



ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ULTRADŹWIĘKOWEJ TERMOGRAFII W PODCZERWIENI W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH WIELOWARSTWOWYCH KOMPOZYTÓW ARAMIDOWYCH

ANALYSIS OF POSSIBILITIES FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF MULTI-LAYER ARAMIDE COMPOSITES BY ULTRASONIC IR THERMOGRAPHY

Waldemar ŚWIDERSKI, Monika PRACHT
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
Military Institute of Armament Technology

Vladimir VAVILOV
Politechnika w Tomsku, Rosja
Tomsk University of Technology, Russia

Streszczenie: W artykule przedstawiono opis matematyczny algorytmu wymuszenia cieplnego generowanego źródłem ultradźwiękowym, zastosowanego w nieniszczących badaniach metodą aktywnej termografii w podczerwieni. Algorytm został użyty w numerycznym modelowaniu przepływu ciepła opracowanym programie ThermoSon przeznaczonym do rozwiązywania zagadnień badań termicznych. Przeprowadzono symulacje numeryczne wykrywania defektów w wielowarstwowym kompozycie aramidowym, stosując ultradźwiękowe źródło wymuszenia cieplnego oraz wstępnie oceniono możliwość tej metody.

Słowa kluczowe: ultradźwięki, badania nieniszczące, termografia w podczerwieni, kompozyt wielowarstwowy, aramid

1. Wstęp

Materiały tkane (m.in. z włókien aramidowych) połączone tworzywem sztucznym, jako spoiwem, tworzą wielowarstwowe materiały kompozytowe. Stosowane są one do osobistych osłon balistycznych (kamizelki i hełmy kuloodłamko odporne), opancerzenia pojazdów samochodowych oraz obiektów stałych. Tego rodzaju materiały charakteryzują się tym, że są lekkie, odporne na korozję, dają się łatwo formować, co umożliwia dopasowanie ich do po-

Abstract: The paper includes a mathematical algorithm describing a heat extortion process generated by an ultrasonic source used in non-destructive testing method of active infrared thermography. This algorithm has been used at numerical modelling of heat propagation in developed ThermoSon program designed to solve problems of thermal testing. There are carried out numerical simulations for detection of defects in multi-layer aramide composite that was heated by an ultrasonic source and a preliminary evaluation of this method usability.

Keywords: ultrasonic, non-destructive testing, infrared thermography, multi-layered composite, aramide

1. Introduction

The woven fabrics (e.g. from aramide fibres) can be joined by a plastic material as a binder to create multilayer composites. They are used for personal ballistic protections (bullet and fragment proof vests and helmets), vehicle armours and stationary facilities. Such type of material is characterised by a low weight, corrosion resistance and great adaptability for shaping what makes it fit well to a surface that has to be protected.

wierzchni, którą mają chronić.

Wadami, jakie mogą występować w tego rodzaju materiałach kompozytowych są:

- niedokładności w sklejeniu warstw kompozytu oraz rozwarstwienia,
- delaminacje powstające w trakcie uderzeń spowodowanych uderzeniami, odłamkami oraz ostrzałem pociskami.

Lekkie osłony balistyczne mają najczęściej grubość od kilku do kilkunastu milimetrów. Ponadto wykonane są z materiałów, których parametry termofizyczne różnią się zdecydowanie od parametrów, jakie mają potencjalne defekty, które mogą występować w tych materiałach. Dlatego też badania nieniszczące metodami termograficznymi mogą być skuteczne w wykrywaniu defektów.

Procedury badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni można podzielić na procedury pasywne i aktywne. Do badań nieniszczących materiałów kompozytowych używane są z reguły metody termografii aktywnej. W procedurach aktywnych stosuje się źródło cieplnej 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 [1, 2].

W pracy [3] przeprowadzono analizę możliwości wykrywania defektów w wielowarstwowym kompozycie aramidowym, stosując metodę termografii w podczerwieni z zewnętrznym źródłem nagrzewania, symulując nagrzewanie lampą grzewczą. Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą programu ThermoCalcTM-30L. Otrzymane wyniki wskazują, że tą metodą jest możliwe wykrywanie cienkich defektów wypełnionych powietrzem, znajdujących się nie głębiej niż 3 mm pod powierzchnią kompozytu. We wnioskach tej pracy stwierdzono, że stosując ultradźwiękowe źródło nagrzewania istnieje możliwość wykrywania głębiej położonych pod powierzchnią cienkich defektów. Uzyskane wyniki przedstawione są w niniejszym artykule.

Ideę ultradźwiękowej termografii w podczerwieni przedstawiono na rys.1. Jest ona jedną z procedur badań cieplnych, określaną terminem termografii wibracyjnej (vibrothermogra-

Following defects may exist in such type of composite materials:

- Delaminations and inaccuracies in bonding layers of composite
- Delaminations originating from mechanical shocks caused by striking, fragments or hitting of bullets.

The light ballistic screens usually have the thickness between a few and a dozen or so millimetres. Moreover they are made of materials which thermo-physical characteristics substantially differ from the characteristics of potential defects that may exist in these materials. For this reason the non-destructive tests by thermography methods may prove to be effective in detection of defects.

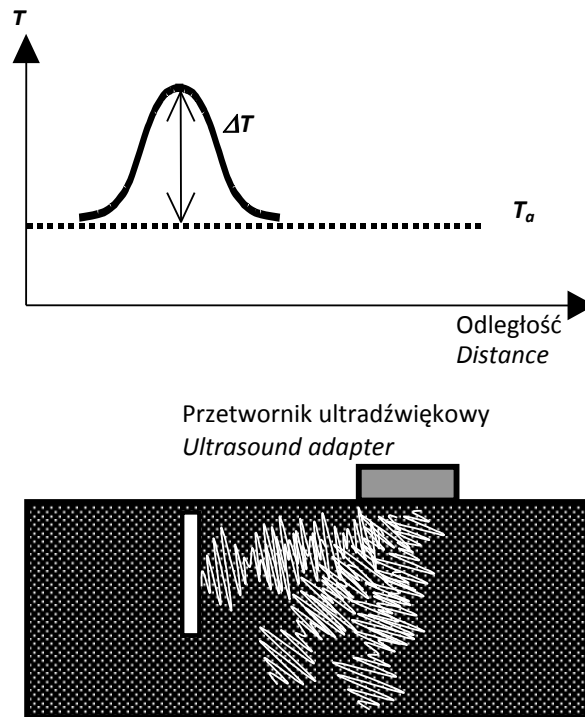
The non-destructive testing procedures of infrared thermography may be divided on passive and active ones. For non-destructive testing of composite materials the methods of active thermography are usually used. Active procedures use a source for thermal stimulation (heating or cooling) of an object. Defects of materials possessing a uniform temperature distribution, equal to ambient parts of material, before initiation of testing do not generate any useful temperature signals and for this reason the heating or cooling of the object in the whole or in a part is needed [1, 2].

In the work [3] an analysis was carried out on possibilities of detecting defects in multilayer aramide composite by using infrared thermography method exploiting an external heating source and simulating the heating by a lamp. Numerical calculations were carried out by using ThermoCalcTM-30L computer code. The received results indicate that this method is suitable for detection of thin defects filled with air placed up to 3 mm below the surface of the composite. Conclusions of that work have stated that using an ultrasound heating source may increase the depth of thin defect detection. The obtained results are presented in the current paper.

A concept of ultrasound infrared thermography is presented in figure 1. It is a procedure of thermal tests described as vibration thermography (vibrothermography)

phy) przeznaczonych do oceny ukrytych niejednorodności strukturalnych materiału na podstawie powierzchniowych pól temperaturowych, powstających podczas cyklicznych mechanicznych obciążeń. Przyczyną podwyższenia temperatury jest wewnętrzne tarcie ścianek defektu podczas ich pobudzenia falami mechanicznymi, w tym przypadku ultradźwiękami (rys 1).

and designated for the evaluation of hidden structural non-homogeneities by using surface temperature fields appearing at cyclic mechanical loads. The reason for temperature increase is the internal friction of defect's walls when they are stimulated by mechanical waves and in this case by ultrasounds, what is presented in figure 1.



Rys.1. Ilustracja idei ultradźwiękowej termografii w podczerwieni
Figure 1. Outline of ultrasound infrared thermography concept

2. Opis matematyczny

Teoretyczne modelowanie wymaga rozwiązania dwóch głównych zagadnień:

- rozchodzenia się fal ultradźwiękowych i obliczenie energii cieplnej generowanej przez defekty w trójwymiarowym modelu (3D),
- rozchodzenia się, w trójwymiarowym modelu (3D), ciepła generowanego przez źródło (defekt), którego parametry określone są przez rozwiązanie pierwszego zagadnienia.

2.1. Rozchodzenie się fal ultradźwiękowych w trójwymiarowym modelu

Wprowadzając w kartezjańskim układzie współrzędnych w dowolnym punkcie ciała stałego, traktowanego jako równoległoscian elementarny o nieskończenie małych krawędziach,

2. Mathematical description

Theoretical modelling concerns a solution for two main issues:

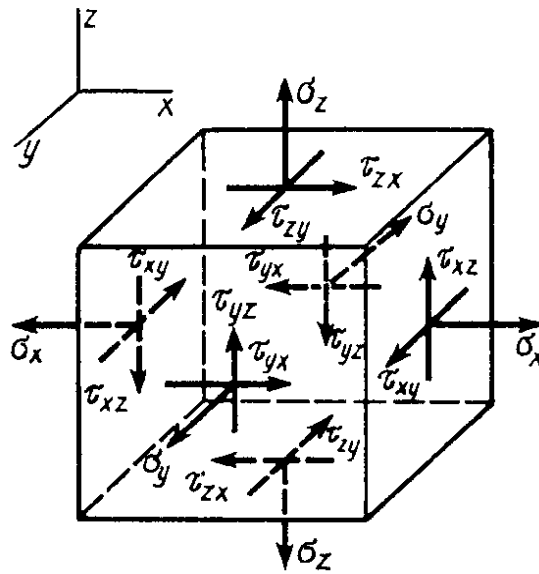
- Propagation of ultrasound waves and calculation of thermal energy generated by defects in three dimensional model (3D),
- Propagation of heat in three dimensional model (3D) for the heat generated by a source (defect) with characteristics which are specified by a solution of the first issue.

2.1. Propagation of ultrasound waves in three dimensional model

Introducing in the Cartesian system of coordinates in any point of a solid body, that is treated as a basic parallelepiped with infinitely small edges and with existing stress,

w którym występuje stan naprężenia, przekroje prostopadłe do osi współrzędnych, dowolnie zorientowanego prostokątnego układu współrzędnych, można wyznaczyć normalne i styczne składowe stanu naprężenia (rys. 2). Naprężenia normalne (np. σ_x) mają jedną składową oddziaływującą w kierunku prostopadłym do przekroju. Naprężenia styczne mają dwie składowe (np. τ_{xz} i τ_{xy}), których zwrot jest zgodny ze zwrotami osi układu współrzędnych na płaszczyznach dodatnich, a przeciwny na płaszczyznach ujemnych.

the cross-sections which are perpendicular to axes of coordinates of a freely oriented rectangular system of coordinates it is possible to determine the normal and tangent components of the stress (Figure 2). The normal stresses (e.g. σ_x) have one component acting in the direction that is perpendicular to the cross-section. The tangential stresses have two components (e.g. τ_{xz} and τ_{xy}) which are pointed according with the directions of coordinate system axes on positive planes and in contrary directions on negative planes.



Rys.2. Naprężenia występujące w punkcie ciała stałego, traktowanego jako równoległoscian elementarny

Figure 2. Stresses existing in a point of a solid body treated as an elementary parallelepiped

Dla równoległoscianu elementarnego równowagę sił dla współrzędnych X określa wyrażenie:

For any elementary parallelepiped the balance of forces for X coordinates may be expressed by:

$$(\sigma_{x+0} - \sigma_{x-0})\Delta y\Delta z + (\tau_{y+0,x} - \tau_{y-0,x})\Delta x\Delta z + (\tau_{z+0,x} - \tau_{z-0,x})\Delta x\Delta y + X \cdot \Delta x\Delta y\Delta z = 0 \quad (1)$$

gdzie Δx , Δy i Δz są wymiarami równoległoscianu, X jest rzutem sił masowych (objętościowych, jeżeli występują) na osi x .

where Δx , Δy and Δz are the dimensions of the parallelepiped, X is a projection of mass forces (voluminal if they exist) into x axis.

Indeks $x+0$ oznacza, że naprężenie dotyczy strony, w której współrzędna x ma maksymalną wartość, a indeks $x-0$ oznacza, że naprężenie dotyczy strony, w której współrzędna x ma wartość minimalną. To samo dotyczy wszystkich innych współrzędnych. Równowagę sił dla współrzędnych Y i Z określają równania:

Index $x+0$ means that the stress refers to a side where x coordinate has a maximal value and index $x-0$ means that the stress refers to a side where x coordinate has a minimal value. The same concerns the other coordinates. The balance of forces for coordinates Y and Z is described by equa-

tions:

$$(\sigma_{y+0} - \sigma_{y-0})\Delta x\Delta z + (\tau_{x+0,y} - \tau_{x-0,y})\Delta y\Delta z + (\tau_{z+0,y} - \tau_{z-0,y})\Delta x\Delta y + Y \cdot \Delta x\Delta y\Delta z = 0 \quad (2)$$

$$(\sigma_{z+0} - \sigma_{z-0})\Delta x\Delta y + (\tau_{x+0,z} - \tau_{x-0,z})\Delta y\Delta z + (\tau_{y+0,x} - \tau_{y-0,x})\Delta x\Delta z + Z \cdot \Delta x\Delta y\Delta z = 0 \quad (3)$$

Wyrażenia (1÷3) można przekształcić w następujące równania różniczkowe [4]:

Expressions (1÷3) may be transformed into following differential equations [4]:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0 \quad (6)$$

Naprężenia mechaniczne powodują w ciałach stałych odkształcenia normalne (liniowe) ε_i i odkształcenia postaciowe (kątowe) γ_{ij} . Zgodnie z prawem Hooke'a, odkształcenia te mogą być wyrażone przez naprężenia normalne σ_i i naprężenia styczne τ_{ij} :

In solid bodies the mechanical stresses cause both the normal deformations (linear) ε_i and figural deformations (angular) γ_{ij} . According to the Hooke's law these deformations may be expressed by the normal stresses σ_i and tangential stresses τ_{ij} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y - \nu \cdot \sigma_z); \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x - \nu \cdot \sigma_z); \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu \cdot \sigma_x - \nu \cdot \sigma_y); \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}; \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie E jest modułem sprężystości podłużnej (moduł Younga), G jest modułem sprężystości poprzecznej (moduł Kirchhoffa) i ν jest współczynnikiem Poissona. W przypadku materiału izotropowego moduł Younga powiązany jest z innymi stałymi materiałowymi wyrażeniem:

where E is the longitude elasticity module (Young module), G is the crosswise elasticity module (Kirchhoff module) and ν is the Poisson coefficient. In the case of isotropic material the Young module is connected with other material constants through the expression:

$$E = G \cdot 2(1 + \nu) \quad (8)$$

Żeby wykonać obliczenia dla opisanego powyżej algorytmu niezbędne jest spełnienie następującego warunku [5]:

In order to perform calculations for the above algorithm the following condition has to be met [5]:

$$\text{lub} \quad (\lambda + 2G)\Delta t^2 \leq \rho h^2 \quad (9)$$

or

$$\Delta t \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} \leq h \quad (10)$$

gdzie h jest minimalnym krokiem Δx , Δy lub Δz , λ stałą Lamego określoną wyrażeniem:

where h is a minimal step Δx , Δy or Δz and λ is the Lamé constant specified by expression:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (11)$$

Warunkiem koniecznym, aby wykonać obliczenia, jest zdefiniowanie warunków brzegowych. W tym przypadku są one następujące:

- nie występują naprężenia normalne i styczne na górnej i bocznych powierzchniach badanej próbki,
- nie występują pionowe przemieszczenia na dolnej powierzchni próbki,
- wymuszone vibracje w punkcie ultradźwiękowej stymulacji są zgodne z równaniem (13).

Na wewnętrznych powierzchniach defektu są nieliniowe warunki brzegowe. Podczas ściskania pęknięcia naprężenia styczne muszą być równe zero, a podczas rozciągania pęknięcia dodatkowo równe zero są naprężenia, które są normalne do powierzchni pęknięcia. Wszystkie powyższe warunki mogą być spełnione przy założeniu zerowej wartości odpowiednich stron równań (1-3). Jako warunek początkowy założono, że nie ma przemieszczenia zarówno dla czasu zerowego (rozpoczęcie obliczeń), jak i w pierwszym kroku obliczeniowym po rozpoczęciu obliczeń numerycznych. W takim modelu, przemieszczanie w każdym następnym kroku obliczeniowym będzie obliczane zgodnie z równaniem (12) wzdłuż osi X i przez analogiczne równania wzdłuż osi Y i Z.

The necessary condition for carrying out the calculations is the definition of boundary conditions. In this case they are as follows:

- There is no normal and tangential stress on the top and side walls of a tested sample
- There is no vertical movement on the bottom surface of the sample
- The enforced vibrations in the point of ultrasound stimulation follow the equation (13).

There are non-linear boundary conditions on internal surfaces of the defect. When a crack is squeezed the tangential stresses have to equal to zero and when a crack is stretched then additionally the stresses normal to the crack surface have to be zero. All above conditions may be met assuming zero values for respective sides of equations (1-3). It is assumed as an initial condition that there are no dislocations both for the zero time (start of calculations) and in the first step of calculations after starting numerical calculations. In this model the dislocation in each next step of calculation is calculated according to equation (12) along axis X and by respective equations along axes Y and Z.

(12)

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2G) \left(\frac{U_{i+1,j,k}^n - 2U_{i,j,k}^n + U_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} \right) + G \frac{U_{i,j+1,k}^n - 2U_{i,j,k}^n + U_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ & + G \frac{U_{i,j,k+1}^n - 2U_{i,j,k}^n + U_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + (\lambda + G) \frac{V_{i+1,j+1,k}^n - V_{i-1,j+1,k}^n + V_{i-1,j-1,k}^n - V_{i+1,j-1,k}^n}{4\Delta x \Delta y} + \end{aligned}$$

$$+(\lambda + G) \frac{W_{i+1,j,k+1}^n - W_{i-1,j,k+1}^n + W_{i-1,j,k-1}^n - W_{i+1,j,k-1}^n}{4\Delta x \Delta z} = \rho \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - 2U_{i,j,k}^n + U_{i,j,k}^{n-1}}{\Delta t^2}$$

gdzie:

U, V, W – rzuty przesunięcia na odpowiednie osie X, Y, Z ;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – kroki przestrzenne;

Δt – krok czasowy;

i, j, k – punkt w numerycznej siatce, w którym umieszczony jest środek prostopadłościanu elementarnego nazywanego komórką Dirichleta [5];

n – indeks określający krok czasowy.

Wymuszone wibracje w punkcie ultradźwiękowej stymulacji są opisane równaniem:

where:

U, V, W – projections of dislocations on the respective axes X, Y, Z ;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – space steps;

Δt – time step;

i, j, k – a point in the numerical net where the centre of an elementary parallelepiped called the Dirichlet's cell is placed [5];

n – index specifying the time step.

Vibrations enforced in the point of ultrasound stimulation are described by equation:

$$W = A \cdot [1 - \cos(2\pi ft)]/2 \quad (13)$$

gdzie: W – pionowe przemieszczenie w tym punkcie, A – amplituda wibracji, f – częstotliwość wibracji, t – czas.

Energia cieplna generowana przez pęknięcie prostopadłe do osi X jest obliczana zgodnie z równaniem [6]:

where W is a vertical shift in this point, A is an amplitude of vibration, f is the frequency of vibration, t is the time.

Thermal energy generated by a crack that is perpendicular to axis X is calculated according to expression [6]:

$$P = \frac{\mu \sigma_x S_{mp}}{T} \int_0^T \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \partial t \quad (14)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia między powierzchniami pęknięcia, S_{mp} – powierzchnia pęknięcia, σ_x – naprężenie normalne do powierzchni pęknięcia.

Dla pęknięć, które są prostopadłe do innych osi, wzory obliczeniowe są analogiczne.

W metodzie różnic skończonych równanie (14) ma następującą formę:

where μ is a coefficient of friction between surfaces of the crack, S_{mp} is the size of the crack surface, σ_x is a strain normal to the crack surface.

For the cracks which are perpendicular to other axes the analogical expressions are used.

In the method of finite differences the equation (14) has the following form:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\mu \sigma_x S_{mp}}{T} (U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k+1}^n + U_{i,j,k}^n) \quad (15)$$

2.2. Rozchodzenie się ciepła generowanego przez defekt

Do modelowania przewodzenia ciepła zastosowano metodę podziału (splitting) [7]. W rozpatrywanym zagadnieniu numeryczny model jest dzielony na trzy niezależne modele przewodzenia ciepła w kierunku X, Y, Z .

2.2. Propagation of heat generated by defects

The splitting method was used for modeling the heat transition [7]. The considered numerical issue is divided into three independent models of heat transition for axes X, Y, Z .

Aby otrzymać równania różnic skończonych trzeba wyprowadzić równanie bilansu cieplnego dla każdego obszaru, który otacza każdy węzeł siatki numerycznej (taki obszar jest komórką Dirichleta). Węzły siatki są wybrane tak, aby graniczne powierzchnie między materiałem a defektem, „prześlizgiwały się” (slipping) przez granice siatki. Bilans cieplny dla węzła i, j, k komórki Dirichleta i osi Z określa wyrażenie:

$$\frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k}{2} \Delta x \Delta y \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \Delta x \Delta y \left(\lambda_{k-1} \frac{U_{i,j,k-1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_{k-1}} + \lambda_k \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_k} \right) \quad (16)$$

gdzie:

$U_{i,j,k}^n$ - temperatura w węźle i,j,k przy n -tym kroku czasowym;

C_k - pojemność cieplna warstwy między węzłami i,j,k i $i,j,k+1$;

ρ_k - gęstość powyżej wymienionej warstwy;

λ_k - przewodność cieplna powyżej wymienionej warstwy;

Δz_k - odległość międzywęzłowa siatki (między węzłami i,j,k i $i,j,k+1$) w osi Z ;

$\Delta x, \Delta y$ - odległości międzywęzłowe siatki w osiach X i Y ;

Δt - krok czasowy.

Po podzieleniu obu stron równania (16) przez $\Delta x \Delta y$ otrzymamy:

$$\frac{(\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k)}{2} \frac{(U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n)}{\Delta t} = \lambda_{k-1} \frac{U_{i,j,k-1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_{k-1}} + \lambda_k \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_k} \quad (17)$$

Rozpatrywany schemat różnic skończonych jest niejawnym, ponieważ obliczenie temperatury w każdym kolejnym kroku czasowym obejmuje rozwiązywanie równań liniowych.

Równanie (17) jest poprawne dla wszystkich węzłów znajdujących się poza defektami. Dlatego też, jeśli nie występowały defekty na prostej pionowej równoległej do Z , układ równań różnic skończonych wzdłuż tej linii można zapisać w następujący sposób:

The equation of thermal balance has to be developed for each area in the vicinity of numerical net nodal points (this area is called as a Dirichlet's cell) in order to get the equations of finite differences. The nodal points of the net are selected to provide that the walls between material and defect are "slipping" through the borders of the net. The thermal balance for the nodal point i, j, k of Dirichlet's cell and axis Z is described by expression:

where:

$U_{i,j,k}^n$ - temperature in the nodal point i,j,k for the n time step;

C_k - thermal capacity of the layer between nodal points i,j,k and $i,j,k+1$;

ρ_k - density above the mentioned layer;

λ_k - thermal conductivity above the mentioned layer;

Δz_k - distance between nodal points of the net (between points i,j,k and $i,j,k+1$) in axis Z ;

$\Delta x, \Delta y$ - inter-nodal distances of the net for axes X and Y ;

Δt - time step.

After dividing both sides of equation (16) by $\Delta x \Delta y$ we have:

The considered scheme of finite differences has a covert character because the calculation of temperature in the next time step deals with the solution of linear equations.

The equation (17) is correct for all nodal points placed beyond the defects. For this reason, unless there was no defects along the vertical line that is parallel to Z axis, the system of equations of finite differences may be presented in the following way:

$$a_k U_{i,j,k-1}^{n+1} + b_k U_{i,j,k}^{n+1} + c_k U_{i,j,k+1}^{n+1} = f_k, \quad k = 0, N_k \quad (18)$$

gdzie:

where:

$$a_k = -\frac{\lambda_{k-1}}{\Delta z_{k-1}} \quad (19)$$

$$b_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} - a_k - c_k \quad (20)$$

$$c_k = -\frac{\lambda_k}{\Delta z_k} \quad (21)$$

$$f_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n \quad (22)$$

dla $k = 0$:

for $k = 0$:

$$a_k = 0$$

$$b_k = \frac{\Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} - c_k + \alpha_1 \quad (23)$$

$$f_k = \frac{\Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n + q_{i,j} \quad (24)$$

(α_1 jest współczynnikiem przyjmowania ciepła na ogrzewanej powierzchni)

(α_1 is a heat absorption coefficient of the heated surface)

($q_{i,j}$ - energia nagrzewania)

($q_{i,j}$ - energy of heating)

dla $k = N_k$:

for $k = N_k$:

$$b_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1}}{2\Delta t} - a_k + \alpha_2 \quad (25)$$

$$c_k = 0$$

$$f_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1}}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n \quad (26)$$

(α_2 – współczynnik przyjmowania ciepła na schładzanej powierzchni)

(α_2 – heat absorption coefficient of the cooled surface)

Jeżeli komórka Dirichleta (węzeł i,j,k) zawiera defekt, wówczas równania (18-22) muszą uwzględniać różnice między parametrami cieplnymi warstwy i defektu. Zakładając, że defekt położony jest wzdłuż osi Z, począwszy od węzła płaszczyzny $k0$ i kończąc na węzłach płaszczyzny $i0$, $j0$ i ik , jk , współczynniki a, b,

If a Dirichlet's cell (nodal point i,j,k) has a defect then the equations (18-22) have to take into account differences between thermal characteristics of a layer and defect. Let's assume that the defect is situated along Z axis starting from the plane nodal point $k0$ and ending at nodal point of the plane $i0$, $j0$

c i f obliczane zgodnie z równaniami (18-22) muszą być następująco skorygowane:

and ik, jk . Then the coefficients a, b, c and f calculated according to formulae (18-22) have to be corrected in the following way:

$$a_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_{k-1}} \quad (27)$$

$$b_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^* + \Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} - a_k^* - c_k^* \quad (28)$$

$$c_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_k} \quad (29)$$

$$f_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^* + \Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n \quad (30)$$

gdzie $C_{def}^*, \rho_{def}^*, \lambda_{def}^*$ nie są bezwzględnyimi wartościami własności cieplnych, lecz są ich przyrostem powyżej wartości własności warstwy, która zawiera defekt.

where $C_{def}^*, \rho_{def}^*, \lambda_{def}^*$ are not any absolute values of thermal characteristics but they are defined as an increase above a value of a characteristic of the layer that has a defect.

Dla $k = k0$:

For $k = k0$:

$$a_k^* = 0, \quad c_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_k} \quad (31)$$

$$b_k^* = \frac{\Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} - c_k^*, \quad f_k^* = \frac{\Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n \quad (32)$$

dla $k = kk$:

for $k = kk$:

$$a_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_{k-1}}, \quad c_k^* = 0 \quad (33)$$

$$b_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} - a_k^*, \quad f_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n \quad (34)$$

3. Symulacja wykrywania defektów

Przedstawione powyżej algorytmy zostały zastosowane w programie komputerowym ThermoSon opracowanym przez prof. V. Vavilova na potrzeby prac naukowo-badawczych prowadzonych w WITU. Program ten umożliwia analizę przejściowych stanów przewodnictwa ciepła generowanego przez źródło ultradźwiękowe w próbce zdefiniowanej prze-

3. Simulation of detecting defects

The algorithms presented above are used in computer code ThermoSon developed by Prof. V. Vavilov and dedicated to meet the demand of research-development work carried out in the Military Institute of Armament Technology (MIAT). The program gives a possibility to analyse transitional stages of conductivity of heat generated by

strzenie trójwymiarowym modelem (3D) w układzie współrzędnych kartezjańskich. W programie ThermoSon rozwiązywane są równania z zastosowaniem metody różnic skończonych. U podstaw opracowania oprogramowania ThermoSon leży symulacja procesów z zakresu badań nieniszczących, dla których podstawowe znaczenie mają sygnały odpowiadające przejściowym stanom temperatury powierzchni ponad defektami podpowierzchniowymi.

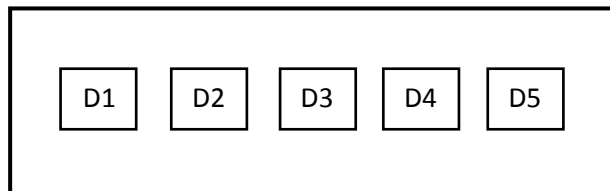
3.1. Model

Analizie poddano obiekt przestrzenny z ukrytymi defektami w postaci próbki prostopadłościennej wielowarstwowego kompozytu aramidowego o wymiarach 50x130x10 mm. W próbce zamodelowano 5 defektów prostopadłościennych o wymiarach 10x10x0,1 mm wypełnionych powietrzem, które znajdowały się na następujących głębokościach pod górną powierzchnią próbki: D1 – 0,5 mm, D2 – 1 mm, D3 – 1,5 mm, D4 – 2 mm i D5 – 3 mm (rys.3).

an ultrasound source in a sample defined in the space by a three dimensional (3D) model in Cartesian system of coordinates. Program ThermoSon uses the method of finite differences to find solutions of equations. The development of ThermoSon program originates from a need to simulate processes in non-destructive tests for which the signals corresponding to transitional stages of temperature on the surface situated above the subsurface defects have the fundamental meaning.

3.1. Model

An object consisting of multilayer aramide composite and in the form of a rectangular prism sample having dimensions of 50x130x10 mm with covert defects has been analysed. There were modelled 5 defects in the sample having the shape of perpendicular prisms with dimensions of 10x10x0,1 mm filled with the air and placed at following depths below the surface: D1 – 0,5 mm, D2 – 1 mm, D3 – 1,5 mm, D4 – 2 mm and D5 – 3 mm (figure 3).



Rys. 3. Rozmieszczenie defektów w analizowanej próbce
Figure 3. Arrangement of defects in the analysed sample

Parametry termofizyczne materiału, z którego wykonana jest próbka (wyznaczone eksperymentalnie [8]) i powietrza [9] wypełniającego defektu przedstawia tabela 1.

Thermo-physical characteristics of material the sample is made of (measured experimentally [8]) and the air [9] that fills the defects are presented in table 1.

Tabela 1

Materiał	Przewodność cieplna W/m·K	Ciepło właściwe J/kg·K	Gęstość kg/m ³
Kompozyt aramidowy	0,22	1070	1450
Powietrze	0,07*	1005	1,2

*uwzględniono poprawkę konwekcyjną zmieniającą przewodność cieplną powietrza suchego nieruchomego o temperaturze pokojowej z wartości 0,26 W/m·K do wartości podanej w tabeli 1.

Table 1

Material	Thermal conductivity W/m·K	Specific heat J/kg·K	Density kg/m ³
Aramide composite	0,22	1070	1450
Air	0,07*	1005	1,2

*convective correction is taken into account as it changes the thermal conductivity of dry and still air in the ambient temperature from the value of 0,26 W/m·K to value presented in table 1.

3.2. Wyniki

Stosując oprogramowanie ThermoSon przeprowadzono symulację rozkładu temperatury dla modelu próbki kompozytu aramidowego przedstawionego na rys.3. Przykładowe wyniki symulacji uzyskane na powierzchni przedniej próbki są przedstawione w tabeli 2. Wartości sygnału temperaturowego ΔT są przedstawione dla optymalnego czasu obserwacji τ_m . Zostały one uzyskane podczas stymulacji cieplnej falami ultradźwiękowymi o częstotliwości 22 kHz, amplitudzie 7e-06 m i czasie trwania 10 s.

3.2. Results

The simulation of temperature distribution in the model sample of aramide composite presented in figure 3 was carried out by using ThermoSon computer code. Exemplary results of simulation received on the frontal surface of analysed sample are presented in table 2. The values of temperature signal ΔT are presented for the optimal time of observation τ_m . They were obtained at thermal stimulation by ultrasound waves of 22 kHz frequency and 7e-06 m amplitude and duration 10 s.

Tabela 2/Table 2

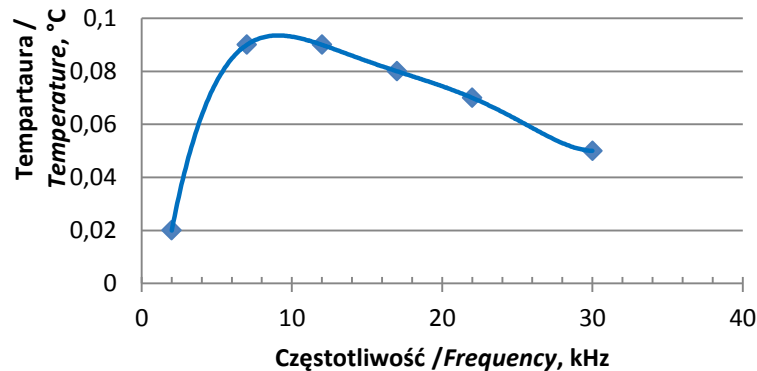
Defekt / Defect	ΔT , °C	τ_m , s
1	5,18	10
2	3,91	10
3	2,44	10
4	1,6	10
5	0,4	10

W celu porównania wyników uzyskanych za pomocą oprogramowania ThermoCalc™-30L w pracy [3], przedstawiono wybrane wyniki w tabelach 3 i 4. W tabeli 3 są wyniki uzyskane podczas zasymulowania nagrzewania impulsem cieplnym o gęstości $Q = 1,5 \times 10^4$ W/m² i czasie nagrzewania $\tau_h = 5$ s. W tabeli 4 są przedstawione wyniki uzyskane podczas zasymulowania impulsu schładzającego o gęstości $Q = 10^4$ W/m² i czasie trwania $\tau_h = 5$ s.

In order to compare the results obtained by ThermoCalc™-30L computer code in the paper [3] some selected results are presented in tables 3 and 4. Table 3 includes the results received at simulation of heating by a thermal pulse having density of $Q = 1,5 \times 10^4$ W/m² and duration $\tau_h = 5$ s. Table 4 includes results received at simulation of heating pulse having density of $Q = 10^4$ W/m² and duration $\tau_h = 5$ s.

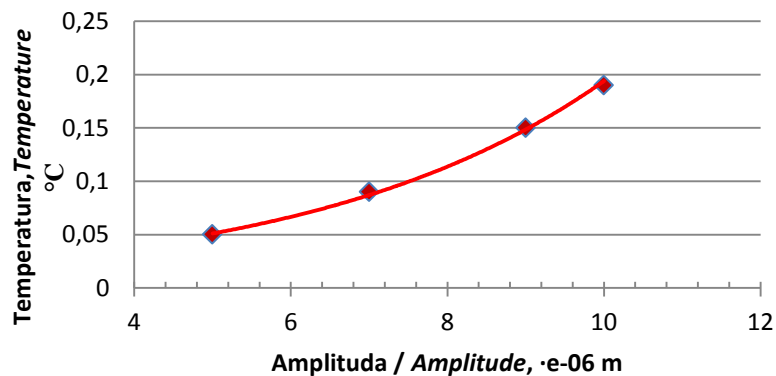
Tabela 3 [3]/Table 3 [3]

Defekt / Defect	ΔT , °C	τ_m , s	C, %
1	6,51	5	10,4
2	2,4	9	7,3
3	1,15	14	5,3
4	0,64	21	3,7
5	0,09	58	2,1



Rys. 4. Zmiany temperatury nad defektem (D5) znajdującym się 4 mm pod powierzchnią próbki kompozytu aramidowego podczas symulacji fal ultradźwiękowych i infradźwiękowych o różnych częstotliwościach i stałej amplitudzie $7e-06$ m

Figure 4. Changes of temperature above the defect (D5) placed 4 mm below the surface of the aramide composite sample subjected to stimulation of ultrasound and infrasound waves with different frequencies and constant amplitude of $7e-06$ m



Rys. 5. Zmiany temperatury nad defektem (D5) znajdującym się 4 mm pod powierzchnią próbki kompozytu aramidowego podczas symulacji fal ultradźwiękowych i infradźwiękowych o różnej amplitudzie i stałej częstotliwości 12 kHz

Figure 5. Changes of temperature above the defect (D5) placed 4 mm below the surface of the aramide composite sample subjected to stimulation of ultrasound and infrasound waves with different amplitudes and constant frequency of 12 kHz

Z wykresu przebiegu zmian temperatury nad defektem (D5) przedstawionego na rys.4 wynika, że największy przyrost temperatury uzyskano w zakresie częstotliwości fal infradźwiękowych od 7 do 12 kHz. Jest to zakres, w którym powinna występować optymalna, najbardziej skuteczna częstotliwość fal infradźwiękowych

The graph presenting changes of temperature above the defect (D5) in the figure 4 shows that the biggest increase of temperature was obtained on the range of frequencies from 7 to 12 kHz. It is the range on which the most effective frequency of acoustic waves has to exist for the detec-

do wykrywania podpowierzchniowych defektów w kompozytach aramidowych metodą termografii w podczerwieni.

Z wykresu (rys. 5) jednoznacznie wynika wpływ amplitudy fali infradźwiękowej na wykrywanie podpowierzchniowych defektów.

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki symulacji komputerowej wykrywania podpowierzchniowych defektów w kompozycie aramidowym metodą ultradźwiękowej termografii w podczerwieni wymagają eksperymentalnej weryfikacji. Wskazują, w porównaniu z wynikami uzyskanymi metodą nagrzewania impulsem cieplnym, że stymulacja cieplna źródłem ultradźwiękowym jest bardziej skuteczna, zwłaszcza podczas wykrywania defektów położonych głębiej pod powierzchnią materiału.

Z wybranych wyników przedstawionych w tabelach 2 - 4 wynika, że czas wykrytych defektów głęboko ukrytych pod powierzchnią kompozytu aramidowego metodą symulacji cieplnej ultradźwiękami jest znacznie krótszy niż czas wykrycia tych defektów z zastosowaniem ogrzewania/chłodzenia zewnętrznego.

Obiecujące są wyniki uzyskane z zastosowaniem fal z zakresu infradźwięków (rys. 4 i 5), które wskazują na nowe możliwości wibracyjnej metody termografii w podczerwieni.

Przyszłe prace powinny być skupione na doskonaleniu zastosowanego algorytmu obliczeniowego, aby umożliwiał symulację modelu składającego się z wielu warstw. Obecny model umożliwia zasymulowanie materiału kompozytu, jako jednej warstwy.

tion of subsurface defects in aramide composites by the infrared thermography method.

The graph presented in figure 5 clearly indicates that the amplitude of acoustic wave has an impact into the detection of subsurface defects.

4. Summary

Presented results of a computer simulation for detection of subsurface defects in aramide composite by ultrasound infrared thermography method have to be experimentally verified. Nonetheless they indicate that the thermal stimulation of ultrasound source is more effective than the stimulation of thermal pulse especially at the detection of deeper defects.

It also results from the data presented in tables 2÷4 that the time needed for detection deeper placed defects in the aramide composite is shorter for the ultrasound stimulation than for external heating/cooling.

Interesting results were obtained by using infrasound waves (graphs – figures 4 and 5), which indicate that there are new possibilities in the vibration infrared thermography method.

In the future an effort has to be focused in improving the used calculating algorithm to apply it for simulating models consisting of many layers as the presented model enables the simulation of composite material as one layer.

Literatura / Literature

- [1] Maldague X. P. V., *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, John Wiley&Sons, New York, 2001
- [2] Dragan K., Świdorski W., *Multimode NDE approach for structure health assessment of composite elements in aerospace applications*, Acta Physica Polonica A, Vol. 117, No 5, pp.87-882, 2010
- [3] Panas A., Pracht M., Świdorski W., *Possibility of defects detection by IR thermography in multi-layered polyaramide materials used for military applications*, Journal of KONES Powertrain and Transport Vol. 21, No. 2, pp. 243-250, Warszawa 2014
- [4] Lourier A. I., *Theory of elasticity*, Nauka Publ., Moskwa 1970, str. 940 (w języku rosyjskim)

- [5] Maldague X., *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*, Springer-Verlag, London, 1992
- [6] Homma C., Rothenfusser M., Baumann J. et al., *Study of the heat generation mechanism in acoustic thermography*, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 25, ed. By D. O. Thompson and D.E. Chimenti, American Institute of Physics 2006, pp. 566-573
- [7] Samarsky A. A., *Theory of finite-difference schemes*, Nauka Publ., Moscow, 1989 (w języku rosyjskim)
- [8] Pracht M., Świdorski W., *Eksperymentalne wyznaczanie parametrów termofizycznych kompozytu aramidowego stosowanego w indywidualnych osłonach balistycznych*, Problemy mechatroniki (w druku)
- [9] Vavilov V., *Infrared non-destructive testing of bonded structures: aspects of theory and practice*, British Journal of NDT (July) 1980 pp.175-183

