

Grzegorz GRALEWICZ¹, Bogusław WIĘCEK²

¹ CENTRALNY INSTYTUT OCHRONY PRACY – PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

² POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI

Badanie wpływu sygnału wymuszenia energetycznego na wynik analizy częstotliwościowej w technikach termografii aktywnej

Mgr inż. Grzegorz GRALEWICZ

Grzegorz Gralewicz urodził się w 1978r, w 2003r. ukończył Wydział Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej, od 2003r pracuje w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym, zajmuje się m. in. badaniami środków ochrony indywidualnej dla potrzeb certyfikacji oraz badaniami z zakresu technik termografii.



e-mail: grgra@ciop.lodz.pl

Dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Bogusław Więcek specjalizuje się w dziedzinie termografii komputerowej i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Bogusław Więcek jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermometry oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczernieni” – TTP.



e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl

Streszczenie

Przedstawione w pracy wyniki dotyczą badania wpływu rodzaju sygnału wymuszenia energetycznego na wynik analizy częstotliwościowej sekwencji obrazów termograficznych oraz zestawienia wyników analiz Fouriera i falkowej dla materiałów jednorodnych termicznie. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń popartych modelowaniem komputerowym określono wpływ sygnału wymuszenia energetycznego periodycznego i impulsowego na wynik analizy częstotliwościowej.

Słowa kluczowe: termografia, impuls, periodyczne wymuszenie.

Impact of energy excitation on frequency analysis for active thermography techniques

Abstract

Results of the excitation energy impact on frequency analysis for active thermography techniques are presented. Active thermography is a non-destructive evaluation method (NDE) in which tested items are excited with heat excitation, while infrared camera measures the changes of temperature distribution in time. Heat spreads in solid materials through diffusion which is strongly dependent on the thermal qualities of the tested material. The investigations included computer simulation and experimental tests. The analysis results of different excitation (frequency and time) for testing thermally conductive and isolative materials while using impulse and periodic energy signals are presented. The comparison between the Fourier and wavelets analysis for thermally homogeneous materials is discussed. The authors defined a parameter phase difference $K\Phi$ for signature defect in materials whose maximum value indicates the frequency of heat excitation. For isolative materials its value is much larger (the larger the thickness of the material, the greater the value of phase angle), while for conductive ones it is smaller, hence it is difficult to locate a defect in the material. The results of the excitation energy impact on the frequency analysis showed that periodic energy is more advantageous for isolative materials, whereas impulse energy is more useful for conductive materials.

Keywords: thermography, impulse, periodic energy excitation.

1. Metodyka badań

W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę komputerową przepływu ciepła przez badane struktury (symulacje komputerowe), a następnie badania termowizyjne specjalnie przygotowanych próbek materiałów przewodzących i izolujących przepływ ciepła.

Na potrzeby analizy przepływu ciepła przez badane struktury zdefiniowano parametr kontrast fazy $K\Phi$ umożliwiający wskazanie przedziału częstotliwości wymuszenia energetycznego, przy pomocy którego możliwe jest wskazanie obszaru o odmiennych parametrach termicznych od materiału bazowego (np. ubytek materiału) [1, 2].

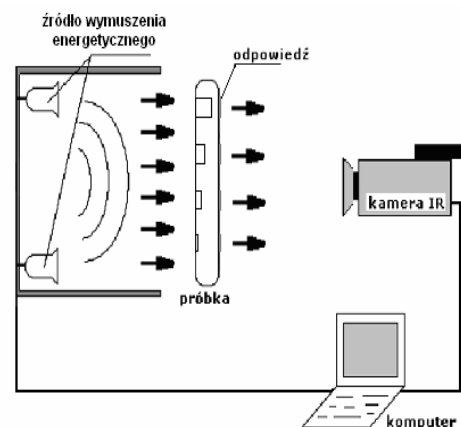
Kontrast fazy $K\Phi$ jest definiowany jako moduł różnicy między wartością w punkcie centralnym defektu (Φ_{defekt}) a punktami poza defektem ($\Phi_{bez-defektu, i}$ $i=1,2,3,4$) odniesiony do średniej z modułów wartości Φ_{defekt} i $\Phi_{bez-defektu, i}$.

$$K\Phi = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{|\Phi_{defekt} - \Phi_{bez-defektu, i}|}{|\Phi_{defekt}| + |\Phi_{bez-defektu, i}|} \quad (1)$$

gdzie Φ_{defekt} to punkt centralny w obszarze o odmiennych parametrach termicznych a $\Phi_{bez-defektu, i}$ to punkty na brzegu okręgu, którego promień kreślony jest na poziomie 0,9 Φ_{defekt} poza obszarem o odmiennych parametrach termicznych od materiału bazowego (rozpatrywany przypadek charakteryzował się mniejszą wartością fazy dla obszaru o odmiennych parametrach termicznych niż materiał bazowy)[7, 8].

2. Stanowisko badawcze

W skład systemu pomiarowego do rejestracji zmian temperatury badanych materiałów – po wymuszeniu energetycznym – w czasie rzeczywistym, wchodzi: kamera termowizyjna ThermoCam PM290E (3-5) μ m, komputer z odpowiednim oprogramowaniem (rejestracja i obróbka obrazów termalnych), źródło wymuszenia energetycznego ze sterownikiem (rys. 1).



Rys. 1. System pomiarowy do badań nieniszczących techniką termografii aktywnej
Fig. 1. System of non-destructive testing with active thermography technique

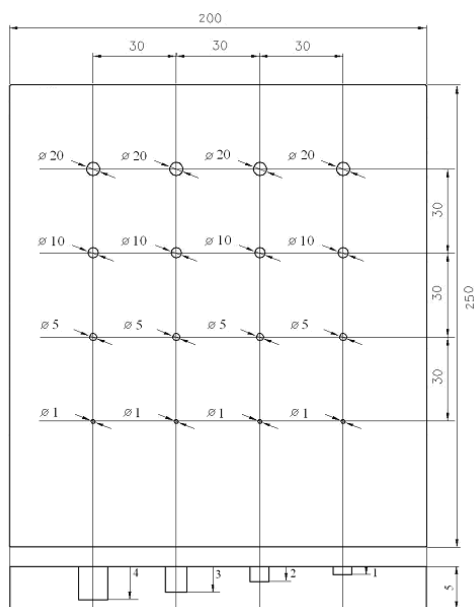
Zasada działania systemu pomiarowego polega na pobudzeniu próbki źródłem wymuszenia energetycznego (periodycznym lub impulsowym). Następnie wyznacza się amplitudę i kąt przesunięcia fazowego odpowiedzi względem sygnału wymuszającego.

Parametry systemu pomiarowego:

- rodzaje wymuszenia energetycznego: impuls, sygnał periodyczny,
- zakres widma generowanych fal: 700 – 3000 nm,
- moc elektryczna periodycznego źródła wymuszenia energetycznego 1400 W,
- energia impulsowego źródła wymuszenia energetycznego 1500 Ws,
- zakres widma analizy obrazu termowizyjnego: 3 – 5 μm ,
- rozdzielczość analizy obrazu termowizyjnego: 0,1 K.

3. Materiały użyte w badaniach

Do badań laboratoryjnych przygotowano próbki o wymiarach 200x250x5 \pm 0,1 mm materiałów przewodzących i izolujących przepływ ciepła (turbaks, drewno, pleksi, aluminium, miedź, stal kwasoodporna). W próbkach usunięto materiał o średnicach: 20, 10, 5 i 1 mm do głębokości: 4, 3, 2, 1 mm (rys. 2). Błąd pomiaru średnicy i głębokości to \pm 0,1 mm.



Rys. 2. Wymiary geometryczne próbek w milimetrach
Fig. 2. Geometric dimensions of the samples in millimeters

Próbki od strony obserwowanej przez kamerę termowizyjną pokryto czarną matową farbą.

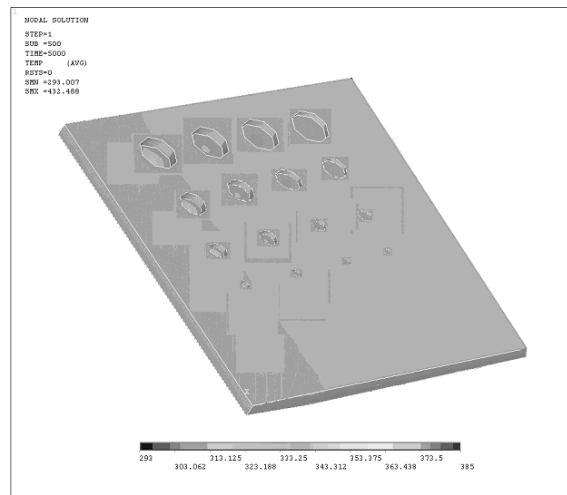
Tab. 1. Parametry materiałowe
Tab. 1. Material parameters

Materiał	Turbaks	Drewno	Pleksi	Aluminium	Miedź	Stal kwasoodporna
Gęstość ρ [kg/m^3]	1350	500	1190	2700	8920	8027
Ciepło właściwe c_w [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{K}$]	930	2500	1470	900	380	502
Przewodność cieplna k [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{K}$]	0,2	0,12	0,2	237	401	16,26

4. Wyniki symulacji komputerowych

Symulacje komputerowe materiałów przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych (pakiet do symulacji numerycznych Ansys®). Program Ansys® umożliwia wykonanie symulacji termicznych z uwzględnieniem najczęściej spotykanych warunków brzegowych. Dane uzyskane z modelu komputerowego (rys. 3) zostały opracowane przy pomocy oprogramowania przygotowanego w języku Matlab®. Wykonany zbiór symulacji kom-

puterowych w pakiecie Ansys® został podany analizie, której celem było wskazanie przedziału częstotliwości wymuszenia energetycznego [4-5,7-10], przy którym występowała największa różnica fazowa względem wymuszenia energetycznego dla obszaru o odmiennych parametrach termicznych niż materiał bazowy (usunięty materiał).



Rys. 3. Model komputerowy próbki materiału
Fig. 3. Computer model of the sample material

Przygotowano model komputerowy próbek materiałów przedstawionych na rys. 3, uwzględniający warunki graniczne: geometrię próbek, parametry materiałowe tab. 1. Następnie do przedniej powierzchni próbki przyłożono wymuszenie energetyczne o mocy

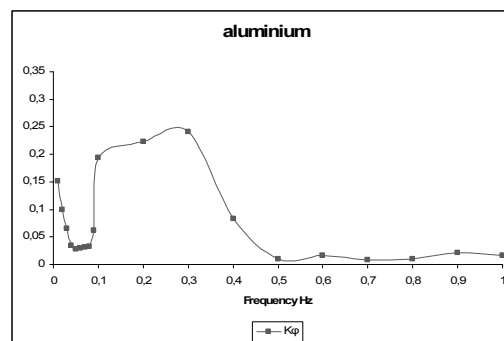
$$Q(t) = Q_0 (1 + \sin(2\pi ft)), \quad (2)$$

gdzie $Q_0 = 350$ W.

Przyjęto temperaturę otoczenia $T_0 = 294$ K. Ponieważ podczas badań termowizyjnych próbka będzie ustawiona pionowo założono współczynnik konwekcji naturalnej na przedniej i tylnej powierzchni: $\alpha_{pr} = 10$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, ściany boczne: $\alpha_b = 5$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

Model komputerowy został tak opracowany, aby możliwe było przeprowadzenie szeregu symulacji komputerowych dla wybranego zakresu częstotliwości źródła wymuszenia energetycznego (0,01–1 Hz) przy tych samych warunkach granicznych.

Wybrane wyniki symulacji komputerowych przedstawiono na wykresie dla materiału aluminium (rys. 4).



Rys. 4. Zależność parametru $K\Phi$ od częstotliwości źródła wymuszenia energetycznego dla materiału aluminium

Fig. 4. The relationship between parameter $K\Phi$ and energy source for aluminium

Wykonany pakiet symulacji komputerowych pozwolił na dobór częstotliwości wymuszenia energetycznego. Jako parametr pozwalający na wskazanie „optymalnej” częstotliwości wymuszenia energetycznego zaproponowano parametr kontrast fazy $K\Phi$ dla fazy prądu odpowiadającego częstotliwości źródła wymuszenia energetycznego. Kryterium wskazania „optymalnej” częstotliwości

jest uzyskanie maksymalnej wartości $K\Phi$. Parametr $K\Phi$ osiągnął wartość maksymalną dla przedziału częstotliwości $f=0,09-0,3$ Hz. Dla tych częstotliwości zostały przeprowadzone badania termowizyjne materiałów.

5. Badania termowizyjne

Przeprowadzono badania termowizyjne, gdzie dokonywany był pomiar zmian pola temperatury na powierzchni badanego obiektu w wyniku wymuszenia energetycznego sygnałem periodycznym w zadanym zakresie częstotliwości (wyznaczonym z symulacji komputerowych) oraz sygnałem impulsowym. Moc elektryczna sygnału wymuszenia energetycznego wynosiła 350 W. Kamera termowizyjna umieszczona została po przeciwnej stronie próbki niż źródło wymuszenia energetycznego (rys. 1). Temperatura w pomieszczeniu wynosiła $T_0=294$ K. Odległość kamery od badanej próbki wynosiła 600 mm.

W badaniach wykorzystano kamerę ThermoCam PM290 (FOV 16° lens, $f/1.5 = 17^\circ$ H x 16° V, IFOV 16° lens, $f/1.5 = 1.2$ mrad) i dla takiej konfiguracji stanowiska dokonano obliczeń najmniejszego punktu pomiarowego

$$IFOV = 2 * \arctg \frac{p}{2d} \approx \frac{p}{d} \quad (3)$$

gdzie: d jest to odległość kamery od obiektu, p jest to najmniejsza średnica punktu pomiarowego, zatem:

Najmniejszy punkt pomiarowy wynosi $p = 0,72$ mm, natomiast najmniejsza średnica usuniętego materiału to 1 mm.

Zarejestrowane obrazy termowizyjne poddano analizie Fouriera i falkowej. Odczyt różnicy fazowej względem wymuszenia energetycznego pozwolił na zbadanie wpływu wymuszenia energetycznego na wynik analizy częstotliwościowej.

6. Wyniki

6.1. Analiza częstotliwościowa Fouriera zmian pola temperatury w wyniku wymuszenia energetycznego sygnałem periodycznym

W poniższych tabelach 2 - 4 przedstawiono wyniki analizy częstotliwościowej Fouriera dla kolejnych średnic usuniętego materiału. Próbkę materiałów poddano wymuszeniu energetycznemu o częstotliwości $f=0,1$ Hz oraz $f=0,01$ Hz. Dla materiałów przewodzących termicznie (miedź, aluminium, stal kwasoodporna) konieczne było dwukrotne zwiększenie mocy elektrycznej (700 W) źródła wymuszenia energetycznego, aby możliwe było wskazanie miejsc usuniętego materiału.

W tabelach 2, 3 i 4 zamieszczono wyniki analizy częstotliwościowej Fouriera dla średnic 20, 10 i 5 mm.

Tab. 2. Wyniki analizy częstotliwościowej Fouriera dla średnicy 20 mm
Tab. 2. Fourier frequency analysis of the results for diameter 20 mm

Material	Różnica fazowa względem wymuszenia [stopnie]			
	Głębokość [mm]			
	4	3	2	1
Turbaks	-23,04 ± 1,15	-3,06 ± 0,15	0,50 ± 0,03	-2,44 ± 0,12
Drewno	-24,18 ± 2,42	-12,20 ± 1,22	-13,86 ± 1,39	-9,16 ± 0,92
Pleksi	-23,66 ± 2,37	-8,94 ± 0,89	-3,76 ± 0,38	-4,28 ± 0,43
Miedź	-43,80 ± 0,88	-46,00 ± 0,92	-40,50 ± 0,81	-
Aluminium	-21,34 ± 2,13	-	-	-
Stal kwasoodporna	-53,10 ± 2,65	-33,78 ± 1,69	-24,17 ± 1,20	-8,00 ± 0,40

Przeprowadzenie analizy częstotliwościowej Fouriera pozwoliło na zobrazowanie zmian różnicy fazowej względem wymuszenia w funkcji głębokości usunięcia materiału dla trzech średnic 20, 10, 5 mm w materiałach. W miarę zwiększania się głębokości maleje wartość różnicy fazowej. Zależność tą zaobserwowano dla przebadanych materiałów: turbaks, drewno, pleksi, miedź, stal kwasoodporna. Ubytki materiału o średnicy 1mm okazały się trudno lokalizowane, jedynie w materiale pleksi ubytek o średnicy 1 mm i głębokości 4 mm został wskazany.

Dla materiałów izolujących termicznie (turbaks, drewno, pleksi) występuje znacznie większa różnica fazowa (im większa grubość materiału tym wartość kąta fazowego większa), natomiast dla materiałów przewodzących termicznie (aluminium, miedź, stal kwasoodporna) różnica fazowa jest mniejsza, a wręcz okazała się trudna lokalizacja ubytków w materiałach (aluminium, miedź).

Tab. 3. Wyniki analizy częstotliwościowej Fouriera dla średnicy 10 mm
Tab. 3. Fourier frequency analysis of the results for diameter 10 mm

Material	Różnica fazowa względem wymuszenia [stopnie]			
	Głębokość [mm]			
	4	3	2	1
Turbaks	-32,86 ± 1,64	-10,14 ± 0,51	-2,24 ± 0,11	-3,12 ± 0,16
Drewno	-41,84 ± 2,09	-10,04 ± 0,50	-8,50 ± 0,43	-9,22 ± 0,46
Pleksi	-28,02 ± 1,40	-13,92 ± 0,70	-9,22 ± 0,46	-4,36 ± 0,22
Miedź	-29,00 ± 0,29	-27,70 ± 0,28	-22,80 ± 0,23	-
Aluminium	-15,90 ± 1,60	-17,32 ± 1,73	-	-
Stal kwasoodporna	-54,28 ± 2,71	-32,52 ± 1,63	-17,00 ± 0,85	-3,60 ± 0,18

Tab. 4. Wyniki analizy częstotliwościowej Fouriera dla średnicy 5 mm
Tab. 4. Fourier frequency analysis of the results for diameter 5 mm

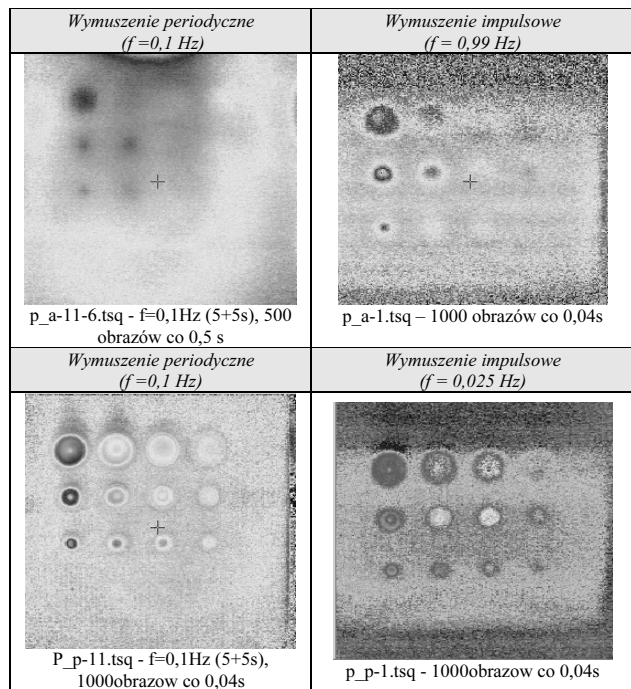
Material	Różnica fazowa względem wymuszenia [stopnie]			
	Głębokość [mm]			
	4	3	2	1
Turbaks	-38,64 ± 1,93	-17,62 ± 0,88	-7,56 ± 0,39	-3,76 ± 0,19
Drewno	-48,56 ± 4,86	-9,10 ± 0,91	-	-
Pleksi	-38,58 ± 1,93	-19,02 ± 0,95	-15,46 ± 0,77	-6,58 ± 0,33
Miedź	-	-	-	-
Aluminium	-11,60 ± 1,16	-10,60 ± 1,06	-	-
Stal kwasoodporna	-25,00 ± 1,25	-13,50 ± 0,68	-5,40 ± 0,27	-3,80 ± 0,19

6.2. Wpływ rodzaju sygnału wymuszenia energetycznego na wynik analizy częstotliwościowej

Na poniższym rysunku 5 przedstawiono wybrane zestawienie wyników analizy częstotliwościowej Fouriera (fazogramy) sekwencji obrazów termowizyjnych zmiany pola temperatury w wyniku wymuszenia energetycznego w postaci sygnału periodycznego (częstotliwości $f=0,1$ Hz oraz $f=0,01$ Hz) i impulsowego.

Uzyskane wyniki wskazują przewagę wymuszania periodycznego dla materiałów izolujących termicznie (turbaks, drewno, pleksi) natomiast dla materiałów przewodzących termicznie (aluminium, miedź, stal kwasoodporna) wymuszenia impulsowego. W materiałach przewodzących ubytki materiału o średnicach 5 mm są lokalizowane przy wymuszeniu impulsowym, natomiast przy wymuszeniu sygnałem periodycznym graniczna średnica wynosi 10 mm. Dla materiałów izolujących termicznie graniczna

średnica to 5 mm dla obydwu typów wymuszeń. Ubytki o średnicy 1 mm nie zostały zlokalizowane.

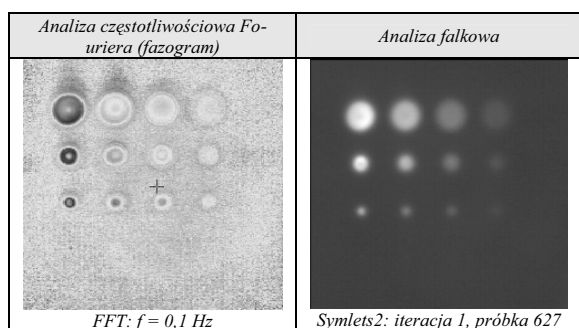


Rys. 5. Przykład fazogramów dla sygnału wymuszenia energetycznego periodycznego i impulsowego dla pleksi i aluminium

Fig. 5. Exemplary results for impulse and periodic energy source for plexi and aluminum

6.3. Zestawienie wyników analiz częstotliwościowej Fouriera i falkowej

Na rys. 6 przedstawiono wybrane zestawienie wyników analiz częstotliwościowej Fouriera i falkowej sekwencji obrazów termowizyjnych zmiany pola temperatury w wyniku wymuszenia energetycznego w postaci sygnału periodycznego o częstotliwości $f=0,1$ Hz oraz $f=0,01$ Hz.



Rys. 6. Przykładowe zestawienie wyników analiz Fouriera i falkowej

Fig. 6. Exemplary results for Fourier and Wavelet analyze for plexi

Wyniki analiz częstotliwościowej Fouriera i falkowej sekwencji obrazów termowizyjnych zmiany pola temperatury w wyniku wymuszenia energetycznego w postaci sygnału periodycznego o częstotliwości $f=0,1$ Hz (turbaks, drewno, pleksi) oraz $f=0,01$ Hz (stal kwasoodporna) wskazują na przewagę analizy Fouriera nad analizą falkową. W przypadku gdy obiektem analizy są przebiegi niegasnące i trwające długo w porównaniu z oknem analizy, najlepszą bazą jest zbiór sinusoid a więc użycie analizy Fouriera. Jeżeli badany sygnał jest niestacjonarny, bogaty w przebiegi przejściowe bazą do analizy są falki.

W wyniku analizy falkowej ostatecznie dobrano falkę Symlets, przy pomocy której możliwe było zlokalizowanie otworów

w materiałach. Wcześniej przeprowadzono analizę falkami: Haara, Daubechies, Coiflets.

7. Wnioski

Przeprowadzenie analizy częstotliwościowej Fouriera pozwoliło na zobrazowanie zmian różnicy fazowej względem wymuszenia w funkcji głębokości usunięcia materiału dla trzech średnic 20, 10, 5 mm w materiałach. W miarę zwiększania się głębokości maleje wartość różnicy fazowej. Zależność tą zaobserwowano dla przebadanych materiałów: turbaks, drewno, pleksi, miedź, stal kwasoodporna. Ubytki materiału o średnicy 1mm okazały się trudno zlokalizowane, jedynie w materiale pleksi ubytek o średnicy 1 mm i głębokości 4 mm został wykryty.

Dla materiałów izolujących termicznie (turbaks, drewno, pleksi) występuje znacznie większa różnica fazowa (im większa grubość materiału tym wartość kąta fazowego większa), natomiast dla materiałów przewodzących termicznie (aluminium, miedź, stal kwasoodporna) różnica fazowa jest mniejsza, a wręcz okazała się trudna lokalizacja ubytków w materiałach (aluminium, miedź).

Przeprowadzone badania wpływu sygnału wymuszenia energetycznego na wynik analizy częstotliwościowej wskazały przewagę wymuszania periodycznego dla materiałów izolujących termicznie (turbaks, drewno, pleksi) natomiast dla materiałów przewodzących termicznie (aluminium, miedź, stal kwasoodporna) wymuszenia impulsowego.

Wyniki analiz częstotliwościowej Fouriera i falkowej sekwencji obrazów termowizyjnych zmiany pola temperatury w wyniku wymuszenia energetycznego w postaci sygnału periodycznego o częstotliwości $f=0,1$ Hz (turbaks, drewno, pleksi) oraz $f=0,01$ Hz (stal kwasoodporna) przedstawiły przewagę analizy Fouriera nad analizą falkową dla materiałów jednorodnych termicznie.

8. Literatura

- [1] Maldague X. P. 2001, "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing", John Wiley & Sons, N. Y.
- [2] A. Nowakowski „Postępy termografii – aplikacje medyczne” Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Katedra Elektroniki Medycznej i Ekologicznej Gdańsk – 2001r.
- [3] W. Batko, A. Ziółko, „Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej”, Problemy inżynierii mechanicznej i robotyki nr 7. Wydawnictwo AGH, Kraków 2002. ISBN 83-916516-1-4.
- [4] G. Owczarek, G. Gralewicz „Zastosowanie promieniowania podczerwonego do lokalizacji defektów w strukturach materiałów” – monografia, CIOP-PIB, 2003, Warszawa.
- [5] G. Busse, T. Zwerschper, G. Riegert, A. Dillenz, “Advanced dynamic thermography for industry-related applications”, Proc. of VI TTP 2004, Ustron-Jaszowiec, 61-72, 2004.
- [6] G. Gralewicz, G. Owczarek, B. Więcek; „Wykrywanie korozji - metoda badań nieniszczących w podczerwieni”, Ochrona przed korozją 12/2004, s. 1-5.
- [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; “Analytical-numerical model for the detection of structural defects by lock-in thermography”, Problemy Eksploatacji, 65-79, 2/2006 (61).
- [9] R. Olbrycht, B. Więcek, G. Gralewicz, T. Świątczak, G. Owczarek „Comparison of Fourier and wavelet analyses for defect detection in lock-in and pulse phase thermography”, QIRT Journal. Volume 4 N° 2/2007, pages 219 to 232.
- [10] A. Gleiter, C. Spiessberger, G. Buse, „Phase Angle Thermography for depth resolved defect characterization”, Proceedings of the 9th Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2008), 2- 5.07.2008, Krakow.