



## NUMERYCZNA ANALIZA WPLYWU CHARAKTERYSTYKI WYMUSZENIA CIEPLNEGO NA WYKRYWANIE DEFECTÓW W KOMPOZYTACH WIELOWARSTWOWYCH METODĄ TERMOGRAFII W PODCZERWIENI

### *NUMERICAL ANALYSIS OF THERMAL STIMULATION CHARACTERISTICS INFLUENCE ON DETECTION OF DEFECTS IN MULTI-LAYER COMPOSITES BY INFRARED THERMOGRAPHY METHOD*

Waldemar ŚWIDERSKI

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia  
*Military Institute of Armament Technology*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane wyniki numerycznych obliczeń wpływu charakterystyki wymuszenia cieplnego użytego w aktywnej metodzie termografii w podczerwieni na wykrywanie cienkich defektów w kompozytach. Obliczenia przeprowadzono dla wielowarstwowego kompozytu z tworzywa wzmacnianego włóknem węglowym. Symulacje komputerowe przeprowadzono dla typowych wymuszeń cieplnych generowanych przez lampy grzewcze. Przeanalizowano możliwości wykrywania defektów zarówno metodą odbiciową jak i transmisyjną.

Słowa kluczowe: symulacja komputerowa, kompozyt, termografia impulsowa

### 1. Wprowadzenie

Materiały inżynierskie to grupa materiałów technicznych, która nie występuje w naturze. Powstają one w wyniku wykorzystania surowców dostępnych w naturze i przystosowaniu ich do potrzeb technicznych. Do grupy tych materiałów należą niemetalowe materiały kompozytowe [1]. Ze względu na ich wytrzymałość przy niskiej wadze w porównaniu z metalami są coraz częściej stosowane w różnych aplikacjach zarówno cywilnych jak i wojskowych. Podstawowymi materiałami w tych konstrukcjach są materiały kompozytowe wzmocnione włóknem występujące w formie laminatu. Stosowane są w celu zapewnienia

**Abstract:** Some results of numerical calculations evaluating the influence of characteristic of thermal stimulation used in active infrared thermography on detection of thin defects in composites are presented in the paper. The calculations were carried out for multi-layer composite material strengthened by carbon fibre. Computer simulations were performed for typical thermal stimulations generated by heating lamps. The possibilities for detection of defects by using both reflection and transmission methods were analysed.

Keywords: computer simulation, composite, pulse thermography

### 1. Introduction

Engineering materials belong to a group not existing in the nature. They are fabricated by using the raw materials available in the nature to adapt them for technical requirements. Non-metallic composite materials belong to this group [1]. They are used more frequently than metals for various civilian and military applications because of their high strength at low weight. The basic materials used in these structures are the composite materials reinforced by the fibre which have the form of laminates. They are used to in-

zwiększonej wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej. Uzyskuje się to przez wprowadzenie włókien wytrzymałych, sztywnych lecz zwykle kruchych do miękkiej lecz ciągliwej osłony. Materiały kompozytowe tej grupy mogą wykazywać wysokie właściwości wytrzymałościowe zarówno w temperaturze pokojowej jak i w podwyższonej. Najczęściej stosowane są laminaty wzmocnione włóknami węglowymi i szklanymi, w aplikacjach militarnych również włóknami aramidowymi. Pierwszym było włókno szklane wytwarzane w okresie II wojny światowej, a następnie w latach 50-tych ubiegłego wieku opracowano technologię włókien węglowych (niskomodulowych, a później wysokomodulowych). Włókna aramidowe zostały wynalezione w 1965 roku.

Najczęściej występującymi uszkodzeniami w laminatach wzmocnianych włóknami są: delaminacje, makropęknięcia, pęknięcia włókien, pęknięcia międzyfazowe, mikropęknięcia, porowatość, wtrącenia, uszkodzenia termiczne, zawilgocenia, wypukłości powierzchniowe i pofałdowania. Do najbardziej skutecznych metod badań nieniszczących, wykrywających uszkodzenia w laminatach zalicza się interferometrię optyczną i termografię w podczerwieni [2]. W strukturach wielowarstwowych, jakimi są laminaty, w wyniku mechanicznego udaru zewnętrznego powstaje uszkodzenie, którego wymiary powierzchniowe są różne w poszczególnych warstwach kompozytu. Związane jest to z absorbowaniem energii kinetycznej udaru przez poszczególne warstwy laminatu. Następuje niszczenie międzywarstwowe materiału na skutek pęknięcia i rozciągania włókien.

W badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych najczęściej stosowane są procedury aktywnych metod termografii w podczerwieni, w których używa się źródeł 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 [3].

Jedną z najpopularniejszych obecnie metod stosowanych w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych jest termografia impul-

crease static and fatigue resistance. It is provided by the incorporation of strong fibres which are rigid and usually fragile into the soft but ductile coating. Composite materials from this group have high values of strength at ambient and increased temperatures. The laminates are usually reinforced by carbon or glass fibres and also by aramide fibres in military applications. Firstly the fibre glass was fabricated during the WWII and then in the fifties of the last century the technology of carbon fibres was developed (low-module and then high-module). The aramide fibres were invented in 1965.

There are following defects happening in fibre strengthened laminates: delaminating, macro and micro-cracks, broken fibres, inter-phase breaks, porosity, inclusions, thermal damages, dampness, bulged and waved surface. Optical interferometry and infrared thermography are the most effective methods of non-destructive testing for detection of defects in laminates [2]. In the result of an external mechanical impact a defect appears with different sizes for particular layers of composite laminate multilayer structure. It is connected with the absorption of mechanical impact kinetic energy by particular layers of the laminate. The inter-layer material is destructed in the result of cracking and pulling the fibres out.

The procedures of active infrared thermography methods using the sources for thermal stimulation (heating or cooling) of an object are most often applied in non-destructive tests of composite materials. Material defects which have the same ambient temperature before the test do not generate any ‘useful’ temperature signals and for this reason the whole object or its part has to be heated or cooled. Such test provides a dynamic field of the temperature and results of testing its distribution depend on the time of observation [3].

One of the most popular methods used now in composite material non-destructive testing is the pulse thermography. These tests are based on application of a lamp, laser and etc. for generation of

sowa. Badania tego rodzaju polegają na zastosowaniu lampy, lasera itp. do generowania impulsu (lub serii impulsów) wymuszenia cieplnego, który trwa od kilku milisekund dla materiałów o dużej przewodności cieplnej (np. metale) do kilku sekund w przypadku materiałów o małej przewodności. Można również użyć impulsu schładzającego powierzchnię badanego obiektu (np. strumień zimnego powietrza, ciekłego azotu itp.).

Termografia impulsowa może być realizowana zarówno metodą odbiciową (jednostronną) jak i transmisyjną (dwustronną). Rejestrowana jest sekwencja obrazów (termogramów) o jednakowych odstępach czasu między obrazami. Po wyłączeniu źródła promieniowania obiekt schładza się do temperatury otoczenia. W fazie stygnięcia wyznaczany jest rozkład temperatury na powierzchni badanego obiektu, który poddawany jest analizie. W zależności od parametrów cieplnych badanego materiału, strefy o wyższej lub niższej temperaturze na jego powierzchni będą wskazywały obszary, w których mogą występować podpowierzchniowe defekty.

## **2. Model stanów przejściowych**

W celu wyboru najbardziej skutecznej metody badawczej oraz oszacowania parametrów źródła stymulacji cieplnej badanego obiektu, niezbędne jest zastosowanie odpowiedniego dla metody badań modelu matematycznego. Opisane są w nim 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. Umożliwia to 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 oparciu o modele teoretyczne opracowano różne algorytmy na ww. proces odwrotny, spośród których dla badań metodą termografii wykorzystywane są jedno- (1D) [4], dwu- (2D) [5] i trójwymiarowe (3D) [6] modele, których algorytmy są implementowane w programach komputerowych. Podstawowe rozważania na temat wykrywalności metodą termograficzną podpowierzchniowych zaburzeń stru-

a thermal stimulation pulse (or a series of pulses) of a few milliseconds duration for materials with high calorific conductivity (e.g. metals) or a few seconds for materials with a low calorific conductivity. It is also possible to use a pulse cooling the surface of the tested object (e.g. the stream of cold air, liquid nitrogen, etc.).

The pulse thermography may be applied both as a reflection method (one side) or a transmission method (two-side). A sequence of pictures (thermograms) is recorded for the same time gaps between pictures. When the source of radiation is off the object is cooled to the ambient temperature. In the cooling phase the distribution of temperature on the surface of tested object is measured in order to be analysed. Depending on calorific parameters of tested material the areas of surface with higher or lower temperatures indicate the zones where some subsurface defects may exist.

## **2. Model of Transitional States**

In order to select the most effective method of investigation and evaluate parameters of a thermal source stimulating the tested object a mathematical model corresponding to the testing method has to be applied. It describes the space-time relations of temperature distribution. Access to analytical solutions of questions concerning the flow of the heat in solid bodies at existence of subsurface defects allows for the solution of so called reverse problems. It provides the information about the geometry of the defect (depth and size) on the base of analysis of object surface infrared picture sequence recorded during the transitional calorific process.

Basing on theoretical models different algorithms were developed for the above mentioned reverse process and the method of thermography exploits one- (1D) [4], two- (2D) [5] and three dimensional (3D) [6] models implemented in computer programs. The basic principles concerning the detection of subsurface disturbances of thermal fluxes by thermo-

mieni cieplnych (i warunków optymalizacji procedur pomiarowych) podane zostały w pracy [7].

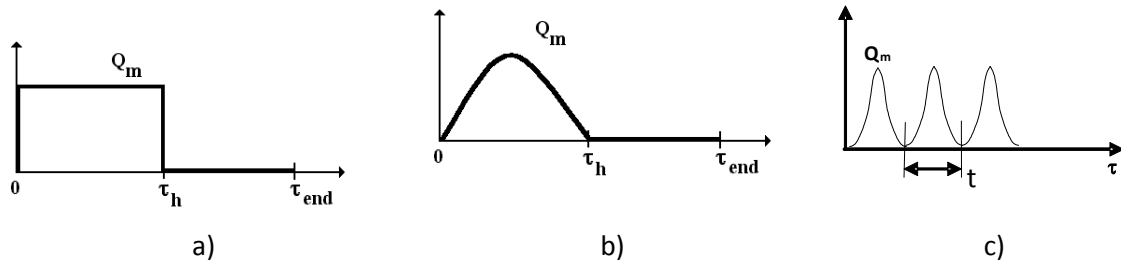
Algorytmy zastosowane w specjalistycznych programach komputerowych do rozwiązania zagadnień badań termicznych przedstawiono na przykładzie programów opracowanych przez V. Vavilova (Multilayer-3, ThermoCalc-2D, ThermoCalc-6L) [3].

Do obliczeń według tych programów stosowane są wymuszenia cieplne, których charakterystyki przedstawione są na rys. 1.

graphic method (and optimising conditions for measurement procedures) were given in publication [7].

Algorithms used in specialised computer codes for solving questions of thermal investigations were presented by exemplary programs developed by V. Vavilov (Multilayer-3, ThermoCalc-2D, ThermoCalc-6L) [3].

These programs may be used for calculations at thermal stimulations presented in Fig. 1.



**Rys. 1. Przebiegi zmian wymuszeń cieplnych stosowanych w modelach stanów przejściowych:**

a) pojedynczy impuls prostokątny, b) pojedynczy impuls cieplny, c) fale cieplne

**Fig. 1. Character of changes for thermal stimulations used by models of transitional stages**

a) Single rectangular pulse, b) Single thermal pulse, c) Thermal waves

Pojedynczy impuls prostokątny przedstawiony na rys.1 a) w przedziale czasu od 0 do  $\tau_h$  ma maksymalną wartość  $Q_m$ , a w przedziale czasu od  $\tau_h$  do  $\tau_{end}$  jest faza schładzania i wymuszenie cieplne ma zerową wartość, co opisuje zależność [8]:

$$Q(t) = \begin{cases} Q_m & \text{dla } t \leq \tau_h \\ 0 & \text{dla } \tau_h < t \leq \tau_{end} \end{cases} \quad (1)$$

Pojedynczy impuls cieplny przedstawiony na rys.1 b) w przedziale czasu od 0 do  $\tau_h$  można opisać wzorem:

$$Q(\tau) = (Q_m / 2) - (Q_m / 2) \cos(2\pi\tau / \tau_h) \quad (2)$$

W przedziale czasu od  $\tau_h$  do  $\tau_{end}$  jest faza schładzania i wymuszenie cieplne ma zerową wartość.

Fale cieplne przedstawione na rys. 1 c) opisuje wzór:

$$Q(\tau) = (Q_m / 2) - (Q_m / 2) \cos(2\pi\tau / t) \quad (3)$$

A single rectangular pulse presented in Fig. 1 a) has maximal value  $Q_m$  within the time from 0 to  $\tau_h$  and zero in the cooling phase for the time starting at  $\tau_h$  to  $\tau_{end}$  what is described by dependence [8]:

Single thermal pulse presented in Fig. 1 b) may be described within the time from 0 to  $\tau_h$  by formulae:

At interval from  $\tau_h$  to  $\tau_{end}$  there is a cooling phase and thermal stimulation is zero.

Thermal waves presented in Fig. 1 c) are described by formulae:

### 3. Modelowanie stanów przejściowych

Do oceny wpływu przebiegu zmian wymuszeń cieplnych na możliwości wykrycia defektów w postaci delaminacji w wielowarstwowej strukturze kompozytu z tworzywa wzmocnionego włóknem węglowym użyto programu Thermo-Calc 6L. Algorytmy obliczeniowe zastosowane w tym oprogramowaniu są dokładnie opisane w pracach [3] i [9]. W programie zakłada się, że zarówno badana próbka jak i podpowierzchniowe defekty mają kształt równoległocianów. Ogrzewanie za pomocą zewnętrznego impulsu cieplnego dokonywane jest po stronie powierzchni przedniej próbki. Obok stymulowanego grzania, powierzchnia czołowa oraz tylna, zgodnie z prawem Newtona podlegają chłodzeniu (a w procesie występuje także wymiana ciepła na drodze konwekcji oraz promieniowania). W tym celu wprowadzone są odpowiednie współczynniki przejmowania ciepła  $h$ . Parametry cieplne próbki i defektów mogą być określane niezależnie we wszystkich trzech płaszczyznach przestrzeni, dzięki czemu elementy te cechować może pełna anizotropowość. W modelu przyjęto, że boczne powierzchnie próbki są izolowane adiabatycznie. Natomiast ciągłość temperatury jest zachowana pomiędzy granicami warstw próbki oraz pomiędzy defektami i ich otoczeniem.

Do sprawdzenia możliwości wykrywania, za pomocą impulsowej termografii w podczerwieni z optycznym źródłem stymulacji cieplnej, defektów w postaci delaminacji w wielowarstwowej strukturze poddano symulacji komputerowej model kompozytu z tworzywa wzmocnianego włóknem węglowym (rys.2).

W modelu składającym się z trzech warstw tkaniny z włókna węglowego o grubości 1 mm, połączonych warstwami żywicy epoksydowej o grubości 0,1 mm przyjęto, że w każdej warstwie występują po dwa defekty w postaci delaminacji o grubości 0,1 mm wypełnionych powietrzem o różnych powierzchniach 5x5 mm i 10x10 mm.

Próbkę kompozytową badano stosując metodę badawczą jedno- i dwustronną. Próbka była ogrzewana czołowo. Do ogrzewania zastosowano wymuszenia cieplne o charakterystykach przedstawionych na rys. 1.

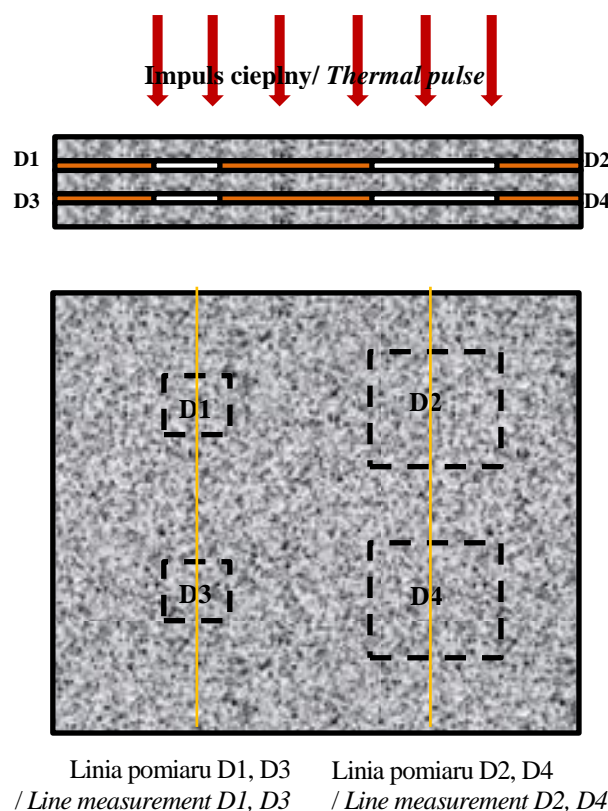
### 3. Modelling Transitional States

Computer code Thermo-Calc 6L was used to assess how the character of changes of thermal stimulations influences the possibilities of detection of delaminating defects occurring in multi-layered structure of plastic composite strengthened by carbon fibre. Calculating algorithms used in this computer code are described in details in publications [3] and [9]. The computer code assumes that both the tested sample and subsurface defects have the shape of parallelepipeds. The external thermal pulse is applied to heat the front surface of the sample. Apart of enforced heating the front and rear surfaces are also subjected to cooling according to Newton's law (the heat is exchanged both by convection and radiation). For this reason special coefficients  $h$  for heat absorption are applied. Calorific parameters of the sample and defects may be specified independently for all three planes of the space what means that they may be considered as completely anisotropic ones. It was assumed in the model that the side walls of the sample are adiabatically isolated. The continuity of temperature is preserved between the borders of sample layers and between defects and their surroundings.

A model of plastic composite reinforced by carbon fibre (Fig.2) was used in computer simulation to check possibilities for detection of delaminating defects in multilayered structure by infrared pulse thermography with an optical source of thermal stimulation.

The model consists of three layers of carbon fibre fabric of 1.0 mm thickness bound by epoxy resin layers with 0.1 mm thickness and it was assumed that each layer includes two delaminating defects having thickness of 0.1 mm and different sizes of 5x5 mm and 10x10 mm.

The composite sample was tested by one-side and two-side method. The front of the sample was heated. Thermal stimulations with characteristics presented in Fig.1 were used for heating.



**Rys. 2. Model kompozytu z defektami**

*Fig. 2. A model of composite with defects*

Maksymalna wartość gęstości mocy nagrzewania wynosiła dla pojedynczego impulsu cieplnego prostokątnego  $Q_m = 2,46 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ , dla pojedynczego impulsu cieplnego  $Q_m = 4,2 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ , a czas nagrzewania w obu przypadkach był takim samym i wynosił  $\tau_h = 0,04 \text{ s}$ . Dla fal cieplnych maksymalna wartość gęstości mocy nagrzewania wynosiła  $Q_m = 4 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ , a okres fali wynosił  $t = 0,1 \text{ s}$ . Całkowity czas wszystkich symulacji wynosił 5 s. Parametry symulacji były tak dobrane, aby maksymalna temperatura nagrzewanej powierzchni próbki kompozytu była porównywalna dla wszystkich symulacji i nie przekraczała temperatury zniszczenia próbki ( $100^\circ\text{C}$ ).

W tabeli 1 przedstawione są parametry cieplne materiałów kompozytu użytego w symulacji komputerowej.

The maximal value of heating power density was  $Q_m = 2.46 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$  for single rectangular thermal pulse,  $Q_m = 4.2 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$  for single thermal pulse whereas the time of heating was  $\tau_h = 0.04 \text{ s}$  in each case. For thermal waves the maximal value of heating power density was  $Q_m = 4 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$  and the period of the wave was  $t = 0.1 \text{ s}$ . The complete time for each simulation was 5 seconds. The parameters of the simulation were matched to provide similar temperature of composite surface for all simulations without exceeding the temperature of  $100^\circ\text{C}$  that damages the sample.

Calorific parameters of composite materials used for computer simulation are presented in table 1.

Tab. 1. Termofizyczne parametry materiałów [10]

Material	Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J/kg·K]	Przewodność cieplna [W/mK]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
Kompozyt grafitowo-epoksydowy kierunek włókien (  ) kierunek włókien (⊥)	935	1,28 0,64	1400
Żywica epoksydowa	1000	0,18	1200
Powietrze (cienkie warstwy)	1005	0,07	1,2

Table 1. Calorific-physical characteristics of materials [10]

Material	Calorific receptivity at constant pressure [J/kg·K]	Calorific conductivity [W/mK]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
Graphite-epoxy composite Direction of fibres (  ) Direction of fibres (⊥)	935	1.28 0.64	1400
Epoxy resin	1000	0.18	1200
Air (thin layers)	1005	0.07	1.2

#### 4. Wyniki

Optymalne warunki wykrycia defektów D1÷D4 w symulowanej próbce kompozytu przedstawione są w tabeli 2 i 3. Wartości maksymalnego kontrastu  $C_m$  i sygnału temperaturowego  $\Delta T_m$  są przedstawione dla optymalnego czasu obserwacji  $\tau_m$  ( $\tau_m$  - czas, w którym wartość kontrastu bieżącego jest maksymalna).

Wartość maksymalnego kontrastu obliczona była zgodnie z następującym wzorem:

$$C_m = \frac{\Delta T_m}{T_{ref}} \quad (4)$$

gdzie:

$$\Delta T_m = T_{def} - T_{ref}$$

$T_{def}$  - temperatura na powierzchni próbki nad defektem,

$T_{ref}$  - temperatura na powierzchni próbki w wybranym punkcie poza defektem.

Wybrane wyniki symulacji przedstawione są na rys. 3÷10.

#### 4. Results

Optimal conditions for detection of D1÷D4 defects in simulated sample of the composite are presented in tables 2 and 3. The values of maximal contrast  $C_m$  and temperature signal  $\Delta T_m$  are presented for the optimal time of observation  $\tau_m$  ( $\tau_m$  – time when the running contrast is maximal).

The value of maximal contrast was calculated according to following dependence:

where:

$$\Delta T_m = T_{def} - T_{ref}$$

$T_{def}$  - temperature on the sample surface above the defect,

$T_{ref}$  – temperature on the sample surface for a point beyond the defect.

Some selected results of simulation are presented in figures 3÷10.

Tab. 2. Obliczone parametry wykrycia defektów – metoda jednostronna

Table 2. Calculated parameters for detection of defects – one-side method

Wymuszenie ciepłe / Thermal stimulation	Defekt / Defect	$\Delta T_m$ (°C)	$\tau_m$ (s)	$C_m$ (bezwym./ di- mensionless)
Pojedynczy impuls prostokątny / Single rectangular pulse	D1	0,46	1,61	0,1
	D2	0,56	1,98	0,14
	D3	-0,4	0,04	0,02
	D4	-0,37	0,04	0,02
Pojedynczy impuls cieplny / Single thermal pulse	D1	0,52	1,61	0,1
	D2	0,63	0,03	0,14
	D3	-0,48	1,97	0,02
	D4	-0,45	0,03	0,03
Fala cieplna / Thermal wave	D1	2,8	5,0	0,25
	D2	3,82	5,0	0,31
	D3	-0,14	2,17	0,04
	D4	-0,23	2,36	0,07

Tab. 3. Obliczone parametry wykrycia defektów – metoda dwustronna

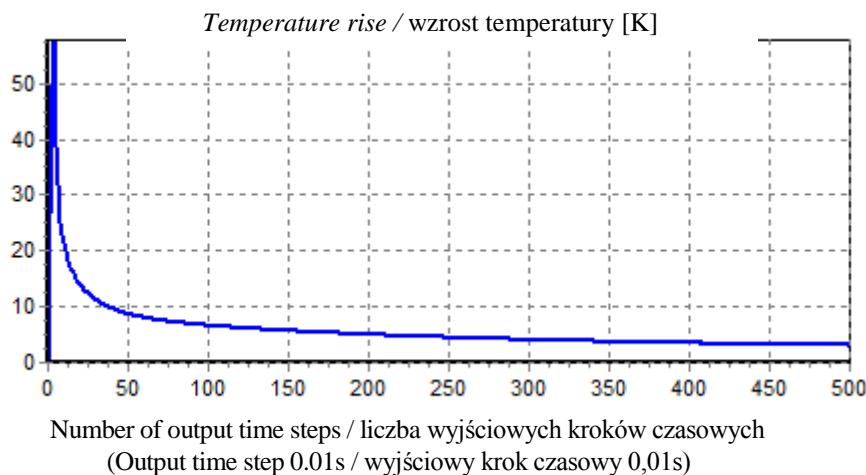
Table 3. Calculated parameters for detection of defects – two-side method

Wymuszenie ciepłe / Thermal stimulation	Defekt / Defect	$\Delta T_m$ (°C)	$\tau_m$ (s)	$C_m$ (bezwym./ di- mensionless)
Pojedynczy impuls prostokątny / Single rectangular pulse	D1	-0,08	3,27	-0,19
	D2	-0,14	3,79	-0,22
	D3	-0,11	3,53	-0,21
	D4	-0,14	3,83	-0,22
Pojedynczy impuls cieplny / Single ther- mal pulse	D1	-0,09	3,27	-0,19
	D2	-0,16	3,79	-0,22
	D3	-0,13	3,53	-0,21
	D4	-0,16	3,82	-0,22
Fala cieplna / Thermal wave	D1	-0,52	5,0	-0,19
	D2	-0,86	5,0	-0,22
	D3	-0,67	5,0	-0,2
	D4	-0,87	5,0	-0,22

Na rys. 3 przedstawiono przebieg zmian sygnału temperatury powierzchni próbki nad defektem D2 nagrzanej pojedynczym impulsem prostokątnym. Przedstawiono zarówno przebieg zmian w fazie nagrzewania jak i chłodzenia. Jaki charakter ma przebieg zmian sygnału temperatury na powierzchni nieogrzewanej przedstawiono na rys. 4.

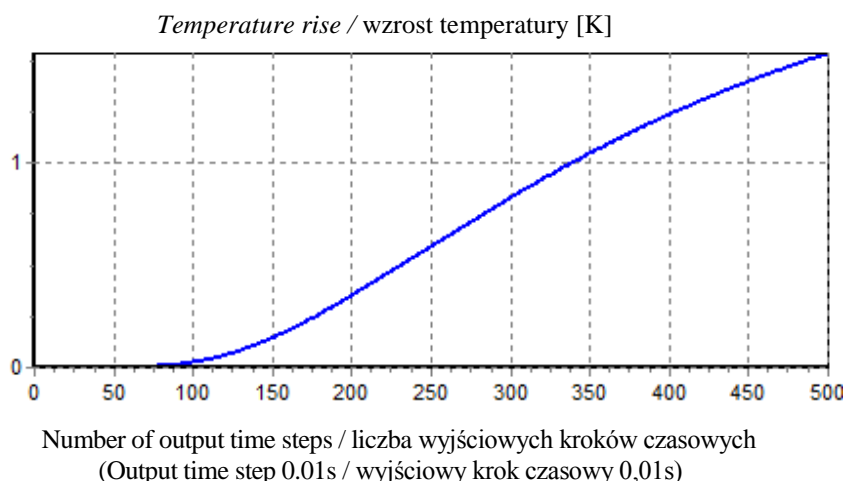
Figure 3 shows the change of temperature signal above defect D2 on the sample surface heated by single rectangular pulse. Character of changes for both phases of heating and cooling is presented. The character of changes of temperature signal on the unheated surface is presented in Fig. 4.





**Rys. 3. Przebieg zmian sygnału temperatury na nagrzewanej pojedynczym impulsem prostokątnym, powierzchni próbki nad defektem D2**

**Fig. 3. Changes of temperature signal on the surface above defect D2 heated by a single rectangular pulse**



**Rys. 4. Przebieg zmian sygnału temperatury nienagrzewanej powierzchni podczas nagrzewania pojedynczym impulsem prostokątnym powierzchni próbki nad defektem D2**

**Fig. 4. Changes of temperature signal on the unheated surface above defect D2 at heating the sample surface by a single rectangular pulse**

Przebieg zmian sygnału temperatury na nagrzewanej powierzchni próbki nad defektem D2 podczas nagrzewania falą cieplną przedstawia rys. 5. Analogiczne zmiany przedstawiono na rys. 6 dla powierzchni nienagrzewanej.

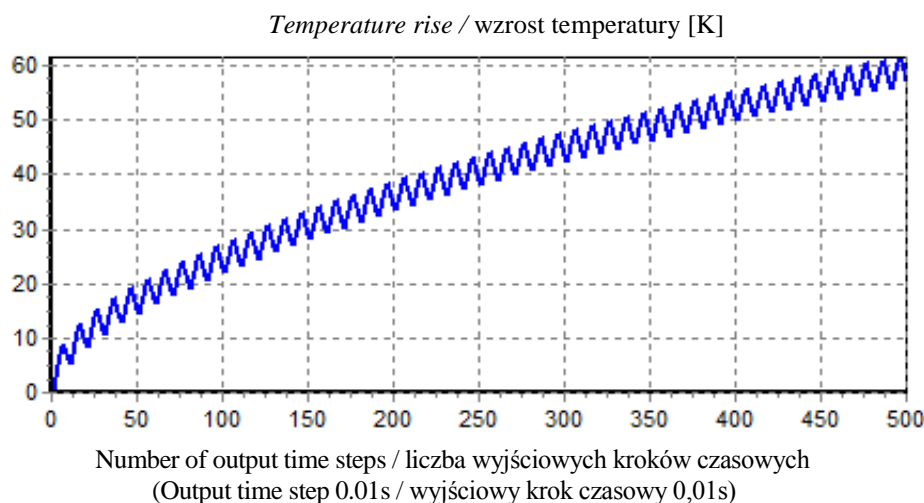
Przykładowe wyniki pokazujące zmiany temperatury spowodowane występowaniem w strukturze kompozytu defektów przedstawiono na rys. 7÷8. Na rys. 7 pokazano rozkład temperatury na nagrzewanej powierzchni próbki nad defektami w fazie chłodzenia 5 s po nagrzaniu powierzchni kompozytu pojedynczym

Changes of temperature signal on heated surface of the sample above defect D2 at heating by thermal wave is presented in Fig. 5. The analogous changes for unheated surface are presented in Fig. 6.

The exemplary results illustrating the changes of temperature caused by existence of defects in structure of the composite are presented in Fig. 7÷8. Fig. 7 shows the distribution of temperature above defects on the heated surface of the sample in the phase of cooling and 5 seconds after the surface of composite is heated by a single

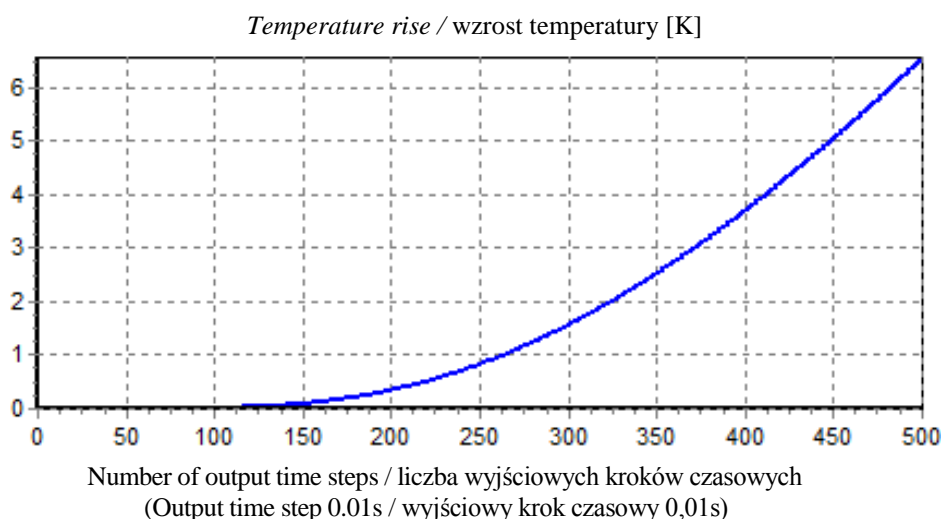
impulsem cieplnym. Rozkład temperatury pod defektami na nienagrzewanej powierzchni w 3,5 s po nagrzewaniu przedstawiony jest na rys. 8.

thermal pulse. The distribution of temperature below defects on the unheated surface and 3.5 seconds after heating is presented in Fig. 8.



**Rys. 5. Przebieg zmian sygnału temperatury na nagrzewanej, falą cieplną, powierzchni próbki nad defektem D2**

*Fig. 5. Changes of temperature signal on the sample surface above defect D2 heated by thermal wave*

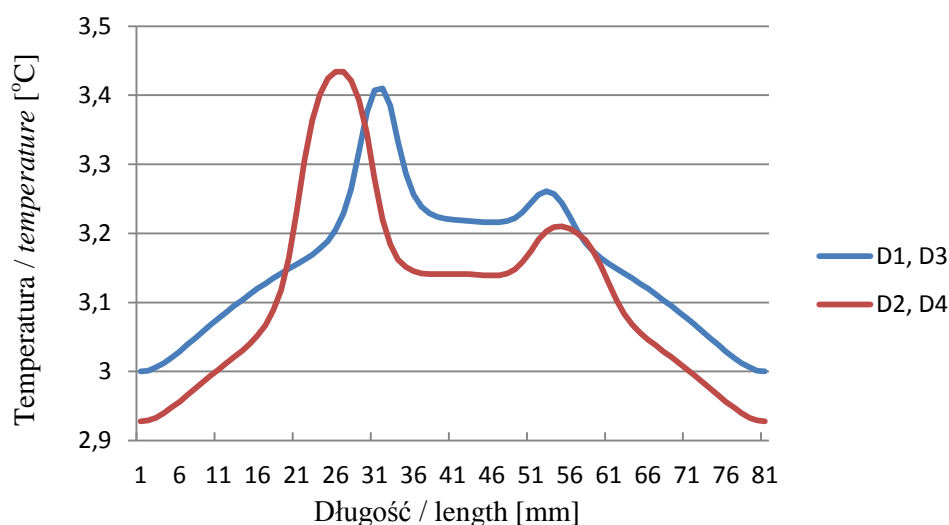


**Rys. 6. Przebieg zmian sygnału temperatury nienagrzewanej powierzchni podczas nagrzewania falą cieplną powierzchni próbki nad defektem D2**

*Fig. 6. Changes of temperature signal on the unheated surface above defects D2 during heating the sample surface by thermal wave*

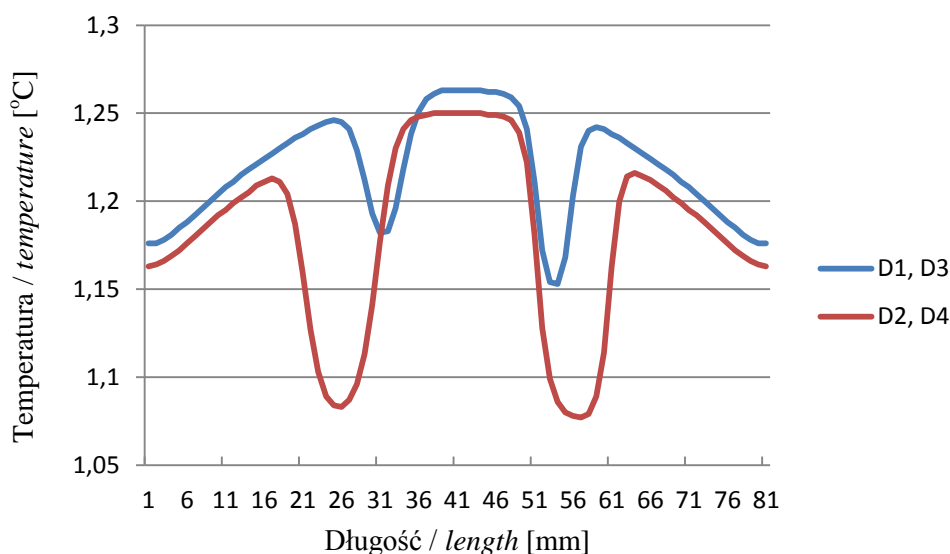
Analogiczne rozkłady temperatury na powierzchniach próbki kompozytu po nagrzewaniu falą cieplną pokazano na rys. 9÷10.

The analogous distributions of temperature on composite sample surfaces after heating by thermal wave are shown in Fig. 9÷10.



**Rys. 7. Rozkład temperatury na powierzchni próbki nad defektami po nagrzewaniu pojedynczym impulsem cieplnym (5 s)**

*Fig. 7. Distribution of temperature above defects on the sample surface after heating by a single thermal pulse (5 s)*



**Rys. 8. Rozkład temperatury na powierzchni próbki pod defektami na nienagrzewanej stronie po nagrzewaniu pojedynczym impulsem cieplnym (3,5 s)**

*Fig. 8. Distribution of temperature behind defects on the unheated side of sample surface after heating by single thermal pulse (3.5 s)*

## 5. Podsumowanie

Przyjmując założenie, że defekt może być wiarygodnie wykryty, jeżeli sygnał temperatury na powierzchni próbki nad defektem (metoda odbiciowa) i pod defektem (metoda transmisyjna) będzie spełniał następujące warunki [3]:

## 5. Summary

It is assumed that a defect may be reliably detected if a temperature signal on sample surface above the defect (reflection method) and behind the defect (transmission method) meets following conditions [3]:

- maksymalna wartość temperatury na powierzchni próbki, która występuje na końcu ogrzewania musi być niższa od temperatury zniszczenia materiału próbki;
- sygnał temperaturowy nad defektem musi przewyższyć rozdzielczość temperaturową użytej kamery termowizyjnej;
- bieżący kontrast temperatury musi przewyższyć poziom szumów (2%).

Porównując wyniki przedstawione w tabelach 3 i 4 z założonymi wyżej warunkami stwierdzono, że:

- temperatura powierzchni próbki w trakcie symulacji nie była wyższa od 100°C, którą przyjęto, jako temperaturę zniszczenia próbki;
- nad i pod wszystkimi defektami  $\Delta T > 0,05^\circ\text{C}$ ;
- w większości przypadków bieżący kontrast  $C > 2\%$ , ale w niektórych przypadkach  $C = 2\%$ .

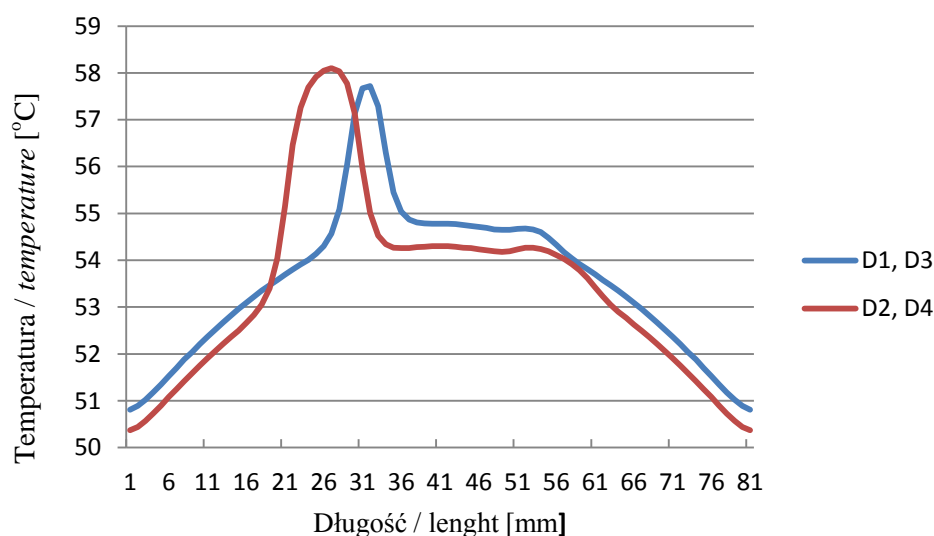
Analizując wyniki stwierdzono, że w metodzie dwustronnej wszystkie defekty mogą być wiarygodnie wykryte bez względu na użyte wymuszenie cieplne. Przy czym korzystniejsze (większe) różnice temperatury pod defektami uzyskano przy użyciu fali cieplnej. Wyniki dla pojedynczego impulsu prostokątnego i cieplnego są porównywalne. W metodzie jednostronnej, używając wymuszenia cieplnego w postaci pojedynczego impulsu, w przypadku głębiej położonych defektów mogą być problemy z ich wiarygodnym wykryciem, ponieważ kontrast temperaturowy jest na poziomie szumów ( $C = 2\%$ ). Aby wykryć te defekty należy albo zwiększyć gęstość impulsu cieplnego ogrzewającego próbkę, albo wydłużyć czas grzania pamiętając jednak o ograniczeniu dotyczącym temperatury zniszczenia próbki. Można również użyć specjalnych metod przetwarzania wyników eksperymentalnych opisanych między innymi w pracy [11].

W przeprowadzonej analizie nie uwzględniono emisyjności badanego obiektu, ponieważ w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni emisyjność nie ma istotnego wpływu na otrzymane wyniki, jak ma to miejsce przy pomiarach wyznaczających dokładną temperaturę obiektu.

- Maximal value of temperature on the sample surface is lower than destructive temperature of the sample material at the end of heating;
- Temperature signal above the defect has to be greater than temperature resolution of applied thermovision camera;
- The running temperature contrast has to exceed the noise level by 2%.  
Comparing the results presented in tables 3 and 4 with the limitations mentioned above it was stated that:
  - Temperature of sample surface was not higher than 100°C which was taken as destructive temperature for the sample;
  - Above and behind all defects there was  $\Delta T > 0.05^\circ\text{C}$ ;
  - For most cases the running contrast was  $C > 2\%$  but in some cases it was  $C = 2\%$ .

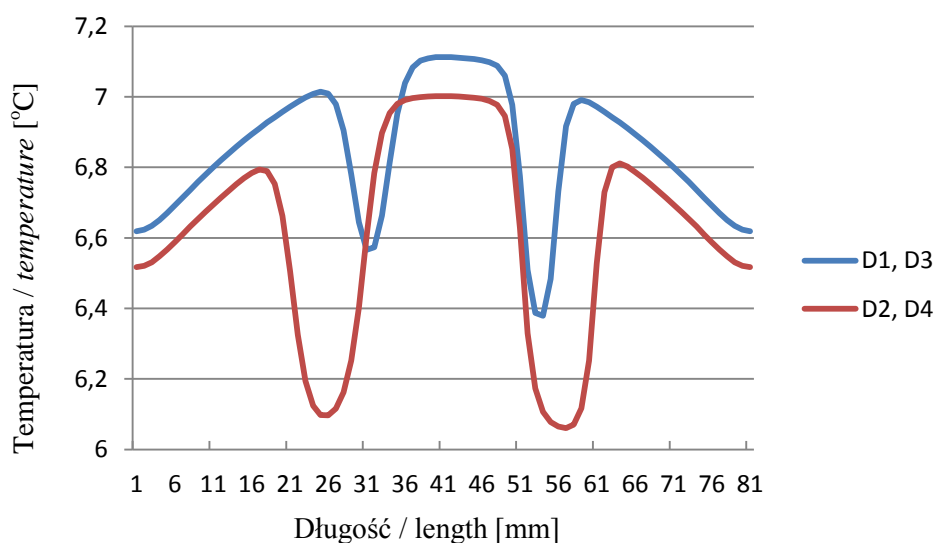
The results show that all defects may be reliably detected by two-side method independently on the applied type of thermal stimulation. Temperature differences are more beneficial (greater) behind the defects if the thermal wave is used. The results for single rectangular and thermal pulses are comparable. For one-side method and thermal stimulation in the form of a single pulse some problems may appear with a reliable detection of deeper defects as the temperature contrast is on the level of noises ( $C = 2\%$ ). The detection of such defects may require an increased density or heating time of thermal pulse without crossing the temperature which destroys the sample. Moreover some specialised methods of measurement data processing which are included above all in [11] may be used.

The analysis presented above does not take into account the radiation of tested object as for non-destructive testing by infrared thermography methods it influences insignificantly the received results in contrary to accurate measurements of object temperature where it plays a significant role.



**Rys. 9. Rozkład temperatury na powierzchni próbki nad defektami po nagrzewaniu falą cieplną (5 s)**

*Fig. 9. Distribution of temperature above defects on the sample surface after heating by thermal wave (5 s)*



**Rys.10. Rozkład temperatury na powierzchni próbki pod defektami na nienagrzewanej stronie po nagrzewaniu falą cieplną (3,5 s)**

*Fig. 10. Distribution of temperature on the unheated sample surface and behind defects after heating by thermal wave (3.5 s)*

## Literatura / Literature

- [1] Dobrzański L. A., *Niemetalowe materiały inżynierskie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008
- [2] Cole W. F., Forte M. S., Heslehurst R. B., *Maintainability Issues in ASM Handbook, Composites Vol. 21*, pp. 914-921, ASM International, Ohio, USA, 2001
- [3] Świdorski W., *Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych, monografia habilitacyjna*, WITU, Zielonka, 2010

- 
- [4] Krapez J. C., Balageas D., Early Detection of Thermal Contrast in Pulsed Simulated Infrared Thermography, *Proc. of QIRT*, pp. 260-266, Sorrento, 1994
- [5] Krapez J. C., Maldague X., Thermographic NDE Data Inversion Procedure (part II: 2D Analysis and Experimental Results, *Res. in NDE*, Vol. 3, No. 2, pp.101-124, 1991
- [6] Degiovanni A., Bendada A., Batsale J. C., Maillet D., Analytical Simulation of a Multi-dimensional Temperature Field Produced by Planar Defects of any Shape; Application to Nondestructive Testing, *Proc. of QIRT*, pp. 253-259, 1994
- [7] Vavilov V., Taylor R., Theoretical and Practical Aspects of the Thermal NDT of Bonded Structures, *Res. Techn. in NDT*, Vol. 5, p.239, London, 1982
- [8] Weisstein E. W., *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*, Chapman&Hall/CRC, 2003
- [9] Świdorski W., Vavilov V., Wybrane problem modelowania przewodzenia ciepła w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych, *PTU, Zeszyt 123*, Nr 3, str. 17-31, Zielonka, 2012
- [10] Vavilov V., Infra-red Non-destructive Testing of Bonded Structures: Aspects of Theory and Practice, *Br J NDT*, No. 7, pp. 175-183, 1980
- [11] Świdorski W., Vavilov V., Przetwarzanie termogramów oraz obróbka danych w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni, *PTU, Zeszyt 111*, Nr 3, str. 57-81, 2009

