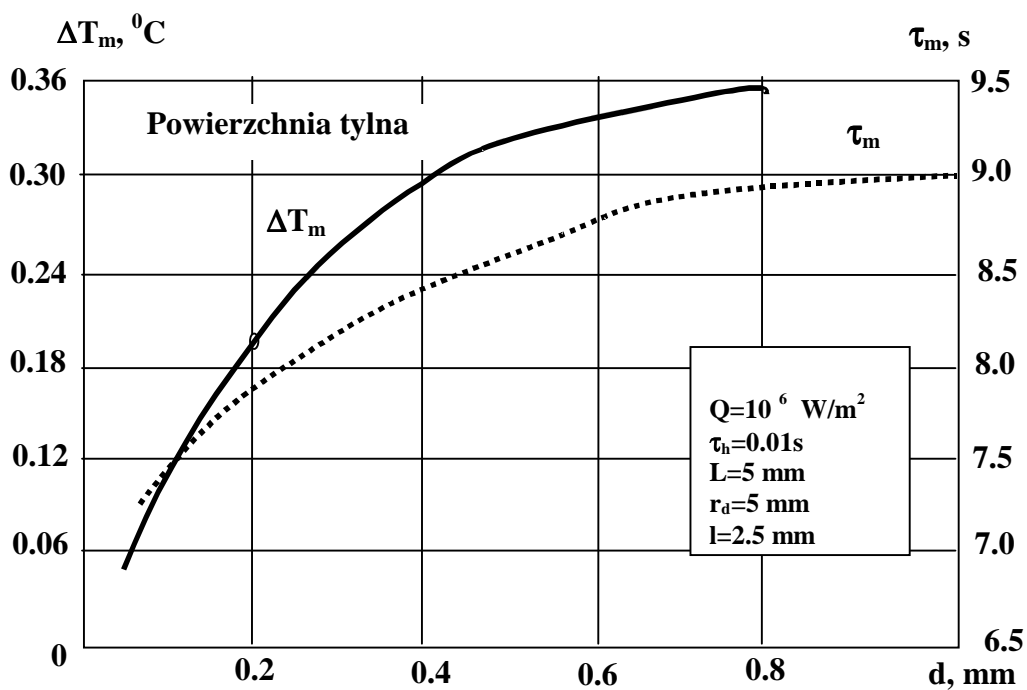
Problemy wpływu blisko położonych defektów na powierzchniowy rozkład temperatury należy rozpatrzyć w dwóch aspektach: 1) bliskie rozmieszczenie defektów w jednej płaszczyźnie powoduje, że przestrzenne rozwiązanie metody cieplnej jest analogicznej do tej, jaka występuje w optyce; 2) defekty, położone blisko na badanej powierzchni, mogą zasłaniać głębiej położone defekty. Oba zagadnienia są analizowane z wykorzystaniem numerycznych rozwiązań badań termograficznych.

6.1. Przestrzenne rozwiązanie badań termowizyjnych

Zagadnienie polega na zapewnieniu warunków badań, które pozwolą rozróżnić dwa defekty, położone blisko jeden drugiego w płaszczyźnie. Jak i w optyce, do tego przygotowuje się specjalne wzorce ze szczelinowymi defektami o różnej szerokości, położone w różnych odległościach jeden od drugiego. Oczywiście, że dla danego standardowego wzorca poprawić przestrzenną rozdzielczość można odpowiednim wyborem procedury i warunków badań.



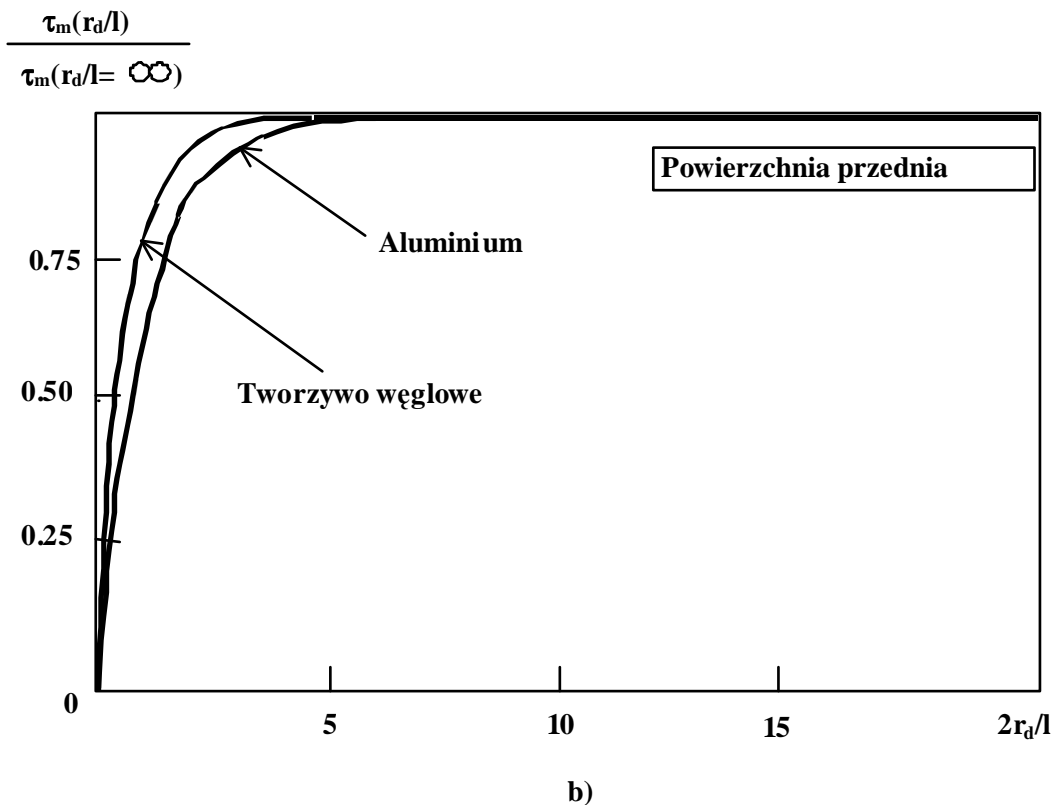
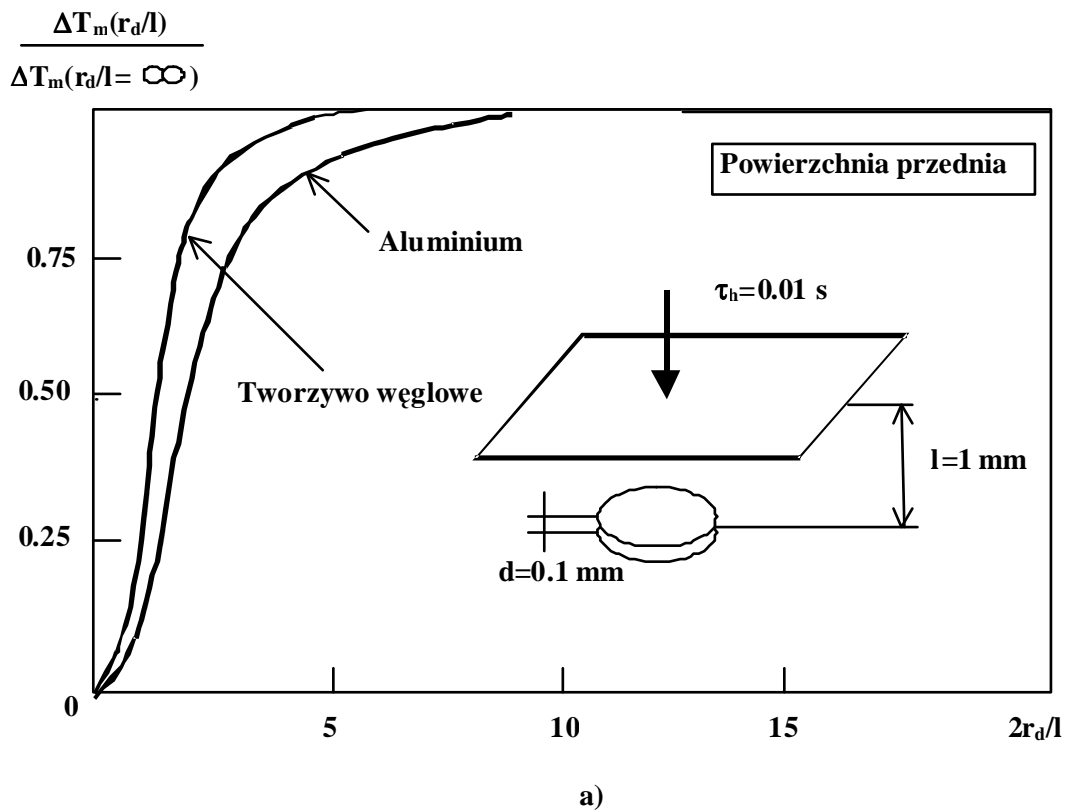
a)



b)

Rys.8. Najlepsze parametry wykrycia defektów w próbce z tworzywa węglowego o grubości 5 mm w zależności od głębokości ich położenia:

- a) powierzchnia przednia;
- b) powierzchnia tylna



Rys.9. Zależność najlepszych parametrów wykrycia w zależności od poprzecznych wymiarów defektów:

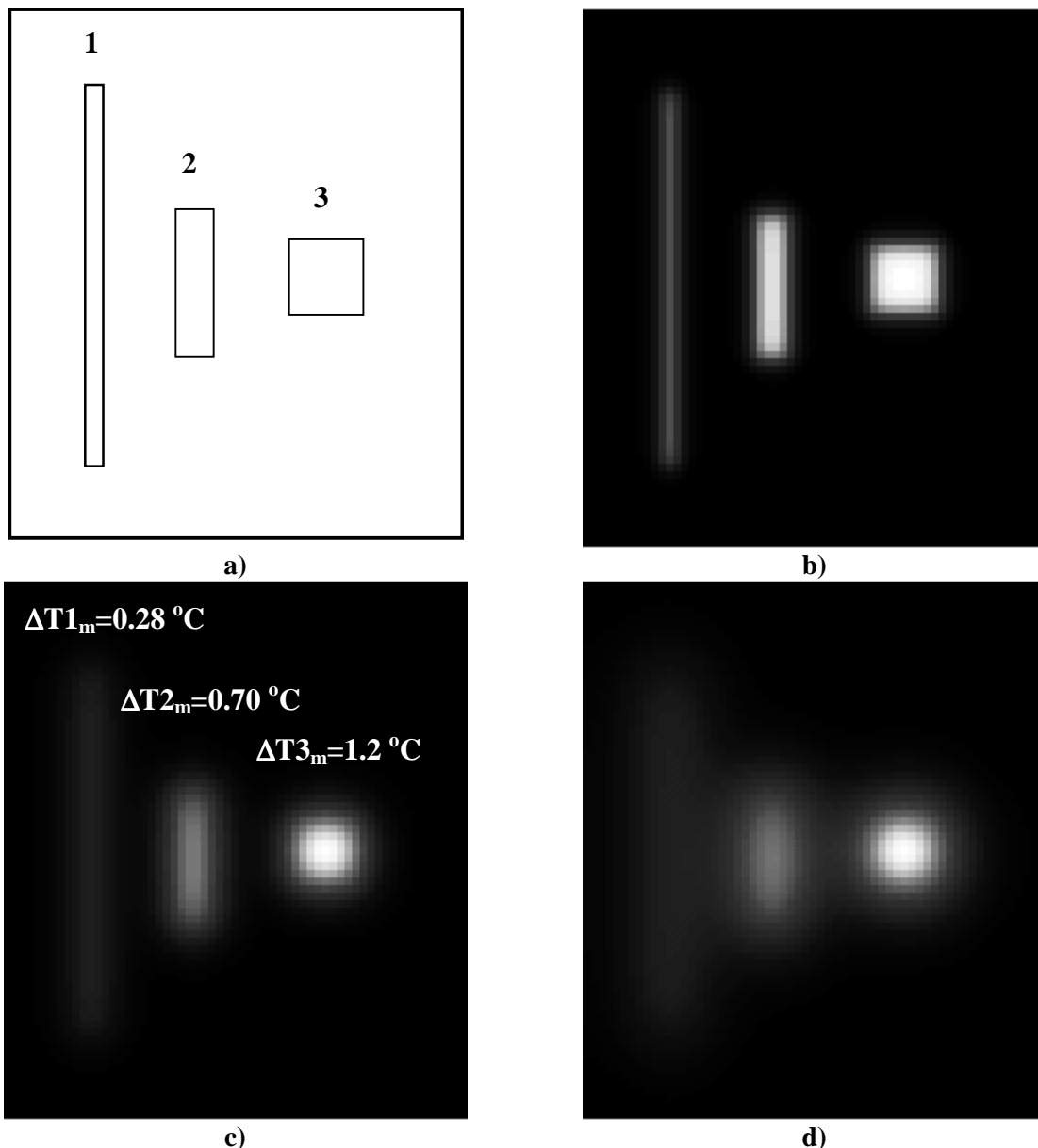
- a – zależność maksymalnego sygnału temperaturowego od r_d/l ;
- b – zależność najlepszego czasu obserwacji od r_d/l

Zagadnienie to jest przedstawione na przykładzie wzorców z tworzywa węglowego i aluminium, w których na głębokości 0.5 mm rozmieszczono 6 defektów (schemat rys. 11 a). Dla tworzywa węglowego rozpatrzmy dwa warianty: 1) izotropowy materiał ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = 0,64 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); 2) anizotropowy materiał ($\lambda_y = \lambda_z = 0,64 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $\lambda_x = 6,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). Jako miarę przestrzennej rozdzielczości wybrano stosunek sygnału temperatury ΔT_{roz} od dwóch blisko położonych defektów do maksymalnie możliwego sygnału ΔT , który ma miejsce dla pojedynczego defektu (patrz rys. 11 b). Przyjmijmy, że dwa blisko położone defekty będą wiarygodnie wykryte, jeśli $\Delta T_{roz} \geq 0.1 \Delta T$. Wówczas w izotropowym tworzywie węglowym dla czasu obserwacji 1 s przestrzenna rozdzielczość będzie lepsza od 0,5 mm, co odpowiada odległości między dwoma defektami z lewej strony (rys. 11 b). W anizotropowym tworzywie węglowym, dzięki możliwości dyfuzji ciepła w kierunku osi x przestrzenna rozdzielczość pogarsza się do 2,5 mm (rozstaw między prawymi krawędziami defektów na rys. 11 c). Odpowiednio, w aluminium dla czasu obserwacji 0,03 s przestrzenna rozdzielczość jest równa 0,5 mm (rys. 11 d). Podkreśmy jeszcze raz, że przestrzenna rozdzielczość metody cieplnej pogarsza się ze wzrostem czasu obserwacji i wzrostem głębokości położenia defektu. Najlepsze wyniki otrzymano przy wykorzystaniu metody wczesnego wykrycia.

Profile rys. 11 również pokazują, że kilka blisko położonych defektów podwyższa średnią temperaturę w strefie gdzie się znajdują, i przy niedostatecznej przestrzennej i/lub temperaturową rozdzielczości kamery termowizyjnej wiele defektów może być rejestrowanych jako jeden duży defekt.

6.2. Sytuacja „defekt pod defektem”

Analiza tego przypadku, po raz pierwszy wykonana została przez zespół A. Degiovanni [7], pokazała, że sumaryczny rozkład temperatury $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau)$ nad grupą małogabarytowych defektów może być przedstawiony jako superpozycja sygnałów od każdego defektu: $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau) = \sum \Delta T_i(x, y, \tau)$, tj. sumowanie wykonywane jest zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. Identyfikacja defektów niekiedy jest możliwa na drodze prostego wizualnego oglądania termogramów. Na przykład, w 1-ym przypadku, przedstawionym na rys. 12 a, położony głębiej mały defekt “prześwieca” przez większy. Tym nie mniej, defektometria w takich przypadkach jest utrudniona, dlatego przyrost sygnału wskutek istnienia głębiej położonego defektu może być na poziomie szumu i nie można odróżnić go od wariacji geometrii i termofizycznych charakterystyk zasadniczego defektu. Teoretycznie z badań termograficznych wynika, że sygnał od dwóch cienkich defektów, położonych jeden pod drugim, daje trochę inny obraz, niż sygnał od jednego defektu o podwójnej grubości, jednak eksperymentalnie możliwość rozdzielenia takich defektów nie była dotychczas wykazana. Co więcej, z praktycznego punktu widzenia, istnienie już jednego defektu może prowadzić do obróbki danych, dlatego nie potrzeba oceniać charakterystyk innych defektów. W 2-im przypadku, zobrazowanym na rys. 12 b, dwa defekty mogą być ocenione ilościowo, z wyłączeniem części większego defektu, przysłoniętej mniejszym.



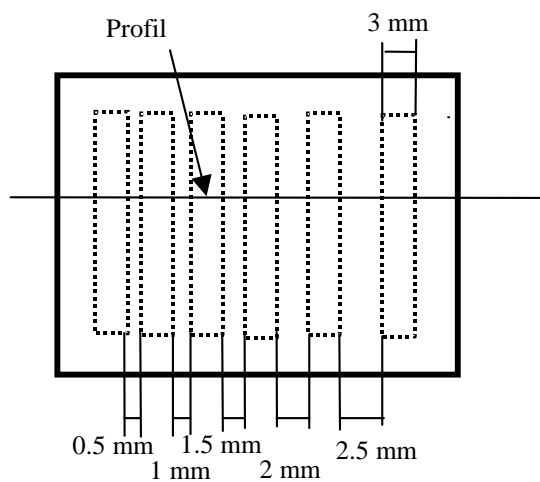
Rys.10. Wpływ konfiguracji defektów na rozkład temperatury powierzchni (wykrycie 50% korozyjnego ubytku w stalowej próbce o grubości 2 mm; $Q=10^6 \text{ W/m}^2$; $\tau_h = 0.01 \text{ s}$):
a – położenie defektów (*Defekt 1* – $1 \times 25 \text{ mm}^2$, *Defekt 2* – $2,5 \times 10 \text{ mm}^2$, *Defekt 3* – $5 \times 5 \text{ mm}^2$);
b – rozkład temperatury w 0.1 s;
c – 0.5 s (najlepsze warunki obserwacji do wykrycia);
d – 1 s

7. Wnioski

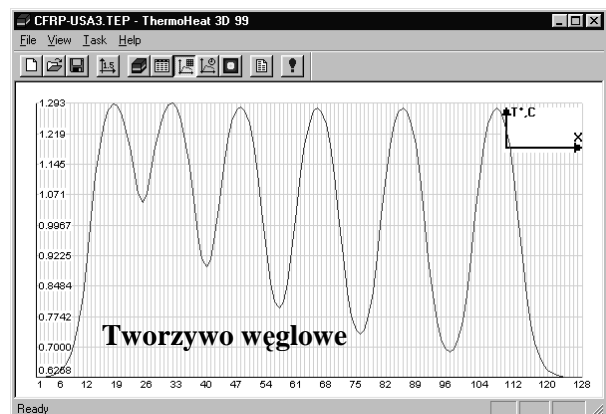
W artykule przedstawiono możliwości termograficznych metod w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych. Metody te pozwalają nie tylko wykryć defekty ale również określić ich wymiary geometryczne oraz ocenić ich położenie w wewnętrznej strukturze badanego obiektu. Zwiększ zakres aplikacji, w których można wykorzystać informacje o defektach uzyskane w trakcie badań metodami termograficznymi.

Ważną rolę w badaniach termograficznych odgrywają wzorce, czyli obiekty o określonych wymiarach, kształcie i strukturze, z wprowadzonymi sztucznie nieciągłościami

(defektami). Służą one do doboru metody, ustawienia i kontroli parametrów pracy aparatury, często kalibracji aparatury do badań, oceny jakości zobrazowania oraz możliwości oceny wymiarów nieciągłości obiektów.



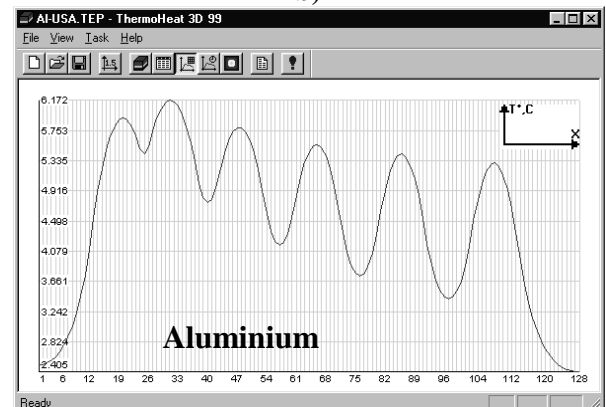
a)



b)



c)



d)

Rys.11. Przestrzenne wykrycie defektów

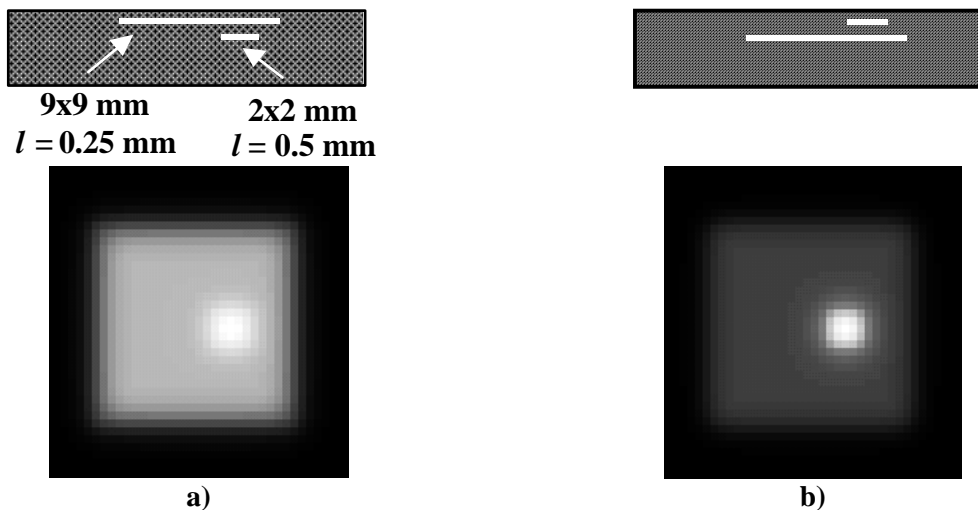
(poprzeczne wymiary defektów 3 x 25 mm, głębokość położenia 0.5 mm, grubość defektów 0.5 mm):

a - położenie defektów;

b – tworzywo węglowe ($L=5$ mm, $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = 0,64$ W/(m·K), $Q=10^5$ W/m², $\tau_h=1$ s);

c – tworzywo węglowe ($L=5$ mm, $\lambda_x = 6,4$ W/(m·K), $Q=10^5$ W/m², $\tau_h=1$ s);

d – aluminium ($L=2$ mm, $Q=10^6$ W/m², $\tau_h=0.03$ s)



Rys.12. Zakrycie jednego defektu drugim (tworzywo węglowe; $L=5 \text{ mm}$, $l=1 \text{ mm}$, $d=0.1 \text{ mm}$, $Q=10^5 \text{ W/m}^2$, $\tau_h=0.01 \text{ s}$, $\tau=0.5 \text{ s}$)

Literatura

- [1] Lewińska-Romicka A. „Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii” WN-T, Warszawa 2001
- [2] Świdorski W. "Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych" monografia habilitacyjna, Zielonka 2010
- [3] Maldague X. P. V. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley&Sons, Inc. New York,2001, p. 78
- [4] Świdorski W., Dragan K. „Multimode NDE approach for structure health assessment of composite elements in aerospace applications” Acta Physica Polonica A, Vol.117, No 5, 2010, pp. 877-882
- [5] Świdorski W. „Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych” PTU, Zeszyt 112, Nr 4/2009, str.75-92
- [6] Świdorski W., Vavilov V. „Wybrane problemy modelowania przewodzenia ciepła w strukturalnej diagnostyce termicznej materiałów kompozytowych” Biuletyn WAT, 2010 (w druku)
- [7] Bendada A., Maillet D., Degiovanni A. “Nondestructive transient thermal evaluation of laminated composites: discrimination between delaminations, thickness variations and multidelaminations” Proc. Eurotherm Seminar 27 “Quant. InfraRed Thermography QIRT’92”, July 7-9, 1992, Châtenay-Malabry, France, pp. 218-223.
- [8] Wiśniewski S. „Wymiana ciepła” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009
- [9] Multilayer-3™ User’s Manual, Innovation Inc., 1995, Tomsk, Rosja
- [10] User’s Manual “ThermoCalc™-6L”, 2005, Innovation Inc., Tomsk, Rosja