



## Badania nieniszczące osłon balistycznych metodami aktywnej termografii w podczerwieni

WALDEMAR ŚWIDERSKI, DARIUSZ SZABRA,  
MAREK SZUDROWICZ\*

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, 05-220 Zielonka, ul. Prymasa Stefana Wyszyńskiego 7

\*Wojskowy Instytut Techniki Pancерnej i Samochodowej, 05-070 Sulejówek, ul. Okuniewska 1

**Streszczenie.** Pancierz kompozytowy jest obecnie preferowanym rozwiązaniem przeciwko militarnym i paramilitarnym źródłom zagrożenia. Coraz częściej dąży się do redukcji masy pojazdów bojowych ze względu na możliwość ich szybkiego transportu powietrznego, stającego się obecnie wymogiem taktycznym. Stwarza to również możliwość szybkiego transportu ciężkiego sprzętu w trakcie realizacji misji wojskowych w odległych częściach świata. Z uwagi na to, grube monolityczne pancierze stalowe stają się pomalą przeszłością, dlatego obecnie dużą wagę zwraca się na możliwości wykorzystania materiałów kompozytowych. Pancierze kompozytowe powinny być odporne na uderzenia, przebicia pociskami, fragmentami min i granatów oraz oddziaływanie fali uderzeniowej. W celu oceny odporności pancierza na te czynniki prowadzi się badania obejmujące kuloodporność oraz odporność na przebicie odłamkami. Oprócz widocznych zewnętrznych uszkodzeń pancierza bardzo istotne są również jego uszkodzenia wewnętrzne. Do określenia strefy delaminacji pancierza zastosowano w WITU metodę badań nieniszczących aktywnej termografii w podczerwieni. W artykule przedstawione są wyniki tych badań.

**Słowa kluczowe:** termografia w podczerwieni, badania nieniszczące, osłony balistyczne

**Symbole UKD:** 620.179.1

### 1. Wstęp

Ochrona załóg pojazdów to jeden z głównych priorytetów modernizacji Sił Zbrojnych RP. W wymaganiach technicznych na nowy sprzęt wojskowy (głównie pojazdy lub ich elementy) 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. Do ich budowy najczęściej obecnie wykorzystuje się materiały polimerowe, na bazie włókien wysokowytrzymałych oraz twarde materiały ceramiczne. 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 panczerze 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 panczerzy 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 przez np. wymianę lub dodatkowe wzmocnienie.

Stosowane obecnie metody to głównie metody ultradźwiękowe oraz rentgenowskie. W artykule przedstawiono wyniki badań kilku próbek panczerzy kompozytowych, badanych metodami termografii w podczerwieni.

## 2. Metody badawcze

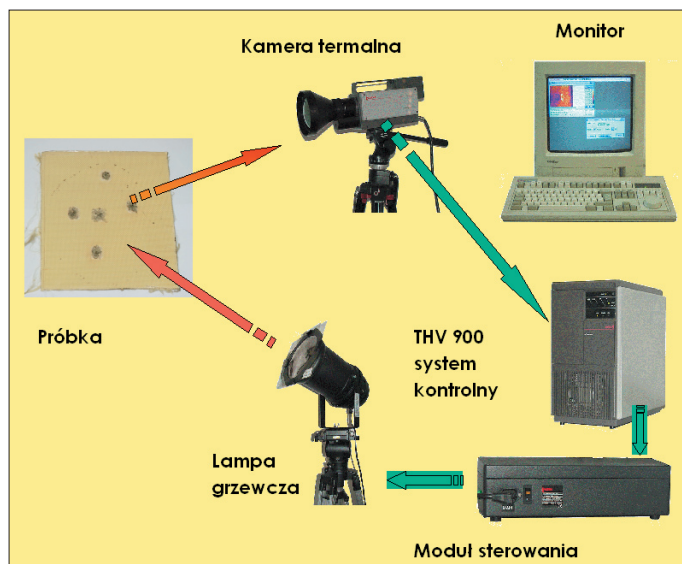
Celem badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni jest określenie właściwości obiektu w czasie trwania procesów przejściowych wywołanych cyklicznym lub impulsowym pobudzeniem cieplnym badanego obiektu. Celem badania jest określenie właściwości obiektu w czasie trwania procesów przejściowych, takich jak grzanie i chłodzenie. Formą odpowiedzi na pobudzenie cieplne jest zmiana temperatury, a szybkość zmian temperatury zawiera informację o wartościach pojemności i przewodności cieplnej, charakteryzujących strukturę wewnętrzną badanego obiektu. Podstawowym założeniem metod badań nieniszczących techniką termografii w podczerwieni jest fakt, że każda klasa badanych obiektów reaguje na pobudzenie w specyficzny sposób. Mogą być różne reakcje zastosowanych wymuszeń, powodujących powstanie fali cieplnej i reakcję obiektu na jej działanie. Pobudzenie ma najczęściej charakter impulsowy lub fali sinusoidalnej. Odpowiedź obiektu na pobudzenie jest rejestrowana za pomocą systemu

termowizyjnego, a następnie, na podstawie analizy termogramów podawane są wynikowe obrazy z zarejestrowanym defektem.

## 2.1. Metoda Lock-in optycznej termografii w podczerwieni

Główną zaletą fali cieplnej jest to, że ma ona ściśle określoną częstotliwość w odróżnieniu od impulsu pomiarowego, który zawiera wiele częstotliwości fal cieplnych, wyemitowanych w czasie generacji tego impulsu. Dzięki tej selektywności fali cieplnej można wykonywać bardziej szczegółowe badania. Obserwując przemieszczanie się fali cieplnej w badanym obiekcie można określić te obszary, które różnią się parametrami od otoczenia. W metodzie Lock-in fala cieplna ma kształt sinusoidalny. Rozchodzi się ona zarówno na powierzchni obiektu, jak i dociera w jego wnętrzu. Fala cieplna natrafiając na obszary o innych parametrach propagacji ciepła zostaje odbita i docierając do powierzchni badanego obiektu wpływa na kształt fali powierzchniowej, gdyż jej sinusoidalny kształt jest przesunięty w fazie w stosunku do fali powierzchniowej. Spowoduje to odwzorowanie obszarów na powierzchni obiektu, które mają pod powierzchnią inne parametry. Te interferencyjne odwzorowania są obrazami podpowierzchniowych defektów.

Stanowisko pomiarowe do badań eksperymentalnych metodą Lock-in przedstawione jest na rysunku 1. Fala cieplna jest wytwarzana przez modulowane źródło ciepła, którym jest lampa o mocy 1 kW. Źródło ciepła jest kalibrowane za pomocą



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni metodą optyczną Lock-in

modułu Lock-in, który realizuje procedurę tworzącą sinusoidalny kształt fali ciepłej o określonej częstotliwości.

Żeby uzyskać odwzorowanie interferencyjne system kontrolny THV 900 zbiera serię obrazów i porównuje ich temperatury, oblicza amplitudę i kąt fazowy odwzorowania fali ciepłej w każdym punkcie obrazu. Obrazy amplitudowy i fazowy są niezakłócone przez promieniowanie odbite od powierzchni badanego obiektu. Fazowy obraz jest niezakłócony przez różnice w emisyjności powierzchni i nierównomierny rozkład ogrzewania emitowanego przez źródło.

System Lock-in dzieli każdy cykl fali ciepłej na cztery równe części i zbiera równe ilości obrazów z każdej części. Obrazy z każdej części są uśrednione, wytwarzając cztery obrazy z uśrednionej wartości sygnału skanera  $S_1, S_2, S_3, S_4$ .

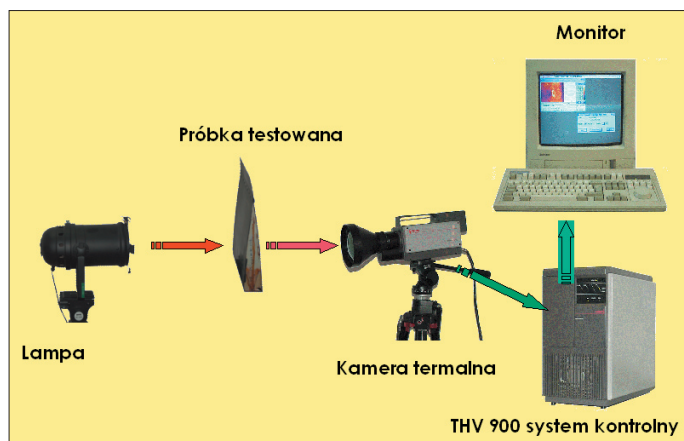
Faza i amplituda jest następnie obliczana dla każdego piksela obrazu zgodnie z następującymi równaniami [1]:

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

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

## 2.2. Metoda transmisyjna

W metodzie transmisyjnej [2] źródło ciepła nagrzewające badaną próbkę i kamera termalna znajdują się po przeciwnych stronach tej próbki materiału. Schemat tego stanowiska pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 2.



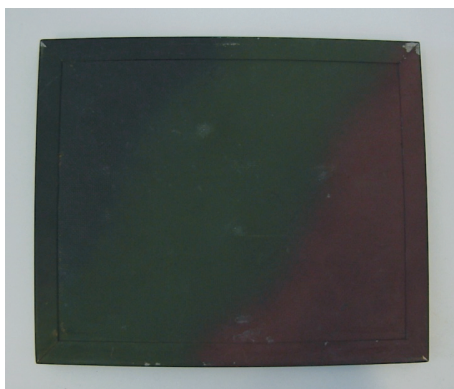
Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego do badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni metodą transmisyjną

### 3. Wyniki badań eksperymentalnych

Do badań przygotowano trzy próbki lekkich osłon balistycznych:

- próbka nr 1 — kompozyt warstwowy z warstwą ceramiki korundowej o grubości 8 mm, płytki  $50 \times 50$ , przyklejone do laminatu z tkanin aramidowych o grubości 15 mm (rys. 3),
- próbka nr 2 — laminat z tkanin aramidowych o grubości 15 mm (rys. 4),
- próbka nr 3 — laminat poliestrowo — szklany o grubości 12 mm (rys. 5).

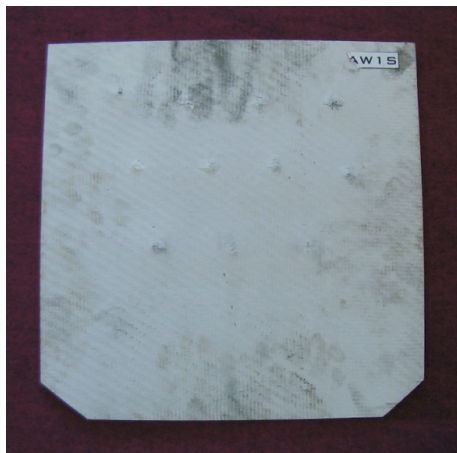
Próbki przed badaniami termograficznymi poddano badaniom kuloodporności (próbka nr 1 — pociski  $7,62 \times 39$  BZ, próbka nr 2 — pociski  $7,62 \times 25$  TT) oraz odporności na przebicie odłamkami 1,1 g [3].



Rys. 3. Próbkę nr 1



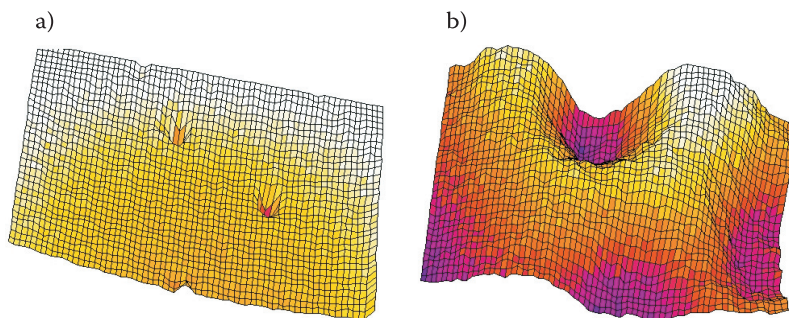
Rys. 4. Próbkę nr 2



Rys. 5. Próbkę nr 3

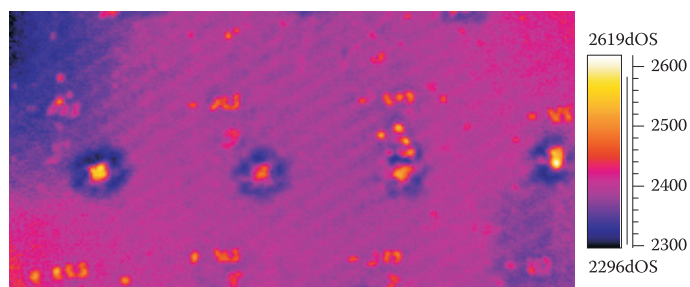
Wszystkie próbki były poddane badaniom nieniszczącym z zastosowaniem metody optycznej Lock-in termografii i metody transmisyjnej. Przykładowe wybrane wyniki tych badań zilustrowane są na rysunkach 6-7. Na rysunku 6 przedstawione są termogramy w postaci 3-D obu stron próbki nr 1 (a — termogram od strony ostrzelanej pociskami  $7,62 \times 39$  BZ, b — termogram strony przeciwnej próbki — rys. 3). Na termogramie (a) widać, że strefa zniszczenia struktury wewnętrznej próbki, wokół miejsc w które trafiły pociski, jest stosunkowo niewielka. Inna sytuacja jest na termogramie (b), gdzie strefy wewnętrznych uszkodzeń są znaczne w miejscach, gdzie materiał kompozytu zatrzymał penetrujący strukturę materiału pocisk. Strefa wewnętrznego zniszczenia materiału jest kilkakrotnie większa niż w przypadku wlotu pocisku.

Na rysunku 7 przedstawiającym fazogram próbki nr 3, wykonany metodą Lock-in optycznej termografii, widoczne są strefy wewnętrznego uszkodzenia



Rys. 6. Termogramy 3-D dwóch stron próbki nr 1 wykonane metodą transmisyjną

materiału kompozytu (ciemnoniebieski kolor) wokół miejsc, w których utkwili wewnątrz materiału odłamki.



Rys. 7. Fazogram próbki nr 3 wykonany metodą Lock-in (0,04 Hz)

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania nieniszczące z zastosowaniem termografii w podczerwieni wykazały, że za pomocą tej techniki jest możliwe określenie obszaru wewnętrznych uszkodzeń, powstałych w wyniku badań na kuloodporność oraz odporność na odłamki osłon balistycznych wykonanych z materiałów kompozytowych.

Metoda optyczna Lock-in okazała się bardziej skuteczna przy zastosowaniu do osłony balistycznej, wykonanej z laminatu poliestrowo-szklanego (próbka nr 3), metoda transmisyjna jest bardziej skuteczna w przypadku próbek 1 i 2.

Ograniczeniem skuteczności metod termografii w podczerwieni do badań osłon balistycznych jest ich grubość.

Niniejszy artykuł powstał podczas realizacji pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2007-2009 w ramach Projektu Badawczego Habilitacyjnego Nr 508-O/0012/32, przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.05.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2008 r.

#### LITERATURA

- [1] W. ŚWIDERSKI, *Lock-in thermography to rapid evaluation of destruction area in composite materials used in military applications*, SPIE Proc. "Thermosense-XXV", vol. 5132, 2003, 506-517.
- [2] X. P. V. MALDAGUE, *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, John Wiley&Sons, Inc., Toronto, 2001, 283.

- [3] W. ŚWIDERSKI, W. HABAJ, *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, 49-53.

W. ŚWIDERSKI, D. SZABRA, M. SZUDROWICZ

**Nondestructive testing of ballistic protections  
by active IR thermography methods**

**Abstract.** The composite armour is a preferred solution against military and paramilitary threats at present. It was rather aimed to reduce a weight of battle vehicles and provide a possibility of air-transport which is now not only a tactical requirement but also enables the transport of equipment to distant parts of the world during military missions. Regarding the above, a process may be observed to replace thick monolithic steel armours by composite materials. The composite armours have to be resistant against impacts of fragments and bullets and also mines and grenades. Except visible external damage of composite armour, very essential is its internal damage. At the Military Institute of Armament Technology, an active IR thermography nondestructive testing method was used to designate the delamination areas in composite armours. The test results are presented in the paper.

**Keywords:** IR thermography, nondestructive testing (NDT), ballistic protections

**Universal Decimal Classification:** 620.179.1