

mgr inż. GRZEGORZ GRALEWICZ

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczydr hab. inż. BOGUSŁAW WIĘCEK prof. PŁ
Politechnika Łódzka, Instytut Elektroniki

Lokalizacja obszarów nieciągłości materiału ochronnego

– symulacje komputerowe i badania eksperymentalne

Materiały stosowane do produkcji wyrobów przeznaczonych do ochrony człowieka (m.in. materiały kompozytowe złożone z kilku warstw, zwane dalej materiałami ochronnymi) mają strukturę niejednorodną i anizotropową. Poprzez dobór odpowiednich składników można otrzymać materiał ochronny o odpowiednich parametrach i w ten sposób uzyskać np. wyższą odporność na udużenie lub lepsze pochłanianie energii. Właściwości materiału ochronnego zmieniają się, gdy w strukturze materiału pojawiają się (już podczas procesu technologicznego oraz na późniejszych etapach użytkowania) rozwarstwienia, pęcherzyki powietrza, pęknięcia itp. Ocena jakościowa struktury materiału ochronnego polega na wskazaniu defektów występujących w materiale. Do tego celu została wykorzystana technika termografii aktywnej.

Location of discontinuities in protective material - computer simulations and experimental tests

The structure of materials used in the production of components designed for personal protection (e.g. multi-layer composites, hereinafter called protective materials) is heterogeneous and anisotropic. By selecting suitable ingredients, protective materials of required parameters can be obtained, making it possible to achieve higher impact strength or enhanced energy absorption. The properties of protective materials change whenever the structure of the material (already during the technological process or at later application stages) features lamination, air bubbles, fractures, etc. A qualitative evaluation of protective material consists in identification of defects present in the material. To this aim, active thermography technology is employed.

Wstęp

Materiały wielowarstwowe stosowane do produkcji wyrobów (tj. sztywnych osłon kulo- i odłamkoodpornych: osłony osobiste, kamizelki wielofunkcyjne, opancerzenia środków transportu i obiektów stałych) przeznaczonych do ochrony człowieka (m.in. materiały kompozytowe złożone z kilku warstw, zwane dalej w skrócie materiałami ochronnymi) mają strukturę niejednorodną i anizotropową. Przez dobór odpowiednich składników można otrzymać materiał ochronny o wymaganych właściwościach, np. mniejszym ciężarze właściwym, wyższej odporności na udużenie lub lepszym pochłanianiu energii.

Wymienione właściwości ulegają znacznej zmianie, gdy w strukturze materiału pojawiają się (już podczas procesu technologicznego oraz później na etapach użytkowania) rozwarstwienia w postaci pęcherzyków powietrza lub pęknięć.

W celu wyeliminowania wadliwych struktur materiałów ochronnych konieczna jest lokalizacja obszarów nieciągłości materiału, czyli miejsc występowania wymienionych defektów. W wyniku badania właściwości termicznych wielowarstwowych struktur materiałów możliwe jest wykrywanie obszarów nieciągłości materiału. Do tego celu została wykorzystana technika termografii aktywnej.

Termografia aktywna to metoda badań nieniszczących (NDT [1-6]), w której badany obiekt pobudza się energią cieplną, a kamera termowi-

zyjna mierzy zmienny w czasie rozkład temperatury. Ciepło w materiałach stałych rozchodzi się drogą dyfuzji, co w dużym stopniu zależy od właściwości termicznych badanego materiału. Dotyczy to zwłaszcza struktur wielowarstwowych, w przypadku których odpowiedź termiczna na wymuszenie energetyczne zależy od właściwości warstw wewnętrznych.

Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych zostało przeprowadzone modelowanie komputerowe struktury materiału kompozytowego z wprowadzonym wtrąceniem (ubytkiem). Pozwoliło to na znaczne zawężenie pomiarów eksperymentalnych, niezbędnych do lokalizacji wtrąceń i nieciągłości materiału kompozytowego.

Analiza matematyczna przewodzenia ciepła przy zmiennym warunku brzegowym

Lokalizacja wtrąceń i nieciągłości materiałów za pomocą termografii aktywnej wymaga opisu zależności czasowo-przestrzennego rozkładu temperatury wywołanego wymuszeniem energetycznym z uwzględnieniem odpowiednich cech badanego materiału (przewodności cieplnej, ciepła właściwego, gęstości). W przypadku termografii aktywnej synchronicznej (*lock-in* [7,8]) wymuszenie energetyczne i odpowiedź na to wymuszenie mają charakter periodyczny i synchroniczny.

Z przeprowadzonej analizy opisu matematycznego wynika, że **głębokość wnikania fali temperaturowej maleje wraz ze wzrostem częstotliwości i skracaniem czasu trwania impulsu źródła wymuszenia energetycznego**. Jest ona również zależna od takich właściwości materiału, jak: przewodność cieplna k , ciepło właściwe c_w , gęstość ρ . Jeżeli znamy zatem – nawet w przybliżeniu – grubość warstw materiału, możemy dobrać czas trwania impulsu wymuszenia energetycznego i/lub częstotliwość przebiegu wymuszenia energetycznego.

Model termiczny struktury materiału ochronnego

Modelowanie numeryczne struktury wielowarstwowej materiału kompozytowego przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych (pakiet do symulacji numerycznych ANSYS®). Program ANSYS® umożliwia przeprowadzenie dynamicznych symulacji termicznych z uwzględnieniem najczęściej spotykanych warunków brzegowych (konwekcji, strumienia ciepła, radiacji itd.). Dane uzyskane z symulacji w pakiecie ANSYS® zostały opracowane za pomocą oprogramowania przygotowanego w języku Matlab®. Program realizuje wizualizację uzyskanych z pakietu ANSYS® wyników. Wylicza ponadto parametry pozwalające wyznaczyć względną różnicę między wartościami występującymi w miejscu, gdzie jest defekt – wtrącenie, a wartościami sąsiednimi (obszar

Tabela 1

PARAMETRY MATERIAŁU WYKORZYSTANE W SYMULACJACH

Parameters of the material used in simulations

Materiał	Kompozyt	Defekt
Gęstość, kg/m ³	1152	1,165
Ciepło właściwe, J kg ⁻¹ K ⁻¹	1400	1000
Przewodność cieplna, W m ⁻¹ K ⁻¹	0,3	0,024

bez defektu). Wykonany zbiór symulacji komputerowych w pakiecie ANSYS® został poddany analizie, której celem było wskazanie przedziału częstotliwości wymuszenia energetycznego, przy którym możliwa jest lokalizacja defektu (nieciągłości materiału).

Modelowanym materiałem był kompozyt kevlarowy złożony z kilkunastu warstw tkaniny kevlarowej usztywniony żywicą formaldehydową. Defekty, które w rzeczywistości wynikają z przypadkowej niejednorodności struktury tego materiału (np. pęcherzyki powietrza), modelowane były jako jednorodne obszary charakteryzowane przez następujące parametry: przewodność cieplną, ciepło właściwe i gęstość – odmienne od materiału bazowego.

Ze względu na czasochłonne obliczenia komputerowe zawężono obszar modelowania do fragmentu z pojedynczym defektem, którego średnica oraz głębokość umieszczenia była zmieniana w kolejnych symulacjach (rys. 1a).

Przy obliczeniach komputerowych wymiary struktury wynosiły:

- $x = 0,08$ m
- $y = 0,08$ m
- $z = 0,007$ m
- $r_m = 0,002 - 0,02$ m (średnica defektu)
- $d_v = 0,0008$ m (grubość defektu)
- $z_m = 0,0002 - 0,0022$ m (głębokość umieszczenia defektu).
- Parametry materiałowe przedstawiono w tabeli 1.

Moc wymuszenia energetycznego:

- $P = 350$ W

Strumień ciepła wymuszenia energetycznego, W/m:

$$Q(t) = Q_0(1 + \sin(2\pi ft))$$

gdzie: Q_0 – natężenie źródła wymuszenia energetycznego; f – częstotliwość; t – czas

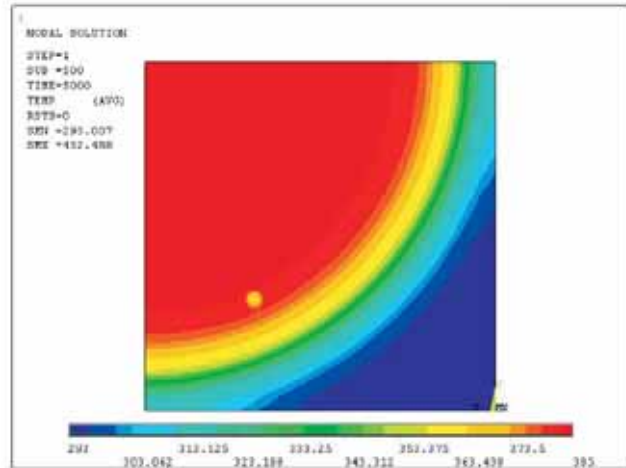
Temperatura otoczenia:

- $T_{room} = 293$ K

Współczynnik konwekcji α na przedniej i tylnej powierzchni:

- Ściana przednia i tylna: $\alpha = 10$ W m⁻²K⁻¹
- Ściany boczne: $\alpha = 5$ W m⁻²K⁻¹

Na fot. 1. przedstawiona jest mapa temperatury z widocznym miejscem występowania defektu w kształcie cylindrycznym, o średnicy $r_m = 0,005$ m, grubości i długości cylindra $d_v = 0,0005$ m, głębokości umieszczenia mierzonej od powierzchni przedniej $z_m = 0,00175$ m. Mapa przedstawia temperaturę dla wybranej chwili czasowej $t = 200$ s; widok od strony obserwacji komponentu przez kamerę termowizyjną (na ścianie tylnej).



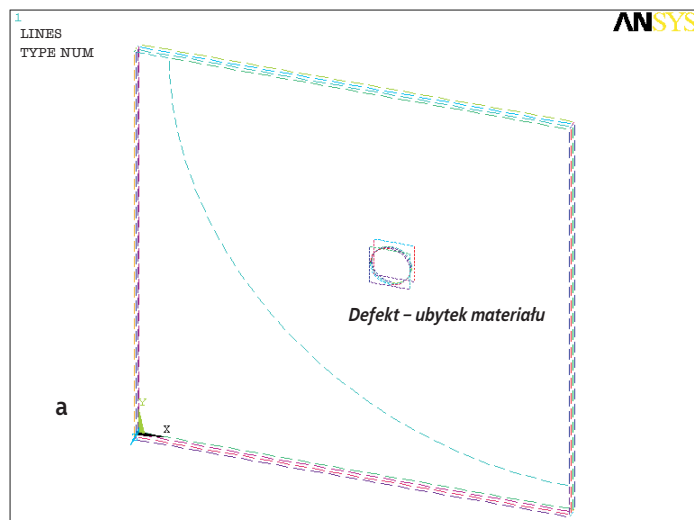
Fot. 1. Przykładowa mapa temperatury na powierzchni badanego kompozytu
Photo 1. Sample map of temperature on the surface of a composite

Dane uzyskane z symulacji pakietem ANSYS® zostały opracowane za pomocą oprogramowania w języku Matlab®. Umożliwia ono wizualizację uzyskanych wyników, wylicza ponadto wartości pozwalające wyznaczyć względną różnicę między wartościami występującymi w miejscu, gdzie jest defekt, a wartościami sąsiednimi (bez defektu). Program powstał głównie z myślą o określaniu różnicy między wartością temperatury /amplitudy /fazy ($T/A/P$) w obszarze defektu i w obszarze bez defektu. Wartości $T/A/P$ charakteryzujące otoczenie zbierane były w czterech punktach wskazanych (p_1, p_2, p_3, p_4). Następnie wyznaczony był parametr $CONTR$ [-] charakteryzujący różnicę wartości $T/A/P$ między obszarem bez defektu a obszarem z defektem. Był on definiowany jako moduł różnicy między wartością w punkcie centralnym (p_c) a sąsiadującymi ($p_i, i = 1:4$), odniesiony do średniej z modułów wartości p_c i p_i .

$$CONTR = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{a|p_c - p_i|}{|p_c| + |p_i|}$$

Następnie wyznaczana była bezwzględna różnica temperatur między punktem defektu (p_c) a punktami bez defektu (p_i).

$$\Delta T = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |T_c - T_i|$$



6-5 warstwa	5-4 warstwa	4-3 warstwa	3-2 warstwa	
○	○	○	○	22 mm
○	○	○	○	19 mm
○	○	○	○	15,8 mm
○	○	○	○	12,7 mm
○	○	○	○	11,1 mm
○	○	○	○	8 mm
○	○	○	○	6,4 mm
○	○	○	○	5,6 mm
○	○	○	○	4,8 mm
○	○	○	○	4 mm
○	○	○	○	3,2 mm
○	○	○	○	2 mm

Rys. 1. Struktura materiału kompozytowego: a) – z defektem po ograniczeniu na potrzeby modelowania komputerowego; b) – z umiejscowieniem defektów o różnej średnicy
Fig. 1. The structure with location of the composite material defects – the structure with defect after reducing for computer modeling (a); varying diameter (b)

Ostatnim etapem było przeprowadzenie analizy *lock-in*, pozwalającej na wykrycie różnicy w amplitudzie i fazie między sinusoidalnym sygnałem wymuszającym a odpowiedzią układu. Parametrem analizy była częstotliwość f_0 i faza φ_0 sygnału wymuszającego. Wartość amplitudy A i fazy φ sygnału odpowiedzi liczona była ze wzorów [10]:

$$A = \frac{2}{N} \sqrt{SQ^2 + SP^2} \quad \text{tg}(\varphi - \varphi_0) = \frac{SQ}{SP}$$

$$SP = \sum_{i=1}^N s(t_i)p(t_i) \quad SQ = \sum_{i=1}^N s(t_i)q(t_i)$$

$$p(t) = \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad q(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$$

A – amplituda, φ – faza, N – zarejestrowana liczba obrazów, t_i – momenty rejestracji obrazów, $s(t)$ – sygnał zarejestrowany, $p(t)$ – sygnał referencyjny zgodny w fazie z sygnałem wymuszenia, $q(t)$ – sygnał przesunięty o 90° względem wymuszenia, SP – suma iloczynów sygnałów $s(t)$ i $p(t)$ od $i = 1$ do N , SQ – suma iloczynów sygnałów $s(t)$ i $q(t)$ od $i = 1$ do N .

Wyniki analizy komputerowej

Celem analizy komputerowej było określenie częstotliwości sygnału wymuszającego, przy której defekt o znanych parametrach (położenie, rozmiar, parametry materiału: przewodność cieplna k , ciepło właściwe c_w , gęstość ρ) może być wykryty. Tabela 2. przedstawia wartości parametrów w odniesieniu do różnych częstotliwości źródła wymuszenia energetycznego.

Wnioski z modelowania komputerowego

Wykonany zestaw symulacji komputerowych pozwolił na dobór częstotliwości wymuszenia energetycznego. **Jako parametr pozwalający na wskazanie „optymalnej” częstotliwości wymuszenia energetycznego zaproponowano parametr *CONTR* dla fazy prądu odpowiadającego częstotliwości źródła wymuszenia energetycznego C_{pf} , którego maksymalna wartość wskazuje na „optymalną” częstotliwość. Parametr C_{pf} (tab. 1.) osiąga wartość największą dla przedziału częstotliwości $f = 0,005 - 0,006$ Hz. W odniesieniu do tych częstotliwości zostały przeprowadzone wstępne badania eksperymentalne materiału kompozytowego z wprowadzonymi defektami.**

Wstępne badania eksperymentalne materiału kompozytowego z wprowadzonymi defektami

Celem wstępnych badań materiału kompozytowego była weryfikacja częstotliwości sygnału wymuszającego $f = 0,005 - 0,006$ Hz. Przygotowano próbkę do badań kontrolnych, w której usunięto fragmenty

o średnicach od 22 do 2 mm (rys. 1b, str. 13.) warstw materiałów (w zakresach od-do: 2-3, 3-4, 4-5 i 5-6 warstwie od powierzchni).

Do badań został wykorzystany system pomiarowy pozwalający na rejestrację zmian temperatury badanego materiału – po wymuszeniu energetycznym – w czasie rzeczywistym. System pomiarowy składał się z generatora, kamery termowizyjnej i komputera z odpowiednim oprogramowaniem (sterowanie generatorem oraz rejestracja i obróbka obrazów termalnych), konwertera analogowo-cyfrowego sygnału z kamery termowizyjnej (fot. 2.).

Parametry systemu pomiarowego:

- rodzaje pobudzenia: impuls, periodyczne
- zakres pasma generowanych fal: 500 – 1700 nm
- moc układu wymuszenia energetycznego 4 × 350 W
- zakres widma analizy obrazu termowizyjnego: 3 – 5 μm
- czułość analizy obrazu termowizyjnego: 0,1°C.

Próbka materiału kompozytowego została umieszczona w specjalnym uchwycie. Kamera termowizyjna obserwowała tylną powierzchnię badanego materiału. Temperatura otoczenia wynosiła 26°C. Układ wymuszenia umieszczono w odległości 0,5 m od próbki, natomiast próbkę w odległości 3 m od kamery termowizyjnej.

Próbkę materiału oraz przykładowy amplitudogram i fazogram dla wybranej częstotliwości $f = 0,005$ Hz wymuszenia energetycznego z zaznaczonymi defektami przedstawiono na fot. 3.

Zestawienie wyników badań termograficznych ze wskazaniem częstotliwości wymuszenia energetycznego, dla której możliwa była lokalizacja defektów w postaci ubytków materiału przedstawiono w tabeli 3. Wyniki te odnoszą się do zlokalizowanych defektów (średnica), pozostałe defekty (średnica) są niewykrywalne.

Wnioski z badań eksperymentalnych:

- defekty o średnicach: 22; 19; 15,8; 12,7; 11,1; 8 mm umieszczone w zakresie od warstwy 2 do 3 zlokalizowano przy częstotliwości wymuszenia energetycznego $f = 0,005$ Hz
- defekty o średnicach: 22; 19; 15,8; 12,7; 11,1; 8 mm umieszczone w zakresie od warstwy 3 do 4 zlokalizowano przy częstotliwości wymuszenia energetycznego $f = 0,006(6)$ Hz
- defekty o średnicach: 22; 19; 15,8; 12,7; 11,1 mm umieszczone w zakresie od warstwy 4 do 5 zlokalizowano przy częstotliwości wymuszenia energetycznego $f = 0,004$ Hz
- defekty o średnicach: 22; 19 mm umieszczone w zakresie od warstwy 5 do 6 zlokalizowano przy częstotliwości wymuszenia energetycznego $f = 0,005$ Hz
- przedział częstotliwości wymuszenia ($f = 0,005-0,006$ Hz), wskazany podczas analizy komputerowej został potwierdzony, gdyż przy częstotliwości ($f = 0,005$ Hz) możliwa jest lokalizacja defektów dla wybranego przypadku (fot. 3.).

Tabela 2

WARTOŚCI PARAMETRÓW W ODNIESIENIU DO RÓŻNYCH CZĘSTOTLIWOŚCI ŹRÓDŁA WYMUSZENIA ENERGETYCZNEGO

Parameters for different values of various frequencies of energy sources

Częstotliwość, Hz	0,001	0,002	0,004	0,0045	0,005	0,0056	0,006	0,01	0,02
t, s	5000	2500	1250	1100	1000	900	750	500	250
$\Delta T_{max}, K$	25,0	22,5	19,0	18,0	17,3	16,5	15,0	12,0	7,2
$\Delta T_A, K$	17,8	15,5	11,9	11,2	10,6	10,0	8,98	6,8	3,9
$C_{Af} [-]$	0,18	0,156	0,18	0,20	0,21	0,23	0,265	0,34	0,27
$C_{pf} [-]$	0,026	0,051	0,087	0,0092	0,095	0,099	0,095	0,05	0,057
$C_{Alu} [-]$	0,18	0,156	0,16	0,17	0,18	0,196	0,22	0,28	0,23
$C_{plu} [-]$	0,045	0,057	0,062	2	2	2	0,065	0,053	0,020

t, s – czas nagrzewania

$\Delta T_{max}, K$ – maksymalna w czasie różnica temperatur między punktem z defektem a bez defektu

$\Delta T_A, K$ – średnia w czasie różnica temperatur między punktem z defektem i bez defektu

$C_{Af} [-]$ – parametr CONTR w odniesieniu do amplitudy prądu odpowiadającego częstotliwości źródła ciepła

$C_{pf} [-]$ – parametr CONTR w odniesieniu do fazy prądu odpowiadającego częstotliwości źródła ciepła

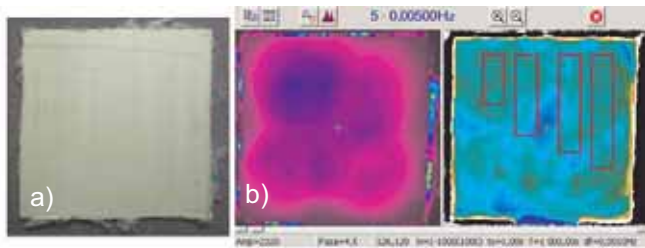
$C_{Alu} [-]$ – parametr CONTR w odniesieniu do amplitudy analizy *lock-in*

$C_{plu} [-]$ – parametr CONTR w odniesieniu do fazy analizy *lock-in*



Fot. 2. Stanowisko pomiarowe do badań nieniszczących techniką termografii aktywnej

Photo 2. A test stand for non-destructive testing with active thermography



Fot. 3. Próbka – a), obraz amplitudy fazy z zaznaczonymi defektami – b)

Photo 3. A sample (a), amplitude and phase with defects indicated (b)

Podsumowanie

Przeprowadzone modelowanie komputerowe struktury materiału kompozytowego z wprowadzonymi defektami (ubytkiem materiału kompozytowego) pozwoliło na znaczne zawężenie pomiarów eksperymentalnych, które miały na celu lokalizację wtrąceń i nieciągłości materiału kompozytowego.

Wyniki wstępnych badań eksperymentalnych potwierdzają możliwość lokalizacji defektów podpowierzchniowych, charakteryzujących się innymi właściwościami termicznymi niż materiał bazowy (kompozytowy). Minimalna średnica zlokalizowanego defektu w zakresie warstw 2. i 3. oraz

3. i 4. to 8 mm, w zakresie warstw 4. i 5. to 11,1 mm, a w zakresie warstw 5. i 6. to 19 mm. Defekty o średnicach mniejszych niż 8 mm nie zostały zlokalizowane podczas badań eksperymentalnych. Może to wynikać z procesu przygotowania próbek – defekty to wycięcia w kolejnych warstwach materiału kompozytowego, próbka składająca się z 16 warstw była sklejana w wysokiej temperaturze i pod odpowiednim ciśnieniem, co mogło być przyczyną zespolenia się obszarów defektu o mniejszej średnicy z materiałem bazowym, przez co lokalizacja tych defektów była niemożliwa.

PIŚMIENICTWO

[1] X. P. Maldague, 2001, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, N.Y.
 [2] E. H. Edwin, T. Arnesen, G. I. Hugosson *Evaluation of Thermal Cracker Operation by Use of Infrared Camera*. Proc. of SPIE Vol. 3361, Thermosense XX, ed. J. Snell, R. N. Wurzbach, 125-136, 1998
 [3] A. Dillenz, D. Wu, K. Breitrück and G. Busse *Lock-in thermography for depth resolved defect characterization*, Pro-ceedings of the 15th World Conference on Nondestructive Testing Roma (Italy) 15-21 October 2000
 [4] F. Galmiche and X. Maldague *Depth defect retrieval using the wavelet pulse phase thermography*, "Quantitative Infrared Thermography" 5, 2000
 [5] B. Więcek, S. Zwolenik *Zastosowanie termografii w badaniach nieniszczących – metoda fali cieplnej, termografia impulsowa*. Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej, 2003
 [6] G. Owczarek, G. Gralewicz *Zastosowanie promieniowania podczerwonego do lokalizacji defektów w strukturach materiałów – monografia*, CIOP-PIB, Warszawa 2003
 [7] G. Gralewicz, G. Owczarek, B. Więcek *Investigations of Single and Multilayer Structures Using Lock-In Thermography – Possible Applications*. "International Journal of Occupational Safety and Ergonomics" (JOSE) 2005, Vol. 11, No. 2, 211-215
 [8] G. Gralewicz, G. Owczarek, B. Więcek, K. Tomalczyk *Optical and ultrasound lock-in thermography systems for detection of structural defects*. „Problemy Eksploatacji”, 129-136, 4/2006 (63)
 [9] S. Wiśniewski, T. S. Wiśniewski *Wymiana ciepła*. WNT, Warszawa 1994, 2000
 [10] A. Nowakowski *Postępy termografii – aplikacje medyczne*. Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Elektroniki Medycznej i Ekologicznej Gdańsk 2001

Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach zadania badawczego realizowanego w zakresie działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego w latach 2007-2008

ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ TERMOGRAFICZNYCH

Results of thermographic tests

Tabela 3

Średnica, mm	Częstotliwość, Hz										
	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,006(6)	0,007	0,008	0,009	0,01
Głębokość umieszczenia defektów 2-3 warstwa											
22	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
19	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
15,8	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
12,7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
11,1			X	X	X	X	X	X	X		
8					X						
Głębokość umieszczenia defektów 3-4 warstwa											
22		X	X	X	X	X	X	X	X		
19		X	X	X	X	X	X	X	X		
15,8		X	X	X	X	X	X	X			X
12,7		X	X	X	X	X	X	X			X
11,1		X	X	X	X	X	X	X			
8							X				
Głębokość umieszczenia defektów 4-5 warstwa											
22		X	X	X	X	X	X	X	X		
19		X	X	X	X	X	X	X			
15,8		X	X	X	X	X	X	X			
12,7		X	X	X	X	X					
11,1				X							
Głębokość umieszczenia defektów 5-6 warstwa											
22				X	X						
19					X						

X – oznacza zlokalizowany defekt