XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania
Bydgoszcz - Pieczyska, maj 2008, ss. 185-192

Adam LIPSKI

MONITOROWANIE PROCESU ZMĘCZENIA Z ZASTOSOWANIEM KAMERY TERMOWIZYJNEJ

W artykule przedstawiono przykład zastosowania kamery termowizyjnej o wysokiej czułości do monitorowania procesu zmęczenia. Badania przeprowadzono na próbce z laminatu warstwowego z karbem wielokrotnym. Przedstawiono przykładowe termogramy z wybranych okresów trwałości próbki oraz czasowe przebiegi zmian temperatury na dnie karbów.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Jednym z głównych obszarów zainteresowań naukowych zespołu badawczego z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy jest zastosowanie nowoczesnych metod eksperymentalnych i hybrydowych w badaniach z zakresu zmęczenia materiałów i konstrukcji, w tym do analizy rozkładów odkształceń i naprężeń oraz diagnostyki procesu zmęczenia w złożonych obiektach (np. strukturach lotniczych).

Do nowoczesnych nieniszczących metod bezstykowych znajdujących coraz częstsze zastosowanie w tego typu badaniach należy termosprężysta analiza naprężeń TSA (Thermoelastic Stress Analysis). Metoda ta wykorzystuje efekt termosprężysty, polegający na odwrotnej konwersji pomiędzy energią mechaniczną i cieplną towarzyszącą sprężystym obciążeniom rozciągającym lub ściskającym powodującym zmianę temperatury obiektu. Efekt ten nie jest jedyną przyczyną zmiany temperatury badanego obiektu - oprócz niego zmianę temperatury powodować mogą: zewnętrzne źródło ciepła, przewodność cieplna oraz wewnętrzna dyssypacja energii [1].

Efekt termosprężysty znany jest już od prawie dwóch wieków [2], jednakże praktyczne zastosowanie w badaniach eksperymentalnych znalazł dopiero w drugiej połowie wieku XX. Krokiem milowym w tej dziedzinie było wprowadzenie w 1967 r. przez Belgena sensora podczerwieni zastosowanego w pierwszym bezstykowym urządzeniu pomiarowym do analizy naprężeń termosprężystych [3, 4]. W 1974 r. firma Sira Ltd. na zlecenie Brytyjskiego Ministerstwa Obrony rozpoczęła prace nad urządzeniem pozwalającym na bezstykową analizę w obszarze tzw. pełnego pola. W roku 1978 Mountain i Weber zaprezentowali pierwszy prototyp takiego urządzenia [5], nazwanego SPATE (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission). W roku 1982 wprowadzono na rynek pierwszą komercyjną wersję systemu Ometron SPATE 8000 z detektorem punktowym oraz systemem luster skanujących. W latach 90. XX w. pojawiły się nowoczesne matrycowe systemy pomiarowe, pozwalające na szybką analizę promieniowania podczerwonego w wybranym obszarze, a co za tym idzie rozkładu temperatury obiektu.

W przypadku badań zmęczeniowych termosprężysta analiza naprężeń TSA polega na analizie rozkładu temperatur w trakcie cyklicznego obciążenia badanego obiektu. Napotyka ona jednak na pewne ograniczenia związane ze specyfiką procesu zmęczenia. Dotyczą one głównie występujących w trakcie cyklicznie zmiennego obciążenia odkształceń plastycznych i związanej z nimi dyssypacji energii. Wyznaczenie ilościowych związków pomiędzy odkształceniem plastycznym i mierzoną temperaturą jest bardzo trudnym zadaniem, stąd też zastosowanie termowizji w zakresie występowania odkształceń plastycznych sprowadza się głównie do analizy jakościowej [1]. Prowadzone są jednakże prace zmierzające do poszerzenia możliwości wyznaczania rozkładów naprężeń za pomocą analizy pól temperatury o zakres odkształceń plastycznych.

Doświadczalne zmęczeniowe metody analizy rozkładów naprężeń oparte o pomiar temperatury wymagają kamer termowizyjnych o bardzo wysokiej czułości – poniżej 20 mK (przy czułości zwykłych kamer wynoszącej około 80 mK) oraz wysokiej częstotliwości rejestracji obrazu. W związku z tym Katedra PKM UTP w Bydgoszczy pozyskała kamerę wysokiej czułości CEDIP Silver 420M, która stanowi zasadniczy element tworzonego stanowiska badawczego.

W niniejszej pracy przedstawiono pierwsze wyniki dotyczące wyznaczania rozkładów temperatury w trakcie obciążenia zmęczeniowego z zastosowaniem wspomnianej kamery termowizyjnej.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Na rysunku 1 pokazano stanowisko wykorzystane w trakcie realizacji przedstawionych poniżej badań.

Rys. 1. Stanowisko badawcze z termowizyjnym układem pomiarowym: 1 – kamera termowizyjna CEDIP Silver 420M, 2 – badany obiekt (próbka), 3 – hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8501, 4 – konsola systemu sterowania 8500 maszyny wytrzymałościowej INSTRON, 5 – komputer PC z oprogramowaniem umożliwiającym sterowanie kamerą termowizyjną, 6 – odbiornik TV z podglądem obrazu z kamery termowizyjnej

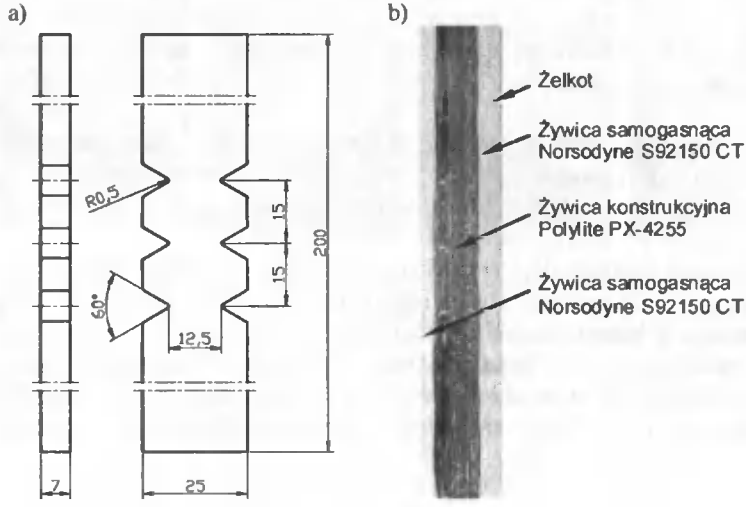
Głównym elementem stanowiska badawczego jest kamera termowizyjna CEDIP Silver 420M wyposażona w wysokiej czułości matrycę InSb chłodzoną pompą Stirlinga. Główne parametry kamery:
- rozdzielczość 320×256 pikseli, plamka 30 μm,
- zakres spektralny 3,6÷5,0 μm,
- czułość poniżej 20 mK (osiągalna 8 mK),
- częstotliwość 100 Hz dla całej matrycy (do 25000 Hz w mniejszej rozdzielczości).

Kamera termowizyjna (1) rejestruje rozkład temperatury badanego obiektu (próbki) (2) zamocowanego na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8501 (3), realizującej założony program obciążenia poprzez konsolę układu sterowania (lub komputer PC) oraz system sterowania 8500 (4). Obraz z kamery przekazywany jest za pomocą złącza USB 2.0 do komputera PC (5) z odpowiednim oprogramowaniem, gdzie jest nagrywany w postaci cyfrowej do pamięci komputera lub bezpośrednio na dysk w formie plików PTW. Jednocześnie podłączony monitor TV (6) umożliwia ciągły podgląd nagrywanego obrazu z kamery termowizyjnej.

Komputer PC (6) zawiera oprogramowania:
- VirtualCAM umożliwiające dwustronną komunikację komputera z kamerą termowizyjną poprzez złącze USB 2.0,
- CIRRUS Front End stanowiące interfejs użytkownika kontrolujący kamerę CEDIP,
- ALTAIR umożliwiające pobieranie, rejestrację oraz zaawansowaną obróbkę obrazów termograficznych.

3. PRÓBKA ZASTOSOWANA W DOŚWIADCZENIU

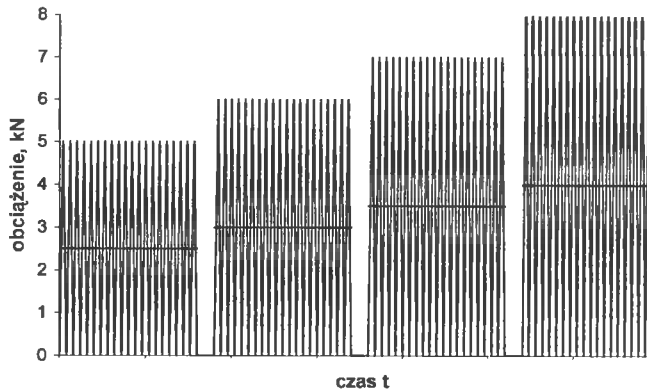
Na rysunku 2 pokazano próbkę z karbem wielokrotnym typu V, wykonaną z laminatu warstwowego na osnowie żywicy poliestrowej konstrukcyjnej Polylite PX-4255 i samogasnącej Norsodyne S92150 CT. Wytrzymałość na rozciąganie laminatu R_m wynosiła około 130 MPa.



Rys. 2. Próbka z laminatu warstwowego zastosowana w badaniach zmęczeniowych

4. OBCIĄŻENIE PRÓBKI

W trakcie badań próbkę laminatową poddano osiowemu obciążeniu zmiennemu (R = 0) przedstawionemu na rysunku 3. Każdy z bloków o stopniowo zwiększanej amplitudzie zawierał 20 cykli (za wyjątkiem ostatniego bloku niszczącego). Częstotliwość obciążenia zmiennego wynosiła 0,2 Hz.



Rys. 3. Schemat obciążenia zmęczeniowego zastosowanego w badaniach

5. WYNIKI POMIARÓW TERMOGRAFICZNYCH

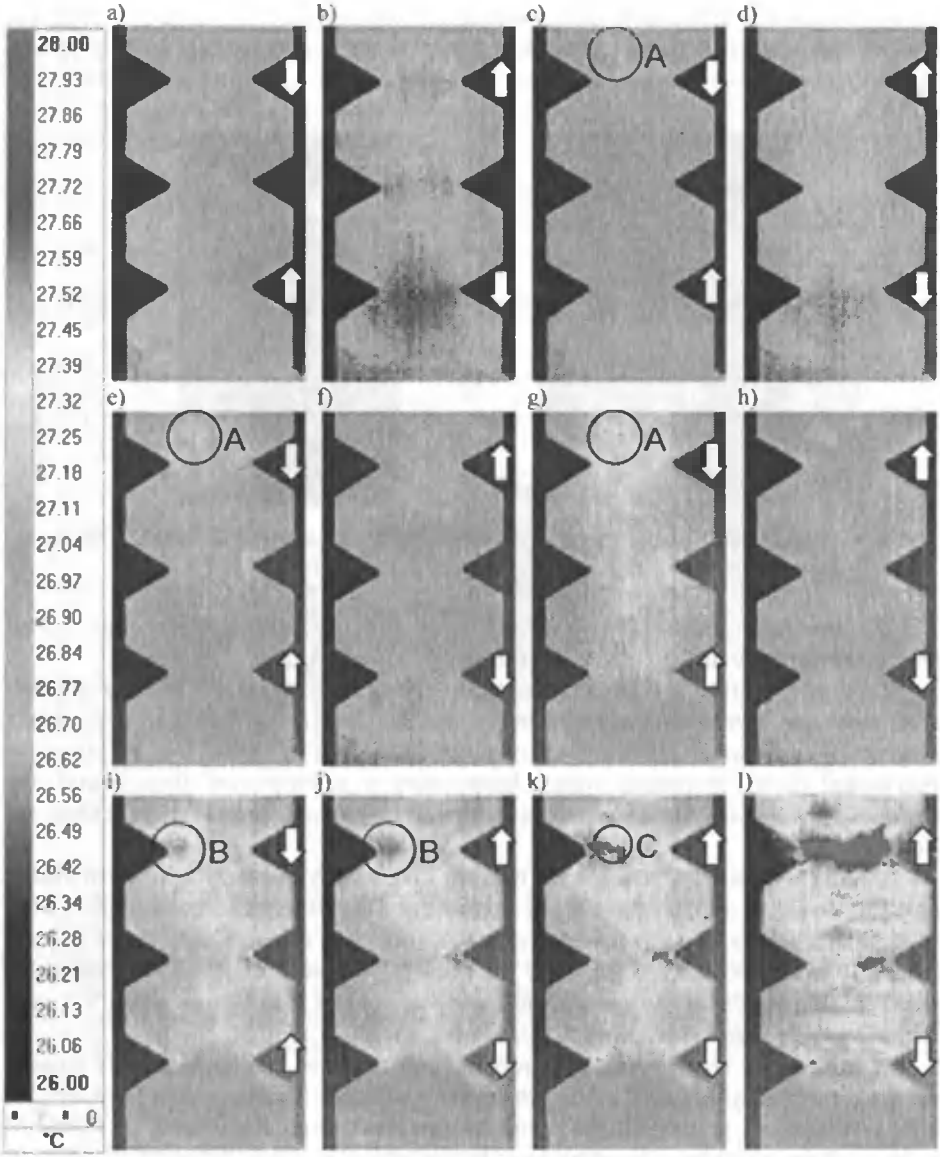
W trakcie próby zarejestrowano łącznie 23 171 termogramów (częstotliwość zapisu 50 Hz, odstęp pomiędzy kolejnymi rejestracjami 20 ms).

Wybrane termogramy, zawierające rozkłady temperatury zmierzone na powierzchni próbki w trakcie obciążenia zmiennego przedstawiono na rysunku 4. Czas ich rejestracji odpowiada punktom zaznaczonym za pomocą kolejnych liter alfabetu na rysunku 6.

Początkowa średnia temperatura całej próbki wynosiła 26,85°C i ulegała zmianom w zależności od kierunku obciążenia. Przykładowo spadek temperatury próbki w czasie rozciągania zaobserwować można na rysunku 4b, a wzrost w czasie odciążania na rysunku 4c.

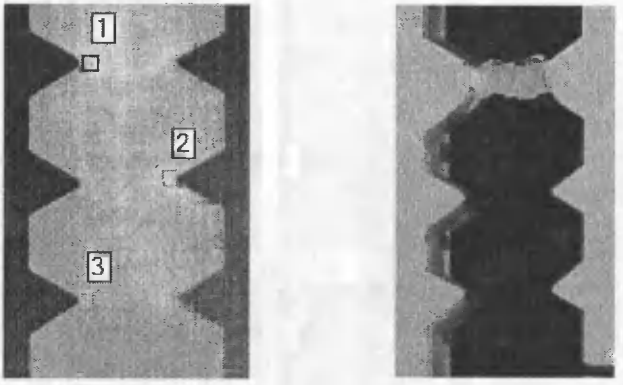
W trakcie obciążenia w próbce ujawniały się obszary o podwyższonej temperaturze. Związane to było prawdopodobnie z występowaniem wad wewnętrznych lub pojawianiem się pęknięć w strukturze laminatu (np. rysunek 4c,e,g – obszar oznaczony literą A oraz rysunek 4i-k – obszary oznaczone literami B i C).

Pęknięcie laminatu doprowadzające ostatecznie do zniszczenia próbki pojawiło się w warstwie żywicy samogasnącej w rejonie oznaczonym na rysunku 4i literą B. Wzrost jego długości w kolejnych cyklach obciążenia objawiał się widocznymi lokalnymi skokami temperatury na czole pęknięcia (rys. 4k – obszar C). Skok temperatury w warstwie żywicy konstrukcyjnej w przekroju karbu, w którym nastąpiło zniszczenie próbki (rys. 5b) po całkowitym rozdzieleniu warstwy żywicy samogasnącej pokazano na rysunku 4l.



Rys. 4. Termogramy przedstawiające rozkłady temperatury powierzchni próbki w wybranych okresach trwałości: a) i b) – rozkład temperatury próbki dla minimalnego i maksymalnego obciążenia w cyklu na początku obciążenia; c) i d) – rozkład temperatury dla obciążenia minimalnego i maksymalnego na końcu pierwszego bloku; e) i f) – rozkład temperatury dla obciążenia minimalnego i maksymalnego na końcu drugiego bloku; g) i h) – rozkład temperatury dla obciążenia minimalnego i maksymalnego na końcu trzeciego bloku; i) – rozkład temperatury odpowiadający wartości minimalnej obciążenia przed zniszczeniem próbki; j), k) i l) – dwa ostatnie termogramy przed pęknięciem i pierwszy termogram po pęknięciu próbki (strzałkami zaznaczono kierunek obciążenia próbki – osiowe rozciąganie lub odciążanie)

W trakcie dalszej obróbki zarejestrowanego materiału w programie ALTAIR wyróżniono trzy obszary o powierzchni ok. 4,7 mm^2 każdy, znajdujące się na dnie karbów (rys. 5a).



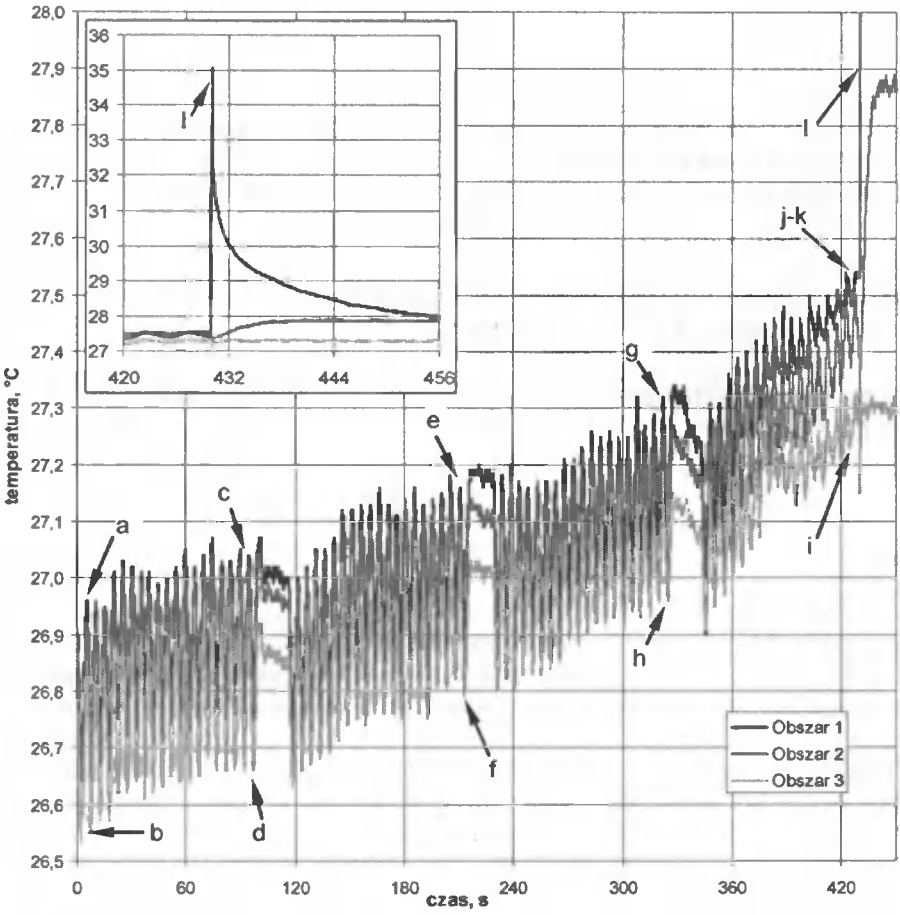
Rys. 5. Przykładowy termogram z zaznaczonymi obszarami szczegółowej analizy zmiany temperatury w czasie (a) oraz próbka po zniszczeniu (b)

Dla wyróżnionych obszarów wykonano rysunek 6, przedstawiający przebieg zmian średniej temperatury danego obszaru w trakcie obciążenia zmiennego.

Zgodnie z rysunkiem 6 zmiana średniej temperatury wybranych obszarów ma charakter cykliczny odpowiadający obciążeniu próbki, przy czym wzrostowi obciążenia (rozciąganie) odpowiada spadek temperatury, a odciążaniu jej wzrost. Jednocześnie zaobserwować można stopniowy wzrost temperatury w pojedynczym bloku obciążenia, związany prawdopodobnie z kumulacją energii dyssypowanej w trakcie obciążenia cyklicznego.

Średnia temperatura obszaru 1 i obszaru 2 w dwóch pierwszych blokach obciążenia jest do siebie zbliżona, natomiast w obszarze 3 jest wyraźnie niższa (o ok. 0,1°C) od pozostałych. Wraz z pojawieniem się defektu (obszar A na rysunku 4c,e,g) w pobliżu obszaru 1, w rejonie którego pojawiło się później pęknięcie zmęczeniowe, zauważyć można stopniowy wzrost średniej temperatury obszaru 1 w stosunku do obszaru 2, przy utrzymującej się różnicy temperatury obszarów 2 i 3.

W końcowym etapie obciążenia próbki zaobserwować można stopniowe zmniejszenie się zakresu cyklicznych zmian temperatury związane z pojawieniem się w obrębie karbu w obszarze 1 propagującego pęknięcia zmęczeniowego. Pojawienie się pęknięcia na dnie jednego z karbów spowodowało widoczne zmiany rozkładu temperatury w rejonie pozostałych karbów, co związane było z redystrybucją obciążenia w próbce. W chwili całkowitego rozdzielenia warstwy zewnętrznej laminatu (rys. 5b) zarejestrowano gwałtowny (w czasie ok. 60 ms) wzrost temperatury z 27,63°C na 35,06°C (powiększony obszar na rysunku 6), przy jednoczesnym jej spadku związanym z odciążeniem w obszarach 2 i 3.



Rys. 6. Przebieg zmian średniej temperatury w wybranych obszarach próbki (rys. 2b) w czasie obciążenia cyklicznego. Kolejnymi literami alfabetu zaznaczono czas, dla którego na rysunku 4 przedstawiono termogramy. W powiększeniu przedstawiono fragment odpowiadający zniszczeniu próbki

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w poniższej pracy eksperyment miał charakter rozpoznawczy i weryfikacyjny w odniesieniu do nowej aparatury badawczej i wykazał pełną przydatność stanowiska wyposażonego w kamerę CEDIP Silver 420M do badań cyklicznych zmian rozkładu temperatury.

Następnym krokiem w rozbudowie termowizyjnego stanowiska badawczego do badań w warunkach obciążeń zmiennych będzie zintegrowanie systemu sterowania kamerą termowizyjną z systemem sterowania maszyną INSTRON oraz opracowanie oprogramowania umożliwiającego analizę TSA w warunkach zmęczenia.

LITERATURA

[1] Boroński D., 2007. Metody badań odkształceń i naprężeń w zmęczeniu materiałów i konstrukcji. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
[2] Weber W., 1830. Über die specifische Warme fester Korper insbesondere der Metalle. Ann. d. Physik u. Chemie 96, 177-213.
[3] Belgen M.H., 1967. Structural Stress Measurements with an Infrared Radiometer. ISA Trans. 6, 49-53.
[4] Belgen M.H., 1968. Infrared Radiometric Stress Instrumentation Application Range Study. NASA Report CR-1067.
[5] Mountain D.S., Webber J.M.B., 1978. Stress Pattern Analysis by Thermal Emission (SPATE). Proc. Soc. Photo-opt. Inst. Engn. 164, 189-196.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy nr 61/EUR/2006/02.