

*Termografia w podczerwieni, badania nieniszczące,
promieniowanie podczerwone, pojazdy specjalne,
badania pasywne, badania aktywne lekkie ostony balistyczne*

Waldemar ŚWIDERSKI¹
Paweł HŁOSTA¹

TERMOGRAFIA W PODCZERWIENI W DIAGNOSTYCE POJAZDÓW

Termografia w podczerwieni jest dziedziną techniki zajmującą się detekcją, rejestracją, przetwarzaniem i wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt. Jej wynikiem jest obraz (termogram) będący odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu. Metody badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni można podzielić na pasywne i aktywne. W artykule przedstawione są przykłady zastosowania termografii w podczerwieni, zarówno metodami pasywnymi jak i aktywnymi, do diagnostyki pojazdów. Metody te umożliwiają zarówno wykrycie nieprawidłowo funkcjonujących elementów i zespołów w pojeździe jak i uszkodzeń powstałych w wyniku eksploatacji pojazdu jak i w fazie ich produkcji (miejsca korozji, uszkodzenia mechaniczne, itp.).

DIAGNOSTIC OF VEHICLES BY INFRARED THERMOGRAPHY

Infrared thermography is a technique dealing with detection, registration, processing and visualization of invisible infrared radiation emitted by objects. The result is an image (thermogram) which is a mapping distribution of temperature on the surface of a tested object. Nondestructive testing uses IR thermography in the form of passive and active methods. The paper includes examples of using IR thermography to examine vehicles by both passive and active methods. These methods make possible detection of abnormal functioning elements and units in vehicle and defects occurring at vehicle manufacture stage and usage (places of corrosion, mechanical damages, etc.).

1. WSTĘP

Termografia w podczerwieni jest dziedziną techniki zajmującą się detekcją, rejestracją, przetwarzaniem i wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt. Jej wynikiem jest obraz (termogram) będący odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu [1]. Należy zauważyć, że wszystkie ciała stałe, ciecze i gazy, których temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego (0 K) emitują promieniowanie podczerwone.

¹ Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia; 05-220 Zielonka; ul. Prymasa Wyszyńskiego 7.
Tel.: +48 22 761-552, Fax.: +48 22 7614-447, E-mail: waldemar.swiderski@wp.pl

Metody badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni można podzielić na pasywne i aktywne [2, 3]. W metodach pasywnych ocenę obiektu badań przeprowadza się na podstawie jego charakterystycznego pola temperatury powstałego podczas funkcjonowania obiektu. Dlatego procedury pasywne stosowane są głównie do badania urządzeń lub ich elementów w trakcie funkcjonowania lub krótko po jego zakończeniu, kiedy na podstawie temperatury na ich powierzchni można sądzić o ich wadliwości. W wyniku obciążeń mechanicznych lub cieplnych, występujących w trakcie funkcjonowania obiektu badań, defekty wypromieniowują lub pochłaniają energię cieplną w większym stopniu niż pozostałe obszary materiału, dlatego można je identyfikować metodami pasywnymi.

W metodach aktywnych wykorzystuje się dodatkowe źródło ciepłej stymulacji (nagrzewania lub chłodzenia) obiektu. Materiał obiektu mający przed rozpoczęciem badania jednakową temperaturę z defektem, równą temperaturze otoczenia, nie generuje „użytecznych” sygnałów temperaturowych i wymaga nagrzewania lub ochładzania całego obiektu lub jego części. W trakcie badania powstaje zmienne pole temperatury, a wyniki badania są funkcją czasu obserwacji. W metodach aktywnych zazwyczaj stosowane są specjalne procedury przetwarzania danych [4].

2. METODA PASYWNA

Kamery termowizyjne w zastosowaniach przemysłowych zostały użyte na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Zaczęto stosować je tam, gdzie temperatura decyduje o prawidłowości procesu produkcyjnego oraz jakości wyrobu. Kamery są stosowane w systemach nadzorowania procesów technologicznych, monitorowania instalacji przemysłowych, a także wspomagają projektowanie i wytwarzanie wyrobu [1]. Stosowana jest wówczas metoda termografii pasywnej, w której analiza obrazów cieplnych (termogramów) może być bogatym źródłem informacji o stanie technicznym urządzenia na podstawie nieprawidłowości w rozkładzie temperatury na badanej powierzchni.

W diagnostyce pojazdów może być szeroki zakres wykorzystania termografii pasywnej za pomocą której można lokalizować miejsca występowania anomalii cieplnych podczas pracy silnika, elementów układów kinematycznych (łożyska, przekładnie, sprzęgło, tarcze hamulcowe), układów hydraulicznych i pneumatycznych, systemów grzewczych siedzeń (rys.1) i szyb samochodowych, opon. Niektóre z tych badań nie wymagają specjalnego stanowiska diagnostycznego i mogą być wykonywane nawet podczas ruchu pojazdu. Np. badanie opon, których nagrzewanie podczas jazdy może być przyczyną ich poważnego uszkodzenia, można wykonać bez zdejmowania kół z pojazdu oceniając rozkład temperatury na ich powierzchni. Na nagrzanej oponie podczas jazdy najcieplejsze będą miejsca wskazujące na uszkodzenie opony. Takie uszkodzenia opon jak rozwarstwienia, wewnętrzne pęknięcia oraz nierównomierne ich zużycie są na termogramach widoczne. Silniejsze nagrzewanie się miejsc uszkodzonych jest wynikiem utrudnienia odprowadzania ciepła powstałego na skutek tarcia opony o podłoże w szczelinie powietrznej np. w rozwarstwieniu opony [5].

Dużym ułatwieniem w lokalizacji miejsc występowania anomalii cieplnych jest równoległa z pomiarami kamerą termowizyjną rejestracja obrazu w świetle widzialnym za pomocą kamery wizyjnej lub aparatu fotograficznego.



a) widok fotela kierowcy w samochodzie VW



b) termogram fotela kierowcy przed włączeniem ogrzewania

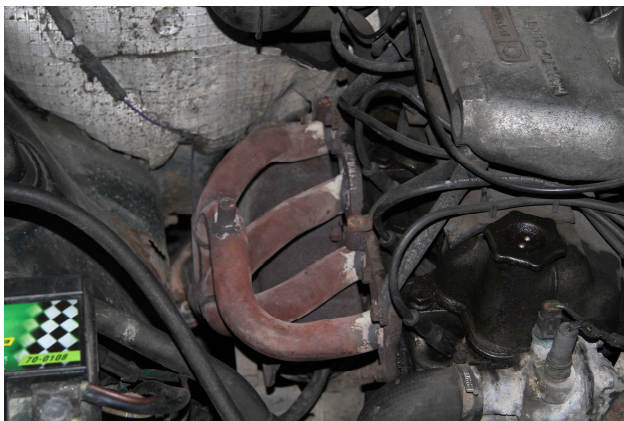


c) termogram fotela kierowcy po 1 minucie od włączenia ogrzewania

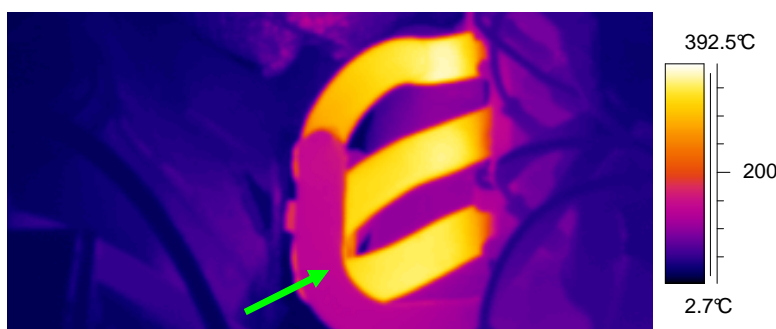
Rys.1. Sprawdzanie ogrzewania fotela kierowcy w samochodzie VW

Na rys.2 przedstawiono zdjęcie i termogram pracującego silnika pojazdu Polonez. Wyraźnie jest widoczna różnica temperatury jednej z rur układu wydechowego (zielona

strzałka). Świadczy to o tym, że nie pracuje jeden z cylindrów silnika od którego „zimniejsza” rura wydechowa odprowadza spaliny.



a) zdjęcie w zakresie widzialnym



b) obraz w podczerwieni (termogram)

Rys.2. Diagnostyka pracy pracującego silnika pojazdu Polonez

3. METODA AKTYWNA

Ochrona załóg pojazdów wojskowych to obecnie jeden z głównych priorytetów w wymaganiach technicznych na nowe oraz modernizowane pojazdy, w których pojawiają się wymagania dotyczące coraz wyższych poziomów ochrony załogi. W celu spełnienia tych wymagań i biorąc pod uwagę ograniczoną ładowność pojazdów, do zabezpieczania osób i przewożonego w nich sprzętu, wykorzystuje się najnowsze rozwiązania inżynierii materiałowej - lekkie pancerze kompozytowe [6].

Do ich budowy obecnie najczęściej wykorzystuje się materiały polimerowe, na bazie włókien wysokowytrzymałych oraz twarde materiały ceramiczne (rys.3).



Rys.3. Pojazd wojskowy HMMWV z osłoną balistyczną - lekkim pancierzem kompozytowym

W zależności od funkcji, którą mają spełniać, tzn. osłony kuloodporne i odłamkoodporne lub osłony odporne na wybuch min, udział materiałów polimerowych i ceramiki w lekkim pancerzu kompozytowym jest zróżnicowany.

Wśród cech charakteryzujących pancierz kompozytowy, niezależnie od rodzaju zastosowanej technologii jego wykonania, znajduje się minimalna krytyczna odległość pomiędzy sąsiadującymi trafieniami. W przypadku laminatów z włókien wysokowytrzymałych, czy pancierzy warstwowych z udziałem ceramiki i laminatów, strefa zniszczenia wewnątrz kompozytu, wokół miejsca trafienia pociskiem, może być nawet kilkanaście razy większa, niż powstający w wyniku uderzenia pocisku, widoczny okiem nieuzbrojonym, ubytek materiału. Uderzenie kolejnego pocisku w strefę zniszczoną często skutkuje przebicciem pancierza.

Identyfikacja wielkości wewnętrznej strefy zniszczenia kompozytu wymaga zastosowania nieniszczących metod diagnostycznych. Na etapie prac badawczo – rozwojowych pozwala to prowadzić prace technologiczne np. nad jej minimalizacją. Przy klasyfikacji rodzaju uszkodzeń pancierza, po ustalonym okresie eksploatacji, czy też po ostrzale, metoda powinna umożliwić podjęcie decyzji, czy pancierz nadaje się nadal do eksploatacji lub jaki jego fragment należy naprawić poprzez np. wymianę lub dodatkowe wzmocnienie [7].

W zakresie odłamkoodporności uznanym testem umożliwiającym porównywanie różnych materiałów, przede wszystkim ze względu na ich gęstość powierzchniową, jest wyznaczanie granicy balistycznej V_{50} pociskiem symulującym odłamek, o masie 1,1g, w normach polskich określanym jako odłamek standardowy. Podstawowym dokumentem NATO zawierającym wymagania co do przeprowadzenia tego testu jest STANAG 2920 „Ballistic test method for personal armour”. Test ten jest opisany również w polskiej normie PN-V-87000.

Granica balistyczna V_{50} wyznaczana jest jako średnia 6 prędkości uderzenia prostopadłego (trzech najniższych prędkości zakończonych całkowitym przebicciem i trzech najwyższych prędkości zakończonych częściowym przebicciem). W określaniu granic

balistycznych dopuszcza się rozrzut do $\pm 20\text{m/s}$ pomiędzy najniższymi i najwyższymi prędkościami pocisku. Tylko w przypadkach, gdy najniższa prędkość zakończona całkowitym przebiciem jest niższa od najwyższej prędkości zakończonej częściowym przebiciem o ponad $\pm 20\text{m/s}$ granice balistyczne oparte są na średniej wyciągniętej z 10 prędkości (5 najniższych prędkości zakończonych całkowitym przebiciem i 5 najwyższych prędkości zakończonych częściowym przebiciem). W tym przypadku zakres prędkości ograniczony jest do najniższego możliwego poziomu (jak najbliższej 20m/s).

W celu uzyskania informacji o występowaniu nieciągłości materiałowych w obiektach (defektów) bez naruszenia ciągłości ich makrostruktury i mikrostruktury oraz powodowania zmian lub wpływania na ich właściwości użytkowe stosuje się badania nieniszczące. Do badania próbek lekkich osłon balistycznych zastosowano aktywną metodę termografii w podczerwieni. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń związanych z badaniami osłon balistycznych zbudowanych z kompozytów wzmacnianych włóknami szklanymi i aramidowymi opisanymi w pracach [8-10] wybrano najbardziej skuteczną metodę optycznej lock-in termografii. Jej zaletą jest to, że można badać dość duże powierzchnie w krótkim czasie bez żadnej ingerencji w badany materiał.

3.1. Metoda Lock-in

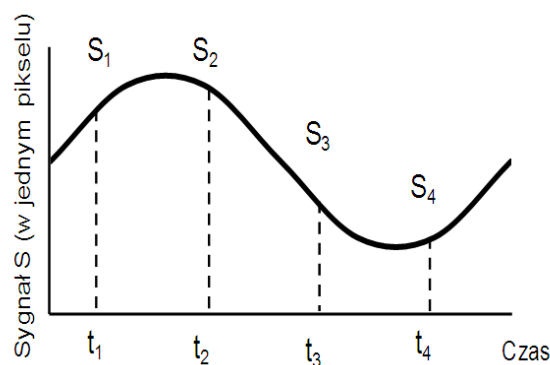
W termografii lock-in, nazywanej również termografią synchroniczną lub modulacyjną (znanej również jako termografia fali cieplnej) [3], jako pobudzenie cieplne badanego obiektu wykorzystuje się harmoniczny strumień ciepła. Pobudzenie cieplne obiektu ma charakter sinusoidalny i na podstawie znanej częstotliwości sygnału pobudzającego i zarejestrowanej odpowiedzi układu można wyznaczyć jej amplitudę i kąt przesunięcia fazowego (amplitudogram i fazogram) [11, 12].

Są cztery główne techniki w metodzie lock-in: standardowa, cztero punktowa, wariacyjna i najmniejszych kwadratów. W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych zastosowano metodę czteropunktową, w której falę cieplną w formie sinusoidy wzbudza się za pomocą lampy grzewczej lub ultradźwiękami [13]. W trakcie jednego cyklu są rejestrowane cztery termogramy, które dokładnie odpowiadają kolejnym przesunięciom w fazie o 90° . Wyzwalanie kamery termowizyjnej jest zsynchronizowane ze źródłem pobudzania. W algorytmie obliczeń zastosowano transformację Fouriera czasowo zależnej amplitudy każdego z punktów termogramu.

Faza (φ) i amplituda (A) jest następnie obliczana dla każdego punktu obrazu zgodnie z następującymi wzorów [12]:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right) \quad (1)$$

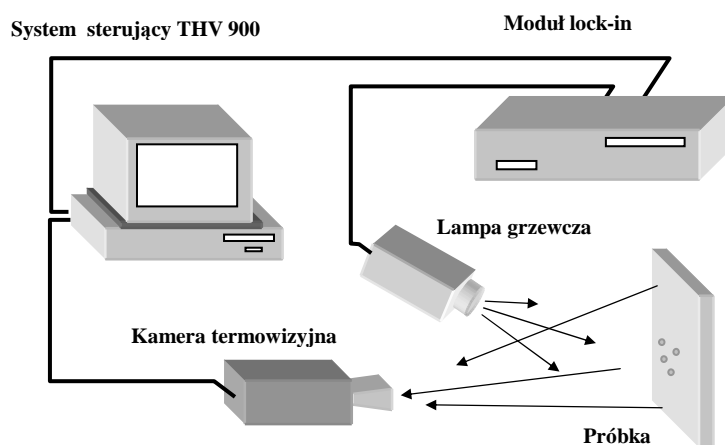
$$A = \sqrt{[S_1 - S_3]^2 + [S_2 - S_4]^2} \quad (2)$$



Rys. 4. Cykl fali cieplnej

Obraz kąta przesunięcia fazowego (fazogram) przedstawia opóźnienie między pobudzającym strumieniem ciepła, a polem temperatury generowanym jako odpowiedź na to pobudzenie. Wiadomo, że fazogram niesie więcej informacji o strukturze obiektu niż amplitudogram. Fazogram jest też mniej wrażliwy na zmiany współczynnika emisyjności, nierównomierności w nagrzewaniu próbki oraz lokalne zmiany temperatury.

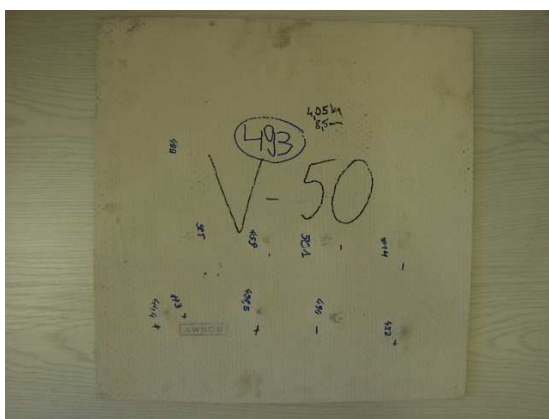
Na rys. 5 przedstawione jest schemat układu pomiarowego w metodzie optycznej termografii lock-in. Do rejestracji termogramów zastosowana była kamera termowizyjna AGEMA 900 LW. Lampa grzewcza o mocy 1 kW była sterowana za pomocą modułu lock-in firmy AGEMA. Do analizy obrazów wykorzystane było specjalistyczne oprogramowanie do analizy przesunięcia analizy i fazy pracujące w systemie operacyjnym Erica firmy AGEMA.



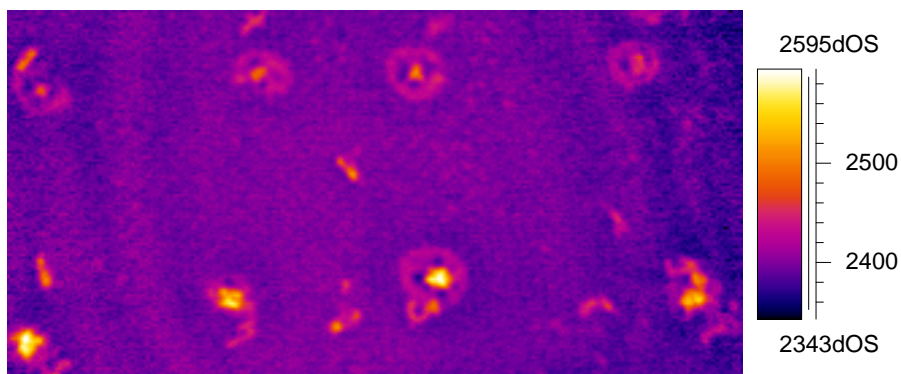
Rys.5. Schemat układu pomiarowego metodą optycznej termografii lock-in

3.2. Przykładowe wyniki badań kompozytowych osłon balistycznych

Na rys. 7 i 8 przedstawiono przykładowe fazogramy laminatu szklanego (rys.6) przedstawiające uszkodzenia wewnętrzne struktury laminatu od strony wlotu pocisku (rys.7) i od strony wylotu (rys.8). Strefę uszkodzenia określano jako średnicę okręgu, w którym znajdowały się uszkodzenia wewnętrzne materiału na skutek uderzenia w próbkę wystrzelonego pocisku. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników wykrywania wewnętrznych uszkodzeń laminatu szklanego na skutek przeprowadzenia testów metodą niszczącą V50 stwierdziliśmy że:



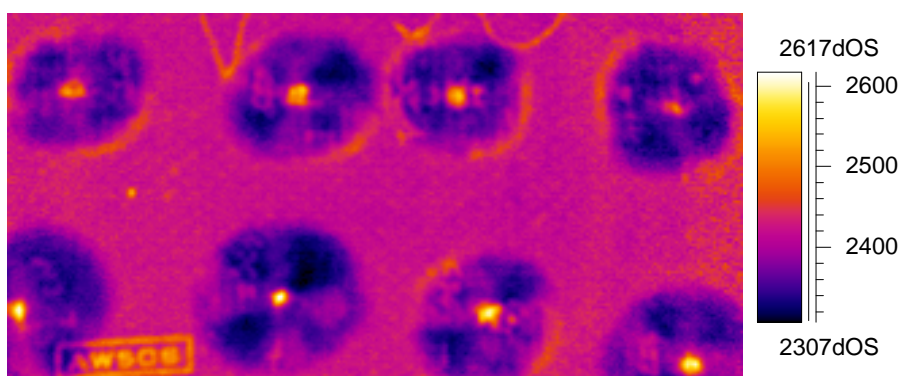
Rys. 6. Próbkę z 15 warstwowego laminatu szklanego



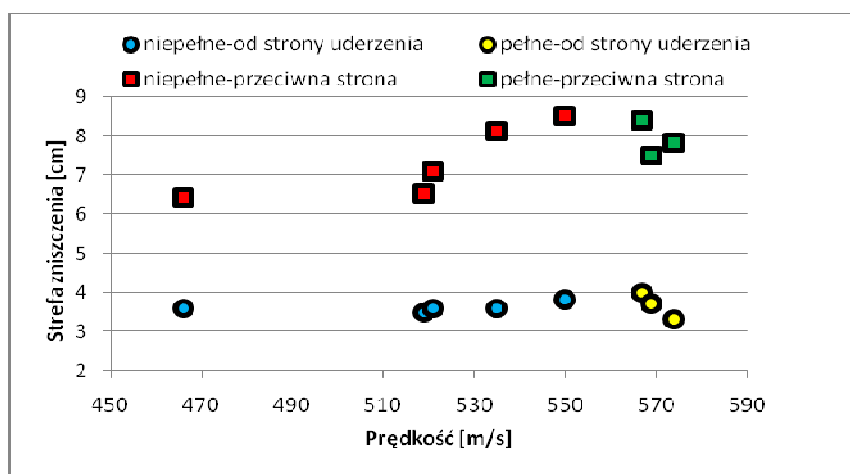
Rys.7. Fazogram (0,04 Hz) laminatu z włókna szklanego (od strony uderzenia)

- przy mniejszych grubościach laminatu i zarazem niższych prędkościach uderzenia pocisku są mniejsze różnice zarówno w strefie zniszczenia od strony wlotu jak i wylotu pocisku przy pełnym przebiciu niż przy niepełnym, przy pełnym przebiciu jest w granicach od 2 cm do 3 cm, a przy niepełnym przebiciu wynosi od 1,5 cm

- do 4,5 cm, przy wylocie dla pełnego przebicia wynosi od 6,5 cm do 7 cm a dla niepełnego od 5,5 cm do 6 cm;
- wraz ze wzrostem prędkości i grubości laminatu (10,8 mm) strefa zniszczenia od strony wlotu pocisku jest porównywalna w obu przypadkach (rys.9) i wynosi od 3 cm do 4 cm, od strony wylotu pocisku wynosi dla niepełnego przebicia od 6,5 cm do 8,5 cm, a dla pełnego przebicia od 7,5 cm do 8,5 cm.



Rys.8. Fazogram (0,04 Hz) laminatu z włókna szklanego (od strony przeciwnej)



Rys.9. Strefy zniszczenia w 15-warstwowym laminacie z włókna szklanego

4. WNIOSKI

Przedstawione w artykule przykłady wykazały szerokie możliwości metod termograficznych w diagnostyce pojazdów. Istnieją również możliwości zastosowania rozwijanych obecnie metod termograficznych ze stymulacją cieplną za pomocą

ultradźwięków i prądów wirowych. Szczególnie zastosowaniem prądów wirowych jest perspektywiczne w zastosowaniu w przemyśle motoryzacyjnym o czym świadczą prace badawcze prowadzone m.in. na Uniwersytecie Newcastle [14] (projekt kierowany przez prof. Tian) czy Uniwersytecie Laval (Kanada) [15].

W WITU przewiduje się również podjęcia prac naukowo-badawczych związanych z rozwojem metod termograficznych ze stymulacją cieplną za pomocą ultradźwięków i prądów wirowych.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Praca zbiorowa: *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Warszawa, PAK 2004
- [2] Świdorski W., Dragan K.: *Multimode NDE approach for structure health assessment of composite elements in aerospace applications*, Acta Physica Polonica A, Vol.117, No 5, 2010, pp. 877-882
- [3] Maldague X. P. V.: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, New York, John Wiley&Sons 2001, p. 78
- [4] Świdorski W.: *Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych*, monografia habilitacyjna, WITU, Zielonka 2010
- [5] Minkina W.: *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*, Częstochowa, Politechnika Częstochowska 2004
- [6] Świdorski W., Szabra D., Szudrowicz M.: *IR Thermography methods for evaluation of internal defects in light composite armours*, Budapeszt, Thermo 2009
- [7] Świdorski W., Szudrowicz M., Jamroziak K.: *Diagnostyka uszkodzeń i napraw kompozytowych osłon balistycznych*, Sulejówek, Zeszyt Naukowy WITPiS 2008
- [8] Świdorski W., Szabra D., Szudrowicz M.: *Nondestructive testing of composite armours by using IR thermographic methods*, Proceedings of 9th International Conference on QIRT 2008, pp. 499-503
- [9] Habaj W., Świdorski W.: *Thermography-Applications to the Testing of Bullet Protection and Ballistic Limit v 50 for Composite Armours Based on Reinforced Plastics*, QCAV'2001, Le Creusot 2001, pp. 49-53
- [10] Świdorski W.: *Infrared inspection of light composite armours with small arms Impacts*, Mezinarodni Konference Pyrotechniku, Luhacovice 2002, pp.127-132
- [11] Wu D., Busse G.: *Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials*, Revue Generale de Thermique, Vol. 37, No 8, September 1998, pp. 693-703
- [12] Świdorski W.: *Lock-in Thermography to rapid evaluation of destruction area in composite materials used in military applications*, SPIE vol. 5132, 2003 pp. 506-517
- [13] Rantala J., Wu D., Busse G.: *Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites*, Research in Nondestructive Evaluation, 7, 1996, pp. 215-228
- [14] <http://gow.epsrc.ac.uk>
- [15] Grenier M., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.: *Development of a hybrid non-destructive inspection thermography and eddy current techniques*, 10th QIRT Proceedings, Quebec 2010