



## **Eksperymentalne wyznaczenie parametrów termofizycznych kompozytu aramidowego stosowanego w indywidualnych osłonach balistycznych**

Monika PRACHT, Waldemar ŚWIDERSKI\*

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

*\*autor korespondencyjny, e-mail: waldemar.swiderski@wp.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 26.06.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 29.04.2015*

DOI 10.5604/20815891.1203123

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań parametrów termofizycznych kompozytu aramidowego stosowanego w konstrukcji indywidualnych osłon balistycznych. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono charakterystyki cieplne, takie jak przewodność cieplną, ciepło właściwe oraz dyfuzyjność cieplną. Parametry cieplne zostały wyznaczone eksperymentalnie przy zastosowaniu kilku metod pomiarowych: metodą termografii w podczerwieni: jedno- i dwustronną, metodą wymuszenia okresowego oraz metodą TPMU. Znajomość charakterystyk termofizycznych materiału jest istotna w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni, będących przedmiotem dalszych prac badawczych.

**Słowa kluczowe:** mechanika, charakterystyki termofizyczne materiałów, termografia w podczerwieni, badania nieniszczące

## 1. WSTĘP

Badania nieniszczące metodami termografii w podczerwieni polegają na wykrywaniu defektów znajdujących się w materiale, a także dostarczają informacji o właściwościach przedmiotu badanego bez pozbawienia go wartości użytkowych (tj. bez zmiany jego przydatności eksploatacyjnej). W materiałach kompozytowych mogą występować defekty, między innymi w postaci cienkich szczelin gazowych wypełnionych powietrzem.

W celu wykrycia defektów w danym materiale niezbędna jest wiedza na temat właściwości materiałów, które różnią się od właściwości defektów. W literaturze można znaleźć dane na temat podstawowych parametrów cieplnych niektórych materiałów. Jednakże z uwagi na specyfikę materiałów wynikającą z zastosowanego przez różnych producentów procesu technologicznego oraz ich dalszego wykorzystania (łączenia) z innymi materiałami niezbędne jest wyznaczenie charakterystyk materiału, z którego składa się konkretny wyrób.

Znajomość rzeczywistych właściwości cieplno-fizycznych jest niezbędna do określenia rozkładu temperatury w analizach numerycznych, jak również przy weryfikacji wyników badań doświadczalnych. Odpowiednie określenie parametrów cieplnych danego materiału jest podstawą do właściwej oceny różnic występujących między parametrami termofizycznymi materiału i poszukiwanych defektów.

Występuje wiele metod pomiarowych służących do wykrywania defektów metodami termografii w podczerwieni. W przypadku aktywnych metod badań metody pomiarowe różnią się rodzajem i parametrami źródła stymulacji cieplnej.

Wśród podstawowych charakterystyk termofizycznych materiałów stałych można wyróżnić współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ , ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu  $C_p$ , gęstość  $\rho$  oraz dyfuzyjność cieplną  $\alpha$ .

Współczynnik przewodności cieplnej  $\lambda$  jest to parametr, który określa zdolność materiału do przewodzenia ciepła w warunkach ustalonej wymiany ciepła i wyrażany jest w W/m·K. Parametr ten oznacza wielkość strumienia ciepła, jaka przepływa przez jednostkową powierzchnię materiału o danej grubości, jeśli różnica temperatury między dwiema jego powierzchniami wynosi 1 Kelwin.

Ciepło właściwe jest to ilość ciepła potrzebna do ogrzania jednostki masy substancji (1 kg) o jeden Kelwin (1 K).

W odróżnieniu od wyżej wymienionych parametrów: przewodności cieplnej i ciepła właściwego, dyfuzyjność cieplna oraz aktywność cieplna (inercja cieplna, z ang. *thermal effusivity*) są stosowane do opisu właściwości materiałów związanych z dynamiką zmian temperatury spowodowanych występowaniem zależnych od czasu źródeł/upustów ciepła.

Współczynnik wyrównania temperatury  $\alpha$  jest wskaźnikiem dyfuzji wewnętrznej energii w materiale i definiowany jest jako stosunek zdolności ciała do przewodzenia ciepła  $\lambda$  względem jego zdolności do gromadzenia ciepła  $C_p \cdot \rho$

$$\alpha = \lambda / (C_p \cdot \rho) \text{ [m}^2/\text{s]} \quad (1)$$

Znajomość tego parametru jest niezbędna do dokonania symulacji przestrzennych zmian temperatury. Stosowane metody pomiaru dyfuzyjności cieplnej polegają na dostarczeniu zmiennego w czasie strumienia energii cieplnej do próbki, a następnie na badaniu zmian temperatury w różnych punktach tej próbki. Aktywność (inercja) cieplna

$$e = \sqrt{\lambda \cdot C_p \cdot \rho} \text{ [W} \cdot \text{s}^{1/2}/\text{m}^2 \cdot \text{K]} \quad (2)$$

określa sposób reagowania materiału na zmiany temperatury.

## 2. WYZNACZANIE PARAMETRÓW TERMOFIZYCZNYCH METODĄ JEDNO- I DWUSTRONNĄ

### 2.1. Metoda jednostronna

Przeprowadzone badanie polegało na zastosowaniu źródła ciepła w postaci lampy generującej krótkie impulsy wymuszenia cieplnego. Badanie realizowano metodą odbiciową nazywaną również procedurą jednostronną. Źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdowało się po tej samej stronie badanego obiektu [10] (fot. 1).

Wadami tej metody są nierównomierne nagrzewanie całej powierzchni badanego obiektu oraz zakłócenia spowodowane odbitym promieniowaniem.

Podczas badań próbka kompozytu aramidowego była nagrzewana impulsem cieplnym (przybliżenie delty Diraca) o mocy 6 kJ i czasie trwania 5 ms, generowanym przez lampę błyskową. Zmiany pola temperatury na powierzchni próbki rejestrowano kamerą FLIR SC 7600 w sekwencji składającej się ze 100 obrazów (termogramów) o rozdzielczości  $512 \times 640$  pikseli, zapisanych z częstotliwością 100 Hz. Na podstawie zarejestrowanych obrazów wykonano wykres ilustrujący przebieg zmian nadwyżki temperatury na przedniej powierzchni dla wybranego punktu próbki z aramid (rys. 1).

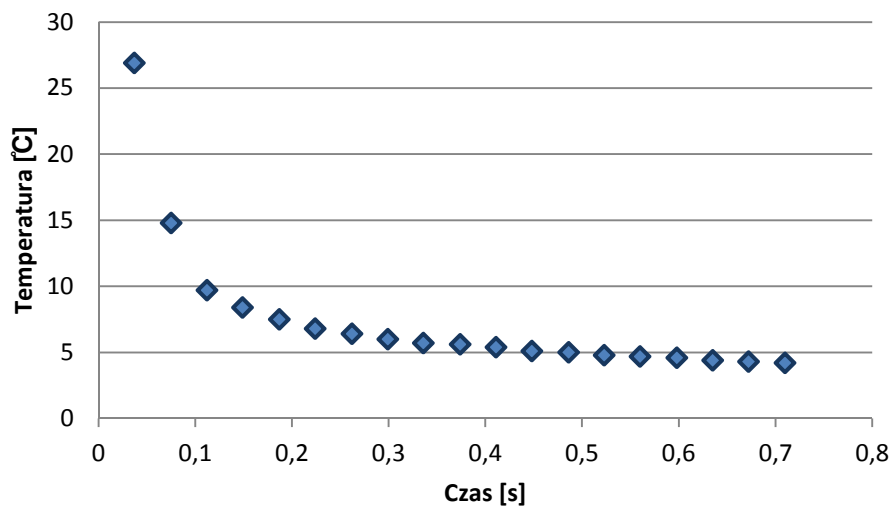
Badaną próbkę aramidową traktujemy jako ciało półnieskończone. Zmiany w czasie nadwyżki temperatury  $T(t)$  powierzchni podczas nagrzewania ciała półnieskończonego impulsem cieplnym typu delta Diraca opisuje wyrażenie [1]:

$$T = \frac{W}{e\sqrt{\pi \cdot t}} \quad (3)$$



Fot. 1. Stanowisko do badań aktywności cieplnej metodą odbiciową:  
 a) źródło stymulacji cieplnej – lampa, b) próbka badawcza – kompozyt aramidowy,  
 c) urządzenie do rejestracji temperatury – kamera IR

Photo 1. Test stand for determination the thermal effusivity by reflection method:  
 a) source of thermal stimulation – lamp, b) test sample – aramid composite,  
 c) device to record temperature – IR (infrared) camera



Rys. 1. Przebieg temperatury na przedniej powierzchni dla wybranego punktu próbki kompozytu aramidowego

Fig. 1. Temperature response on the front surface of the selected sample point of aramide

W przypadku idealnym, dla dowolnej chwili  $t$  cieplną inercję ciała można określić z nadwyżki temperatury jego powierzchni i zmierzonej gęstości powierzchniowej energii:

$$e = \frac{W}{T(t)} \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot t}} \quad (4)$$

Wartość energii pochłoniętej przez badaną próbkę z aramidu wyznaczono eksperymentalnie. W tym celu próbkę wykonaną z cienkiej blachy aluminiowej  $L = 1,8$  mm nagrzewano tym samym impulsem cieplnym i z tej samej odległości co próbkę z aramidu. Stosując metodę dwustronną, rejestrowano zmiany nadwyżki temperatury kamerą termowizyjną na przeciwległej, w stosunku do ogrzewanej, powierzchni próbki aluminiowej. Na podstawie zależności [11]:

$$W = \frac{T \cdot \lambda \cdot L}{\alpha} \quad (5)$$

znając współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda = 220$  W/m · K, dyfuzyjność cieplną  $\alpha = 73 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s aluminium i zmierzoną nadwyżkę temperatury na nieogrzewanej powierzchni próbki aluminiowej  $T = 1,05^\circ\text{C}$ , obliczono maksymalną wartość gęstości strumienia energii impulsu cieplnego, która wynosi J/m<sup>2</sup>. Ponieważ nagrzewanie próbki kompozytu aramidowego odbyło się w takich samych warunkach jak próbki z blachy aluminiowej, to wartość gęstości strumienia energii impulsu cieplnego była taka sama w obu próbach.

Aktywność cieplną kompozytu aramidowego określono ze wzoru nr 2, otrzymując wartość:  $W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ .

Posługując się wyznaczonymi eksperymentalnie (opisanymi w dalszej części artykułu) wartościami ciepła właściwego (1085 J/(kg · K)) i gęstości (1450 kg/m<sup>3</sup>) oraz wyżej wyznaczonej aktywności cieplnej kompozytu aramidowego, po przekształceniu wzoru nr 2 (5) wyznaczono współczynnik przewodności cieplnej, otrzymując wartość:  $W = 5450$  W/m · K.

## 2.2. Metoda dwustronna

Badanie przeprowadzono metodą dwustronną, nazywaną również metodą transmisyjną lub procedurą dwustronną. Źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdowały się po przeciwnych stronach badanego obiektu [10]. Impuls lampy wywołał intensywne ogrzanie powierzchni po jednej stronie próbki, po czym ciepło zostało transportowane przez próbkę i wywołało zmianę pola temperatury powierzchni po drugiej stronie próbki. Zmiana temperatury i jej rozkład na powierzchni były rejestrowane przez kamerę FLIR S.C. 7600. Na podstawie zarejestrowanego przebiegu zmiany wartości temperatury w czasie ekspozycji oraz znanej grubości badanej próbki  $L$  wyznacza się wartość dyfuzyjności cieplnej  $\alpha$  materiału. Ponadto z zarejestrowanego przebiegu wyznacza się czas do osiągnięcia połowy maksimum nadwyżki temperatury na tylnej stronie próbki  $t_{1/2}$ .

Schemat zastosowanego układu pomiarowego przedstawiono na fotografii 2. Składał się on z generatora impulsów, czyli lampy, układu pomiaru temperatury, który stanowiła kamera termowizyjna oraz system zbierający i analizujący dane (komputer).



Fot. 2. Stanowisko do badań dyfuzyjności cieplnej metodą transmisyjną:  
a) źródło stymulacji cieplnej – lampa, b) próbka badawcza – kompozyt aramidowy,  
c) urządzenie do rejestracji temperatury – kamera IR

Photo 2. Test stand for determination the thermal diffusivity by transmission method:  
a) source of thermal stimulation – lamp, b) test sample – aramid composite,  
c) device to record temperature – IR (infrared) camera

Dyfuzyjność cieplną wyznaczono metodą impulsową, zaproponowaną przez Parkera i in. [11]. Podczas badań krótkotrwały impuls cieplny  $Q$  o czasie trwania  $t$  pada na czołową powierzchnię próbki termicznie izolowanej. Następnie mierzony jest przyrost temperatury na tylnej powierzchni próbki.

Zarejestrowana historia nadwyżki temperatury  $T(t)$  dla tylnej powierzchni próbki pozwala określić dyfuzyjność cieplną  $\alpha$  materiału próbki ze wzoru (6).

$$\alpha = F_0 \frac{L^2}{t} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (6)$$

gdzie:

$F_0$  – współczynnik (liczba podobieństwa Fouriera) wyznaczony dla czasu  $t_{0,5}$ ,

$t$  – czas trwania impulsu cieplnego,

$t_{0,5}$  – oznacza czas, po którym tylna powierzchnia próbki osiągnie połowę maksymalnego przyrostu temperatury.

Wartość współczynnika  $F_0 = 0,1388$  dla czasu  $t_{0,5}$  przyjęto na podstawie pracy [11]. Wzrost temperatury jest rejestrowany w funkcji czasu. Podczas badań, jako źródła wymuszenia cieplnego do nagrzewania próbek, użyto lampy o mocy 6 kJ. Zasadniczym elementem układu rejestracji zmian temperatury na powierzchni próbek była kamera termowizyjna SC7600 produkcji firmy Flir Systems.

Kamera termowizyjna połączona była z komputerem klasy PC, służącym jako system zapisu i gromadzenia danych. Czas nagrzewania próbek oraz odległość lampy od nagrzewanej powierzchni ustalono eksperymentalnie.

Na podstawie zarejestrowanych obrazów, wartość dyfuzyjności cieplnej kompozytu aramidowego określono przy użyciu oprogramowania ThermoFit™ Pro firmy Innovation (Rosja), która wyniosła  $(1,335 \pm 0,094) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Metoda Parkera, oprócz dyfuzyjności cieplnej, umożliwia określenie przewodności cieplnej próbki.

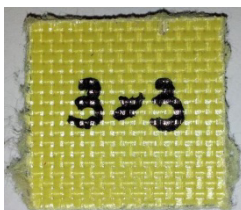
Na podstawie wcześniej wyznaczonych wartości dyfuzyjności cieplnej ( $1,335 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ), gęstości ( $1450 \text{ kg/m}^3$ ) i ciepła właściwego ( $1085 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ), współczynnik przewodności cieplnej wyznaczono, korzystając ze wzoru nr 1, gdzie po przekształceniu otrzymano:

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$$

$$\lambda = 0,21 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (7)$$

### 3. WYZNACZANIE PARAMETRÓW TERMOFIZYCZNYCH METODĄ TPMU

Badania polegały na wyznaczeniu przewodności cieplnej i dyfuzyjności cieplnej jednorodnego materiału stałego w warunkach normalnych (w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$ ). Do badań użyto próbki materiału o wymiarach ( $30 \times 30$ ) mm i grubości 8,2 mm.



Fot. 3. Próbką badawczą w postaci kompozytu aramidowego do badań metodą TPMU

Photo 3. Test sample as a composite aramid for testing by TPMU method

Zastosowana aparatura TPMU- $\lambda$ -20 składała się z jednostki grzewczej i kontrolera (fot. 4). Dolną część aparatury TPMU- $\lambda$ -20 stanowiła baza. Baza i górna część aparatury (blok górny) tworzą razem izotermiczny rdzeń metaliczny aparatury. W centralnej części bazy aparatury znajduje się otwór, w którym umieszczony jest grzejnik elektryczny z wbudowanym czujnikiem temperatury. Grzejnik i blok górny są termicznie izolowane od siebie poprzez umieszczenie podkładki.

Podczas badań zarówno grzejnik, jak i próbka były podgrzewane w ściśle określonym czasie. Zmiany temperatury grzejnika i powierzchni próbki, z którą grzejnik był w kontakcie, były mierzone za pomocą czujników temperatury z wcześniej określonym odstępem czasu.

Aby określić przewodność cieplną i dyfuzyjność cieplną próbki, zostały zastosowane regularne warunki grzania. Powyższe parametry zostały określone na podstawie ustalonych wartości różnych sygnałów temperaturowych między próbką a układem baza – górny blok, którego temperatura była względnie stała, jak również tempo grzania grzejnika.



Fot. 4. Aparatura TPMU- $a \lambda$ -20 do określenia przewodności cieplnej i dyfuzyjności niemetalicznych materiałów stałych, od lewej: kontroler, jednostka grzewcza

Photo 4. TPMU- $a \lambda$ -20 apparatus for determining the thermal conductivity and thermal diffusivity of nonmetallic solids, from left: controller, heating unit

W obliczeniach uwzględniono wiele parametrów, takich jak parametry kalibracji aparatury, w tym m.in. pojemność cieplną grzejnika, straty ciepła przez termiczną izolację i boczne powierzchnie próbki. Stałe kalibracji zostały wyznaczone przez producenta aparatury podczas testów kalibracji na próbkach składających się z materiałów referencyjnych. Stałymi kalibracji są: pojemność cieplna grzejnika  $C_n$ , (7,24) J/K, przewodnictwo izolacji termicznej  $K_n$ , (0,01325) W/K,  $\alpha_n$ , (22,579) W/m<sup>2</sup> · K, rezystancja cieplna  $R_n$ , (67,14) Ohm [3].

Do parametrów podstawowych eksperymentu należały:

- grubość próbki – 0,0082 m,
- powierzchnia próbki –  $0,9 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>,
- obwód próbki – 0,1202 m,
- czas pomiędzy kolejnymi pomiarami – 45 s,
- liczba pomiarów – 25,
- liczba obliczeń stałych temperatur (zmierzony stacjonarny sygnał temperatury w Kelwinach) – 13,



- pojemność cieplna grzejnika ( $C_n$ ), J/K = 7,24,
- przewodnictwo izolacji termicznej ( $K_n$ ), W/K = 0,01325,
- efektywny współczynnik przejmowania ciepła ( $\alpha_n$ ), W/m<sup>2</sup>·K = 12,151061.

Badania oraz obliczenia zostały wykonane według metody określonej w instrukcji „The TPMU (ITC)–a  $\lambda$ –20 unit for determining thermal conductivity and diffusivity technical passport operation manual” Saint-Petersburg 2006 [3]. Badanie powtórzono pięciokrotnie. Otrzymano następujące wyniki:

- przewodności cieplnej:

$$\lambda = (0,1609 \pm 0,0159) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}; \quad \varepsilon_\lambda = 9,9 \% ; \quad \alpha = 0,95 \quad (8)$$

- dyfuzyjności cieplnej:

$$a = (1,0072 \pm 0,3055) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}; \quad \varepsilon_\lambda = 30,3 \% ; \quad \alpha = 0,95 \quad (9)$$

gdzie:

$\varepsilon_\lambda = 9,9 \%$  – błąd względny,

$\alpha = 0,95$  – przedział ufności.

#### 4. WYZNACZANIE PARAMETRÓW TERMOFIZYCZNYCH METODĄ WYMUSZENIA OKRESOWEGO (JEDNOSTRONNEGO)

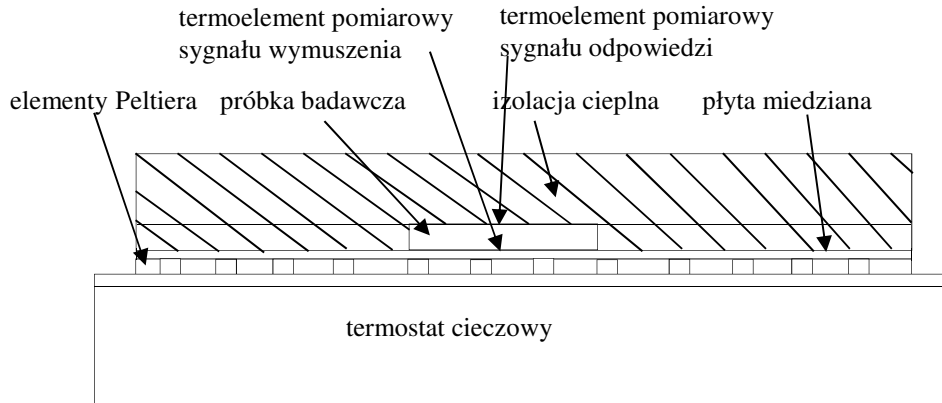
Do badań zastosowano metodę wymuszeń okresowych do określenia dyfuzyjności cieplnej wielowarstwowego kompozytu aramidowego stosowanego w konstrukcji indywidualnych osłon balistycznych. Badania eksperymentalne były prowadzone w przedziale temperatury od  $-40^\circ\text{C}$  do  $+100^\circ\text{C}$ . Dyfuzyjność cieplną określono z danych amplitudowych i fazowych. Uzyskane wyniki zweryfikowano metodą modelowania numerycznego [4]. Badania dyfuzyjności cieplnej wykonano zmodyfikowaną metodą Ångströma [7-9]. Wprowadzone zmiany wynikały z potrzeby przeprowadzenia pomiaru w określonym przedziale temperatury oraz zlikwidowania ograniczeń związanych z koniecznością odpowiedniego doboru częstotliwości oscylacji [4, 5]. Wykonano badania dwóch próbek kompozytu aramidowego prostopadle i równoległe do włókien.

Metodę wymuszenia okresowego (jednostronnego) wybrano ze względu na fakturę kompozytu aramidowego, która uniemożliwia wykonanie bardzo regularnej próbki do wyznaczania parametrów termofizycznych wymaganej np. w metodzie stanu ustalonego za pomocą aparatu płytowego Poensgena.

Badania dyfuzyjności cieplnej próbek zostały wykonane z wykorzystaniem stanowiska pomiarowego przedstawionego na rysunku 2 [8]. Izolacja cieplna próbki miała na celu zapewnienie warunku adiabatyczności.

Do badanej próbki przylegała płyta miedziana. Okresowe zmiany temperatury górnej powierzchni płyty miedzianej generowane były przy użyciu elementów Peltiera.

Elementy były zasilane ze sterowanego komputerowo zasilacza prądu stałego poprzez magistralę [8]. Napięcie zasilania było zmieniane z częstotliwością 1 Hz. Zmiany temperatury (wykonywane programowo) dolnej płyty miedzianej oraz stabilizację zapewniał ultratermostat. Na przeciwległych powierzchniach próbki zamocowane zostały termoelementy.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego dyfuzyjności cieplnej metodą wymuszenia okresowego

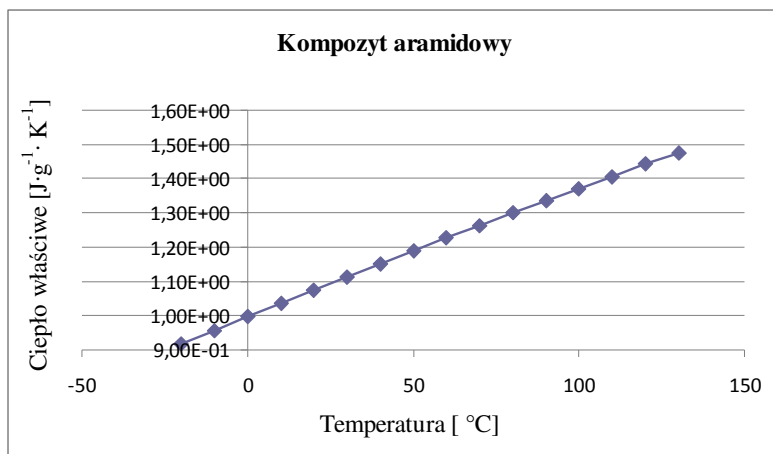
Fig. 2. Diagram of measurement stand of thermal diffusivity by temperature oscillation technique

Przed zasadniczymi badaniami przeprowadzono wstępne pomiary gęstości i ciepła właściwego. Pomiar gęstości wykonano w Laboratorium Badań Środków Bojowych Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia metodą piknometryczną (za pomocą piknometru gazowego). Gęstość próbki wyniosła:  $1,45 \text{ g/cm}^3 = 1450 \text{ kg/m}^3$ .

Ciepło właściwe określono metodą względną za pomocą mikrokalorymetru skaningowego (DSC) w zakresie temperatury od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+130^\circ\text{C}$  [6]. Próbkę do badań ciepła właściwego wycięto z płaskiej kwadratowej próbki. Miała ona postać krążka o średnicy 5 mm i grubości 1 mm.

Z uzyskanych wyników opracowania sygnałów mikrokalorymetrycznych usunięto dane odpowiadające początkowym fazom (nieustabilizowanym, pozamodelowym warunkom wymiany ciepła) każdego procesu grzania lub chłodzenia. Podczas pierwszego cyklu badań masa próbki ulegała zmianie pod wpływem wzrostu temperatury. Dlatego też przeprowadzono drugi cykl badań dla próbki wygrzanej – po uwolnieniu wody (por. wyniki badań termogravimetrycznych).

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki mikrokalorymetrycznego pomiaru ciepła właściwego próbki badawczej – pierwszy pomiar drugiego cyklu badań.



Rys. 3. Przebieg reprezentatywnej charakterystyki aproksymacyjnej mikrokalorymetrycznego pomiaru ciepła właściwego próbki badawczej – pierwszy i drugi pomiar drugiego cyklu badań

Fig. 3. Graph for representative approximation characteristic of microcalorimetric measure of heat capacity of the test sample – the first and second measurement of the second cycle of research

Wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych wartości ciepła właściwego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości ciepła właściwego wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych

Table 1. Heat capacity values determined on the basis of experimental test

$T [^{\circ}\text{C}]$	-20	-10	0	10	20	30
$C_p [\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	0,916	0,957	0,996	1,04	1,07	1,11
$T [^{\circ}\text{C}]$	40	50	60	70	80	90
$C_p [\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	1,15	1,19	1,23	1,26	1,30	1,34
$T [^{\circ}\text{C}]$	100	110	120	130		
$C_p [\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	1,37	1,41	1,44	1,48		

Uzyskaną wartość ciepła właściwego zmierzoną w temperaturze otoczenia wykorzystano do wyznaczenia przewodności cieplnej. Do badań dyfuzyjności cieplnej użyto 2 próbek o wymiarach 3 cm × 3 cm i gr. 5 mm oraz 3 cm × 5 mm (szer.) i gr. 3 cm.

W badaniach zastosowano wymuszenie o okresie oscylacji 120 s i amplitudzie wynoszącej od 0,9 K do ok. 1,3 K. Badania wykonano według odpowiedniego programu zadanymi szybkościami grzania/chłodzenia wynoszącymi odpowiednio  $\pm 0,5$  K/min.

Częstotliwość rejestracji sygnałów pomiaru temperatury wynosiła 2 Hz. Uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych wyniki pomiaru dyfuzyjności cieplnej przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości dyfuzyjności cieplnej uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych

Table 2. Thermal diffusivity values determined on the basis of experimental test

$T [^{\circ}\text{C}]$	-40	-30	-20	-10
$[\text{m}^2/\text{s}] \perp$	$1,738 \cdot 10^{-7}$	$1,686 \cdot 10^{-7}$	$1,636 \cdot 10^{-7}$	$1,587 \cdot 10^{-7}$
$[\text{m}^2/\text{s}] \text{II}$	1,055613E-06	1,026602E-06	9,983880E-07	9,709498E-07
$T [^{\circ}\text{C}]$	0	10	20	30
$[\text{m}^2/\text{s}] \perp$	$1,54 \cdot 10^{-7}$	$1,494 \cdot 10^{-7}$	$1,449 \cdot 10^{-7}$	$1,406 \cdot 10^{-7}$
$[\text{m}^2/\text{s}] \text{II}$	$9,443 \cdot 10^{-7}$	$9,183 \cdot 10^{-7}$	$8,931 \cdot 10^{-7}$	$8,685 \cdot 10^{-7}$
$T [^{\circ}\text{C}]$	40	50	60	70
$[\text{m}^2/\text{s}] \perp$	$1,364 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-7}$	$1,284 \cdot 10^{-7}$	$1,245 \cdot 10^{-7}$
$[\text{m}^2/\text{s}] \text{II}$	$8,447 \cdot 10^{-7}$	$8,214 \cdot 10^{-7}$	$7,989 \cdot 10^{-7}$	$7,769 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-7}$
$T [^{\circ}\text{C}]$	80	90	100	
$[\text{m}^2/\text{s}] \perp$	$1,208 \cdot 10^{-7}$	$1,172 \cdot 10^{-7}$	$1,137 \cdot 10^{-7}$	
$[\text{m}^2/\text{s}] \text{II}$	$7,556 \cdot 10^{-7}$	$7,348 \cdot 10^{-7}$	$7,146 \cdot 10^{-7}$	

$\perp$  prostopadle do włókien

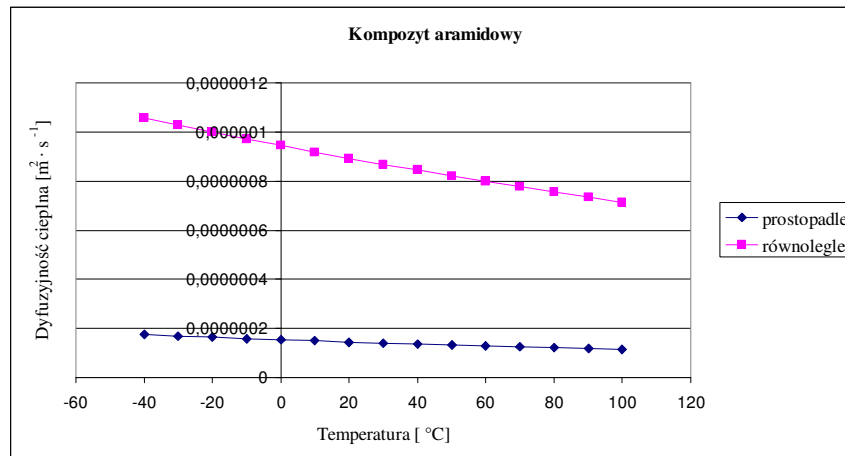
II równolegle do włókien

Wyniki pomiaru dyfuzyjności cieplnej przedstawiono na rysunku 4.

Przewodność cieplną wyznaczono drogą pośrednią, poprzez pomiar dyfuzyjności cieplnej i obliczenie wartości przewodności cieplnej z zależności (1).

Do obliczeń przyjęto wartość dyfuzyjności cieplnej  $\alpha$  zmierzonej dla próbki prostopadle do włókien, która dla temp.  $+20^{\circ}\text{C}$  wynosi  $1,4492 \cdot 10^{-7}$   $\text{m}^2/\text{s}$ . Błąd pomiaru tej metody jest poniżej 5% wyznaczonej wartości. Przewodność cieplna dla tej temperatury wynosi zatem:

$$\lambda = 1,4492 \cdot 10^{-7} \cdot (1070 \cdot 1450) = 22 \text{ W/m}\cdot\text{K} \quad (10)$$



Rys. 4. Charakterystyki aproksymacyjne wyników badań dyfuzyjności cieplnej kompozytu aramidowego w kierunku równoległym do włókien i prostopadłym do powierzchni tkaniny włókien aramidowych – reprezentatywne wartości dyfuzyjności cieplnej kierunkowej

Fig. 4. Graph for representative approximation characteristic of thermal diffusivity of the test sample

## 5. PODSUMOWANIE

Podczas wykonywanych doświadczeń określono dyfuzyjność cieplną, przewodność cieplną oraz ciepło właściwe kompozytu aramidowego stosowanego w konstrukcji indywidualnych osłon balistycznych. Pomiary dyfuzyjności cieplnej i przewodności cieplnej wykonano za pomocą aparatury TPMU- $\lambda$ -20, kamery termowizyjnej FLIR SC 7600 oraz oprogramowania ThermoFit<sup>TM</sup> Pro firmy Innovation, a pomiary ciepła właściwego – za pomocą mikrokalorymetru skaningowego.

Porównując wartości dyfuzyjności cieplnej i przewodności cieplnej, otrzymane przy użyciu kilku metod pomiarowych z wartościami podanymi w publikacji [2], można stwierdzić ich zadowalającą zgodność.

Porównanie alternatywnych metod do reprezentatywnej metody wymuszenia okresowego wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej wykazało, że uzyskana dokładność wyników jest wystarczająca do zastosowania w symulacjach komputerowych. Celem jest ocena możliwości wykrywania defektów metodami aktywnej termografii, wybór najskuteczniejszej metody, jak również określenie potrzebnych parametrów i rodzaju źródła stymulacji cieplnej.

Zaletą metody TPMU, w porównaniu z innymi przedstawionymi metodami, jest znacznie krótszy czas wyznaczenia parametrów cieplnych materiałów.

Pomimo zaniżonego o ok. 20% wyniku badań przewodności cieplnej w stosunku do pozostałych metod, można ją stosować w przypadku potrzeby szybkiego uzyskania przybliżonej wartości przewodności cieplnej (mając oczywiście na uwadze, jak zaniżona może być ta wartość).

Opisane w artykule alternatywne metody nie wymagają złożonej aparatury pomiarowej, są również mniej czasochłonne.

Uzyskane wyniki będą wykorzystane do przeprowadzenia symulacji komputerowych wielowarstwowych kompozytów aramidowych, stosowanych w konstrukcji indywidualnych osłon balistycznych.

*Autorzy artykułu dziękują Panu prof. Andrzejowi Panasowi z Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej za pomoc przy wyznaczaniu parametrów termofizycznych aramidów metodą wymuszenia okresowego.*

## LITERATURA

- [1] Świdorski Waldemar, V. Vavilov. 2009. „Wyznaczanie termofizycznych charakterystyk materiałów metodami termografii w podczerwieni”. *Biuletyn WAT LVIII* (3) : 149-168.
- [2] Świdorski Waldemar, V. Vavilov. 2010. *Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych*. Zielonka: Wydawnictwo WITU.
- [3] *Technical passport operation manual the TPMU (ITC) – a  $\lambda$ -20 unit for determining thermal conductivity and diffusivity, The unit for determining thermal conductivity and diffusivity of non-metallic materials*, № 000100460101, Sanct-Petersburg, 2006.
- [4] Panas A.J., M. Nowakowski, Z. Jakielaszek, P. Tkaczyk. 2011. „Badania dyfuzyjności cieplnej past termoprzewodzących metodą wymuszenia okresowego”. *Modelowanie inżynierskie*, 41 : 315-322.
- [5] Panas A.J., M. Nowakowski. 2009. Numerical validation of the scanning mode procedure of thermal diffusivity investigation applying temperature oscillation. In *Proceedings of Thermophysics 2009*. Brno: University of Technology, Faculty of Chemistry.
- [6] Panas A.J., D. Panas. 2009. “DSC investigation of binary iron-nickel alloys”. *High Temp. – High Press* 38 (1) : 63-78.
- [7] Bodzenta J. 2008. “Thermal wave methods in investigation of thermal properties of solids”. *Eur. Phys. J. Special Topics* 154 : 305-311.
- [8] Kosky P.G., D.H. Maylotte, J.P. Gallo. 1999. “Ångström’s method applied to simultaneous measurements of thermal diffusivity and heat transfer coefficients. Part 1: Theory”. *Int. Com. Heat Mass Trans* 26 (8) : 1051-1059.

- [9] Maylotte D.H., P.G. Kosky, J.P. Gallo. 1999. "Ångström's method applied to simultaneous measurements of thermal diffusivity and heat transfer coefficients. Part 2: Experimental". *Int. Com. Heat Mass Trans*, 26 (8) : 1061-1068.
- [10] Świdorski Waldemar. 2009. „Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych”. *Biuletyn PTU* 112 (4) : 75-92.
- [11] Parker W.J., R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbott. "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity". *Journal of Applied Physics*, Sept. 1961, vol. 32 : 1679-1684.

## **Experimental Determination of Thermo-physical Parameters of Aramid Composite Used in Individual Ballistic Protective Shields**

Monika PRACHT, Waldemar ŚWIDERSKI

**Abstract.** In the paper, the measurement results of thermo-physical properties of aramid composite used in the construction of individual ballistic protective shields are presented. Thermal characteristics i.e. temperature dependencies of the thermal conductivity, heat capacity and thermal diffusivity were determined on the basis of the tests. Thermal parameters were determined experimentally with the use of the following measurement methods: one-sided and two-sided infrared thermography methods, temperature oscillation technique, three-curve DSC, and the TPMU method. Knowledge of the thermophysical characteristics of the material is important in non-destructive testing of composites by infrared thermography method which will be the subject of further research work.

**Keywords:** mechanics, thermophysical characteristics of materials, infrared thermography, non-destructive testing