

dr hab. inż. Waldemar ŚWIDERSKI, prof. WITU*

prof. Vladimir VAVILOV**

* Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

**Tomsk Polytechnic University, Research Institute of Introscopy

WYBRANE PROBLEMY MODELOWANIA PRZEWODZENIA CIEPŁA W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Streszczenie: W pracy przeprowadzono porównanie analitycznych i numerycznych metod stosowanych przy badaniu wymiany ciepła w materiałach kompozytowych, zawierających ukryte defekty typu naruszenia jednolitości (ciągłości). Poddano ocenie wykorzystywane oprogramowanie komputerowe oraz przedstawiono przewidywane kierunki rozwoju modeli badań termicznych.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, termografia w podczerwieni, modelowanie analityczne i numeryczne

ANALYTICAL AND NUMERICAL MODELING OF THERMAL PROBLEMS IN NONDESTRUCTIVE TESTING OF COMPOSITE MATERIALS

Abstract: Analysis of using analytical and numerical methods in investigation of exchange of heat in composite materials including hidden defects of disarrangement or uniformity (continuity) is carried out in the paper. The computer software used in this modeling is evaluated and future directions of development of thermal investigation models are presented too.

Keywords: nondestructive testing, infrared thermography, analytical and numerical modeling

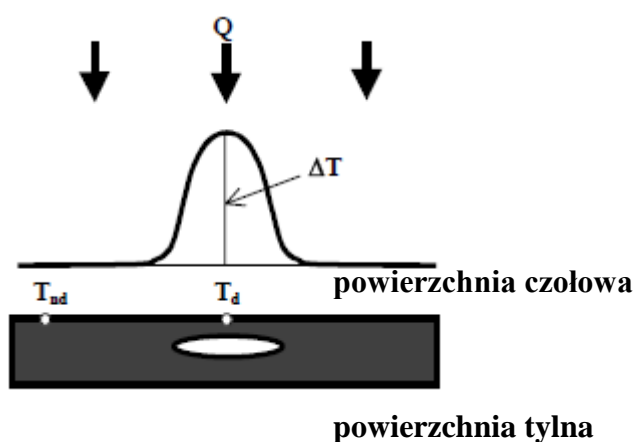
1. WPROWADZENIE

W badaniach nieniszczących z wykorzystaniem techniki termowizyjnej w celu realizacji zadania diagnostycznego polegającego na oszacowaniu rozmiarów i głębokości wady w badanym obiekcie niezbędne jest wykorzystanie odpowiedniego modelu matematycznego opisującego relacje pomiędzy czasowo-przestrzennym rozkładem temperatury a sygnałem diagnostycznym z uwzględnieniem odpowiednich cech badanego obiektu.

Analiza teoretyczna zagadnień badań termowizyjnych z wykorzystaniem wybranej dowolnej fizycznej metody związana jest z rozwiązaniem tak zwanych prostych i odwrotnych zagadnień fizyki matematycznej, przy czym zagadnienia proste odpowiadają modelowaniu, a odwrotne zagadnienia – obróbce danych eksperymentalnych. Analizę prostych i odwrotnych zagadnień można traktować w szerokim rozumieniu jako rozwiązanie równań, opisujących proces badania, dotyczący wybranych niewiadomych funkcji. W matematyce ta terminologia odnosi się z reguły do rozwiązania odpowiednich układów równań różniczkowych. Przy czym rozwiązanie zagadnienia prostego polega na określeniu pola temperatury w oparciu o założony model wymiany ciepła wraz z warunkami granicznymi, przyjętą geometrią i

znajomością charakterystyk termofizycznych oraz radiacyjnych. Zagadnienie odwrotne polega na identyfikacji parametrów termofizycznych oraz radiacyjnych na podstawie przyjętego do rozważań modelu wymiany ciepła, obserwacji temperatury w wybranych punktach badanego ciała oraz znajomości rozkładu powierzchniowej gęstości strumienia ciepła. Trudności związane z rozwiązaniem zagadnień odwrotnych związane są z ich złym uwarunkowaniem [1].

Niejednorodności struktury dowolnego rodzaju, włączając w to defekty, zniekształcają przepływ strumienia ciepła (Q) w badanym obiekcie i doprowadzają do miejscowych anomalii temperaturowych, które są przekazywane przez materiał obiektu na jego powierzchnię, gdzie są rejestrowane aparaturą do badań termowizyjnych w postaci sygnałów temperaturowych ΔT (rys.1). W rozpatrywanym modelu wtrącenia (defekty) są modelowane poprzez uwzględnienie warstwy materiału o innych właściwościach fizycznych z cieplnym oporem kontaktowym na styku. Porównywane są pola temperatury dla obiektu z wtrąceniami T_d i bez wtrąceń T_{nd} (które są traktowane jako pola referencyjne).



Rys.1. Rozpatrywany model badań termicznych materiału z wewnętrznym defektem

Klasyczne modele badań termicznych rozpatrują wewnętrzne defekty w charakterze warstw materiałów, w których wymiana ciepła realizowana jest na drodze czystej przewodności cieplnej. Jeżeli dla modelu ciała stałego z podpowierzchniowym defektem w postaci wtrącenia objętościowego materiału obcego rozpatrzmy problem kontaktowych warunków brzegowych. To prawdziwe jest że:

$$\lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} = \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}; \quad T_{nd} = T_d, \quad (1)$$

$$\text{lub} \quad \lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} = \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}; \quad T_d - T_{nd} = R_d \lambda_d \cdot \frac{\partial T_d}{\partial z} \quad (2)$$

gdzie:

λ - przewodność cieplna,

R – opór termiczny,

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

Przy zastosowaniu warunku (1) należy rozwiązać różniczkowe równanie przewodności cieplnej, zarówno w warstwach podstawowego materiału, jak również w defektach stanowiących wtrącenie objętościowe materiału obcego w zasadniczym materiale obiektu,

dlatego rozkład temperatury w kontrolowanym obiekcie będzie zależeć 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 cieplnego i kamera termowizyjna znajdują się po tej samej stronie badanej próbki materiału, a w dwustronnej po przeciwnych jej stronach. Jeśli pojemność cieplna defektu jest porównywalna z pojemnością cieplną kontrolowanego obiektu (dla dwustronnej procedury badań termalnych) lub warstwy materiału nad defektem (przy jednostronnej procedurze), to może ona istotnie wpływać na wielkość 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 także jest znaczny w przypadku rozległych niegłębokich rozwarstwień w materiałach kompozytowych. Pojemnościowy charakter defektu może być odpowiedzialny za tak zwaną inercję sygnału temperaturowego, kiedy strefa materiału badanej struktury nad słabo przewodzącym ciepło defektem (napętnionym gazem) w jednostronnej procedurze badań termograficznych staje się chłodniejsza niż strefy bez defektów, tj. $\Delta T(\tau) < 0$.

Jeśli pojemność cieplną defektu można pominąć, to jego zasadniczą termofizyczną charakterystyką jest opór termiczny $R_d = d / \lambda_d$ i defekt nazywany jest oporowym (warunki graniczne (2)). Przy tym równania różniczkowego przewodności cieplnej wewnątrz defektu nie rozwiązuje się.

W przypadku kontaktu dwóch chropowatych materiałów wykorzystywany jest termin «oporu przewodzenia ciepła» ponieważ przez analogię do prawa Ohma dla prądu elektrycznego można powiedzieć, że ciepło przepływające pod wpływem różnic temperatury z jednego materiału do drugiego doznaje oporu cieplnego (przepływu). 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 ich wzajemne przenikanie się. Analogiczne defekty, nazywane w literaturze angielskojęzycznej «całującymi się» (kissing), mogą występować również między warstwami kompozytowego materiału.

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

2. ODWROTNE I PROSTE ZAGADNIENIE BADAŃ TERMICZNYCH

Rozpatrzmy ogólny schemat badań termicznych: badany obiekt o nieznanach parametrach («czarna skrzynka») poddany jest stymulacji cieplnej na powierzchni (lub objętościowo). Podczas nieustalonego procesu wymiany ciepła jest rejestrowana temperatura odpowiedzi na podstawowych powierzchniach obiektu (czołowej i tylnej – rys.1). Funkcję sygnału wyjściowego kontrolowanego obiektu można zapisać jako:

$$U(x, y, \tau) = E(x, y, \tau)T(\tau, [L], [D], [Q]) + N_s(x, y, \tau) + N_d, \quad (3)$$

gdzie:

$E(x, y, \tau)$ - funkcja, charakteryzująca radiacyjne cechy kontrolowanego obiektu;

$T(x, y, \tau, [L], [D], [Q])$ - temperatura powierzchni, zależna od geometrii obiektu $[L]$, parametrów defektów $[D]$ i źródła nagrzewania $[Q]$;

$N_s(x, y, \tau)$ - funkcjonal addytywnych zaburzeń, powstających na skutek odbicia strumienia optycznego promieniowania źródła nagrzewającego (np. lampy grzewczej) i otoczenia od powierzchni kontrolowanego obiektu;

N_d - funkcjonal szumu, wnoszonego przez detektor i elektroniczny układ urządzenia rejestrującego zmiany pola temperatury.

W rozpatrywanym przypadku nie uwzględniamy szumów własnych systemu rejestracji na podczerwień dlatego człon N_d jest pomijany. Wówczas równanie (3) opisuje sytuację, w której strumień promieniowania, rejestrowany przez system na podczerwień, składa się z własnego promieniowania kontrolowanego obiektu i odbitego promieniowania otoczenia. Struktura wyrażenia (3) przedstawia wieloparametrowy charakter procedur badań termowizyjnych, w których czystemu sygnałowi temperaturowemu, niosącemu informację o defektach, towarzyszą radiacyjne zakłócenia dla wszystkich trzech zewnętrznych mechanizmów przekazywania ciepła (przewodności, konwekcji i promieniowania).

Parametry wewnętrznych defektów określane są w wyniku rozwiązania zagadnienia odwrotnego, to jest na drodze inwersji problemu (3):

$$\{D\} = \{l, d, h_x, h_y\} = \{U(x, y, \tau)\}^{-1}, \quad (4)$$

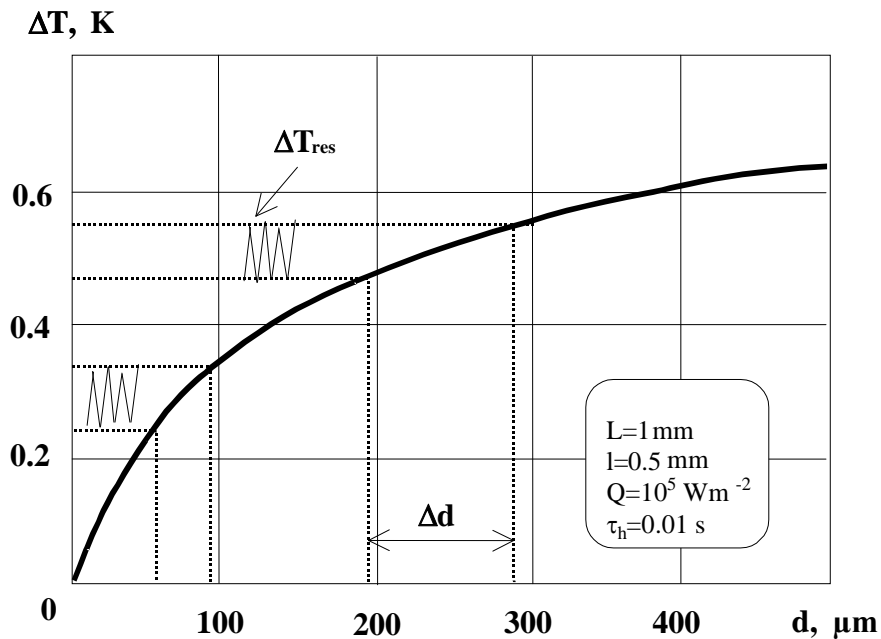
gdzie:

l - głębokość pod powierzchnią na której występuje defekt,

d - grubość defektu,

h_x, h_y - poprzeczne rozmiary defektu.

W ten sposób, sygnał temperaturowy U jako funkcja współrzędnych służy w charakterze wejściowej informacji dla rozwiązania odwrotnego zagadnienia badań termicznych defektów $\{D\}$ (operator zawiera wszystkie parametry defektów, które mamy określić) w materiałach. Dokładność określenia wyjściowych parametrów zależy od dokładności pomiaru parametrów wejściowych. Cechą charakterystyczną zagadnień odwrotnych jest to, że mały rozrzut danych wejściowych może prowadzić do dużego rozrzutu danych wyjściowych i do utraty stabilności wykorzystanego algorytmu. Na przykład, niektóra kombinacja wejściowych parametrów może doprowadzić do określenia głębokości położenia defektu, przewyższającej grubość samego wyrobu. Proszemu przedstawieniu rozwiązania zagadnienia odwrotnego może służyć wyznaczenie grubości defektu na podstawie wielkości sygnału ΔT . W tym celu za pomocą oprogramowania ThermoCalc-6L (Tabela 2) zamodelowano prostopadłościenną próbkę wykonaną z CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) o grubości $L = 1$ mm i defektem (prostopadłościennym – wypełnionym powietrzem) znajdującym się na głębokości 0,5 mm od czołowej powierzchni próbki nagrzewanej impulsem cieplnym o wartości $Q = 10^5$ W/m² w czasie $\tau_h = 0,01$ s. W trakcie modelowania zwiększano grubość defektu od 50 do 500 μm . Następnie wyznaczono przebieg zmian ΔT nad defektem w zależności od jego grubości d (rys. 2). Zakładając, że czułość pomiarów temperatury ogranicza jedynie rozdzielczość aparatury $\Delta T_{res} = 0,1$ °C. Z wykresu zależności $\Delta T(d)$ widać, że w zakresie małych grubości defektu dokładność pomiaru d osiąga 30 μm , spada przy większych grubościach do 100 μm . Fakt nasycenia zależności $\Delta T(d)$ wskazuje, że defekty znacznej grubości nie mogą być oceniane z dostateczną dokładnością.



Rys.2. Symulacyjny przebieg zmian ΔT nad defektem w funkcji jego grubości w próbce CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic).

Ponieważ wiadomo, że czas mierzy się z większą dokładnością, niż temperaturę, w badaniach termicznych często wykorzystuje się charakterystyki czasowe (fazowe).

W odróżnieniu do zagadnienia odwrotnego, związanego z interpretacją danych eksperymentalnych, określenie pola temperatury w oparciu o założony model wymiany ciepła wraz z dopełniającymi warunkami granicznymi, przyjętą geometrią i znajomością charakterystyk termofizycznych oraz radiacyjnych formułuje się tak zwane zagadnienie proste [1]. Ze wzrostem możliwości techniki komputerowej popularność rozwiązywania zagadnień prostych za pomocą takiego modelowania wzrasta. Jego wyższością jest:

- 1) ustalenie „czystych”, tj. niezaszumionych, wzajemnych powiązań między badanymi parametrami (przy braku zakłóceń),
- 2) oszczędność czasu, co szczególnie jest ważne przy optymalizacji procedur badań nieniszczących,
- 3) możliwość opracowania i sprawdzenia algorytmów rozwiązań zagadnień odwrotnych.
- 4) możliwość analizowania układów o złożonej geometrii i strukturze.

Krótką porównawczą charakterystykę zagadnień prostych i odwrotnych badań termalnych przedstawiono w Tabeli 1.

3. ANALIZA KLASYCZNYCH ROZWIĄZAŃ MODELOWANIA DEFECTÓW OBJĘTOŚCIOWYCH STRUKTURY CIAŁA STAŁEGO

Klasyczne rozwiązania problemu nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych dotyczą stosunkowo prostych kształtów ciał i nieskomplikowanych warunków brzegowych [8]. Oparte są o termofizyczne charakterystyki ciał i ich parametry geometryczne oraz parametry nagrzewania. Zazwyczaj są rozwiązaniami wzdłuż przestrzennej współrzędnej, skierowanej w głąb wyrobu. Zgodnie z teorią podobieństwa, wyżej wymienione parametry można grupować w kryterium bezwymiarowe i liczby podobieństwa, co pozwala analizować

rozwiązania w uogólnionej postaci. Najczęściej stosowanymi bezwymiarowymi liczbami podobieństwa są:

- liczba podobieństwa Biota $Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$ (L - grubość płytki), charakteryzująca zjawiska przewodzenia i przejmowania ciepła;
- liczba podobieństwa Fouriera $Fo = \frac{a \tau}{L^2}$, charakteryzująca uogólniony czas;
- liczba podobieństwa Priedwoditielewa (Предводителява) $Pd = \frac{\omega L^2}{a}$ (ω - cykliczna częstotliwość fal temperatury), charakteryzujące rozchodzenie się fal temperatury.

TABELA 1

Porównawcza charakterystyka prostych i odwrotnych zagadnień badań termalnych

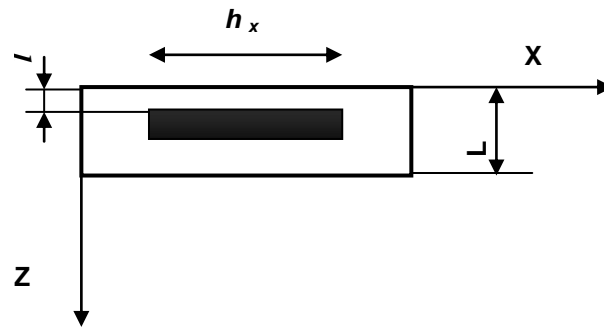
Zagadnienia proste	Zagadnienia odwrotne
<p><u>Teoretyczne dane wejściowe</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Parametry materiału będącego obiektem kontroli • Parametry wymiany ciepła (nagrzewania lub chłodzenia) • Poprzeczne wymiary defektu • Głębokość położenia defektu • Grubość defektu 	<p><u>Eksperymentalne dane wejściowe:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Parametry materiału będącego obiektem kontroli • Przestrzenny rozkład temperatury • Dynamika zmian temperatury
<p><u>Parametry wyjściowe:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Przestrzenny rozkład temperatury • Dynamika zmian temperatury • Optymalny czas rejestracji 	<p><u>Parametry wyjściowe:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Poprzeczne wymiary defektu • Głębokość położenia defektu • Grubość defektu
<p><u>Charakterystyka:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Dokładne rozwiązanie 	<p><u>Charakterystyka:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Niepoprawnie postawione zadanie, rozwiązanie którego sprowadza się do wyboru optymalnego wariantu z wielu możliwych

W typowych dla badań termicznych zagadnieniach nagrzewania (chłodzenia) ciał stałych bez defektów impulsami cieplnymi pole temperatury całkowicie określa ogół kryteriów $\{ Bi, Fo \}$ lub $\{ Bi, Fo, Pd \}$.

Występowanie ukrytych defektów komplikuje ogólną analizę. W charakterze odpowiednich bezwymiarowych parametrów defektów zaproponowano następujące:

- $h_x^* = \frac{h_x}{L} \left(\frac{\lambda_z}{\lambda_x} \right)^{1/2}$ (h_x - poprzeczny wymiar prostokątnego defektu w kierunku współrzędnej x) – uogólniony wymiar defektu w anizotropowym wyrobie w kierunku współrzędnej x ; (rys.3)

- $R_d^* = \frac{R_d}{L/\lambda_z}$ - względny opór cieplny defektu;
- $Fo_d = a\tau/l^2$ - liczba Fouriera, odzwierciedla bezwymiarową wartość czasu w obszarze z defektem (jednostronne badania termiczne);
- $Bi_d = l/(\lambda R_d)$ - modyfikacja liczby podobieństwa Biota zaproponowana przez Balageasa i inni w pracy [2], odzwierciedlająca stosunek oporu cieplnego warstwy zasadniczego materiału nad defektem i defektu (jednostronne badania termiczne).



Rys.3. Dwuwymiarowy model anizotropowego wyrobu z defektem, który jest nieskończenie długi wzdłuż współrzędnej Y.

Przy eksperymentalnym wyznaczeniu parametrów termicznych badanego obiektu (rozwiązanie zagadnienia odwrotnego) należy mieć na uwadze że:

- 1) czas narastania sygnału jest parametrem za pomocą którego można określić głębokość położenia defektu pod powierzchnią badanego obiektu;
- 2) w zależności od kształtów geometrycznych wyrobu i procedury badania, parametry mogą wystąpić w postaci liczb rzeczywistych lub zespolonych;
- 3) zagadnienia identyfikacji wieloparametrycznej rozwiązywane są na drodze minimalizacji funkcjonału, który określa całokształt różnic między eksperymentalnymi danymi, rozkładów przestrzennych zmieniających się w czasie, a odpowiadającymi im teoretycznymi rozwiązaniami; w takiej procedurze z bardzo wysoką dokładnością ocenia się te parametry wyrobu, które bardzo wpływają na mierzone (informacyjne) parametry;
- 4) jednowymiarowe klasyczne rozwiązanie pozwala ocenić głębokość położenia defektów i ich grubość, ale nie ich poprzeczne wymiary - oznacza to, że z punktu widzenia badań termicznych, podstawowym rozróżnieniem wielowymiarowych zagadnień od jednowymiarowych jest możliwość obliczenia dyfuzji ciepła w materiale kontrolowanego obiektu i dokonanie oceny defektów o skończonych wymiarach.

4. METODY NUMERYCZNE

Analityczne rozwiązania są pogładowe, ale mało efektywne w wielu przypadkach, prezentujących praktyczne zastosowania, szczególnie, przy modelowaniu defektów o skończonych wymiarach w materiałach anizotropowych i obiektach o złożonej konfiguracji.

Numeryczne metody stają się coraz bardziej rozpowszechnione, do czego przyczynia się bardzo szybki wzrost możliwości obliczeniowych współczesnych komputerów, który

umożliwia obecnie rozwiązywanie złożonych trójwymiarowych zagadnień badań termicznych w krótkim czasie.

Najczęściej stosowanymi metodami numerycznymi w rozwiązywaniu zagadnień prostych badań termicznych są metoda elementów skończonych i metoda różnic skończonych. Metoda elementów skończonych powstała w 50-tych latach XX-go wieku w mechanice konstrukcji i teorii sprężystości w związku z badaniami kosmicznymi. Obecnie to powszechna metoda numerycznego rozwiązania różniczkowych równań z wykorzystaniem np. metody ważonych odchyłek opartej o funkcjonał, spełniająca różniczkowe równanie (układ równań) i warunki brzegowe. Zastosowanie tej metody jest najbardziej racjonalne przy analizie obiektów o złożonym kształcie.

Prostsza metodą jest metoda różnic skończonych, która dobrze daje się programować i pozwala otrzymać poglądowe rozwiązania zagadnień badań termicznych. Idea tej metody polega na zastąpieniu pochodnych występujących w równaniach różniczkowych przez odpowiednie ilorazy różnicowe.

W zależności od geometrii analizowanego zagadnienia, równanie nieustalonego przewodzenia ciepła:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_w}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (5)$$

gdzie $a = \lambda / (C\rho)$ - dyfuzyjność cieplna, m^2/s

q_w - wydajność objętościowych źródeł ciepła

może być zapisane w prostokątnych, cylindrycznych lub sferycznych współrzędnych w postaci:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^N L_i T \quad (6)$$

gdzie $L_i = \partial^2 / \partial q_i^2$ - operator różniczkowy; N - ogranicznik sumacyjny.

Uogólnioną różnicową formą zapisu równania (6) jest:

$$\frac{1}{a} \frac{T^{p+1} - T^p}{\Delta \tau} = \Theta (\Lambda T)^{p+1} + (1 - \Theta) (\Lambda T)^p \quad (7)$$

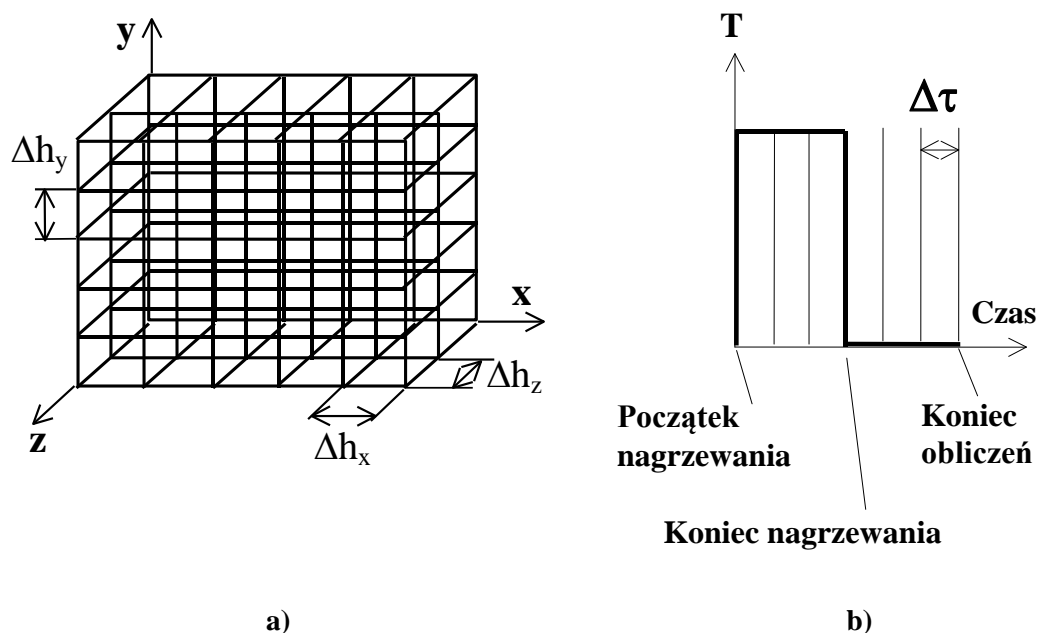
gdzie Θ - stała układu; $\Lambda = \sum_{i=1}^N \Lambda_i$ (Λ_i - dyskretny analog L_i).

Dla jednowymiarowego równania przewodzenia ciepła układ jawny ma postać:

$$T_i^{p+1} = \frac{a \Delta \tau}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^p + T_{i-1}^p) + [1 - 2 \frac{a \Delta \tau}{(\Delta x)^2}] T_i^p \quad (8)$$

Równanie (8) określa temperaturę i -go węzła T_i w momencie czasu $\tau + \Delta \tau$, dla znanych temperatur sąsiednich węzłów w poprzednim momencie czasu τ . Analogiczne obliczeniowe

układy mogą być łatwo otrzymane dla dwu- i trójwymiarowych przypadków. Ilustrację trójwymiarowego przestrzenno-czasowego numerycznego modelu z wykorzystaniem równomiernych siatek przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Przestrzenna (a) i czasowa (b) siatka przy numerycznym modelowaniu zagadnień badań termicznych

Jawny układ jest stabilny, jeśli $\frac{(\Delta x)^2}{a \Delta \tau} \geq 2$ (przypadek jednowymiarowy). Warunek

stałości ogranicza dobór kroku czasowego przy ustalonych krokach przestrzennych. Przy rozwiązaniu wielowymiarowego zagadnienia z powodu dużej liczby kroków czasowego może to doprowadzić do długotrwałych obliczeń. Wykorzystanie schematów jawnych jest poglądowe i łatwo programowalne, jednak w praktyce częściej wykorzystuje się niejawne układy, które są wolne od wyżej wspomnianej wady [3]. Przykład niejawnego układu do analizy dwuwymiarowego cylindrycznego modelu badań termicznych opisano w publikacji [4]. Przy praktycznych obliczeniach temperaturowych zagadnień mogą być wykorzystane przestrzenne siatki z kilkoma milionami węzłów.

Tak przestrzenna, jak i czasowa siatka może być nierównomierna: jak wiadomo, przestrzenna siatka powinna zagęszczać się w rejonie defektu, a krok czasowy siatki powinien być mniejszy od czasu gwałtownych zmian temperatury, które występują, na przykład, w momencie włączenia i wyłączenia impulsu nagrzewającego. Jednak nierównomierne siatki są bardziej trudne do programowania i ich niedokładności przy rozwiązywaniu zagadnienia badań termalnych nie są dostatecznie zbadane.

4.1. Komercyjne programy komputerowe do numerycznego rozwiązania zagadnień badań termicznych

4.1.1. Programy ogólnego zastosowania

Komercyjne pakiety programów komputerowych do numerycznego rozwiązania zagadnień wymiany ciepła zawierają graficzne środki do modelowania złożonych obiektów i

wizualizację wyników. Większość z będących na rynku komputerowych programów może być wykorzystana w badaniach termicznych.

Cieszące się powodzeniem interfejsy takich programów wykorzystują koncepcję i instrumenty komputerowego projektowania (CAD-Computer-Aided Design), za pomocą których można modelować dwu- i trójwymiarową geometrię obiektów również w badaniach termicznych. Składniki analizowanej geometrii można przenieść z jednego programu do drugiego, wykorzystując standardowe środki CAD. Za pomocą takich programów można automatycznie wymieniać dane lub mogą one być wbudowany w wyspecjalizowane środki projektowania CAD i modelownia CAM (Computer-Aided Modeling), które szeroko są stosowane, na przykład, w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Pozwala to istotnie skrócić czas przygotowania i przetwarzania danych, dlatego opracowane modele mogą później być wykorzystane przez różne programy.

W komercyjnych pakietach do numerycznego rozwiązania zagadnień wymiany ciepła wykorzystano możliwości optymalizowania geometrii modeli, co jest szczególnie ważne przy analizie złożonej geometrii. Gęstość przestrzenno-czasowej siatki może być zwiększona w tych miejscach lub w tym czasie, gdzie i kiedy oczekujemy zasadniczych termofizycznych zjawisk, wpływających na ujawnienie defektów. Na przykład, przy analizie nagrzewania obiektu znacznej grubości z podpowierzchniowym defektem, należy mieć gęstą siatkę w warstwie nad defektem i rzadką pod nim, a krok w czasie powinien być mały w okresie ujawnienia defektu i odpowiednio duży w końcu procesu cieplnego. Pozwala to zmniejszyć obciążenie komputera i czas obliczeń bez straty dokładności. Specjalny kształt elementów siatki można wykorzystać do modelowania wyrobów o złożonym kształcie i powierzchniowych nierównościach. Anizotropię materiałów i zależność charakterystyk termofizycznych od czasu, można także łatwo modelować tymi pakietami obliczeniowymi. Dostosowane schematy rozwiązań mogą być jawne i niejawne z ręcznymi lub automatycznymi zmianami kroku w czasie, a także wykorzystujące metodę różnic skończonych lub metodę elementów skończonych.

4.1.2. Programy specjalistyczne

Specjalistyczne programy do rozwiązania zagadnień badań termalnych opracowano na Wydziale Aeronautyki NASA (USA), Wydziale Aeronautyki ONERA (Francja), Federalnym Instytucie Badań Materiałów BAM (Niemcy), Instytucie Technologii Konstrukcji ITC (Włochy), Innovation Inc. (Rosja) i szeregu innych instytucji. W Tabeli 2 przedstawiono specjalistyczne programy opracowane przez Innovation Inc.

TABELA 2
Specjalistyczne komputerowe programy „Innovation Inc.” do rozwiązania zagadnień badań termalnych

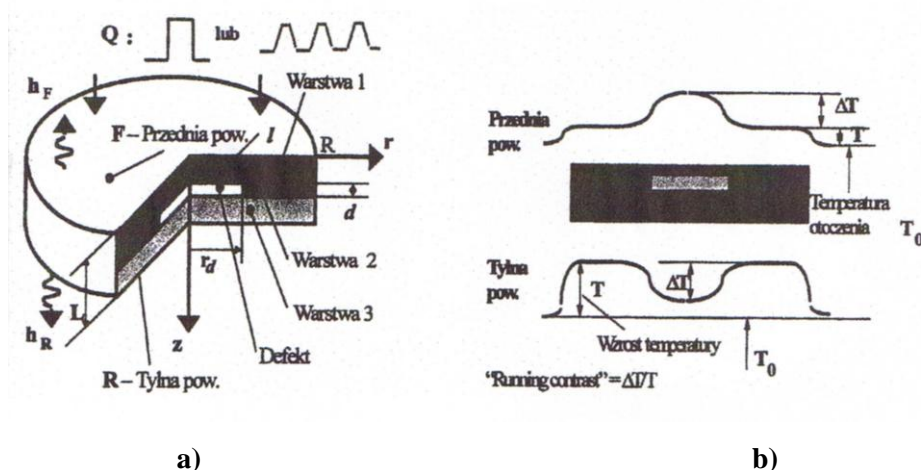
Program	Charakterystyka
Multilayer-3	Analityczne rozwiązanie jednowymiarowego zagadnienia nagrzewania nieadiabaticznej trójwarstwowej płyty prostokątnym impulsem.
Multilayer-3D	Numeryczne rozwiązanie jednowymiarowego zagadnienia nagrzewania nieadiabaticznej wielowarstwowej płyty przy dowolnej funkcji nagrzewania i obecności fazowego przesunięcia w jednej z wewnętrznych warstw.
ThermoCalc-2D	Numeryczne rozwiązanie zagadnienia nagrzewania trójwarstwowego obiektu o kształcie dysku ze współśrodkowym defektem w postaci dysku (dwuwymiarowy model cylindryczny). Nagrzewanie prostokątnym i sinusoidalnym impulsem. Fale cieplne.

ThermoCalc-6L	<p>Numeryczne rozwiązanie zagadnienia nagrzewania trójwarstwowego prostopadłościanu z 9-ma defektami w formie prostopadłościanów.</p> <p>Nagrzewanie prostokątnym i sinusoidalnym impulsem.</p> <p>Zadanie dowolnej funkcji nagrzewania.</p> <p>Wszystkie parametry modelu są dowolną funkcją zmieniającą się w czasie.</p> <p>Wykorzystanie przestrzennej maski nagrzewania (sztucznej i eksperymentalnej).</p> <p>Stworzenie logiczności zobrazowań w podczerwieni.</p>
---------------	---

4.2. Zgodność wyników rozwiązań numerycznych

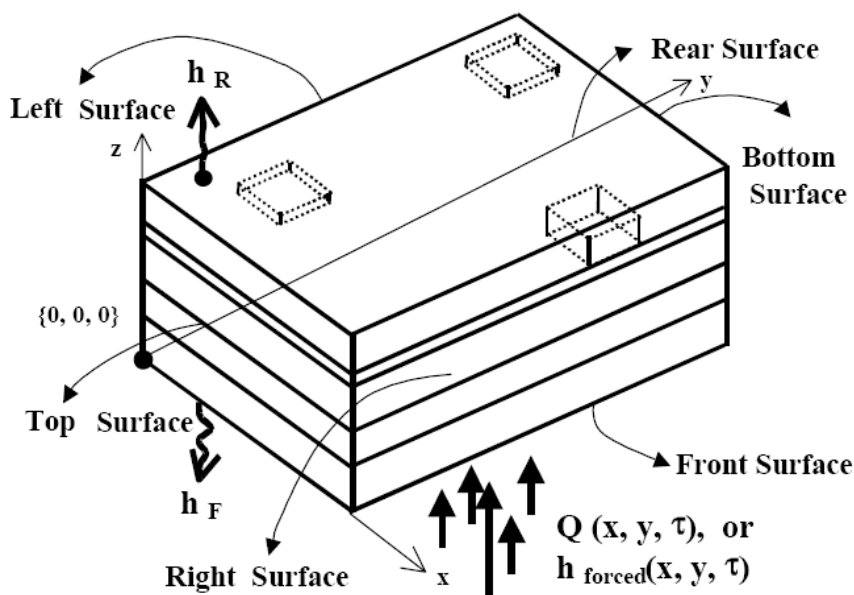
Zgodność wyników obliczeń za pomocą numerycznych metod ocenia odpowiednie rozwiązanie analityczne. Wybór parametrów siatki polega na tym, że dokładność numerycznych metod wzrasta ze zmniejszeniem kroków przestrzenno-czasowej siatki. Tym niemniej, w strefie wewnętrznych defektów kontrola dokładności numerycznych rozwiązań nie jest prosta z powodu braku odpowiednich analitycznych rozwiązań. Zaś nadmierne zmniejszenie kroków powoduje jednak zwiększenie czasu obliczeń, który przy przyjętym zbyt małym kroku może być bardzo długi mimo zastosowania komputera o dużej mocy obliczeniowej.

Autorzy przeanalizowali dokładność dwu- i trójwymiarowych numerycznych algorytmów, zrealizowanych odpowiednio w programach komputerowych ThermoCalc-2D (Tabela 2) [5] i ThermoCalc-6L (Tabela 2) [6]. Program ThermoCalc-2D modeluje dyskowe defekty w trójwarstwowym dyskowym obiekcie (rys.5) przy nieograniczonym powiększeniu średnicy defektu, dwuwymiarowy cylindryczny model (niekiedy nazywany «dysk w dysku») przechodzi w jednowymiarowy trójwarstwowy model. Rekomendowane wartości kroków równomiernej przestrzenno-czasowej siatki przedstawiono w Tabeli 3 dla typowych sygnałów badań termicznych.



**Rys.5. Model obiektu z defektem program ThermoCalc-2D – a)
Profile temperaturowe na powierzchni czołowej (F) i tylnej (R) – b)**

Program ThermoCalc-6L pozwala na modelowanie 6 warstwowej równoległościenniej struktury materiału z symulowanymi dziewięcioma defektami (rys.6). Wszystkie defekty symulowane są jako równoległościanny, których powierzchnie są odpowiednio równoległe do powierzchni granicznych warstw oraz powierzchni zewnętrznych próbki materiału. Defekty mogą znajdować się w głębi warstwy bądź występować na styku z wewnętrzną powierzchnią graniczną. Program ten uwzględnia również defekty tzw. „pojemnościowe” [7].



Rys.6. Model 3D próbki kompozytu z podpowierzchniowymi defektami – program ThermoCalc-6L

Wartości w Tabeli 3 i 4 podano przy następujących parametrach:

a) defektu:

- głębokość położenia $h = 10\% L$ (gdzie L – grubość materiału);
- grubość $d = 10\% L$.

b) materiałów:

- aluminium (Al) - $\lambda = 210W/(m \cdot K)$, $\alpha = 8.6 \cdot 10^{-5} m^2/s$;
- stal - $\lambda = 32W/m \cdot K$, $\alpha = 7.3 \cdot 10^{-6} m^2/s$;
- CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) - $\lambda = 0.64W/(m \cdot K)$, $\alpha = 5.2 \cdot 10^{-7} m^2/s$;
- defekt powietrzny - $\lambda = 0.07W/m \cdot K$, $\alpha = 5.8 \cdot 10^{-5} m^2/s$

współczynniki przejmowania ciepła na powierzchni czołowej i tylnej wynosiły $\alpha = 10W/m^2$.

TABELA 3

Zalecane parametry siatki przestrzenno-czasowej przy rozwiązywaniu zagadnień termalnych badań nieniszczących za pomocą programu ThermoCalc-2D.

Grubość materiału, mm	Warunki ogrzewania	Zalecane parametry siatki przestrzenno-czasowej (siatka przestrzenna RxZ, R-promień dysku; krok czasowy, s; zgodność wyników, %)		
		Al	Stal	CFRP
1	$\tau_h = 0.01s$, $Q = 10^5 W/m^2$	100x200 0.001 (1.6)	50x300 0.01 (3)	50x200 0.005 (2.6)
	$\tau_h = 100s$, $Q = 10^4 W/m^2$	50x100 0.01 (0.4)	50x200 0.01 (0.5)	50x200 0.05 (3.6)

50	$\tau_h = 0.01s$, $Q = 10^5 W/m^2$	100x800 0.01 (5)	50x2000 0.01 (10)	100x2000 0.01 (9)
	$\tau_h = 100s$, $Q = 10^4 W/m^2$	50x800 1 (1.5)	50x300 5 (2)	50x800 5 (1.5)

TABELA 4

Zalecane parametry siatki przestrzenno-czasowej przy rozwiązywaniu zagadnień termalnych badań nieniszczących za pomocą programu ThermoCalc-6L.

Grubość materiału, mm	Warunki ogrzewania	Zalecane parametry siatki przestrzenno-czasowej (siatka przestrzenna XxYxZ; krok czasowy, s; zgodność wyników, %)		
		Al	Stal	CFRP
1	$\tau_h = 0.01s$, $Q = 10^5 W/m^2$	25x25x200 0.001 (3.9)	50x50x200 0.0025 (7)	20x20x200 0.005 (1.1)
	$\tau_h = 100s$, $Q = 10^4 W/m^2$	30x30x100 0.01 (9.8)	50x50x200 0.01 (7)	20x20x200 0.05 (1.2)
50	$\tau_h = 0.01s$, $Q = 10^5 W/m^2$	25x25x100 0.01 (8.4)	20x20x200 0.01 (2.7)	20x20x200 0.01 (0.8)
	$\tau_h = 100s$, $Q = 10^4 W/m^2$	25x25x200 1 (4.6)	25x25x200 5 (2.1)	20x20x200 5 (0.6)

Wielkości niezgodności, stanowiące w większości przypadków od 0,5 do 5%, przedstawione są w Tabelach 3 i 4 dla temperatur w strefie z defektami (patrz dane w nawiasach). W celu porównania zgodności wyników wybrano analityczne rozwiązanie jednowymiarowego trójwarstwowego zagadnienia badań termicznych, zrealizowanego za pomocą programu Multilayer-3 (Tabela 2). W tabeli 3 i 4 podano wyrażoną w [%] zgodność wyników otrzymanych za pomocą programu Multilayer-3 i programów ThermoCalc-6L i ThermoCalc-2D. Należy zauważyć, że największe niezgodności pojawiają się w sytuacjach, kiedy nieprzewodzące ciepła lub znacznej grubości ciało nagrzewane jest krótkimi impulsami cieplnymi. Jednak takie sytuacje nie są charakterystyczne w praktyce, ponieważ w takich przypadkach zwykle przyjmuje się nagrzewanie o małej mocy i długim czasie trwania.

5. PRZEWIDYWANE KIERUNKI ROZWOJU MODELI BADAŃ TERMICZNYCH

Wszystkie modele badań termicznych, przeanalizowane powyżej, można nazwać klasycznymi w tym sensie, że cechy przestrzennego rozkładu i czasowego rozwoju sygnału ΔT w zależności od parametrów tego modelu są zbadane wystarczająco dobrze, i wiele z nich

praktycznie wykorzystuje się w algorytmach defektometrii. Dalszy rozwój modeli badań termicznych związane jest ze:

- 1) specyficznymi zagadnieniami, w których funkcjonują nowe parametry wykrycia;
- 2) analizą subtelnych efektów, które nie odgrywają rozstrzygającej roli dla wykrywania, ale związane są z fizycznym mechanizmem badań (na przykład, anizotropia kompozytów doprowadza do zniekształcenia kształtu ΔT na powierzchni);
- 3) możliwością modyfikacji termofizycznych charakterystyk zasadniczego materiału w standardowych wzorcach przy wprowadzeniu do nich sztucznych defektów;
- 4) połączeniem czysto cieplnych efektów w kontrolowanym obiekcie z cechami rejestracji termograficznej w podczerwieni temperatury (na przykład, związek kąta widzenia systemu podczerwieni ze współczynnikiem promieniowania) itp.

Dla obliczenia wyżej przedstawionych czynników w ostatnim czasie opracowano tak zwane zaawansowane modele badań termicznych, w których analizuje się następujące zjawiska:

- dowolne zależności gęstości strumienia nagrzewającego od czasu i współrzędnych $Q(x, y, z, \tau)$;
- anizotropii termofizycznych charakterystyk obiektu badań i ich zmian w czasie;
- przemiany fazowe i ubytek masy w kontrolowanym obiekcie (wyparowanie wody, topnienie lodu);
- chropowatość nagrzewanej powierzchni;
- konwekcyjne i radiacyjne komponenty wymiany ciepła, które zmieniają się w czasie;
- zależność współczynnika promieniowania powierzchni obiektu od jego stanu i kąta wizowania kamery termowizyjnej.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono i poddano analizie analityczne i numeryczne modelowanie zagadnień nieniszczących badań termicznych materiałów kompozytowych stosowane przy określeniu warunków badań z zastosowaniem metod termografii w podczerwieni. Modelowanie umożliwia zarówno ocenę możliwości wykrywania defektów w badanej próbce, wybór najskuteczniejszej metody jak również pozwala określić potrzebne parametry i rodzaj źródła stymulacji cieplnej badanej próbki. Modelowanie znacznie skraca czas wykonywania badań eksperymentalnych i pozwala optymalizować stosowaną w konkretnych przypadkach metodę badawczą. Stosowane metody modelowania muszą uwzględniać dwie podstawowe procedury stosowane w badaniach z zastosowaniem kamery termowizyjnej: jednostronną w której kamera rejestruje obraz powierzchni poddanej stymulacji cieplnej i dwustronną w której kamera rejestruje powierzchnię przeciwną. Obecnie najczęściej stosowane są metody modelowania numerycznego ze względu na coraz większe możliwości obliczeniowe współczesnych komputerów. Trudno wskazać które z programów numerycznych, czy komercyjne programy komputerowe ogólnego zastosowania do rozwiązywania zagadnień badań termicznych czy programy opracowywane dla potrzeb badań nieniszczących dają wyniki bardziej zgodne z badaniami eksperymentalnymi. W tym celu należy przeprowadzić odpowiednią analizę zgodności obliczeniowych wyników i porównać ją z badaniami eksperymentalnymi. Tematyka ta będzie przedmiotem dalszych prac analityczno-eksperymentalnych.

Literatura

- [1] Zmywaczyk J. "Estymacja parametrów termofizycznych ciał stałych z wykorzystaniem wybranych metod optymalizacji" WAT, Warszawa 2006
- [2] Balageas D.L., Deom A.A., Boscher "Characterization and nondestructive testing of carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method", Materials Evaluation, 45, pp 461-465, 1987
- [3] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.:Высшая школа, 604 с, 1967
- [4] Вавилов В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. М., Радио и связь, 162 с, 1984
- [5] User's Manual "ThermoCalc™-2D", Innovation Inc., Tomsk, Rosja, 1998
- [6] User's Manual "ThermoCalc™-6L", Innovation Inc., Tomsk, Rosja, 2005
- [7] W. Świdorski „Modelowanie badań nieniszczących w podczerwieni wielowarstwowych materiałów kompozytowych” PTU – wydanie specjalne, Materiały konferencyjne, str. 183-195, Rynia 2007
- [8] S. Wiśniewski „Wymiana ciepła” PWN, Warszawa 1988