

Waldemar ŚWIDERSKI¹, Vladimir VAVILOV², Paweł HŁOSTA¹¹ WOJSKOWY INSTYTUT TECHNICZNY UZBROJENIA, ul. Prymasa Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka² TOMSK POLITECHNIC UNIVERSITY, Savinykh Str. 3, 634028 Tomsk, Russia**Zjawisko przezroczystości kompozytu w nieniszczących badaniach termicznych****Dr inż. Waldemar ŚWIDERSKI**

Absolwent Wydziału Elektro-Mechanicznego Uzbrojenia Wojskowej Akademii Technicznej (1978). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2000 (budowa i eksploatacja maszyn). Od 1980 roku jest pracownikiem Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia. Zainteresowania naukowe to badania nieniszczące z zastosowaniem termografii w podczzerwieni oraz zastosowania techniki podczzerwieni w aplikacjach militarnych. Autor i współautor ponad 130 publikacji oraz 8 patentów.

e-mail: waldemar.swiderski@wp.pl

**Mgr inż. Paweł HŁOSTA**

Absolwent Wydziału Elektroniki, Wojskowej Akademii Technicznej (1999). Od 1999 jest pracownikiem Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia. Kierownik pracowni elektronicznej. Projektuje i programuje moduły układów elektronicznych systemów szkolno – treningowych. Zainteresowania naukowe to nieniszczące badania z wykorzystaniem kamer pracujących w podczzerwieni.

e-mail: phpph@wp.pl

**Prof. dr Vladimir VAVILOV**

Absolwent Politechniki w Tomsku (1972). Stopień doktora z dziedziny termicznych badań nieniszczących uzyskał w 1975. Doktora habilitowanego w 1986. Jest vice-prezydentem stowarzyszenia Russian NDT i członkiem Academia NDT International. Obecnie jest kierownikiem laboratorium termicznych badań nieniszczących w Politechnice w Tomsku. Zainteresowania naukowe: badania nieniszczące, przewodzenie ciepła w ciałach stałych, zobrazowanie w podczzerwieni, przetwarzanie obrazów.

e-mail: vavilov@introspect.tpu.ru

**Streszczenie**

W nieniszczących badaniach termicznych typowym założeniem jest, że materiały kompozytowe są optycznie nieprzezroczyste zarówno dla promieniowania nagrzewania optycznego jak i promieniowania podczzerwonego emitowanego przez badane obiekty. W artykule przedstawiono wyniki badań, w których wykazano, że niektóre kompozyty, takie jak tworzywa wzmocnione włóknami węglowymi (CFRP) i szklanymi (GFRP) oraz i inne są częściowo przezroczyste dla promieniowania nagrzewającego w trakcie badań termicznych. Dlatego to zjawisko powinno być uwzględnione kiedy określone są ograniczenia w wykrywaniu defektów metodami stosowanymi w tych badaniach. Wyniki badań eksperymentalnych pokazały, że wpływ przezroczystości kompozytów na wyniki nieniszczących badań termicznych może być znaczący co wskazuje, że ten problem powinien być dokładniej przebadany.

Słowa kluczowe: materiały kompozytowe, nieniszczące badania termiczne, współczynnik absorpcji, zjawisko przezroczystości.

Phenomenon of composite transparency in thermal NDT**Abstract**

Most available mathematical models in thermal nondestructive testing (NDT) assume that solid materials under test are not transparent for both optical radiation of a heater and infrared radiation emitted by the very material. The authors' preliminary study on composites showed that the statement above was not absolutely true even in the case of some presumably opaque composites, such as Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP). There was assumed that the propagation of optical radiation through composites is governed by the Bouguer's law (Eq. 1). Values of γ were experimentally determined by Eq. (2) for CFRP, Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) and ceramic samples. Values of W_0 were evaluated by using the experimental setup shown in Fig. 1. The rear-surface response of a thin aluminum (Al) plate is fairly precisely described by the following well-known expression (heating an adiabatic plate with a Dirac pulse) (Eq. 3). The time evolution of the rear-surface response of a 1 mm-thick Al plate according to Eq. (3) is shown in Fig. 1. The corresponding experimental curve was slower than the theoretical one due to relatively low acquisition frequency of the IR imager used (25 Hz). However, only a 'stationary' (at about 1 s after the flash) excess temperature T value was

measured in the experiment to calculate W_0 . The experiment result is presented in Table 1. It was found that a single circular flash tube used in the experiment produced 8950 W/m² at the plane where the Al plate was placed. This value matches well other data obtained with this flash tube. To evaluate the absorption coefficient γ , the plates made of the above-mentioned composite were placed between the flash tube and the Al plate, and the rear-surface excess temperature of the Al plate was measured in about 1 s (see the test sketch in Fig. 2 and the experimental results in Table 1). It is worth mentioning that, in the considerations above, the spectral composition of the heating radiation is not taken into account. It is obvious that the major energy of flash tubes is concentrated in the visible range of optical radiation. Intuitively, it seems that the measured transparency of composites is much higher than expected. Therefore, the influence of the composite transparency on the results of thermal NDT may be significant, thus this topic deserves further investigations.

Keywords: composite materials, thermal NDT, absorption coefficient, transparency phenomenon.

1. Wprowadzenie

W nieniszczących badaniach termicznych, wiele dostępnych modeli matematycznych zakłada, że stałe materiały w trakcie badań nie są przezroczyste zarówno dla optycznego promieniowania grzejnika jak i promieniowania podczzerwonego emitowanego przez tenże materiał podczas badania. Nasze wstępne badania kompozytów pokazały, że powyższe stwierdzenie nie jest całkowicie zgodne z prawdą, nawet w przypadku niektórych przypuszczalnie nieprzezroczystych kompozytów, takich jak tworzywa wzmocnione włóknem węglowym (Carbon Fiber Reinforced Plastic – CFRP).

Zakładamy, że przechodzenie promieniowania optycznego przez kompozyt odbywa się zgodnie z prawem Bouguera. Prawo to dotyczy absorpcji (pochłaniania) światła w ośrodku materialnym. Mówi ono, że natężenie światła przechodzącego przez warstwę substancji maleje wykładniczo wraz ze wzrostem grubości tej warstwy. Analitycznie prawo to wyraża wzór [1]:

$$W = W_0 e^{-\gamma L}, \quad (1)$$

$$\gamma = -\frac{\ln(W/W_0)}{L}, \quad (2)$$

gdzie W_0 jest gęstością strumienia promieniowania na przedniej płaszczyźnie próbki, od strony oświetlenia, jednostką jego jest W/m², γ jest współczynnikiem absorpcji, który zależy od długości fali promieniowania cieplnego, a L jest odległością albo grubością próbki.

Powyższe prawo zostało odkryte przez Pierre'a Bouguera w roku 1729. W roku 1760 niemiecki fizyk, matematyk i astronom Johann Heinrich Lambert opublikował pracę, w której po raz

wtóry sformułował to samo prawo, zapisując je w trochę innej postaci. Lambert nie znał wcześniej publikacji Bouguera, a gdy się z nią zapoznał, przyznał pierwszeństwo swemu francuskiemu koledze. Mimo to często prawo to bywa nazywane prawem Lamberta [2]. W wielu publikacjach jest nazywane również jako prawo Bouguera-Lamberta.

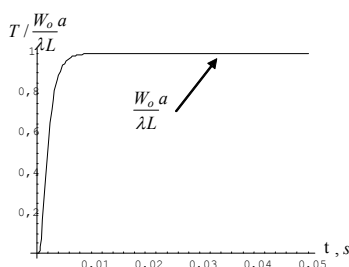
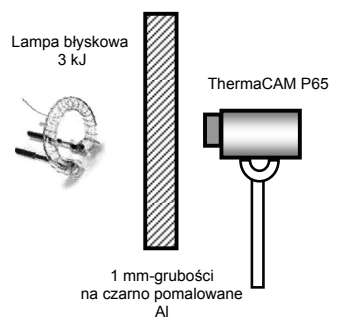
Współczynnik absorpcji można zdefiniować następująco: jest to odwrotność grubości warstwy po przejściu której promieniowanie optyczne ma e -krotnie mniejsze natężenie. Jednostką jego jest odwrotność metra (m^{-1}). Współczynnik absorpcji jest stały dla danej substancji dla promieniowania optycznego o ustalonym składzie widmowym. Duża wartość tego współczynnika oznacza silne pochłanianie promieniowania optycznego. Ośrodek doskonale przezroczysty ma zerowy współczynnik absorpcji.

2. Badania eksperymentalne

Wartości współczynnika absorpcji γ określone równaniem (1) zostały wyznaczone eksperymentalnie dla takich materiałów kompozytowych jak tworzywo wzmocnione włóknem węglowym (CFRP), tworzywo wzmocnione włóknem szklanym (GFRP) oraz ceramika.

Wartości W_o były wyznaczone przy użyciu eksperymentalnego stanowiska pokazanego na rys. 1. Temperatura T tylnej nieogrzewanej powierzchni cienkiej aluminiowej (Al) płyty jest opisana przez dobrze znane następujące równanie (ogrzewanie adiabatycznej płyty impulsem Diraca) [3, 4]:

$$\frac{T}{T_m} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 F_0}, \quad T_m = \frac{W_o a}{\lambda L} \quad (3)$$



Rys. 1. Wyznaczanie gęstości energii (pojedynczy błysk)
Fig. 1. Evaluating incident power density (single flash)

gdzie zostały przyjęte następujące wartości współczynnika dyfuzyjności cieplnej i współczynnika przewodności cieplnej dla aluminium: $\alpha = 73 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ i $\lambda = 177 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. $F_0 = \alpha t/L^2$ jest liczbą podobieństwa Fouriera, a t czasem.

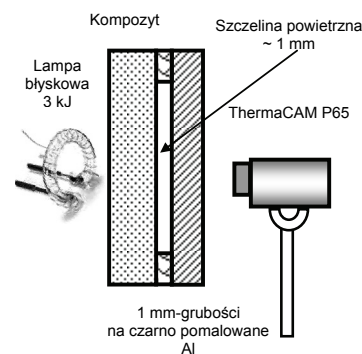
Teoretyczny przebieg zmian w czasie temperatury na tylnej powierzchni płyty aluminiowej o grubości 1 mm zgodnie z równaniem (3) przedstawiony jest na rys. 1. W eksperymentalnie wyznaczonej krzywej przyrost temperatury był „wolniejszy” niż w przypadku teoretycznej na skutek stosunkowo niskiej częstotliwości rejestracji termogramów przez użytą kamerę IR (25 Hz). Jednakże, tylko „ustabilizowana” nadwyżka wartości temperatury

T (około 1 s po błysku) była zmierzona w eksperymencie do obliczenia W_o (zgodnie z równaniem 3). Powierzchnia przednia płyty aluminiowej została nagrzana impulsem cieplnym wygenerowanym przez lampę błyskową o czasie nagrzewania 5 ms i gęstości $8950 \text{ J}/\text{m}^2$ ($1\,790\,000 \text{ W}/\text{m}^2$). Przyjęto, że proces termodynamiczny podczas eksperymentu jest przemianą adiabatyczną. Ponieważ zachodzi na tyle szybko (ok. 1 s), że przepływ ciepła do otoczenia nie zdąży nastąpić ponadto wartość liczby podobieństwa Biota [4] jest mniejsza od 0,1 co charakteryzuje przemianę adiabatyczną:

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (4)$$

gdzie L – grubość płytki.

Aby wyznaczyć współczynniki absorpcji γ w materiałach kompozytowych, płyty wykonane z kompozytów były umieszczone między lampą błyskową a płytą z aluminium, na tylnej powierzchni płyty aluminiowej po około 1 sekundzie od nagrzewania przedniej powierzchni kompozytu była mierzona nadwyżka temperatury T (patrz schemat rys. 2). Z wartości tej temperatury podobnie jak w eksperymencie (rys. 1) wyznaczono gęstość strumienia W na powierzchni aluminiowej płytki od strony kompozytu (rys. 2). Zakładając, że wyznaczona wartość W jest gęstością strumienia promieniowania na powierzchni nienagrzewanej kompozytu i znając wartość gęstości strumienia W_o padającego na powierzchnię kompozytu (wyznaczonego eksperymentalnie na stanowisku pokazanym na rys. 1) z równania (2) przy znanej grubości kompozytu L wyznaczono wartości współczynników absorpcji dla różnych materiałów (wyniki pomiarów eksperymentalnych w tabeli 1).



Rys. 2. Wyznaczanie współczynnika absorpcji kompozytu
Fig. 2. Evaluation of the composite absorption coefficient

Tab. 1. Współczynniki absorpcji kompozytów (pomierzone układem pomiarowym przedstawionym na rys.2)

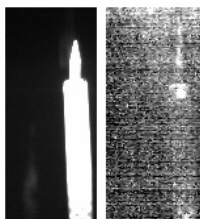
Tab. 1. Composite absorption coefficients (measured by the scheme of Fig. 2)

Materiał	Współczynnik absorpcji γ , 1/m
GFRP (1,0 mm)	1130
CFRP (1,0 mm)	2506
Ceramika (1,2 mm)	2040

Należy zauważyć, że w powyższym rozważaniu, zakres widmowy ogrzewającego promieniowania nie był brany pod uwagę. Wiadomo, że ksenonowe lampy błyskowe charakteryzują się zwykle zakresem promieniowania od 0,2 do 1,4 μm (z kilkoma pikami w szczególnych długościach fali). W każdym razie wydaje się, że oszacowana przezroczystość kompozytów dla promieniowania ogrzewającego jest dużo wyższa niż zwykle oczekiwana.

Przezroczystość grafitowo-epoksydowej próbki o grubości 1 mm w zakresie spektralnym 7-13 μm , tj. gdzie kompozyt emituje najwięcej promieniowania cieplnego, była sprawdzona przez umieszczenie gorącego obiektu (grota lutownicy) za próbką (rys. 3) i zmierzono stosunek między strumieniem cieplnym emi-

townym przez obiekt a tłem. Temperatura obiektu wynosiła 471,3 °C wobec 30,12 °C tła (lewy obraz na rys. 3). Prawy obraz na rys. 3 pokazuje bardzo niewyraźny obraz grota lutownicy poprzez próbkę z temperaturowym kontrastem 28,37 °C i 27,59 °C odpowiednio dla grota lutownicy i tła. Przeliczając wyżej wymienione wartości temperatury na gęstość strumienia ciepła za pomocą prawa Plancka, wartość współczynnika absorpcji γ w zakresie spektralnym 7-13 μm została wyznaczona na 7503 m^{-1} . To znaczy, że kompozyt grafitowo-epoksydowy jest dużo bardziej przezroczysty dla krótkofalowego promieniowania cieplnego niż dla długofalowego promieniowania emitowanego przez sam materiał. Dlatego, tylko zjawisko przezroczystości promieniowania krótkofalowego powinno być brane pod uwagę przy analizie problemów aktywnych badań nieniszczących metodami termograficznymi.



Rys. 3. Wyznaczania współczynnika absorpcji kompozytu (zakres spektralny 7-13 μm)

Fig. 3. Evaluation of the composite absorption coefficient (7-13 μm spectral range)

3. Wyniki modelowania nieniszczących badań termicznych

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika praktyczny wniosek, że promieniowanie lampy ksenonowej dość dobrze przenika przez kompozyty, dlatego w trakcie trwania impulsu nagrzewającego ograniczona jest nie tylko powierzchnia kompozytu ale i głębiej położone warstwy.

Eksperymentalnie określona wartość przezroczystości CFRP ($\gamma = 2506 \text{ m}^{-1}$) została użyta w 3D numerycznej symulacji nieniszczących badań termicznych próbki wykonanej z CFRP o grubości 4 mm w której znajdowały się dwa defekty w postaci delaminacji. Jeden defekt o wymiarach 6x10 mm znajdował się na głębokości $l = 0,4 \text{ mm}$, drugi o wymiarach 20x8 mm na głębokości $l = 1,2 \text{ mm}$. Grubość obu defektów była jednakowa i wynosiła $d = 25 \mu\text{m}$. Do symulacji przyjęto następujące parametry termofizyczne CFRP: $\lambda_{y,z} = 0,64 \text{ W/(mK)}$, $\lambda_x = 6,4 \text{ W/(mK)}$, $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ (gęstość), $C = 2462 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ (pojemność cieplna). Próbka była nagrzana pojedynczym impulsem cieplnym promieniowania optycznego (gęstość $W = 10^6 \text{ W/m}^2$, czas nagrzewania $t_n = 5 \text{ ms}$). Wyniki symulacji są przedstawione w tabeli 2, w której maksymalne różnice sygnałów ΔT_m (wyznaczone z odjęcia od maksymalnej wartości temperatury na powierzchni nieogrzewanej próbki w strefie z defektem, wartości temperatury w wyznaczonym punkcie tej powierzchni w strefie bez defektu, która jest również temperaturą odniesienia w obliczeniu wartości bieżącego kontrastu) i bieżących kontrastów $C_m = (\Delta T/T)_m$ są podane z ich optymalnymi czasami obserwacji t_m . Parametry wykrycia defektów w nieniszczących badaniach termicznych obliczono używając trzech programów: Multilayer-3 (1D rozwiązanie dla nieskończonych płaskich defektów), ThermoCalc-6L (3D rozwiązanie dla anizotropowych materiałów) i ThermoCalc Mine (podobnie jak Calc-6L, ale częściowo-przezroczyste materiały mogą być symulowane).

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 2 widać, że różnica sygnałów temperatury nad defektami o skończonych wymiarach charakteryzuje się dwa razy mniejszymi wartościami sygnałów przy porównywalnej głębokości do defektów o nieskończonym wymiarze bocznym, jeśli założymy, że kompozyt jest

nieprzezroczysty. Ważne jest to, że częściowa przezroczystość kompozytu wpływa na wykrycie defektu. W przypadku płytko położonego defektu (głębokość 0,4 mm), odpowiednie sygnały mają dwukrotnie mniejszą wartość, kiedy defekt na głębokości 1,2 mm wciąż utrzymuje swoją wartość. Przyczyna tego może być taka, że cienkie warstwy kompozytu ponad płytko położonymi defektami pochłaniają mniej energii niż w przypadku defektów położonych głębiej. Dlatego przezroczystość materiału jest ważnym czynnikiem w wykrywaniu płytko położonych defektów. Również należy zwrócić uwagę na to, że przezroczystość materiału nieznacznie wpływa na optymalne czasy obserwacji t_m .

Tab. 2. Parametry wykrycia defektu w termicznych badaniach nieniszczących w próbce CFRP o grubości 4 mm (założono przezroczystość i częściową-przezroczystość kompozytu)

Tab. 2. Defect detection parameters in TNDT of a 4-mm-thick CFRP sample (assumption of opaque and partially-transparent composite)

Model	Maksymalna różnica sygnału temperatury		Maksymalny kontrast bieżący	
	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	t_m, s	C_m	t_m, s
1D, izotropowy, nieskończone płaskie defekty				
$l = 0,4 \text{ mm}$ $d = 25 \mu\text{m}$	0,937	0,50	0,183	0,87
$l = 1,2 \text{ mm}$ $d = 25 \mu\text{m}$	0,124	4,42	0,067	7,3
3D, izotropowy, defekty o skończonych wymiarach				
$l = 0,4 \text{ mm}$ $d = 25 \mu\text{m}$ 6x10 mm	0,467	0,59	0,183	0,97
$l = 1,2 \text{ mm}$ $d = 25 \mu\text{m}$ 20x8 mm	0,060	4,51	0,065	6,69
3D, izotropowy, półprzezroczysty CFRP 2506 m^{-1} , defekty o skończonych wymiarach				
$l = 0,4 \text{ mm}$ $d = 25 \mu\text{m}$ 6x10 mm	0,213	0,66	0,115	1,39
$l = 1,2 \text{ mm}$ $d = 25 \mu\text{m}$ 20x8 mm	0,055	4,22	0,061	6,36

4. Wnioski

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnie wykazano, że wpływ przezroczystości materiałów kompozytowych na wyniki termicznych badań nieniszczących może być znaczny, a szczególnie przy wykrywaniu płytko położonych defektów. Dlatego to zjawisko wymaga dalszych badań.

Praca częściowo finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu badawczo-rozwojowego.

5. Literatura

- [1] Meyer-Arendt J. R.: Wstęp do optyki. PWN, Warszawa, 1975.
- [2] Sawieliew I. W.: Wykłady z fizyki t.2. PWN, Warszawa, 1994.
- [3] Świdarski W., Vavilov V.: Wyznaczanie termofizycznych charakterystyk materiałów metodami termografii w podczerwieni. Biuletyn WAT, Vol. LVIII, Nr 3, 2009.
- [4] Świdarski W.: Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych, monografia habilitacyjna, WITU, Zielonka, 2010.