

WYKORZYSTANIE SYSTEMÓW TERMOWIZYJNYCH DO BADAŃ MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH

MONIKA SZCZEPANIK, JÓZEF STABIK, GABRIEL WRÓBEL, ŁUKASZ WIERZBICKI

*Institut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Przetwórstwa Materiałów Metalowych
i Polimerowych, Politechnika Śląska
e-mail: monika.szczepanik@polsl.pl*

Streszczenie. Artykuł zawiera przegląd technik badań nieniszczących, ze szczególną charakterystyką metod termografii w podczerwieni. Opisano też podstawy fizyczne tego zjawiska z wyszczególnieniem metod badawczych oraz charakterystyką oprzyrządowania. W części eksperymentalnej przedstawiono wyniki badań nad możliwością zastosowania nieniszczącej techniki badań termograficznych do wykrywania defektów w materiałach polimerowych (polietylen, polimetakrylan(metylu), kompozyt warstwowy) oraz w celach porównawczych w stali.

1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie termografii w różnych dziedzinach techniki staje się obecnie bardzo powszechne. Stosuje się ją w ekologii, medycynie (badaniach nowotworów), ratownictwie, budownictwie, w obserwacji procesów cieplnych, np. do oceny jakościowej i ilościowej, jak również w badaniach materiałów czy też monitorowania procesów produkcyjnych i przetwórczych w odlewnictwie. Należy podkreślić, że pomiary termowizyjne stanowią często metodę uzupełniającą inne metody diagnostyczne.

W badaniach nieniszczących określa się rodzaj i wielkość defektów oraz ich właściwości, dlatego też różne techniki badawcze są stosowane do określenia różnych defektów.

Najczęściej stosowane nieniszczące metody badań to: badania organoleptyczne, badania szczelności, badania penetracyjne, badania magnetyczno-proszkowe, badania prądami wirowymi, badania radiograficzne, badania ultradźwiękowe oraz badania termograficzne.

Terminy termografia i termowizja obejmują metody badawcze polegające na zdalnej i bezdotykowej ocenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała. Metody te są oparte na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania na światło widzialne.

Termografia polega więc na rejestrowaniu przez specjalną kamerę podczerwonej części widma promieniowania emitowanego przez ciało, a następnie przetwarzaniu go na kolorową mapę temperatur. System termowizyjny umożliwia pomiar temperatury na odległość i jednocześnie na całej powierzchni [1, 2, 3].

Ze względu na temperaturę badanego obiektu oraz potrzebę dostarczenia ciepła z zewnątrz (pobudzenie impulsem cieplnym) wyróżnia się termografię [1, 5, 6, 7, 8, 12]:

- pasywną – gdzie obserwujemy promieniowanie emitowane przez badany obiekt, niepobudzany zewnętrznym źródłem promieniowania cieplnego. Możliwe jest zastosowanie tej metody tylko do obserwacji obiektów o temperaturze różniącej się od otoczenia w znacznym stopniu, pozwalającym na wykonanie badań i późniejsze analizowanie promieniowania pochodzącego od badanego obiektu,
- aktywną – której istotą jest badanie termicznej odpowiedzi materiału w funkcji czasu na stymulację zewnętrznym impulsem ciepła i ta odpowiedź jest rejestrowana za pomocą termografu.

W zależności od sposobu stymulacji rozróżnia się kilka rodzajów termografii aktywnej, a mianowicie, termografię:

- impulsową (pulsed thermography) uważaną za stosunkowo prosty rodzaj termografii aktywnej. Polega ona na wyznaczeniu i analizie rozkładu temperatury na badanej powierzchni w czasie jej stygnięcia po uprzednim równomiernym nagrzaniu impulsem cieplnym [8, 9, 10, 12];

- modulacyjną (lock-in thermography with modulated heating) wykorzystującą teorię fal termicznych. Fale termiczne są generowane przez nagrzewanie badanej powierzchni źródłem ciepła, którego natężenie zmienia się sinusoidalnie. Za pomocą termografu podczerwieni wyznacza się oscylujące pole temperatury na powierzchni badanego obiektu w stanie ustalonym. Sekwencja czasowa pól temperatury pozwala odtworzyć postać fali termicznej na badanej powierzchni, co umożliwia wyznaczenie przesunięcia fazy tej fali względem oscylacji źródła ciepła. Otrzymuje się mapę przesunięć fazowych. Przesunięcie fazowe, przy zadanej częstotliwości, jest funkcją dyfuzyjności wady w warstwie powierzchniowej materiału [9,10, 11]:

- impulsowo-fazową (pulsed phase thermography) łączy zalety termografii impulsowej i modulacyjnej. Podobnie jak w metodzie termografii impulsowej powierzchnia badanego obiektu jest stymulowana impulsem ciepła i za pomocą termografu podczerwieni rejestruje się rozkład temperatury na badanej powierzchni w czasie jej stygnięcia. Zarejestrowany sygnał, w postaci zależności temperatury od czasu $T(t)$ w poszczególnych punktach powierzchni podczas stygnięcia, zostaje poddany dyskretnej transformacji Fouriera [9].

2. BADANIA WŁASNE

2.1. Badane materiały

Przeprowadzono badania termograficzne na 12 próbkach z materiałów polimerowych oraz na 4 próbkach ze stali. Badane materiały przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Przygotowane próbki do badań

Z każdego materiału wykonano po cztery próbki w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 23,5x35x150 mm. Następnie w trzech próbkach wykonano sztuczne defekty w postaci otworów przelotowych o różnej średnicy z przedziału $\phi 2$ mm ÷ $\phi 10$ mm w odległości 3 mm od badanej powierzchni oraz ok. 30 mm od kolejnego defektu (otworu) na tej próbce. Czwarta próbka z każdego materiału posiadała wyłącznie otwory o średnicy 5 mm, usytuowane na przekroju próbki tak, by ich odległość od badanej powierzchni wzrastała.

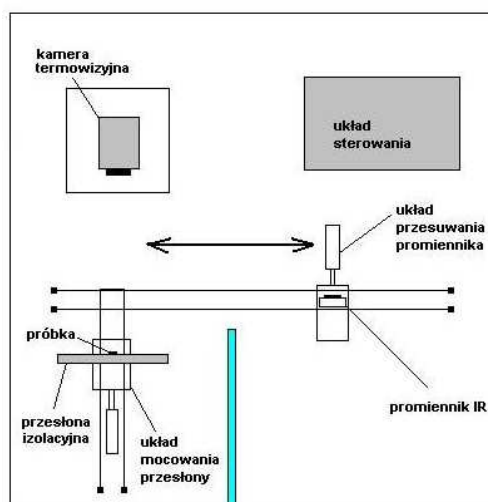
Taka lokalizacja nieciągłości umożliwia sprawdzenie, w jaki sposób zróżnicowanie głębokości zalegania wad wpływa na otrzymane wskazania. Materiały wykorzystane w badaniach przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Wykaz materiałów wykorzystanych w badaniach

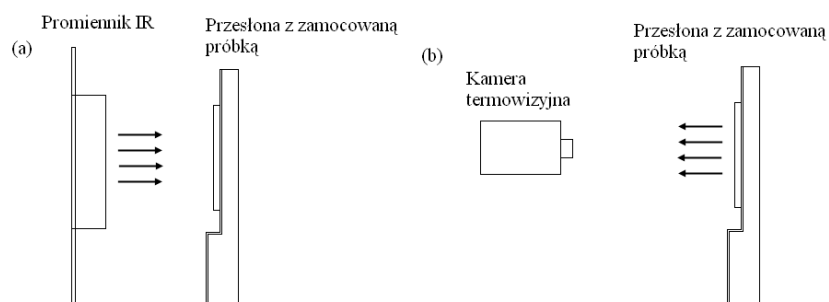
Material	
Polietylen o wysokiej gęstości (HDPE)	Płyta produkcji „Szagru” Sp z o. o. - Pszczyna
Polimetakrylan metylu (PMMA)	Płyta produkcji Firmy Chemicznej Dwory S.A. - Oświęcim
Laminat bawełniano – fenolowy	Płyta produkcji Firmy IZO ERG - Gliwice
Stal St72P	Blacha przekazana przez Zespół Szkół Techniczno - Informatycznych w Gliwicach

2.2. Metodyka badań

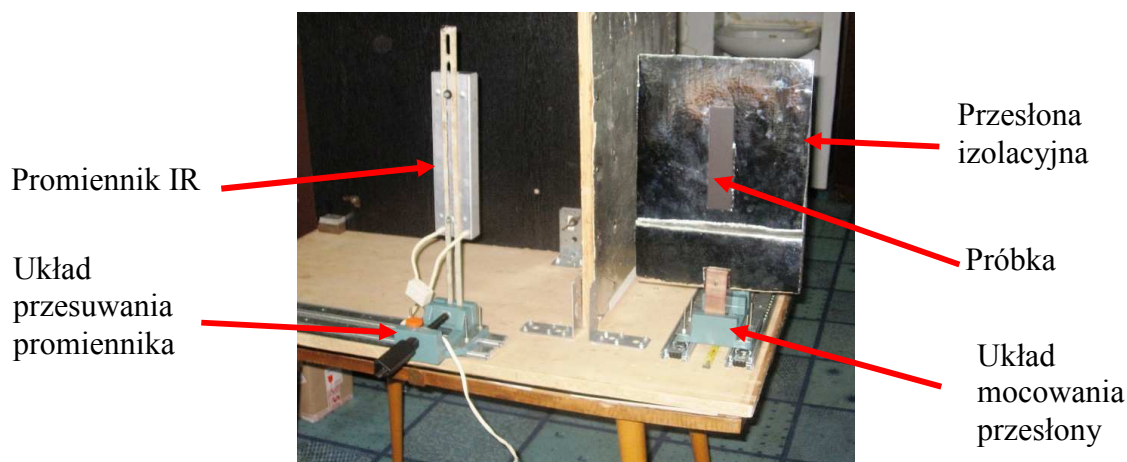
Do badań próbek wykorzystano termografię impulsową. Stanowisko do badań termograficznych przedstawiono na rys.2,3,4,5. W skład stanowiska wchodzi: promiennik podczerwieni „Victory Lighting Ltd o mocy 1000 W, przesłona izolacyjna w postaci ramki pokrytej folią aluminiową ułatwiająca montaż próbki na stanowisku oraz kamera termowizyjna „INFRAMETRICS 760”.



Rys.2. Schemat układu stanowiska badawczego



Rys.3. Schemat przebiegu badań termowizyjnych, a) proces nagrzewania próbki, b) proces badania próbki kamerą termowizyjną



Rys.4. Stanowisko do badań termograficznych



Rys.5. System termowizyjny Inframetrics 760

Na podstawie wcześniej wyznaczonych charakterystyk nagrzewania się promiennika od momentu jego włączenia, dobrano odpowiednią odległość źródła ciepła od próbki podczas przeprowadzanych badań. Natomiast na podstawie przeprowadzonych licznych prób wstępnych określono czas nagrzewania próbek.

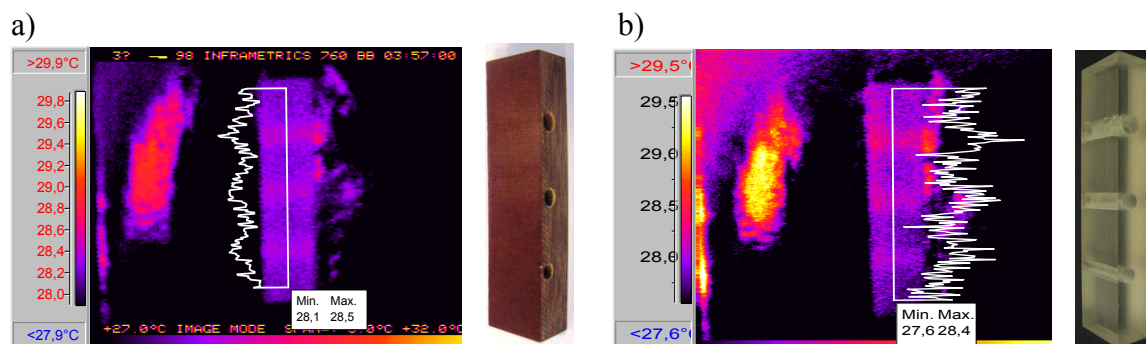
2.3. Badania termograficzne próbek z materiałów polimerowych oraz ze stali

Programem badań objęto serię próbek, poddając je w pierwszej fazie nagrzewaniu promiennikiem podczerwieni (2 sekundy). Próbki usytuowane były w stałej odległości od źródła promieniowania, wynoszącej 80mm, powierzchnia próbek pokryta została jednolicie matową czarną farbą. Z chwilą zakończenia procesu nagrzewania rozpoczynała się rejestracja rozkładu temperatury nagrzanej powierzchni próbki. Zarejestrowano sekwencje obrazów termowizyjnych powierzchni próbek. Badania termograficzne przeprowadzono przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej. Mierzonymi wielkościami były temperatury powierzchni próbki w czasie jej stygnięcia w obszarze defektu oraz w obszarze poza defektami rejestrowane w funkcji czasu.

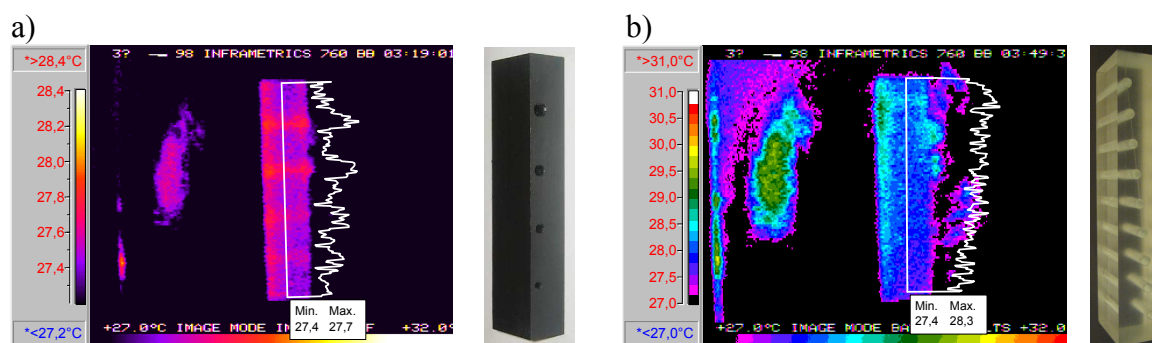
Próbki ze stali poddano badaniom termograficznym w tych samych warunkach, co materiały polimerowe, ale przy zmienionych parametrach badania. Próbki badano podczas procesu stygnięcia w czasie ok 0,5 min w zakresie temperatur 2°C, a czas nagrzewania próbki promiennikiem wynosił dziesięć sekund. Bardzo trudno jest uchwycić obraz próbki z defektami bezpośrednio po procesie nagrzewania, dlatego też w przypadku tego materiału zawężono zakres temperatury w badaniu i nie przeprowadzono dynamicznej analizy obrazu. Stal jest materiałem bardzo dobrze przewodzącym ciepło, dlatego też bardzo szybko się nagrzewa, lecz równie szybko oddaje ciepło.

2.4. Wyniki badań i ich analiza

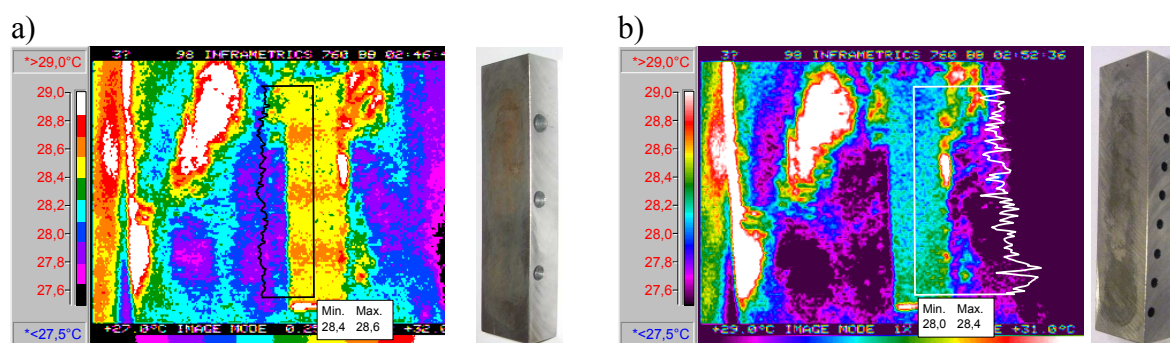
Na podstawie otrzymanych obrazów termograficznych można wnioskować jak duże defekty mogą być wykrywane za pomocą kamery termowizyjnej i jak głęboko są one umieszczone. W próbkach z materiałów polimerowych (rys.7,8) i ze stali (rys.9) udało się zlokalizować defekty (o średnicach jak w tab.2), co jest widoczne na obrazie termograficznym. W przypadku materiałów polimerowych defekty zaczynają się ujawniać po ok. 2 min od zakończenia nagrzewania, natomiast w próbkach ze stali już po 2 sek.



Rys.7. Zarejestrowany obraz cieplny powierzchni próbki po 150 sekundach od zakończenia nagrzewania przy zakresie 2°C : a) próbka z laminatu, b) próbka z polimetakrylanu metylu



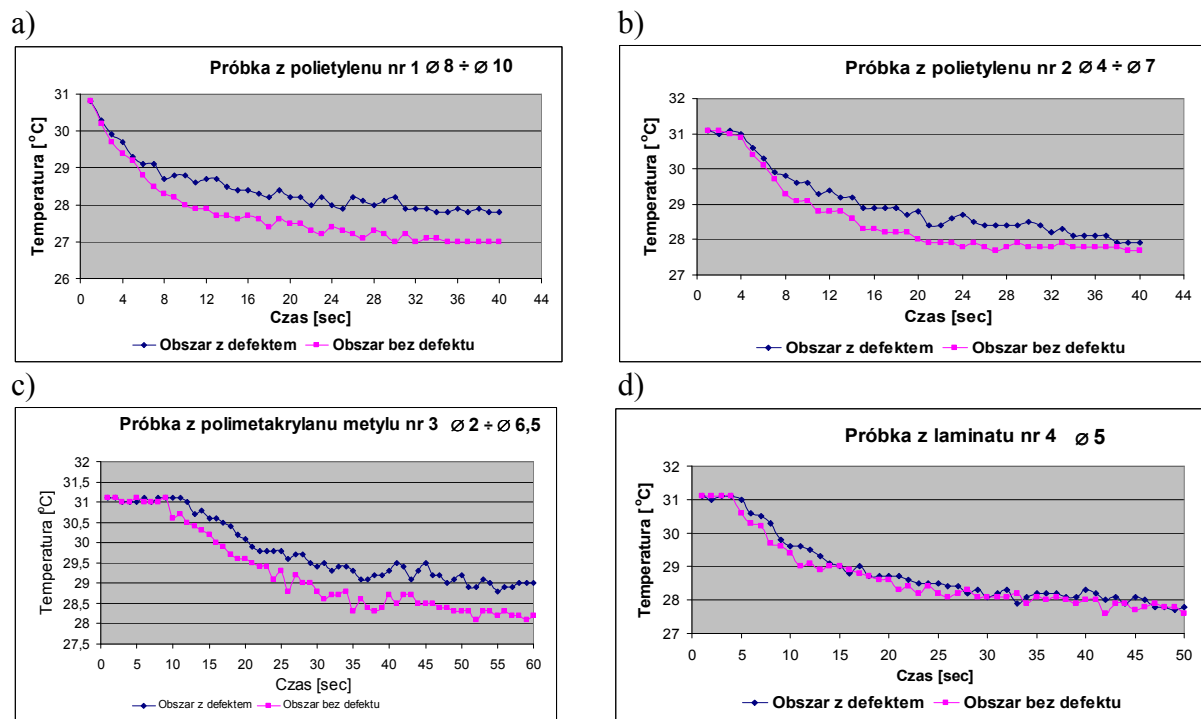
Rys.8. Zarejestrowany obraz cieplny: a) próbka z polietylenu - po 60 sekundach od zakończenia nagrzewania przy zakresie 2°C , b) próbka z polimetakrylanu metylu - po 120 sekundach od zakończenia nagrzewania przy zakresie 5°C



Rys.9. Próbkę ze stali. Zarejestrowany obraz cieplny po 2 sekundach od zakończenia nagrzewania przy zakresie 2°C

Na wykresach (rys.10 a÷d) przedstawiono proces stygnięcia próbek zarówno w obszarze defektu jak i w obszarze bez defektu.

Obszar próbki z defektem odznacza się wyższą temperaturą w stosunku do pozostałej części próbki, a także proces stygnięcia w obszarze z defektem przebiega znacznie dłużej, różnica ta jest szczególnie widoczna w przypadku próbki z PE (rys.10.a, b) oraz próbki z PMMA (rys.10c)



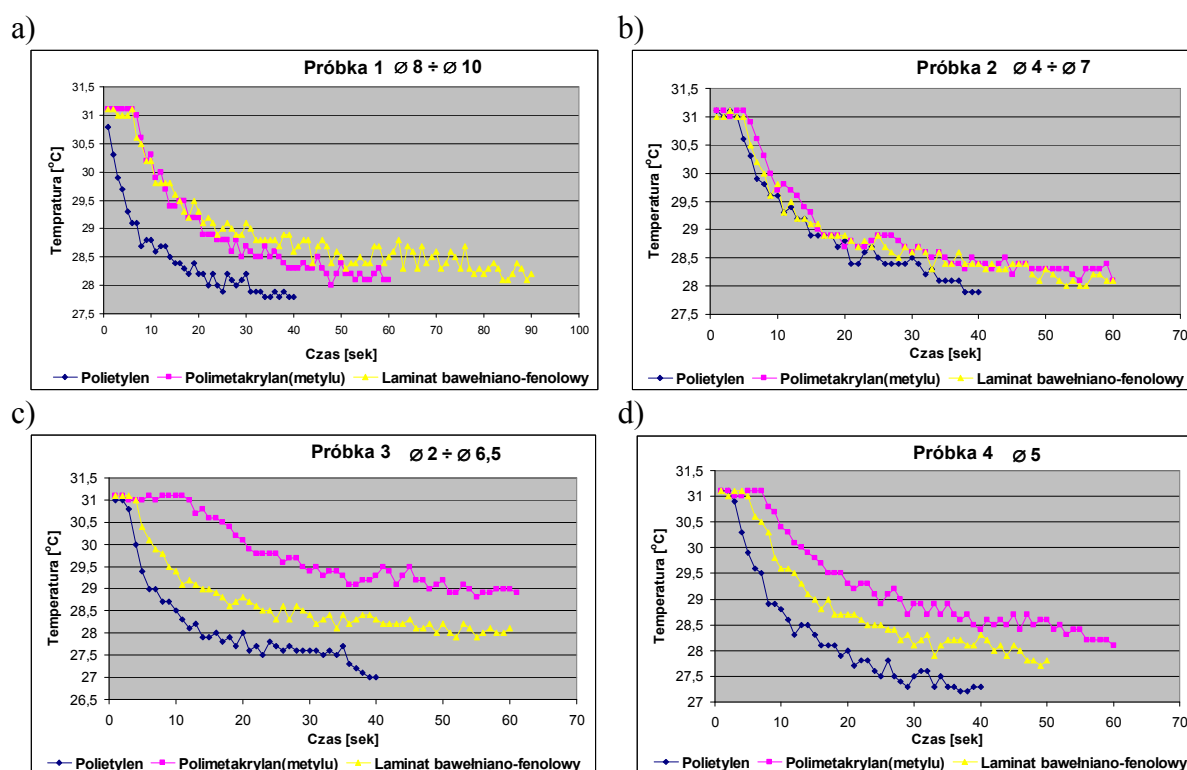
Rys.10. Zależność średnich wartości temperatury dwóch obszarów badanej powierzchni próbek od czasu stygnięcia: a i b) próbka z PE, c) próbka z PMMA, d) próbka z laminatu

Po przeprowadzonych badaniach można przedstawić ocenę wykrywalności defektów w poszczególnych materiałach w zależności od ich wielkości. Najmniejsze defekty ($\varnothing 2$ i 3 mm) nie zostały wykryte w żadnym z badanych materiałów. Przy zastosowanych warunkach i parametrach badania najwięcej defektów udało się wykryć w próbkach z polietylenu (tab. 2). Przy uwzględnieniu odległości defektu od badanej powierzchni należy zaznaczyć, że wady położone głębiej niż ok. 4,5 mm pod powierzchnią próbki nie zostały wykryte.

Tabela 2. Ocena wykrywalności defektów w poszczególnych materiałach

Defekty \varnothing mm	Polietylen PE	Polimetakrylan PMMA	Laminat	Stal St72P
2				
3				
4	x			
4,5	x	x	x	
5	x	x	x	
6	x	x	x	x
6,5	x	x	x	x
7	x	x	x	x
8	x	x	x	x
9	x	x	x	x
10	x	x	x	x

Na wykresach (rys.11 a ÷ d) przedstawiono porównanie procesu stygnięcia próbek o tej samej geometrii z różnych materiałów w obszarach z defektem w celu określenia wpływu wielkości defektu na szybkość studzenia próbki, a także w celu wykazania różnic w procesie studzenia próbek o tej samej geometrii, lecz z różnych materiałów. Na tej podstawie można wnioskować, iż należy odrębnie rozpatrywać każdy materiał. Najszybciej oddaje ciepło próbka z polietylenu, a najdłużej utrzymuje ciepło próbka wykonana z polimetakrylanu. W przypadku, gdy otwory (defekty) są duże, próbki z polietylenu i polimetakrylanu zachowują się podobnie.



Rys.11.a÷d Zależność temperatury od czasu stygnięcia obszaru próbki z defektem

Przeprowadzone badania udowodniły celowość zastosowania badań nieniszczących termograficznych do wykrywania nieprawidłowości i wad w materiałach polimerowych. Jednak przy długim czasie nagrzewania badanego materiału nie można wykryć defektów, uzyskano bowiem równomierną temperaturę na całej powierzchni próbki. Materiały polimerowe nie są dobrymi przewodnikami ciepła, w związku z czym prowadzenie badań podczas procesu studzenia przebiega znacznie dłużej niż w przypadku materiałów metalowych. Badanie obszaru defektu podczas procesu stygnięcia wykazało, że najszybciej oddaje ciepło próbka ze stali oraz polietylenu, a najdłużej utrzymuje ciepło próbka wykonana z polimetakrylanu. Próbkę z polietylenu i polimetakrylanu zachowują się podobnie, gdy defekty są duże (4-7 mm).

3. WNIOSKI

Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie następujących najistotniejszych wniosków:
- obrazy termograficzne (termogramy) odwzorowują stan fizyczny badanych próbek i można wykryć wady wewnętrzne w materiale, jednak ich geometria i położenie znacznie ograniczają zastosowanie tej metody badań;

- obszar próbki z defektem odznacza się wyższą temperaturą w stosunku do pozostałej części próbki, a proces stygnięcia w obszarze z defektem przebiega znacznie dłużej.

LITERATURA

1. Piasecka M., Pastuszko R.: Wyznaczanie pól temperatury przy zastosowaniu termografii ciekłokrystalicznej oraz kamery termowizyjnej w badaniach wymiany ciepła w minikanalach. „Pomiary, automatyka, kontrola” 2005, 6, s 23 – 26.
2. Rudowski G.: Termowizja i jej zastosowanie. Warszawa: WKiŁ, 1978.
3. De Mey G.: A model for infrared emissivity. W: Materiały konferencji „Termografia i termometria w podczerwieni”. Warszawa 1996, s 79 – 89.
4. Witryna internetowa Katedry Inżynierii Biomedycznej PG: <http://www.med.eti.pg.gda.pl>
5. Lewińska – Romicka A.: Badania nieniszczące – podstawy defektoskopii. Warszawa : WNT, 2001.
6. Ochelski S.: Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych. Warszawa : WNT, 2004.
7. Vavilov V. P.: Najnowsze techniki przetwarzania obrazów w badaniach nieniszczących metodami termografii stanów nieustalonych. W: Materiały konferencji „Termografia i termometria w podczerwieni”. Warszawa 1996, s 13 – 32.
8. Macyński J.: Oprogramowanie do analizy sekwencji termogramów w aktywnej termografii dynamicznej - obrazy parametryczne modelu. Praca magisterska. Politechnika Gdańska 2006.
9. Oliferuk W.: Termografia aktywna w badaniach materiałów. W: Materiały konferencyjne 12 seminarium nieniszczących badań materiałów. Zakopane 2006, s. 10-25.
10. Castanedo C. I.: Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase. Quebec 2005, s. 6-27.
11. Wu D., Busse G.: Lock-in thermography for nondestructive evaluation of material. Paris : Elsevier, 1998, p. 693-703.
12. Rybiński J., Bednarek M., Jokiel A.: „Stanowisko badawcze do wykrywania i identyfikacji defektów podpowierzchniowych metodą fali cieplnej. Warszawa 2005. Zeszyty Naukowe SGSP, 32, s. 5-11.

THE APPLICATION OF THERMOVISION SYSTEMS TO STUDY OF POLYMERIC MATERIALS

Summary: This paper contains a review of nondestructive testing with detailed characteristics of infrared thermography methods. It describes the physical basis of this phenomenon, specification of testing methods, and instrumentation characteristics. In part of research of this paper was to determine the possibility of the use of non-destructive thermographic testing to detect defects in polymeric materials (polyethylene, polymethacrylate (methylate) and laminate) and steel in compare purpose.