

**Łukasz KORNAS<sup>1</sup>, Tomasz WIŚNIEWSKI<sup>2</sup>, Krzysztof DRAGAN<sup>3</sup>**<sup>1</sup> INSTYTUT TECHNICZNY WOJSK LOTNICZYCH, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, skryt. poczt. 96<sup>2</sup> INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ, POLITECHNIKA WARSZAWSKA, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa<sup>3</sup> INSTYTUT TECHNICZNY WOJSK LOTNICZYCH, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, skryt. poczt. 96**Termograficzna metoda badań nieniszczących konstrukcji lotniczych****Mgr inż. Łukasz KORNAS**

Absolwent Politechniki Łódzkiej oraz Uniwersytetu Technicznego w Libercu na wydziale Mechanicznym o specjalności Inżyniera Materiałowa. Od roku 2009 pracuje w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych specjalizując się technikach badań nieniszczących głównie w metodzie pomiarów w podczerwieni. Jest autorem oraz współautorem artykułów dotyczących problematyki badań nieniszczących materiałów i konstrukcji stosowanych w lotnictwie.

e-mail: lukasz.kornas@itwl.pl

**Dr hab. inż. Tomasz WIŚNIEWSKI**

Jest profesorem nadzwyczajnym w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. Jest autorem i współautorem ponad 90 publikacji, w tym 20 z zakresu zastosowań termografii w podczerwieni, m.in. w badaniach wymiany ciepła, obróbki plastycznej, reakcji chemicznych oraz zastosowań w budownictwie i energetyce. Jego zainteresowania naukowe dotyczą głównie wymiany ciepła. Jest współautorem monografii poświęconych izolacji cieplnym i termicznemu oporowi kontaktowemu.

e-mail: tswis@itc.pw.edu.pl

**Dr inż. Krzysztof DRAGAN**

Ukończył Wojskową Akademię Techniczną (kierunek fizyka techniczna) w 2001 r. Pracuje w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych od 2001 r. obecnie na stanowisku zastępcy kierownika zakładu niezawodności i bezpieczeństwa techniki lotniczej. W 2008 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w specjalności budowa i eksploatacja maszyn. Jest autorem szeregu publikacji i opracowań książkowych dotyczących badań nieniszczących i monitorowania konstrukcji.

e-mail: krzysztof.dragan@itwl.pl

**1. Wprowadzenie**

Sprawność i ciągłe monitorowanie stanu technicznego konstrukcji statków powietrznych jest niesłychanie ważne z uwagi na bezpieczeństwo użytkownika. W lotnictwie bezpieczeństwo i sprawność działania są podstawowym wymogiem, gdyż nawet niepozorne uszkodzenie konstrukcji może doprowadzić do poważnego w skutkach wypadku. Przemysł lotniczy intensywnie wykorzystuje innowacyjne rozwiązania technologiczne i materiałowe przy wytwarzaniu konstrukcji lotniczych oraz monitorowania ich stanu.

Współczesne statki powietrzne są najczęściej metalowymi półskorupowymi strukturami, których cienkościenne elementy, wykonane z wysokowytrzymałych stopów aluminium, są łączone metodą nitowania. Liczne otwory pod nity są źródłami koncentracji naprężeń, od których rozpoczyna się proces pęknięcia zmęczeniowego. Długoletnia eksploatacja w zmiennych warunkach atmosferycznych (opady, różnice temperatur itp.) przyczynia się do obniżenia właściwości użytkowych konstrukcji metalowych wywołanego w skutek korozji.

Metalowe struktury cienkościenne, które w warunkach dopuszczalnych obciążeń mogą wykazywać utratę stateczności, zostały zastąpione strukturami przekładkowymi (tylko wtedy gdy taka struktura nie ingerowała w globalną konstrukcję płatowca). Struktury przekładkowe z materiałów metalowych składają się z rdzenia, któremu może być nadawany dowolny kształt i jest łączony z okładzinami operacją klejenia. Najbardziej rozpowszechnionym rdzeniem metalowym jest rdzeń komórkowy. Konstrukcje o takiej strukturze, często o masie niższej od konstrukcji cienkościennych, charakteryzują się wysoką sztywnością. Powszechnie stosuje się takie rozwiązania w śmigłowcach w łopatach wirników nośnych.

Rozwój materiałów polimerowych i kompozytów pozwolił na dalsze modyfikacje struktur lotniczych. Zaczęto stosować pianki polimerowe o właściwościach izotropowych jako rdzenie w konstrukcjach przekładkowych. Natomiast na pokrycia w cienkościennych konstrukcjach, jak również w strukturach przekładkowych wykorzystano materiały kompozytowe o budowie laminarnej, wytworzone na bazie włókien węglowych, szklanych, aramidowych itp.

Wzrastające wykorzystanie materiałów kompozytowych w przemyśle lotniczym wynika z faktu, że pod wieloma względami przewyższają one tradycyjne materiały konstrukcyjne, takie jak stopy aluminium. Jednym z istotnych aspektów wzrastającego wykorzystania kompozytów do wytwarzania coraz to bardziej odpowiedzialnych części lotniczych jest zapotrzebowanie na specjalistyczne techniki badań nieniszczących, umożliwiające ocenę struktury wewnętrznej tych materiałów. Dotyczy to zarówno produkcyjnej kontroli jakości na etapie wytwarzania poszczególnych części i podzespołów, jak też badań eksploatacyjnych wykonywanych na samolotach w czasie rutynowych przeglądów lub po sytuacjach awaryjnych. Rola badań nieniszczących w omawianej dziedzinie jest szczególnie odpowiedzialna również

**Streszczenie**

W artykule opisano metodę badań nieniszczących konstrukcji lotniczych w podczerwieni wykorzystującą technikę termografii impulsowej (*ang. pulsed thermography*). Pomiar w podczerwieni zrealizowano na elementach konstrukcji lotniczych wykonanych ze stopów aluminium oraz coraz powszechniej stosowanych struktur kompozytowych zbrojonych włóknem węglowym lub szklanym. W takich strukturach powstają uszkodzenia zagrażające trwałości konstrukcji lotniczych takie jak: korozja (ubytkowa, ukryta, naprężeniowa, etc.); pęknięcia zmęczeniowe; wady i uszkodzenia w kompozytach (m.in. wtrącenia ciała obcych, rozwarstwienia, etc.). Zaprezentowano wyniki badań termograficznych oraz ich analizę z przeprowadzonej inspekcji struktur przekładkowych i laminarnych, w których zarejestrowano typowe nieciągłości strukturalne lub konstrukcyjne jakie mogą w nich występować. Zwrócono również uwagę na zalety i ograniczenia zastosowanej techniki badawczej.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, termografia impulsowa, aluminium, kompozyt, statek powietrzny.

**Thermographic method for nondestructive testing of aircraft structures****Abstract**

The paper presents a method for nondestructive testing of aircraft structures using infrared pulsed thermography. In the pulsed thermography method, a disorder in the thermal equilibrium is introduced for a short time interval (a few thousandths of a second for metals) by providing a momentary portion of thermal energy. Infrared measurements were taken on aircraft structural components made of aluminum alloys as well as of carbon- or glass-fiber reinforced composites (use of which is increasingly more common). In such structures, damage modes that endanger the structure durability may occur. These are: corrosion (cavity, hidden, stress, etc.); fatigue cracks; defects and damage in composites (such as foreign body intrusions, delaminations, etc.). In the paper there are presented the results of thermographic testing. There is also described the analysis of the inspections performed on sandwich and laminar structures in which typical structural defects were recorded. The advantages and limitations of the pulsed thermography method are given.

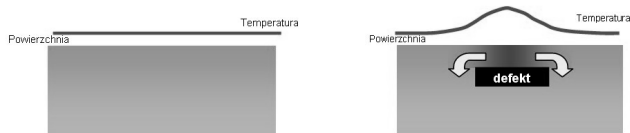
**Keywords:** non-destructive testing, pulsed thermography, aluminum, composite, aircraft.

z powodu niskich wartości współczynników bezpieczeństwa stosowanych przy projektowaniu kompozytowych konstrukcji lotniczych.

W dalszej części artykułu omówiono jedną z wielu metod badań nieniszczących stosowaną do kontroli wyrobów kompozytowych i metalowych. Przed tym jednak przedstawiono podstawowe informacje na temat termograficznej metody impulsowej, wykorzystywanej w badaniach nieniszczących materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym.

## 2. Podstawy teoretyczne

Jeśli do powierzchni materiału dostarczymy pewną ilość energii, na przykład w formie impulsu ciepła, to spowoduje to okresowy wzrost temperatury na powierzchni i w głębi materiału. Wielkość i tempo zmian temperatury w procesie niestabilnego przewodzenia zależne jest m.in. od dyfuzyjności cieplnej (zwanej inaczej współczynnikiem wyrównywania temperatury) ogrzanego materiału. Obecność obszarów z defektami, charakteryzujących się inną dyfuzyjnością cieplną niż obszary bez defektów, powoduje zakłócenie w niestabilnym przepływie ciepła, widoczne na powierzchni w postaci anomalii rozkładu temperatury. Zatem, obrazując pole temperatury na powierzchni stygnącej próbki, uwidocznimy położenia defektów (rys. 1).

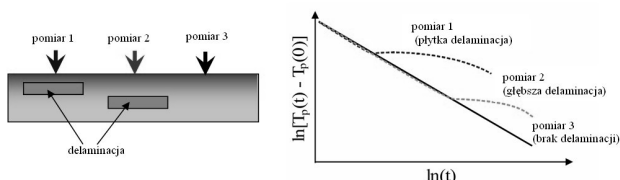


Rys. 1. Model dyfuzji termicznej w głąb materiału  
Fig. 1. The model of thermal diffusion through the material

Technika ta posiada ograniczenia. Szybko zanikający z głębokością kontrast bezwzględny  $\Delta T$  wynikający z różnicy temperatur obszaru z defektem  $T_d$  i obszaru bez defektu  $T_{bd}$  pozwala na wykrywanie zwłaszcza defektów przypowierzchniowych.

$$\Delta T = T_d - T_{bd} \quad (1)$$

Obecność defektów w materiale zmienia lokalnie dyfuzyjność termiczną, powodując różnice pomiędzy temperaturą w obrębie obszaru zawierającego wadę i w obszarze wolnym od nieciągłości materiałowych. Defektami takimi są wtrącenia ciał obcych i rozwarstwienia warstw laminatu, które można ocenić sporządzając wykres zależności  $\ln[T_p(t) - T_p(0)] = f[\ln(t)]$  (rys. 2). Dla materiału jednorodnego bez defektów krzywa stygnięcia jest linia prosta o nachyleniu  $-1/2$ . Delaminacja wprowadza zmianę w przewodnictwie cieplnym materiału wywołując zmianę w przebiegu krzywej stygnięcia.



Rys. 2. Wykrywanie delaminacji za pomocą termografii impulsowej  
Fig. 2. Detection of delamination using pulsed thermography

## 3. Badania rzeczywistych obiektów

W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych podjęto badania mające na celu wykorzystanie metody termografii impulsowej w diagnostowaniu pokryć na elementach statków powietrznych. Pomiary wykonano przy użyciu systemu EchoTchem wyposażonego w kamerę termowizyjną wysokiej klasy firmy FLIR, dwie

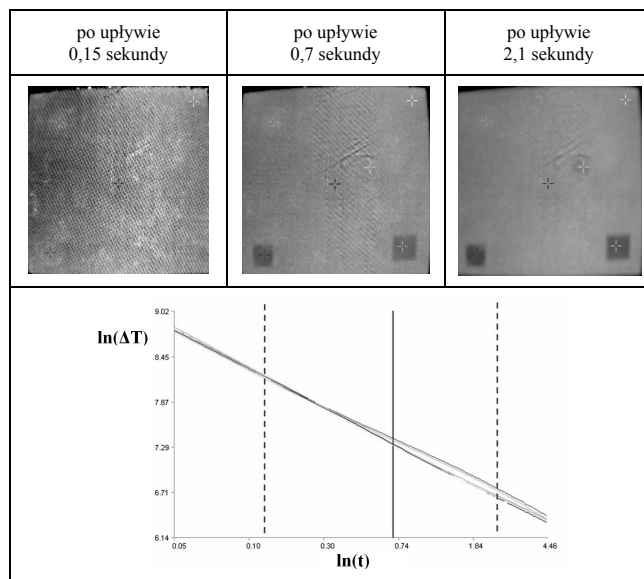
lampy ksenonowe generujące łącznie 5kJ energii cieplnej oraz oprogramowanie wspomagające do wykreślania krzywych temperaturowych (rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu) umożliwiające analizę termogramów.

Badaniom poddano serie próbek z materiałów kompozytowych oraz rozwiązań konstrukcyjnych występujących w strukturze samolotu. Pomiary przeprowadzono na próbkach ze stopów metali lekkich i konstrukcji kompozytowych mające potencjalne uszkodzenia strukturalne np. rozwarstwienia, odklejenia i wtrącenia ciał obcych, występujące w materiałach kompozytowych. Próbki były usytuowane w stałej odległości 290 mm od kamery termowizyjnej. Zarejestrowano sekwencje termogramów powierzchni próbek. Mierzonymi wielkościami były temperatury powierzchni próbki podczas jej stygnięcia w obszarze defektu oraz w obszarze poza defektami rejestrowane w funkcji czasu.

## 4. Wyniki badań i ich analiza

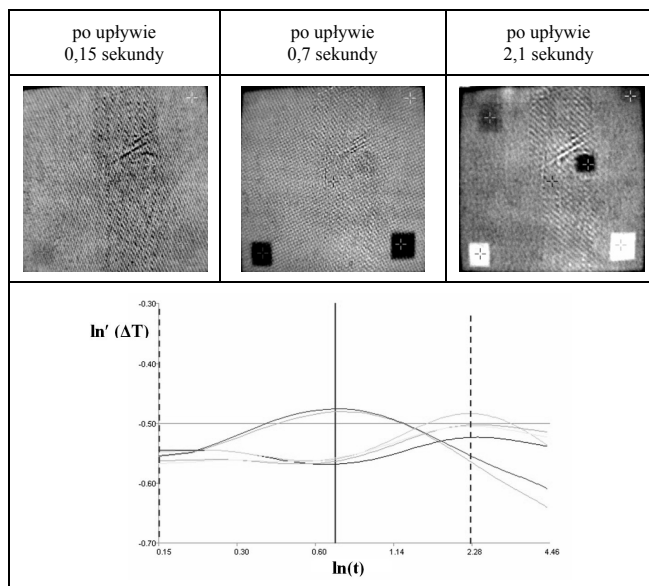
Przeprowadzone badania dostarczyły bardzo obszernego materiału w postaci termogramów i wykresów ujmujących zależność zmian temperatury od czasu. Poniżej przedstawiono podstawową analizę termogramów na przykładzie płytki kompozytowej z wtrąceniami ciał obcych położonych na różnych głębokościach. Wykorzystanie specjalnego oprogramowania umożliwia przedstawienie przebiegu stygnięcia próbki w danym punkcie za pomocą krzywej temperaturowej wykreślonej w funkcji zmieniającej się temperatury w czasie. Poniżej, w tabelach 1, 2, 3 zamieszczono termogramy i przebiegi temperaturowe stosując przekształcenia matematyczne, które wpływają na kontrast i dokładność oceny struktury badanego obiektu.

Na podstawie otrzymanych termogramów można wnioskować o kształcie defektów i ich wielkości oraz jak głęboko są położone. Przykładowa analiza sygnałów termicznych płytki kompozytowej pokazuje możliwość oceny położenia defektu od powierzchni badanej. Defekty zlokalizowane tuż pod powierzchnią wywołują wzrost temperatury powierzchni, odznaczając się większą intensywnością promieniowania podczerwonego. Różnica widoczna jest zarówno na termogramach jak i wykresach przedstawiających etap stygnięcia, tj. zależności zmiany temperatury w czasie (tab. 1). Zastosowanie różniczkowania pierwszego i drugiego stopnia (tab. 2 i 3) znacząco wpływa na jakość i dokładność przeprowadzanej analizy uzyskanych termogramów.



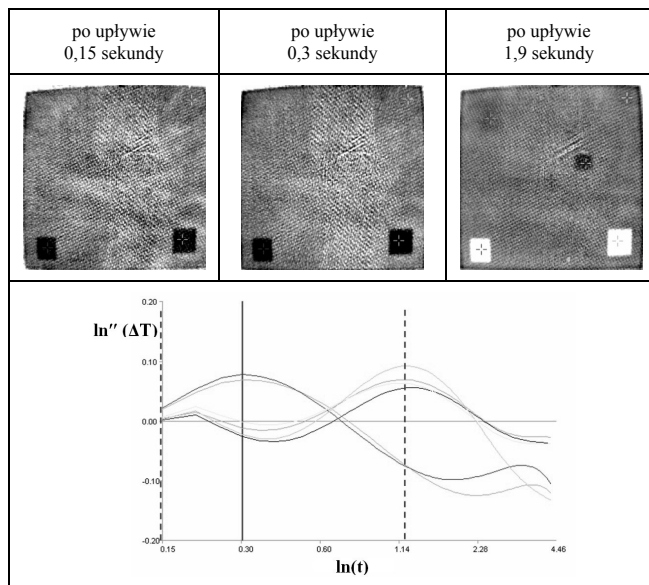
Tab. 1. Sekwencja termogramów w procesie stygnięcia próbek. Wykresy przedstawiające przebieg sygnałów termicznych w obszarze z defektem i bez defektu sporządzone w zależności  $\ln(\Delta T) = f[\ln(t)]$

Tab. 1. The sequence of thermograms in the sample cooling process. Graphs showing the course of thermal signals in the area of defect and without defect made in the  $\ln(\Delta T) = f[\ln(t)]$



Tab. 2. Sekwencja termogramów w procesie stygnięcia próbek. Wykresy przedstawiające przebieg sygnałów termicznych w obszarze z defektem i bez defektu sporządzone w zależności  $d[\ln(\Delta T)]/d[\ln(t)]=f[\ln(t)]$

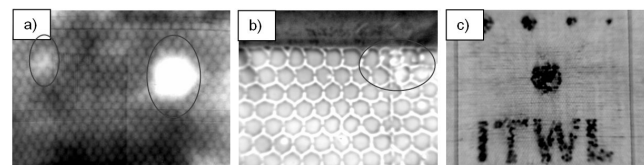
Tab. 2. The sequence of thermograms in the sample cooling process. Graphs showing the course of thermal signals in the area of defect and without defect made in the  $d[\ln(\Delta T)]/d[\ln(t)]=f[\ln(t)]$



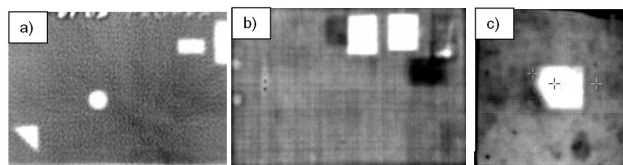
Tab. 3. Sekwencja termogramów w procesie stygnięcia próbek. Wykresy przedstawiające przebieg sygnałów termicznych w obszarze z defektem i bez defektu sporządzone w zależności  $d^2[\ln(\Delta T)]/d[\ln(t)]=f[\ln(t)]$

Tab. 2. The sequence in the process of cooling thermograms of the samples. Graphs showing the course of thermal signals in the area of defect and without defect made in the  $d^2[\ln(\Delta T)]/d[\ln(t)]=f[\ln(t)]$

W dalszej części artykułu zamieszczono wyniki badań w postaci termogramów, pokazujące skuteczność badań diagnostycznych innych rodzajów materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych, stosowanych w budowie statków powietrznych.

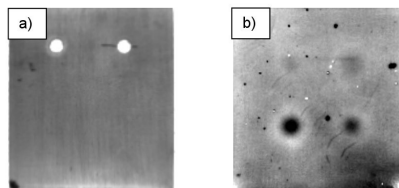


Rys. 3. Przykłady wad w konstrukcji przekładkowej z rdzeniem komórkowym; a) odklejenie; b) deformacja; c) wtrącenia wody  
Fig. 3. Examples of defects in sandwich structures with honeycomb; a) disbond; b) deformation, c) water ingress



Rys. 4. Przykłady wad w materiale kompozytowym; a, b) zbrojony włóknami węglowymi (wtrącenia ciał obcych); c) połączenie klejone (kompozyt na bazie włókien szklanych)

Fig. 4. Examples of defects in the composite material, a, b) made from carbon fibers (bodies ingress), c) joint bonded (made of glass fibers)



Rys. 5. Przykłady wad w stopie aluminium; a) pęknięcie zmęczeniowe; b) zmiana grubości (korozja ubytkowa)  
Fig. 5. Examples of defects in aluminum alloy, a) fatigue crack; b) a change in thickness (pitting corrosion)

## 5. Wnioski

Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Pomiar termograficzny umożliwia odzworowanie stanu fizycznego badanych próbek oraz wykrycie wad wewnętrznych w materiale na różnych głębokościach.
- metoda termograficzna umożliwia sprawdzenie doskonałości wewnętrznej struktury materiału oraz stanu technicznego konstrukcji np. połączenia klejone, (rys. 3, 4c).
- operacje matematyczne wykonywane na uzyskanych termogramach wpływają na sposób przeprowadzania analizy prowadząc do otrzymania lepszego kontrastu na termogramach i dokładności w ocenie istniejących defektów.

Badania nieniszczące metodą termografii impulsowej są możliwe dzięki różnym właściwościom cieplnym obiektów badanych dając możliwość diagnozowania szerokiej klasy materiałów. Zaletami metody jest to, że układ pomiarowy jest bezkontaktowy z powierzchnią badanego obiektu oraz czas odpowiedzi detektora na sygnał jest stosunkowo krótki.

## 6. Literatura

- [1] Kornas Ł., Dragan K., Synaszko P., Latoszek A.: Zastosowanie metody termografii impulsowej do diagnostyki pokryw statków powietrznych, 39 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2010.
- [2] Kornas Ł., Dragan K., Latoszek A., Sałaciński M.: Diagnostyka kompozytowych konstrukcji lotniczych z wykorzystaniem badań nieniszczących metodami termografii oraz ultradźwiękową i akustycznymi, 3 Conference Fatigue of Aircraft Structures, Warszawa 2010.
- [3] Oliferuk W.: Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń, Biuro Gamma, Warszawa 2008.
- [4] Materiały szkoleniowe: Thermal Wave Imaging, Inc. EchoTherm User Manual, 2009.
- [5] Świdarski W.: Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zielonka 2010.

otrzymano / received: 06.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany