

Aparatura badawczo-testowa do wykrywania i śledzenia procesów pęknięcia w materiałach wysokoenergetycznych

Research and test apparatus for detection and monitoring the crack propagation processes in the high-energy materials

Andrzej Zbrowski¹⁾, Tomasz Wolszakiewicz²⁾

1)Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom, PL

2)Instytut Przemysłu Organicznego, Pracownia Badań Balistycznych w Pionkach, PL

Autor do korespondencji:andrzej.zbrowski@itee.radom.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono budowę i działanie aparatury badawczo testowej umożliwiającej śledzenie procesów pęknięcia w materiałach wysokoenergetycznych. System jest przeznaczony do inspekcji stałych paliw raketowych sformowanych w postaci próbek wiosekowych poddawanych obciążeniom mechanicznym i termicznym. Rozwiązanie wykorzystujące technikę maszynowego widzenia przeznaczone jest do prowadzenia badań w warunkach laboratoryjnych na maszynie wytrzymałościowej. Zasada pomiaru polega na analizie w czasie rzeczywistym, kolejnych rejestrowanych obrazów powierzchni próbek i wyznaczaniu zmian położenia charakterystycznych punktów obrazu związanych z pęknięciem. System posiada strukturę modułową, której zasadniczymi elementami są: głowica pomiarowa z modulem wizyjnym, układ pozycjonowania głowicy komputer z oprogramowaniem. W artykule przedstawiono przykładowe wyniki badań zarejestrowane z zastosowaniem prezentowanej aparatury badawczej.

Abstract: The work presents the structure and operation of the research and test apparatus for detection and monitoring the crack propagation processes in the high-energy materials. The system is intended for inspection of the solid rocket propellants in the form of oar-shaped samples subjected to the mechanical and thermal loads. The solution using the techniques of machine vision is intended for the research in the laboratory environment on the fatigue strength testing machines. The principle of operation consists in the analysis, in real-time, subsequent recorded images of the sample surface and determination of the changes of the location of characteristic points of the image related to the crack. The system is of modular structure with essential elements: the measurement head with vision module, the positioning module for the measurement head, computer with the software. The article presents the sample results of the tests recorded with use of the presented apparatus.

Słowa kluczowe: stałe paliwa raketowe, pęknięcie, maszynowe widzenie

Keywords: solid rockets propellants, fracture, machine vision

1. Wprowadzenie

Stale paliwa raketowe narażone są w okresie ich składowania, montażu i magazynowania w gotowych produktach na działanie obciążeń termicznych i mechanicznych. Jednym z warunków ich prawidłowej pracy jest zachowanie właściwości mechanicznych na wymaganym poziomie niezależnie od zadanych warunków środowiskowych odpowiadających warunkom eksploatacyjnym. Dla paliw raketowych szczególnie istotne są badania własności mechanicznych w warunkach pracy. Krytycznym momentem jest chwila zapłonu. Następuje wówczas gwałtowny wzrost obciążeń, które są wynikiem działania temperatury zapłonu i siły odrzutu. Podczas lotu nierównomierności spalania mogą prowadzić do przeciążeń i zniekształcania ładunku. Dlatego istotne jest zbadanie statycznych własności mechanicznych stałych paliw raketowych poddanych uprzednio termicznym obciążeniom zmęczeniowym, które umożliwiają symulację ich warunków pracy i eksploatacji. W niskich temperaturach poniżej temperatury zeszklenia wytrzymałość paliw silnie wzrasta, a maleje elastyczność

i udarność. Na skutek obniżonej elastyczności powstają dogodne warunki do ogniskowania się naprężeń i miejscowych mikropęknięć prowadzących do zniszczenia materiału.

Prawidłowa ocena stanu obiektu technicznego, narażonego na wystąpienie niekontrolowanego pęknięcia zmęczeniowego, zależy w znacznym stopniu od skutecznego wykrywania i monitorowania przebiegu pęknięcia [1]. Współczesne narzędzia wykorzystywane w diagnostyce zmęczeniowej wykorzystują metody obserwacji bezpośredniej, pośrednie oraz techniki defektoskopowe.

W celu zapewnienia szerszych możliwości diagnostycznych, szczególnie w obszarze badań podstawowych materiałów wysokoenergetycznych, w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym w Radomiu we współpracy z Instytutem Przemysłu Organicznego w Warszawie opracowano system monitorowania pęknięcia (SMP) dedykowany do inspekcji stałych paliw raketowych sformowanych w postaci próbek wiosełkowych. System wykorzystujący technikę maszynowego widzenia przeznaczony jest do prowadzenia badań w warunkach laboratoryjnych na maszynie wytrzymałościowej [2]. System SMP jest aparaturą badawczą przeznaczoną do prowadzenia automatycznego pomiaru pęknięcia zmęczeniowego bez ingerencji w proces obciążania oraz bez konieczności nadzoru badań, przy jednoczesnej wysokiej dokładności pomiaru. Opracowanie systemu wymagało rozwiązania zagadnień obejmujących detekcję pęknięcia, pomiar pęknięcia w czasie rzeczywistym, automatyzację procesu kalibracji, zapewnienie wysokiej dokładności i rozdzielczości pomiarowej [3].

2. Metoda pomiarów

Przyjęta metoda pomiarów pęknięcia warstw powierzchniowych materiału wysokoenergetycznego polega na wykorzystaniu techniki maszynowego widzenia, w której za pomocą kamery cyfrowej o odpowiedniej rozdzielczości jest rejestrowany obraz powierzchni próbki w trakcie trwania procesu obciążania, jego przetworzeniu do postaci mapy bitowej i poddaniu analizie komputerowej z wykorzystaniem opracowanych algorytmów [4]. Możliwość wykrywania pęknięcia przez system wyznacza graniczna czułość detekcji układu wizyjnego. Zasada pomiaru polega na analizie w czasie rzeczywistym, kolejnych rejestrowanych obrazów powierzchni próbki i wyznaczaniu zmian położenia charakterystycznych punktów obrazu związanych z pęknięciem [5]. Na podstawie analizy położenia wyodrębnionych charakterystycznych punktów wyznaczany jest wektor kierunkowy i trajektoria pęknięcia. Uwzględniając parametr czasu wyznaczyć można prędkość przemieszczania się czoła pęknięcia.

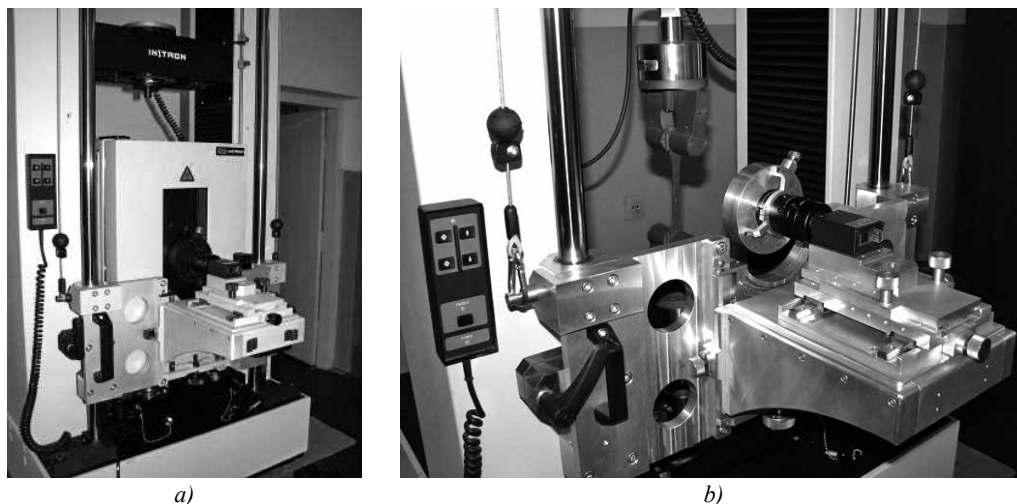
Celem badań prowadzonych z zastosowaniem prezentowanej aparatury jest:

- wykrywanie pęknięć w zadanym polu obserwacji powierzchni próbki, gdzie jako minimalny wymiar pęknięcia przyjęto 0,05 mm, a stosowane maksymalne pole obserwacji 50 x 50 mm,
- pomiar łącznej długości lub pola powierzchni pęknięć w polu obserwacji, w celu wyznaczania wartości parametru gęstości pęknięć,
- wyznaczanie liczby pęknięć w polu analizy.

System jest przeznaczony przede wszystkim do zautomatyzowanych pomiarów długości pęknięć w próbkach paliw raketowych poddawanych obciążeniom mechanicznym i termicznym. Do analizy pęknięcia zmęczeniowego wykorzystywana jest optyczna technika pomiaru pozwalająca na zastosowanie optyczno-elektronicznych układów wizyjnych w układzie pomiarowym.

2.1. Struktura systemu

Istotnym elementem przyjętego rozwiązania jest powiązanie rejestrowanych danych pomiarowych z zadanymi parametrami obciążenia próbki na maszynie wytrzymałościowej (rys. 1).

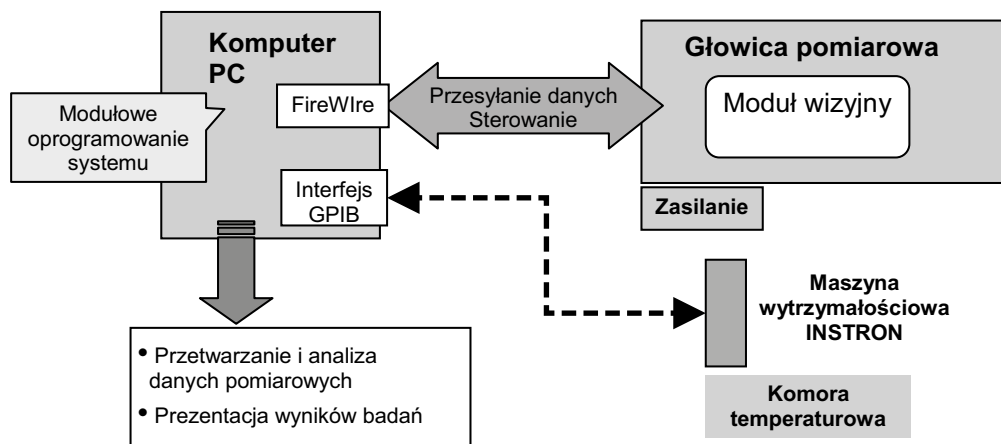


Rys. 1. Aparatura badawczo-testowa: a) badania z zastosowaniem komory termicznej; b) badania w temperaturze otoczenia

Metoda pomiaru opiera się na wykorzystaniu systemu wizyjnego do obserwacji powierzchni próbek. System posiada strukturę modułową (rys.2), której zasadniczymi elementami są: głowica pomiarowa z modulem wizyjnym, układ pozycjonowania głowicy komputer z oprogramowaniem.

Opracowana koncepcja pracy aparatury do monitorowania procesu pęknięcia próbek zakłada badania próbek:

- poddawanych obciążeniom mechanicznym w warunkach laboratoryjnych,
- poddawanych obciążeniom mechanicznym i termicznym w komorze cieplnej.



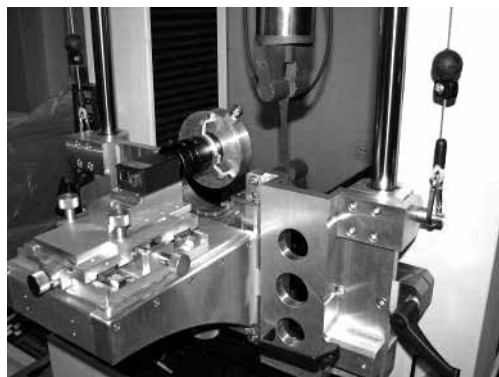
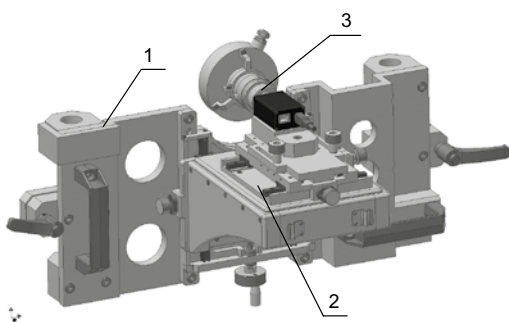
Rys. 2. Struktura systemu pomiarowego

Podstawowe zadania systemu wizyjnego i programu analizy obrazów obejmują:

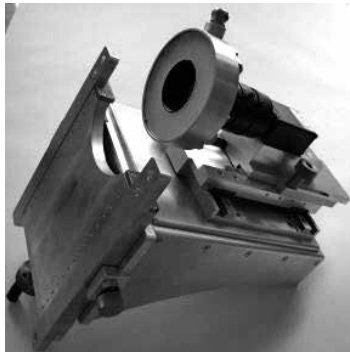
- detekcję pęknięć w czasie rzeczywistym w trakcie procesu badawczego,
- ocenę liczby pęknięć w polu analizy,
- monitorowanie zmian liczby i łącznej długości pęknięć.

2.2. Moduł pozycjonowania głowicy pomiarowej

Podstawowym wymogiem stawianym systemowi pozycjonowania jest możliwość prowadzenia badań z wykorzystaniem głowicy pomiarowej na maszynie wytrzymałościowej z zastosowaniem komory ciepłej, oraz bez komory w temperaturze otoczenia. W konstrukcji wykorzystano koncepcję trójosiowego układu pozycjonowania. Głównym zespołem modułu pozycjonowania głowicy jest manipulator trójosiowy (rys. 3). Na manipulatorze zamontowana jest głowica pomiarowa (rys. 4), której zasadniczymi elementami są: kamera CCD, obiektyw o zmiennej ogniskowej i oświetlacz pierścieniowy.



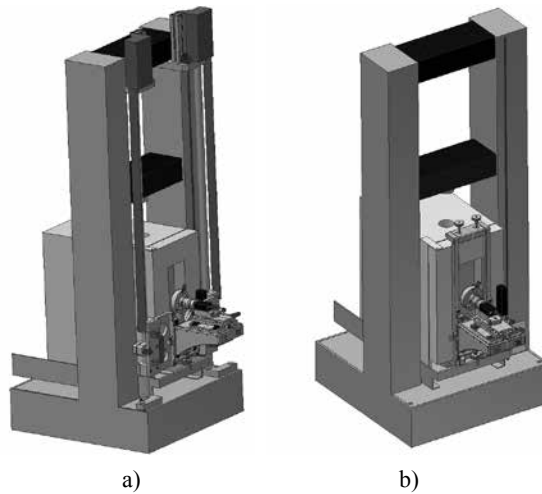
Rys. 3. Moduł pozycjonowania z głowicą pomiarową: 1 – trawers; 2 – manipulator trójosiowy, 3 – głowica pomiarowa



Rys. 4. Głowica pomiarowa

Moduł pozycjonowania jest zamocowany do korpusu maszyny wytrzymałościowej na prowadnicach (rys. 5a). Konstrukcja umożliwia ręczne ustawienie głowicy pomiarowej na dowolnej wysokości roboczej, w zależności od rozmiaru badanej próbki. Otwieranie drzwi komory jest możliwe po sprowadzeniu modułu pozycjonowania do pozycji parkingowej, znajdującej się ponad gabarytem komory.

Moduł pozycjonowania głowicy pomiarowej może być także zamontowany bezpośrednio na drzwiach komory (rys. 5b). Podczas wykonywania badań moduł pozycjonowania głowicy pomiarowej jest przytwierdzony do drzwi komory w sposób umożliwiający swobodne otwieranie i zamykanie komory.

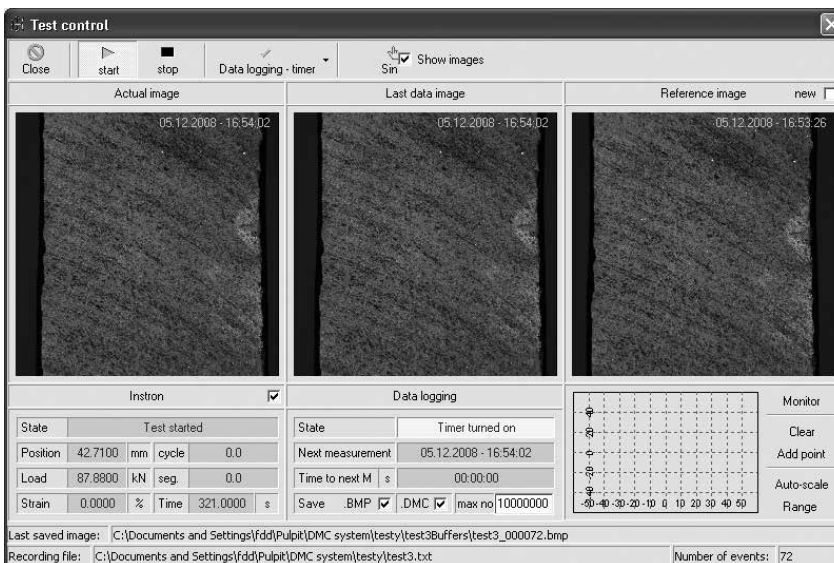


Rys. 5. Moduł pozycjonowania głowicy pomiarowej: a) ustawienie robocze podczas badań z komorą, b) moduł pozycjonowania głowicy pomiarowej zamocowany na komorze

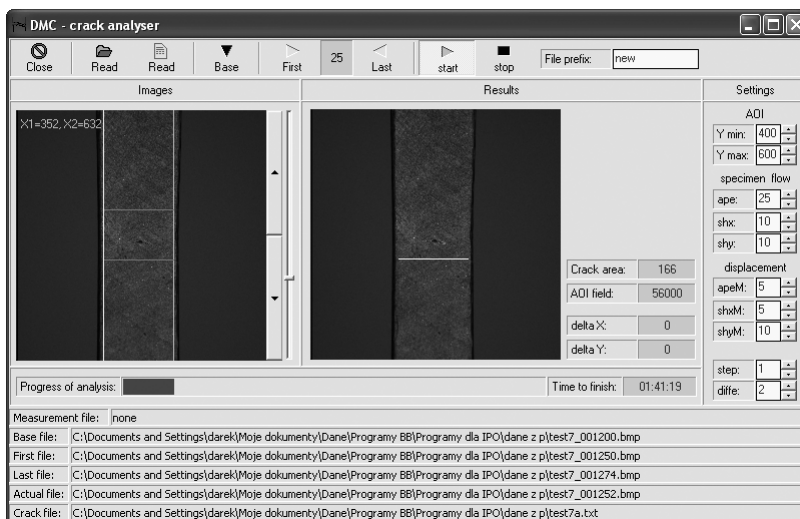
Opracowane rozwiązanie umożliwia precyzyjne pozycjonowanie głowicy w pionie oraz w płaszczyźnie poziomej względem próbki. Uzyskano roboczy zakres pomiarowy głowicy wynoszący 100 x 100 mm.

2.3. Oprogramowanie

Sterowanie przebiegiem procesu pomiarowego jest realizowane z poziomu komputera klasy PC z zainstalowanym specjalistycznym oprogramowaniem dedykowanym dla opracowanego urządzenia. Oprogramowanie do sterowania procesem pomiarowym zawiera moduły realizujące funkcje: kalibracji, diagnostyki, realizacji procesu badawczego, analizy i pomiaru pęknięcia, rejestracji danych pomiarowych. Okno pomiarów (rys. 6) przedstawia bieżący obraz powierzchni próbki, ostatni zapisany obraz oraz obraz referencyjny. Pasek stanu pokazuje na bieżąco proces rejestracji kolejnych obrazów. Okno modułu oprogramowania do wykrywania i pomiaru pęknięć próbki zawiera panele realizujące poszczególne funkcje (rys. 7).



Rys. 6. Okno pomiaru



Rys. 7. Okno modułu analizy pęknięć

W panelu Images wyświetlane są obrazy próbki zarejestrowane w trakcie badania, a także pole wskazania AOI (*ang. area of interest*) oznaczone czterema liniami: żółtą ograniczającą pole analizy od lewej strony, zieloną (od prawej strony) oraz dwiema czerwonymi (od góry i dołu). Panel Results przedstawia wyniki analizy: mapy przemieszczeń, mapy pęknięć oraz dane do obliczenia względnego pola pęknięć. Wyświetlane mapy oraz dane liczbowe zapisywane są w trakcie analizy do odpowiednich plików.

W panelu Settings można dokonać zmian parametrów analizy obrazów:

- AOI: wymiary pola analizy,
- specimen flow: sztywne przemieszczenie próbki,
- displacement: parametry analizy pól przemieszczeń i detekcji pęknięcia.

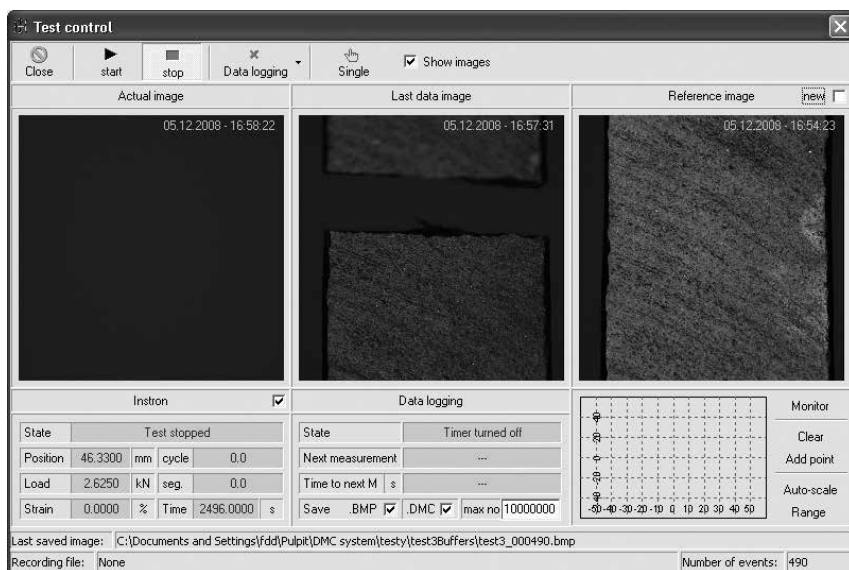
W polu Statusu wyświetlane są dane o plikach wykorzystywanych podczas analizy.

2.4. Weryfikacja

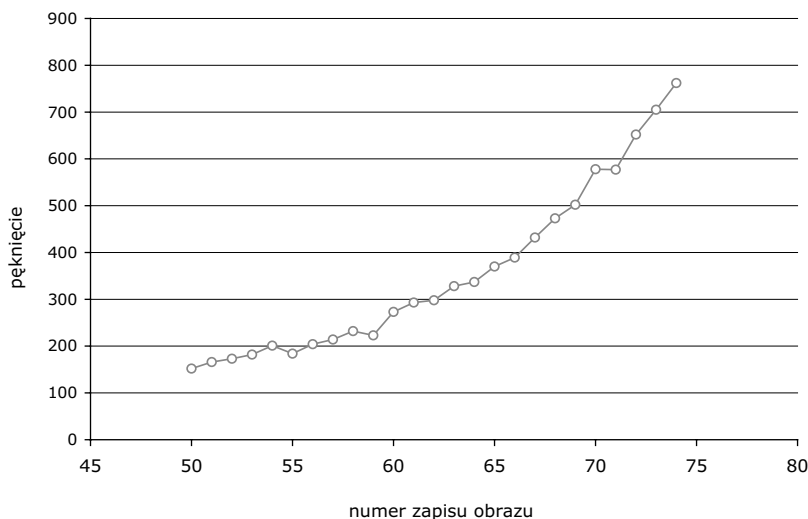
Przeprowadzono testy aparatury w trakcie współpracy z maszyną wytrzymałościową, dla wykonanych próbek stałych paliw raketowych (rys. 8 ÷ 10). Zamontowane w uchwycie maszyny wytrzymałościowej próbki były poddane monotonicznym obciążeniom rozciągającym przy zadanym przyroście obciążenia. Przeprowadzone badania umożliwiły rejestrację torów pęknięcia zmęczeniowego oraz budowę wykresów rozwoju pęknięć.



Rys. 8. Zarejestrowane obrazy prezentujące kolejne fazy pęknięcia próbki

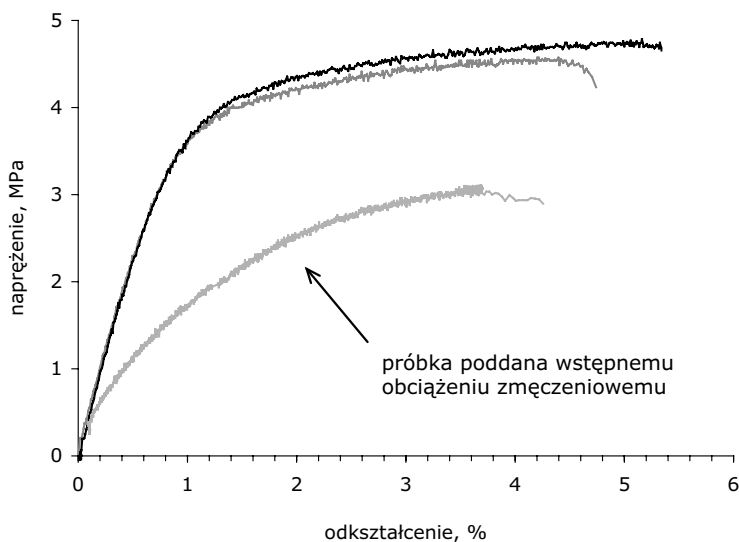


Rys. 9. Przykładowy końcowy wynik testu po zerwaniu próbki



Rys. 10. Przebieg pęknięcia

W wyniku przeprowadzonego badania wyznaczono wykres monotonicznego rozciągania w układzie naprężenie – odkształcenie, którego przebieg pokazano na rys. 11. W celach porównawczych umieszczono wykresy rozciągania otrzymane dla materiału bazowego.



Rys. 11. Wykres rozciągania próbek stałego paliwa raketowego

Na podstawie otrzymanego wykresu wyznaczono wybrane własności statyczne:

- umowną granicę plastyczności, $R_{p0,2}$,
- wytrzymałość na rozciąganie, R_m ,
- umowną wytrzymałość pęknięcia, R_c (wyznaczoną dla długości pęknięcia $a = 0,1$ mm),
- wydłużenie względne graniczne, A_t ,
- moduł sprężystości wzdłużnej, E (styczny).

Wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 1, gdzie także zamieszczono dla celów porównawczych wyniki prób materiału bazowego.

Tab. 1

	$R_{p0,2}$	R_m	R_c	A_t	E (styczny)		E (sieczny)	
	MPa	MPa	MPa	%	MPa	r^2	MPa	r^2
próbka 1 bazowa	3,89	4,57	4,35	4,74	516,88	0,9996	399,8	0,9937
próbka 2 bazowa	4,05	4,78	-	5,34	549,28	0,9997	434,8	0,9941
próbka poddana wstępnemu obciążeniu zmęczeniowemu	1,48	3,09	-	3,74	203,52	0,9961	-	-

3. Wnioski

Opracowana aparatura badawczo-testowa jest przeznaczona do wykrywania i pomiarów pęknięcia w materiałach wysokoenergetycznych i umożliwia realizowanie badań wybranych ich własności mechanicznych obejmujących:

- wyznaczanie własności statycznych w zadanych temperaturach,
- wyznaczanie własności statycznych w zadanych temperaturach po określonej liczbie cykli obciążenia zmęczeniowego na drodze mechanicznej,
- wyznaczanie własności statycznych w zadanych temperaturach po określonej liczbie cykli obciążenia termicznego,
- wyznaczenie własności zmęczeniowych w warunkach obciążeń mechanicznych,
- wyznaczanie własności zmęczeniowych w warunkach obciążeń termicznych.

Zastosowana metoda nie wymaga szczególnego przygotowania obiektu do badań. Badania wykonywane są w sposób bezkontaktowy w czasie rzeczywistym.

Podziękowanie

Autorzy dziękują prof. dr inż. Dariuszowi Borońskiemu (Uniwersytet Techniczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy) oraz dr inż. Tomaszowi Giesko (Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom) za znaczący wkład w zrealizowanie pracy naukowej. Praca została zrealizowana ze środków Programu Wieloletniego PW-004 pt.: „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji”.

Literatura

- [1] Szala J., Boroński D., *Ocena stanu zmęczenia materiału w diagnostyce maszyn i urządzeń*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, ISBN 978-837204-692-5, Bydgoszcz – Radom 2009.
- [2] Boroński D., Gawor T., Giesko T., Wolszakiewicz T., *Nowa metoda badań właściwości wytrzymałościowych stałych paliw raketowych z wykorzystaniem optycznej inspekcji*. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej. 170 K/1, (2007).
- [3] Giesko T., Boroński D., Zbrowski A., Czajka P., *Detection and measurement of fatigue cracks in solid rocket propellants*. Problemy Eksploatacji 3, (2009), 75-84.
- [4] Zbrowski A., Samborski T., Giesko T., Boroński D., Machniewicz T., *System pomiarowy do monitorowania pękania połączeń montażowych stosowanych w przemyśle lotniczym*. Technologia i Automatyzacja Montażu. 3, (2010), 5-10.
- [5] Giesko T., Zbrowski A., Boroński D., *Metoda i system monitorowania pękania zmęczeniowego elementów konstrukcyjnych*. Energetyka. (Listopad 2008), 52-54.