

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKRYWANIA WAD WEWNĘTRZNYCH POLIMEROWYCH KOMPOZYTÓW WŁÓKNISTYCH METODĄ TERMOGRAFII

Streszczenie

W artykule poruszono zagadnienie wykrywania wad wewnętrznych polimerowych kompozytów włóknistych metodą termografii. W celu weryfikacji jej efektywności przeprowadzono badanie z wykorzystaniem metody stymulacji długim impulsem próbek materiałów kompozytowych z celowo wprowadzonymi defektami.

WSTĘP

Pojęcie bezpieczeństwa jest obecnie nierozzerwanie związane z inżynierią materiałową: w celu jego zapewnienia opracowywane są materiały o nowych, lepszych właściwościach, zdolne do przeniesienia większych obciążeń. Do takich materiałów zaliczane są z pewnością materiały kompozytowe. Zauważalny jest wzrost zainteresowania i wykorzystania materiałów kompozytowych w konstrukcjach lotniczych. Na bezawaryjność w trakcie ich eksploatacji wpływ ma m.in. stan techniczny, którego prawidłowa ocena zależy od doskonałości zastosowanej metody diagnostycznej. Do metod o wysokiej efektywności należą bez wątpienia badania nieniszczące z zastosowaniem kamer termowizyjnych. Dużą zaletą tej metody jest możliwość oceny stanu technicznego bez demontażu konstrukcji a nawet podczas pracy.

Materiałami kompozytowymi, tzw. kompozytami (łac. compositus = złożony) określa się materiały dla otrzymania których połączono składniki o różnych właściwościach, w wyniku czego otrzymano właściwości wyższe lub dodatkowe w stosunku do składników wykorzystywanych oddzielnie, przy czym ich połączenie zachodzi na poziomie makroskopowym. W tym znaczeniu nie są materiałami kompozytowymi np. stopy metali, które w skali mikroskopowej tworzą kompozycję wielu składników, ale w obrazie makroskopowym zachowują się jak typowe materiały jednorodne. Należy ponadto podkreślić, że właściwości kompozytu nigdy nie prezentują sumy czy średniej wartości poszczególnych właściwości jego składników [1,2,3]. Najszerze zastosowanie znalazły jak dotąd polimerowe kompozyty włókniste, zawdzięczające swoje podstawowe znaczenie praktyczne bardzo dobrym parametrom technicznym przy stosunkowo prostych metodach wytwarzania i względnie niskiej cenie.

Żadna z kilkunastu obecnie stosowanych technologii wytwarzania materiałów kompozytowych nie umożliwia uzyskania wyrobów o strukturze idealnej tj. pozbawionej nieprawidłowości. Połączenie znacznie różniących się swą charakterystyką składników powoduje, że kompozyty częściej niż inne materiały są narażone na powstawanie wad zarówno na etapie produkcji, jak i podczas eksploatacji. Za uszkodzenie uznaje się zamierzoną lub niezamierzoną zmianę własności materiałowych lub geometrycznych obiektu, która ujemnie wpływa na aktualny i przyszły stan tego obiektu [6].

Założenie, że nie jest możliwe uniknięcie występowania defektów technologicznych i eksploatacyjnych oraz stawianie coraz bardziej ekstremalnych wymagań przed współcześnie użytkowanymi materiałami wymusza jednoczesny wzrost wymagań dotyczących zarówno metod oceny ich jakości w kontrolach poprodukcyjnych, jak i wydajnych sposobów diagnozowania w trakcie eksploatacji. Sprawność i ciągle monitorowanie stanu technicznego elementów **konstrukcji** jest niesłychanie ważne z uwagi na bezpieczeństwo użytkowników. W przypadku materiałów kompozytowych skuteczne

okazują się metody diagnostyczne z użyciem termografii w podczerwieni, co wynika z cech tych materiałów: małej przewodności cieplnej, wysokiej emisyjności, a także z różnic w parametrach termofizycznych między składnikami, z których zbudowany jest kompozyt, a poszukiwanymi defektami. Celowość użycia metody termografii w stosunku do materiałów kompozytowych potwierdza również fakt, że promieniowanie odbite od badanego materiału, będące zakłóceniem pomiaru, jest w ich przypadku zdecydowanie niższe [8].

Termowizja (termografia, zobrazowanie termiczne) jest dziedziną techniki zajmującą się detekcją, rejestrowaniem, przetwarzaniem i wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego (rzadziej mikrofalowego) emitowanego przez obiekty, przy czym otrzymany obraz (kolorowy lub czarno-biały) jest odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni obserwowanego (badanego) obiektu. Obraz ten jest nazywany termogramem [7]. W zależności od właściwości cieplnych badanego materiału i defektu, strefy w których występują nieciągłości będą na nim wskazywane przez obszary o wyższej lub niższej temperaturze.

1. BADANIA TERMOGRAFICZNE

Jedną z najpopularniejszych obecnie metod stosowanych w badaniach nieniszczących jest termografia impulsowa, będąca aktywną metodą termografii. [4] Ze względu na dużą bezwładność cieplną, jaką charakteryzują się materiały kompozytowe oraz ograniczenia w dostępności potrzebnej mocy nagrzewania, do oceny możliwości wykrywania wad wewnętrznych polimerowych kompozytów włóknistych zastosowano metodę długiego impulsu, transmisyjną o powierzchniowej stymulacji promieniowaniem optycznym. Analiza odpowiedzi defektnej za pomocą kamery termograficznej umożliwia wykrycie defektów podpowierzchniowych, ze względu na ich odmienne właściwości termiczne od badanego obiektu. [5] Próbką, której temperatura była wyrównana w całym obszarze i równa temperaturze otoczenia została poddana nagrzewaniu, co rozpoczęło proces wymiany ciepła pomiędzy próbką a otoczeniem, umożliwiając rejestrację, a następnie analizę sekwencji termogramów w poszukiwaniu defektów. W celu uniknięcia poddawania w wątpliwość nieniszczącego charakteru badania, jako temperaturę zniszczenia próbki przyjęto 100°C. Badania przeprowadzono w pomieszczeniu, co gwarantowało stabilne warunki zewnętrzne. Temperatura otoczenia wynosiła 20°C, brak było wiatru i nie występowały żadne inne czynniki mogące wprowadzić zakłócenia wpływające na pomiary. Biorąc pod uwagę, że emisyjne właściwości badanych próbek były jednorodne, a zmieniała się jedynie temperatura poszczególnych fragmentów, przed przystąpieniem do badań termowizyjnych przyjęto emisyjność cieplną dla każdego

z badanych kompozytów równą 0,92. Takie przybliżenie mogło zostać dokonane, ze względu na cel badania, który nie wymaga dużej dokładności pomiaru temperatury, a jedynie możliwości analizy morfologii pola temperatury na powierzchni badanego obiektu, co pozwoli na podjęcie przez operatora lub automatyczne urządzenie decyzji w kwestii występowania defektu.

Do przeprowadzenia badań wykorzystano stanowisko składające się z układu mocowania próbki, źródła energii cieplnej oraz urządzenia rejestrującego (Rys. 1). Stanowisko przystosowane jest do rejestracji obrazów termowizyjnych na powierzchni próbki przeciwległej do powierzchni nagrzewanej, a więc do przeprowadzania badań metodą dwustronną. Obrazy termowizyjne mogą być rejestrowane zarówno w trakcie jak i po zakończeniu nagrzewania próbki. Ponadto stanowisko umożliwia stabilne mocowanie próbki oraz dokładne ustawienie odległości źródła stymulacji cieplnej od nagrzewanej próbki, co pozwoliło na uzyskiwanie żądanych temperatur.



Rys. 1. Stanowisko do badań termograficznych


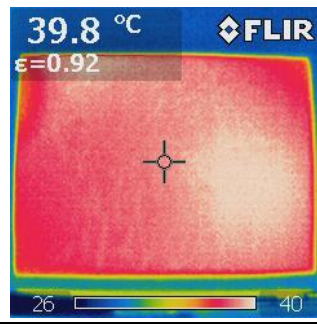

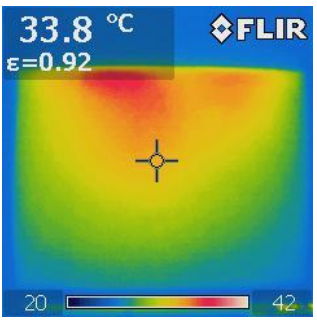

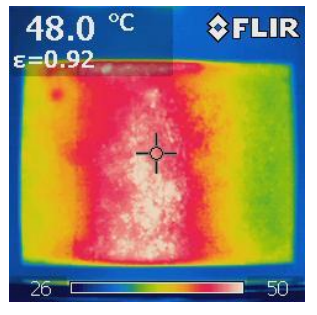

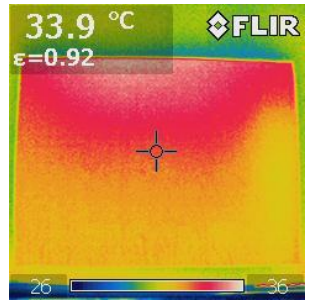
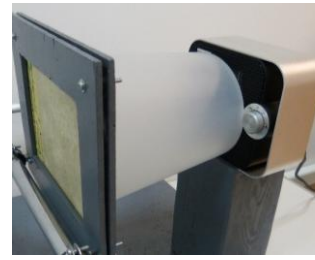
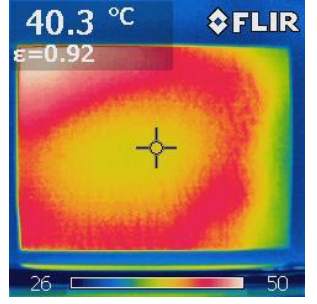
Do rejestracji pola temperatury na powierzchni próbek użyto kamery termowizyjnej FLIR i60 (Rys. 2), pracującej w zakresie długości fali 7.5 do 13 μm .



Rys. 2. Kamera termowizyjna FLIR i60

W celu wybrania najbardziej optymalnego pod względem mocy i równomierności nagrzewania źródła energii cieplnej przeprowadzono ich porównanie stosując przy tym próbkę polimerowego kompozytu wzmacnianego matą szklaną. Jako potencjalne źródła ciepła użyto: promiennik podczerwieni (lampę grzewczą o mocy 375 W), suszarkę do włosów (o mocy 2 kW), grzejnik elektryczny (o mocy 1,4 kW) oraz farelkę ceramiczną (o mocy 1,2 kW) z dyszą i bez dyszy. Nierównomierność nagrzewania powierzchni badanego materiału może utrudnić (a nawet uniemożliwić) wykrycie wady. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Równomierność nagrzewania w zależności od użytego źródła ciepła (źródło: opr. wł.)

Źródło energii cieplnej	Uzyskany termogram
	
	
	
	
	

Przedstawione termogramy jednoznacznie wskazują na promiennik podczerwieni jako źródło ciepła pozwalające na zminimalizowanie wpływu nierównomierności nagrzewania na pomiary ter-

mowizyjne. W dalszych badaniach został więc wykorzystany promiennik podczerwieni („POLAMP”) o mocy 375 W, którego powierzchnia aktywna usytuowana była pionowo, równolegle do ogrzewanej próbki.

Do opracowywania i testowania metod badań nieniszczących wykorzystuje się próbki wzorcowe, do których wprowadza się sztuczne nieciągłości symulujące w przybliżeniu charakter defektów „naturalnych”. W celu przygotowania 32 próbek kompozytowych (po dwie próbki z danym defektem), różniących się między sobą typem włókna (szklane, węglowe oraz aramidowe) i rodzajem wprowadzonej wady wewnętrznej, zastosowano metodę kontaktową (laminowania ręcznego). Jako materiał osnowy użyta została żywica epoksydowa („Epidian 52”).

Do dalszych badań wybrano sześć próbek zawierających wady w postaci wtrąceń:

- z piasku i żużlu pomiedziowego (próbka została oznaczona jako nr 1),
- kawałków szkła (nr 2),
- trzech nitów lotniczych (nr 3),
- kamienia (nr 4),
- krążka parafinowego (nr 5),
- pęcherza powietrza (nr 6).

Wybrane próbki zostały dodatkowo zalane żywicą epoksydową (Epidian 52, 300 g) utwardzaną TFF (81 g) z dodatkiem pyłu (41 g) (rys. 3).

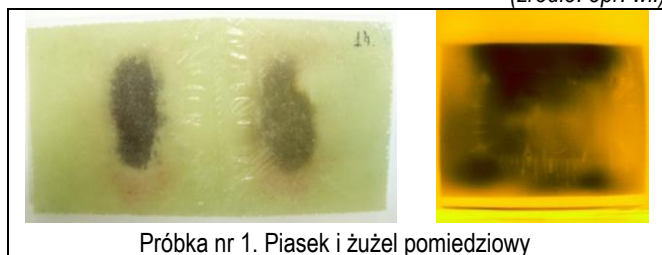


Rys. 3. Przygotowywanie próbek badawczych

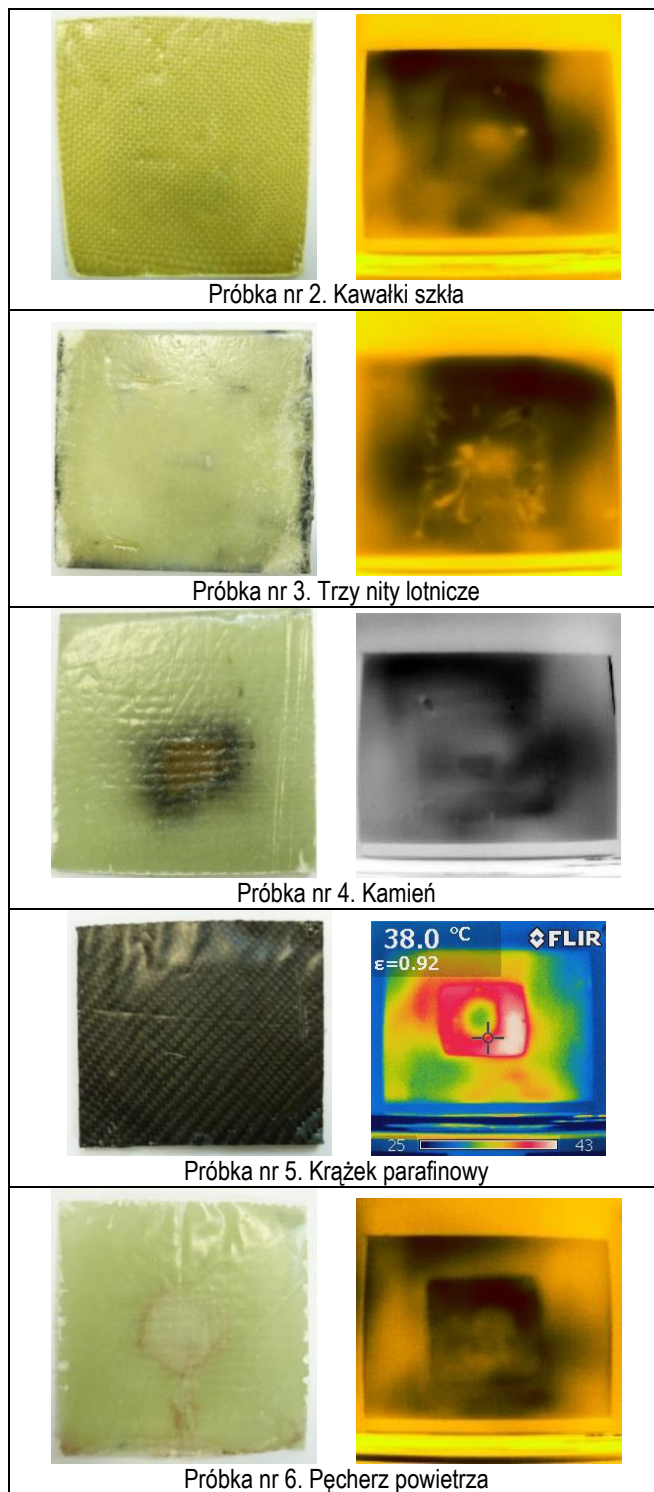
Za pomocą kamery termowizyjnej rejestrowano rozkład temperatury na powierzchni próbki przeciwległej do nagrzewanej. Uzyskano kilkaset termogramów, jednak na potrzeby niniejszej pracy przedstawiono jedynie wybrane z nich. Czas wzbudzenia cieplnego promiennikiem podczerwieni oraz odległość źródła ciepła-próbka ustalano eksperymentalnie, zwiększając stopniowo czas nagrzewania przy określonej odległości promiennika, w celu uniknięcia przekroczenia temperatury zniszczenia.

W tabeli 2 zestawiono otrzymane termogramy dla każdej z badanych próbek. W pięciu przypadkach, w celu uwypuklenia interesujących z punktu widzenia obserwatora cech, dokonano ich przetworzenia za pomocą programu ThermoCAM Researcher Professional 2.10.

Tab. 2. Zestawienie otrzymanych termogramów (źródło: opr. wł.)



Próbka nr 1. Piasek i żużel pomiedziowy



Próbka nr 2. Kawałki szkła

Próbka nr 3. Trzy nity lotnicze

Próbka nr 4. Kamień

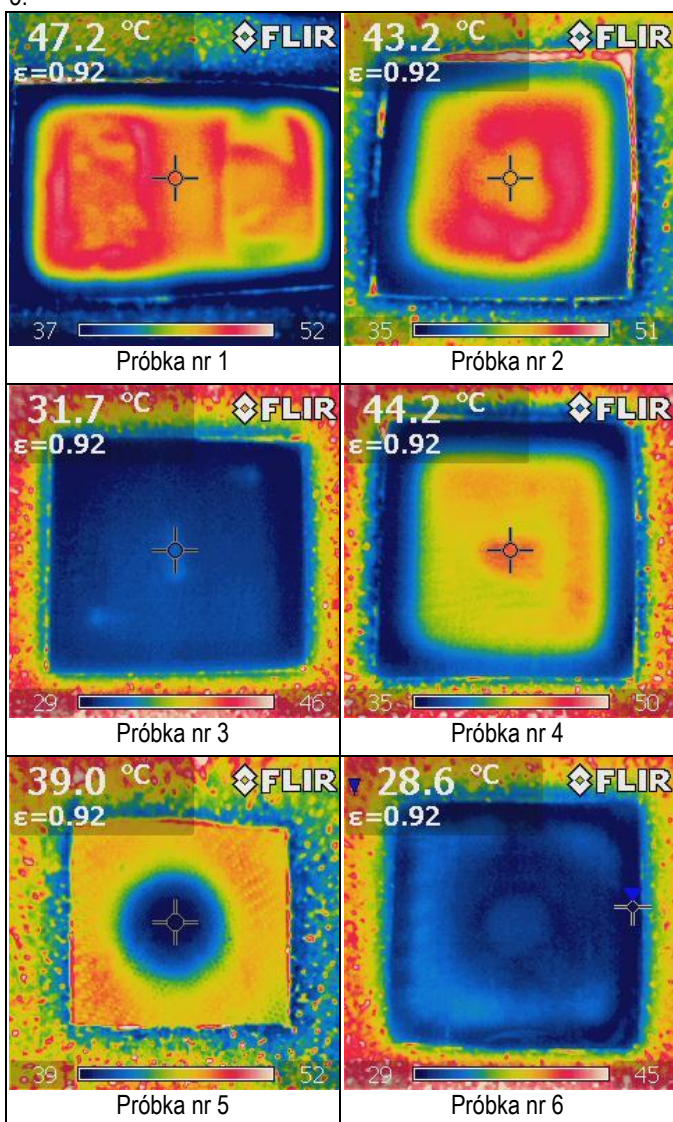
Próbka nr 5. Krążek parafinowy

Próbka nr 6. Pęcherz powietrza

Analiza uzyskanych termogramów pozwoliła stwierdzić, że nie w każdym przypadku został wykryty wprowadzony defekt, co może być spowodowane głębokością jego położenia. Można również zauważyć, że mimo zastosowania w układzie mocowania próbki otworów mniejszych w stosunku do wymiarów próbki, ścianki boczne nie były izolowane w dostatecznym stopniu (przepływ ciepła wokół ścianek). Pomimo poprzedzenia badań wyborem odpowiedniego źródła energii cieplnej, stwierdzono, że obrazy termiczne są zaburzone w efekcie nierównomiernego nagrzewania próbki, co w efekcie może prowadzić do błędnej interpretacji lub ograniczyć zdolność wykrycia defektu. Należy jednak zaznaczyć, że na termogramach widoczne są nieciągłości, które nie zostały celowo wprowadzone do struktury materiału kompozytowego, ale były niezamie-

rzonym błędem technologicznym procesu wytwarzania próbki do badań.

Badania powtórzone w celu weryfikacji uzyskanych wyników i wypracowanych wniosków, umieszczając próbki (drugie z pary z danym defektem) w styropianie. Metoda oraz parametry badania pozostały niezmienione. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Zestawienie otrzymanych termogramów (źródło: opr. wł.)

Na przedstawionych termogramach wprowadzone defekty są wyraźnie zauważalne, bez konieczności ich wcześniejszego przetwarzania. Można zauważyć, że w większości przypadków, temperatura na obrzeżach próbki jest niższa niż na pozostałej części powierzchni, co świadczy o wystarczającej izolacji bocznych ścianek próbki przez zastosowany sposób umieszczenia ich w styropianie. Ponadto mniejsza powierzchnia próbki pozwoliła na większą równomierność nagrzewania. W efekcie, rozkład temperatury na badanych próbkach pozwala na wiarygodne stwierdzenie przez operatora urządzenia rejestrującego, że defekt istnieje, co kończy fazę defektoskopii.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie w diagnostyce polimerowych kompozytów włóknistych nieniszczącej metody termografii w podczerwieni, pozwala na wykrywanie oraz dobrą wizualizację niektórych wad wewnętrznych i powierzchniowych.

Analiza otrzymanych lub przetworzonych termogramów badanych próbek umożliwia wydzielenie obszarów, na których występują niejednorodności pola temperatury świadczące o zmianach w strukturze wewnętrznej kompozytów. Dokładność pomiarów termowizyjnych zależy jednak od wielu czynników – trudność stanowi precyzyjna ocena ich wpływu na uzyskane wyniki. Niekiedy istnieje możliwość ich pominięcia lub eliminacji, co jednak wymaga wiedzy na temat sytuacji, w których można tego dokonać bez wprowadzania błędów.

W trakcie wykonywania badań stwierdzono, że czas, w którym występuje największy kontrast nad defektem jest zależny od jego wymiarów geometrycznych i właściwości cieplnych, a możliwość wykrycia determinowana jest m.in. przez głębokość jego położenia. Termogramy są ponadto często zaburzone w wyniku przestrzennej niejednorodności fali cieplnej warunkowanej zarówno niejednorodnością wymuszeń cieplnych jak i np. kształtem obiektu badanego, co może prowadzić do błędnej analizy. Współczesne możliwości ich przetwarzania pozwalają na wyodrębnienie użytecznej informacji, a w niektórych przypadkach mogą mieć istotny wpływ na prawidłowość interpretacji uzyskanych obrazów oraz efektywność defektoskopii. Pomiar termowizyjny mogą być przeprowadzane przez odpowiednio przeszkolonego operatora, niebędącego specjalistą w dziedzinie badań diagnostycznych, jednak decydujące znaczenie w prawidłowym formułowaniu wniosków będzie mieć jego wiedza i doświadczenie. Ważną rolę w poszerzaniu wiedzy na temat zastosowań termografii spełniają wzorce z wprowadzonymi celowo defektami, które pozwalają na ocenę możliwości wykrywania poszczególnych typów wad przy użyciu danej metody. Przeprowadzone badania potwierdzają potencjał użytej metody pomiarowej, a uzyskane wyniki mogą być podstawą do dalszych rozważań teoretycznych w tym zakresie.

BIBLIOGRAFIA

1. Częściak A., Materiałoznawstwo, COSSTWL, Oleśnica 1992.
2. Fejdyś M., Łandwajt M., Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe, Techniczne wyroby włókiennicze, 1-2, nr 12, 2010.
3. German J., Materiały kompozytowe w budownictwie, Kalejdoskop Budowlany nr 6, 2000.
4. Oliferuk W., Termografia aktywna w badaniach materiałów, Dwunaste seminarium – Nieniszczące badania materiałów, Zakopane 2006.
5. Oliferuk W., Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń, Biuro Gamma, Warszawa 2008.
6. Pieczonka Ł., Szewdo M., Uhl T., Termograficzne metody detekcji uszkodzeń, PAK, nr 9, 2009.
7. Praca zbiorowa, Pomiar termowizyjny w praktyce, PAK, Warszawa 2004.
8. Świdorski W., Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zielonka, 2010.

ANALYSIS OF CAPABILITY TO DISCOVERING THE INTERNAL DEFECT OF FIBROUS POLYMER COMPOSITE BY THERMOGRAPHIC METHOD

Abstract

The article discussed the issue of detection of internal defects of fibrous composite polymerthermography method. In order to verify its effectiveness study was carried out using the method of simulation a long pulse samples of composite materials with deliberately introduced defects.

Autorzy:

Przybyłek Paweł - Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Wydział Lotnictwa; 08-521 Dęblin; ul. Dywizjonu 303 nr 35. Tel. +48 261-51-74-29

Sarnowski Witold - Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Wydział Lotnictwa; 08-521 Dęblin; ul. Dywizjonu 303 nr 35. Tel. +48 261-51-74-28

Wojciechowski Piotr - Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Wydział Lotnictwa; 08-521 Dęblin; ul. Dywizjonu 303 nr 35. Tel. +48 261-51-74-29

Zahorski Tomasz - Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Wydział Lotnictwa; 08-521 Dęblin; ul. Dywizjonu 303 nr 35. Tel. +48 261-51-74-29