

Termografia aktywna w analizie uszkodzeń cylindrycznych struktur kompozytowych

Active thermography for damage analysis of cylindrical composite structures

Streszczenie

W pracy zaprezentowano zagadnienia dotyczące analizy uszkodzeń cylindrycznych struktur kompozytowych za pomocą aktywnej termografii w podczerwieni. Przedmiotem badań były cylindryczne struktury kompozytowe o osnowie polimerowej wykonane z jednokierunkowych prepregów (S1) oraz tkaniny szklanej i żywicy epoksydowej (S2). W badaniach były wykorzystywane panele o wymiarach: długość $L = 300$ mm, promień $R = 92$ mm i grubość $t = 2$ mm. W celu wytworzenia sztucznej delaminacji pomiędzy czwartą i piątą warstwą w środkowej części laminatu umieszczono wkładki teflonowe o różnej geometrii. Ponadto badane próbki były obciążane statycznie aż do finalnego zniszczenia. Pozwoliło to na wytworzenie rzeczywistych uszkodzeń i porównanie ich z symulowanymi. Wykonane badania potwierdziły skuteczność badań termograficznych w wykrywaniu i identyfikacji defektów występujących w laminatach szklanych.

Słowa kluczowe: termografia aktywna, delaminacje, struktury kompozytowe

Abstract

The paper presents issues concerning the failure analysis of cylindrical composite structures using active infrared thermography. The subject of the study were cylindrical structures made of composite unidirectional prepregs (S1) and a woven roving glass/ epoxy resin (S2). The panels used in this study are the following dimensions: length $L = 300$ mm, the radius $R = 92$ mm and a thickness $t = 2$ mm. In order to produce artificial delamination, between the fourth and the fifth layer, in the center of laminate, Teflon inserts with various thicknesses were placed. In addition, the samples were loaded statically up to the final failure. This allowed the formation of the real defects and compare them with simulated. The study confirmed the effectiveness of the active thermography in detecting and identifying defects in the glass laminates.

Keywords: active thermography, delamination, composite structures

Wstęp

Wykładniczy rozwój nauki i techniki determinuje zmiany zachodzące w sposobie projektowania konstrukcji inżynierskich. Bardzo wysoko już postawione kryteria wytrzymałościowe przy stałe obniżanej masie i objętości konstrukcji niosą za sobą konieczność optymalnego wykorzystania istniejących materiałów, ale przede wszystkim tworzenia nowych, dotąd niespotykanych kompozycji. Alternatywnym rozwiązaniem

dla tradycyjnych materiałów izotropowych są materiały kompozytowe, których właściwości termomechaniczne mogą być projektowane kierunkowo. Jednak, pomimo wielu istotnych zalet omawianych materiałów, mają one także wiele wad. Główną z nich jest mnogość form zniszczenia (pękanie osłony/włókien, delaminacje etc.), które są odpowiedzialne za zmniejszenie sztywności, jak i wytrzymałości konstrukcji. Ponadto, stopniowy rozwój zniszczenia od lokalnych mikrodefektów może prowadzić do globalnego zniszczenia konstrukcji, gdy nie spełnia ona już swoich funkcjonalnych

Mgr inż. Przemysław Pastuszak – Instytut Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: ppastuszak@pk.edu.pl

zadań [1]. Istnieje bardzo duże ryzyko, że defekty znajdujące się wewnątrz struktury nie zostaną wykryte, co w konsekwencji wiąże się z dodatkowymi kosztami i zagrożeniem zdrowia lub życia człowieka. Dlatego też, zachodzi potrzeba stosowania nowoczesnych metod do oceny stanu konstrukcji. Do tego zadania wykorzystano szereg technik z dziedziny badań nieniszczących (*Non-Destructive Testing* – NDT), które podlegają nieustannej ewolucji, ze względu na rozwój inżynierii materiałowej. Charakterystyka metod, które są obecnie najbardziej rozpowszechnione w przemyśle, została zawarta w tabelicy I. Spośród wymienionych metod badań nieniszczących, termografia w podczerwieni ma kilka wyróżniających ją zalet: szybkość, bezkontaktowość, a także łatwość w interpretacji wyników. Ponadto nieinwazyjność tej metody stwarza możliwości zastosowania jej praktycznie w każdym procesie, gdzie występują zmiany temperatury.

Tablica I. Charakterystyka najczęściej stosowanych w przemyśle metod NDT [2÷4]

Table I. Characteristic of the common NDT methods [2÷4]

Metoda badań	Badania ultradźwiękowe	Badania emisji akustycznej	Badania termograficzne	Badania prądów wirujących	Badania tomograficzne	Badania penetracyjne	Badania wizualne
Badanie próbek metalicznych	+	+	+	+	-	+	+
Badanie próbek kompozytowych	+	+	+	-	+	+	+
Badania bezpośrednio na próbce	-	+	+	+	-	+	+
Wielkość badanej próbki	-	+	+	+	-	+	+
Złożoność geometrii próbki	+	+	+	-	+	-	-
Badania wewnątrz struktury	+	+	+	-	+	-	-
Odporność na warunki środowiskowe	+	+	+	+	-	-	+
Implementacja metody	-	+	+	+	-	+	+
Automatyzacja pomiarów	+	-	+	-	+	-	+
Efektywność metody	-	+	+	+	-	+	+

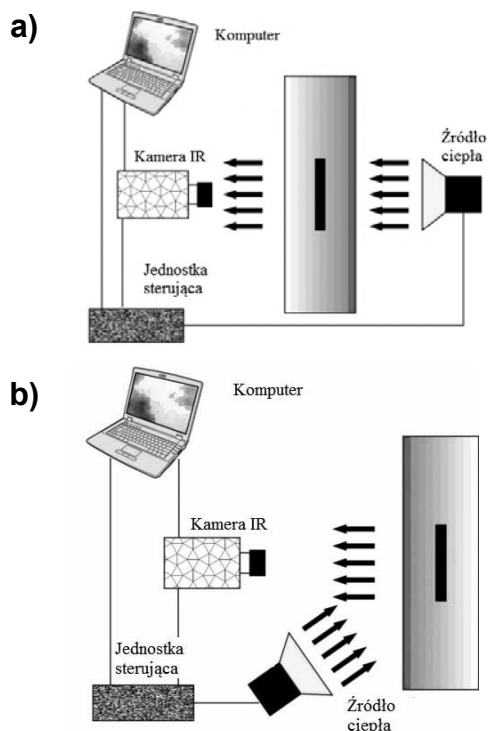
+ zgodność z podaną cechą, - brak zgodności z podaną cechą

Termografia w podczerwieni

Termografia w podczerwieni to dziedzina wiedzy i techniki zajmująca się detekcją, akwizycją i przetwarzaniem fal promieniowania podczerwonego (IR) na użyteczne dla człowieka informacje. Dzięki właściwościom, którymi się charakteryzuje, możliwy jest bezkontaktowy pomiar temperatury na powierzchni badanych obiektów. Kamera termowizyjna wyposażona w odpowiedni detektor przetwarza energię padających

fotonów promieniowania IR na sygnał elektryczny. Następnie, uzyskany sygnał jest przetwarzany i wizualizowany w postaci obrazów termicznych (termogramów).

Można rozróżnić aktywne i pasywne procedury termografii w podczerwieni. Zasadnicza różnica polega na tym, że w badaniach metodą aktywną wykorzystuje się dodatkowe źródło stymulacji cieplnej obiektu. Natomiast techniki pasywne wykorzystują ciepło powstałe w wyniku jego funkcjonowania. Istnieje podział metod aktywnych według wzajemnego położenia urządzeń badawczych, rodzaju źródła cieplnej stymulacji, czy też kształtu i wymiarów strefy stymulacji ciepła i rejestracji temperatury. Położenie źródła cieplnej stymulacji i urządzenia rejestrującego temperaturę możliwe jest w dwóch konfiguracjach: jednostronnej i dwustronnej. W pierwszym przypadku wzbudnik cieplny i detektor promieniowania znajdują się po tej samej stronie badanego materiału, natomiast w drugiej konfiguracji są po przeciwnych stronach. Przykładowe rozmieszczenie urządzeń badawczych zostało zobrazowane na rysunku 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie urządzeń badawczych w termografii aktywnej: a) metoda transmisyjna, b) metoda jednostronna
Fig. 1. Arrangement of the research equipment for active thermography: a) the transmission method and b) the one-sided method

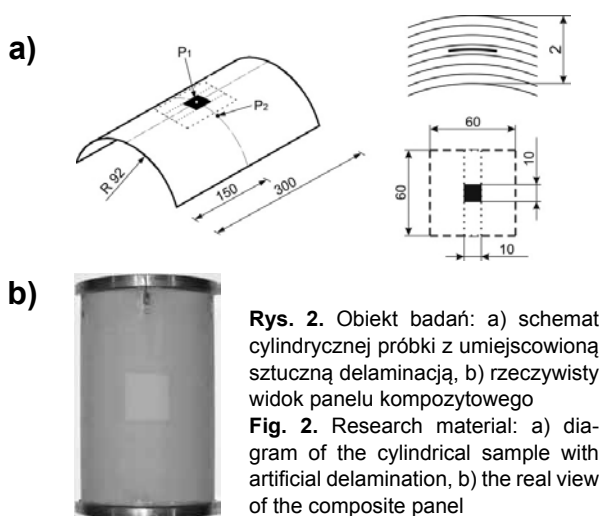
Termografia aktywna opiera się na tworzeniu fali cieplnej na powierzchni badanego obiektu. W zależności od zastosowanej metody może to być impuls prostokątny lub sinusoidalny. Fala cieplna jest różnie absorbowana przez poszczególne materiały. Zależy jest to przede wszystkim od częstotliwości wzbudzenia, ale także od właściwości termofizycznych, przewodnictwa cieplnego, pojemności cieplnej i gęstości testowanych materiałów. Jeżeli fala cieplna dotrze do obszarów, gdzie właściwości termofizyczne różnią się (delaminacja, wtrącenia, porowatość), jest częściowo odbijana, co jest widoczne na powierzchni stygnącej próbki w postaci zaburzonego

rozkładu temperatury. Oceniając amplitudę lokalnej temperatury powierzchni, można otrzymać informacje o wewnętrznej strukturze (głębokości, geometrii lub rodzaju defektu). Zastosowanie to ma sens wówczas, gdy grubość materiału odpowiada w przybliżeniu długości fali cieplnej oraz gdy występują różnice we właściwościach termofizycznych badanego materiału i defektu. Źródłem stymulacji cieplnej badanych obiektów może być: promieniowanie optyczne, prądy wirowe, prąd elektryczny, drgania mechaniczne i in.

Szczegółowe omówienie prezentowanych zagadnień związanych z technikami termografii w podczerwieni można odnaleźć w literaturze uznanej przez autora niniejszej pracy jako podstawową [5÷7], literaturze krajowej [8÷11], a także pracach autora [12÷15]. Ponadto zostało opublikowanych wiele prac ściśle dotyczących omawianego tematu, które można podzielić ze względu na zastosowane metody, takie jak: termografię impulsową [16,17], modulacyjną [18,19], impulsowo-fazową [20,21], czy wibrotermografię [22,23]. Godne uwagi są prace porównujące między sobą poszczególne metody [2,24÷26].

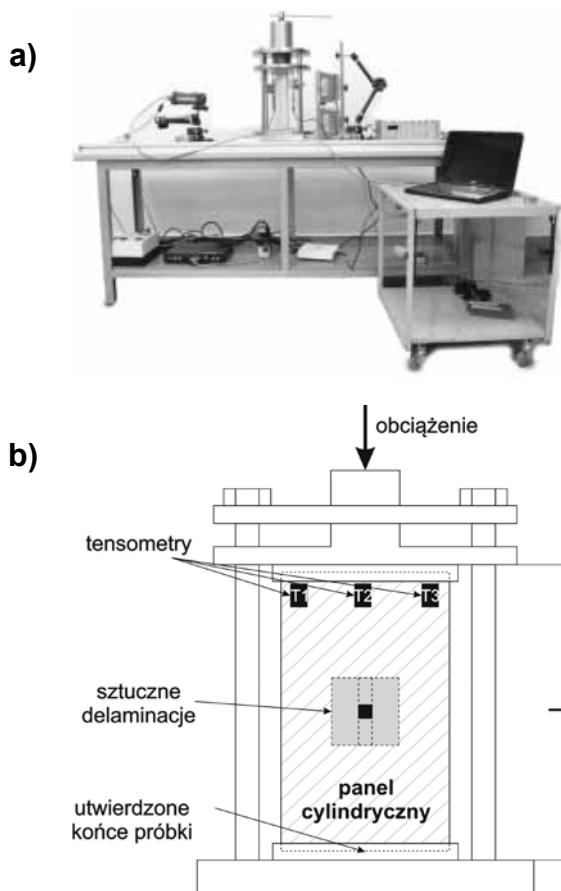
Badania doświadczalne

Przedmiotem badań były cylindryczne struktury kompozytowe o osnowie polimerowej wykonane z jednokierunkowych prepregów (P1) oraz tkaniny szklanej i żywicy epoksydowej (P2). W badaniach były wykorzystywane panele o wymiarach: długość $L = 300$ mm, promień $R = 92$ mm i grubość $t = 2$ mm. W celu wytworzenia sztucznej delaminacji pomiędzy czwartą i piątą warstwą w środkowej części laminatu umieszczono wkładki teflonowe o grubości 400 i 25 μm . Ponadto badane próbki były obciążane statycznie aż do finalnego zniszczenia. Pozwoliło to na wytworzenie rzeczywistych uszkodzeń i porównanie ich z symulowanymi. Schemat badanej struktury z umiejscowioną delaminacją oraz widok rzeczywistego panelu przedstawiono na rysunku 2.



Badania doświadczalne były prowadzone na stanowisku badawczym wykonanym w Instytucie Konstrukcji Maszyn Politechniki Krakowskiej. Podstawowymi elementami stacji badawczej były: kamera termowizyjna marki Flir A325, komputer z oprogramowaniem IR-NDT i ThermoCAM Researcher Pro, lampy halogenowe oraz jednostka sterująca. Dodatkowo, w celu wytworzenia uszkodzeń, wykonano prasę z manualną kontrolą obciążenia (rys. 3). Kamera termowizyjna Flir A325 jest wyposażona w połączenie RJ-45 Gigabit Ethernet, dzięki któremu możliwe jest uzyskanie 16-bitowych obrazów o rozdzielczości 320x240 przy częstotliwości 60 Hz. Ponadto wyposażona jest w dwa zewnętrzne obiektywy: 10 mm i 18 mm, a także może wykonywać pomiary w zakresie temperatury od -20 do 350 $^{\circ}\text{C}$ z dokładnością do $0,07$ $^{\circ}\text{C}$. Działa w zakresie spektralnym od 7,5 do 13,5 μm . Zdjęcie kompletnego stanowiska do badań z wyszczególnieniem urządzenia do obciążania próbek przedstawiono na rysunku 3.

Analizy termograficzne przeprowadzane były w temperaturze pokojowej. Badane próbki były ogrzewane przez lampę halogenową i monitorowane za pomocą kamery termowizyjnej, zarówno podczas ogrzewania, jak i chłodzenia. Zastosowano metodę dwustronną (transmisyjną), co oznacza że próbka znajduje się pomiędzy kamerą, a źródłem ciepła.

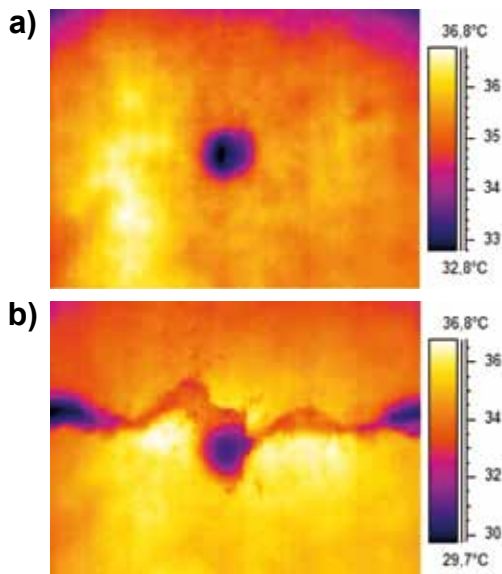


Rys. 3. a) stanowisko do badań termograficznych, b) prasa do obciążenia statycznych

Fig. 3. a) test rig for thermographic survey b) press for static loads

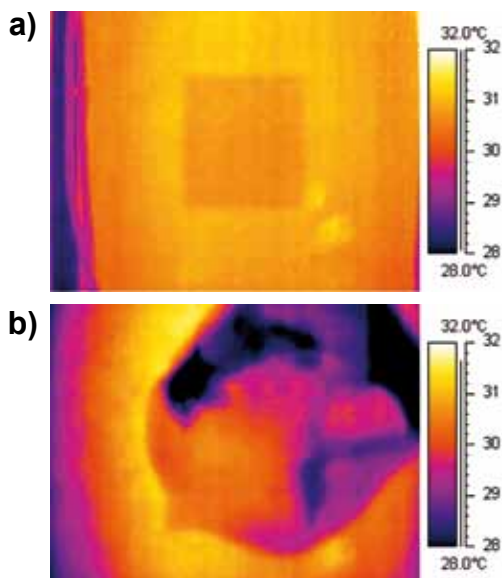
Wyniki i dyskusja

W 80% przypadków wynik jakościowy pozwala stwierdzić, czy badany obiekt opuści linię produkcyjną lub zostanie dopuszczony do dalszej eksploatacji [5]. Wyniki testów pokazują, że identyfikacja zarówno sztucznej, jak i powstałej w wyniku obciążeń statycznych nieciągłości materiału za pomocą aktywnej termografii w podczerwieni jest prosta i szybka do przeprowadzenia. Na rysunkach 4 i 5 zaprezentowano wybrane termogramy dla struktur nieobciążonych oraz zniszczonych w wyniku ściskania. Obszary o obniżonej temperaturze wskazują na możliwość wystąpienia uszkodzeń w strukturze.



Rys. 4. Termogramy struktury: a) nieobciążonej, b) zniszczonej w wyniku obciążeń statycznych, wykonanej z włókna szklanego i żywicy epoksydowej

Fig. 4. Thermograms of investigated structures a) unloaded, b) destroyed by static loading made of fiberglass and epoxy resin

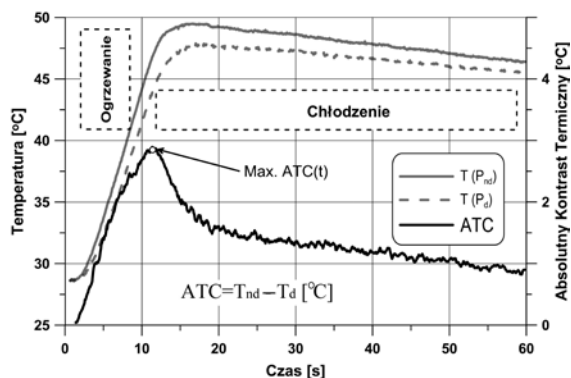


Rys. 5. Termogramy struktury: a) nieobciążonej, b) zniszczonej w wyniku obciążeń statycznych, wykonanej z prepregów jednokierunkowych

Fig. 5. Thermograms of investigated structures a) unloaded, b) destroyed by static loading made of unidirectional glass prepregs

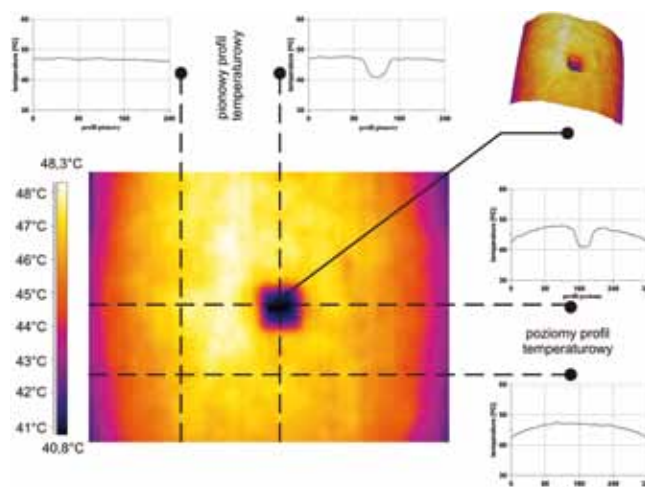
Rozwój temperatury dla wybranych punktów umieszczonych w obszarach z defektem i bez defektu (P1 i P2) oraz *absolutny kontrast temperaturowy* (ATC) dla próbki wykonanej z prepregów jednokierunkowych (S1) został zaprezentowany na rysunku 6. Maksymalny kontrast termiczny wynosi 2,94 °C i wystąpił tuż po zakończeniu ogrzewania próbki w 11,87 sekundzie. Wyniki przeprowadzonej analizy termograficznej są również zaprezentowane w postaci termogramów 2D&3D z wyszczególnionymi profilami temperaturowymi dla poszczególnych obszarów wolnych od wad oraz regionów ze sztucznie wprowadzonym defektem (rys. 7). Kształt i położenie folii teflonowej mogą być zaobserwowane zarówno na termogramie, jak i na profilach temperaturowych dzięki obniżonej temperaturze.

Nierównomierne ogrzewanie oraz fluktuacje emisyjności mają bardzo duży wpływ na jakość otrzymanych danych termograficznych, dlatego też należy zawsze uwzględniać te zjawiska przy interpretacji obrazów termicznych. Na rysunku 7 zaobserwowany spadek temperatury na krawędziach próbki jest spowodowany nierównomiernym ogrzewaniem.



Rys. 6. Rozwój temperatury dla wybranych punktów P1 i P2 (z defektem i bez defektu) oraz *absolutny kontrast temperaturowy* (ATC) dla S1

Fig. 6. Temperature evolution for selected points: P1 and P2 (within and beyond defected area) and Absolute Thermal Contrast (ATC) for S1



Rys. 7. Termogram z pionowymi i poziomymi profilami temperaturowymi dla maksymalnego kontrastu temperaturowego (ATC) dla S1

Fig. 7. Thermogram with the horizontal and vertical temperature profiles for the maximal ATC for S1

Wnioski

Zaprezentowane wyniki potwierdzają tezę, że badania nieniszczące wykorzystujące termografię w podczerwieni są bardzo efektywnym i skutecznym narzędziem w wykrywaniu, lokalizacji i ocenie defektów podpowierzchniowych występujących w wielowarstwowych strukturach kompozytowych.

Testy termograficzne przeprowadzono na cylindrycznych panelach kompozytowych ze sztucznie wprowadzoną delaminacją w postaci kwadratowej folii teflonowej o różnej geometrii oraz rzeczywistych defektów wytworzonych podczas klasycznej próby ściskania. Należy zauważyć, że może być obserwowana nie tylko geometria poszukiwanych defektów, ale także ich rozwój.

Literatura

- [1] A. Muc; Mechanika kompozytów włóknistych; Księgarnia Akademicka, Kraków, 2003.
- [2] E. Kuhn, E. Valot, P. Herve; A comparison between thermosonics and thermography for delamination detection in polymer matrix laminates; Composite Structures, 2012, 94, s. 1155–1164.
- [3] A. Lewińska-Romicka; Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii; WNT, Warszawa, 2001.
- [4] P.D. Pastuszak, M. Chwał, A. Muc, J. Bieniaś; Defects identification in GFRP cylindrical panels by Active Thermography; Przetwórstwo Tworzyw 1/2014, s. 68-75, ISSN 1429-0472.
- [5] X.P.V. Maldague; Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, John Wiley & Sons, Inc., New York - Toronto, 2001.
- [6] X.P.V. Maldague, P.O. Moore; Infrared and thermal testing nondestructive testing handbook, American Society for Non-destructive Testing, 3, 2001.
- [7] C. Ibarra-Castaneda; Quantitative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth retrieval with the phase, PhD thesis, University Laval, 2005.
- [8] W. Oliferuk; Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń; Biuro Gamma, Warszawa, 2008.
- [9] W. Świdorski; Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych. Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zielonka 2010.
- [10] B. Więcek, G. Mey; Termowizja w podczerwieni: podstawy i zastosowania; Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
- [11] H. Madura, ed.; Pomiar termowizyjny w praktyce. Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola - PAK, Warszawa, 2004.
- [12] P.D. Pastuszak, A. Muc; Methods of infrared non-destructive techniques: review and experimental studies, Key Engineering Materials, t. 542, s. 131-141, 2013.
- [13] A. Muc, P.D. Pastuszak; Prediction of subsurface defects through a pulse thermography: experiments vs. numerical modeling. Proceedings of 15th ECCM, Venice – Italy 2012.
- [14] Pastuszak P.D., Badania termograficzne cylindrycznych paneli kompozytowych. Czasopismo Techniczne, Politechnika Krakowska, t. 9-M/2012, s. 213-222, Kraków 2012.
- [15] M. Chwał, P. Pastuszak, W. Lachendro, M. Barski; Analiza delaminacji w panelach kompozytowych metodą termografii impulsowo-fazowej, Przetwórstwo Tworzyw 6(144), 2011, s. 432-437.

Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej
Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa
ZG Stowarzyszenia Inżynierów Techników Mechaników Polskich
Politechnika Świętokrzyska
Centrum Laserowych Technologii Metali PŚk i PAN

zapraszają do udziału w:

4. MIĘDZYNARODOWEJ KONFERENCJI NAUKOWEJ
NATRYSKIWANIA CIEPLNEGO I NAPAWANIA

Wrocław 22-24.09.2015 r.

na temat:

„Postęp, zastosowania i nowoczesne technologie”