

Analiza procesów spalania materiałów wysokoenergetycznych zarejestrowanych z zastosowaniem szybkich technik wizyjnych

The analysis of the processes of burning the high-energy materials with use of the high-speed vision techniques

Szymon Zacharski, Andrzej Zbrowski

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, PL

Autor do korespondencji: szymon.zacharski@itee.radom.pl

Streszczenie: *W pracy zaprezentowano analizę procesów spalania materiałów wysokoenergetycznych zarejestrowanych przy pomocy szybkich technik wizyjnych. Badania przeprowadzono na przykładzie spalania zapłonników paliw raketowych, mieszanin pirotechnicznych zawartych w petardach hukowych i próbek wykonanych ze stałego paliwa raketowego. Wykorzystanym instrumentarium badawczym była kamera cyfrowa Phantom V310, której możliwości rejestracyjne sięgają do 0,5 mln klatek na sekundę. Na podstawie zarejestrowanych danych wyznaczono histogramy opisujące intensywność promieniowania świetlnego. W celu określenia granic zjawiska spalania wykonano binaryzację obrazów cyfrowych. Obszary wyznaczone na drodze binaryzacji umożliwiają precyzyjny pomiar propagacji oraz analizę kształtu płomienia. Przedstawiono metodę wyznaczania czasu spalania wykorzystującą analizę intensywność promieniowania świetlnego wyznaczoną za pomocą histogramów.*

Omówiono warunki prawidłowej rejestracji zjawisk z wykorzystaniem pomocy szybkiej kamery. Przedstawiono proces przetwarzania otrzymanych materiałów filmowych w celu efektywnego ich wykorzystania jako źródła informacji. Pokazano przykładowe możliwości komputerowej analizy obrazów w środowisku Matlab.

Abstract: *The work presents the analysis of the processes of burning the high-energy materials with use of the high-speed vision techniques. The tests were conducted on the sample burning of the ignitors for the rocket propellants, the pyrotechnic mixtures used in the firework bangers and samples manufactured out of the solid rocket propellants. The research apparatus used was the digital camera Phantom V310, which is capable of recording up to 0.5 million frames per second. Based on the recorded data the histograms were calculated for the intensity of the visible radiation in the burning process. To determine the limits of the burning process the binarisation of the digital images was performed. The areas determined by binarisation allow precise measurement of the propagation and analysis of the shape of the flame. The method for determination of the burning time by analysis of the intensity of the visual radiation calculated from the histograms is presented.*

The conditions for the proper recording of the phenomena with use of high-speed camera are discussed. The processing of the motion materials for the effective use as the information source is presented. The computer analysis of the digital images was performed in the Matlab environment.

Słowa kluczowe: *pirolanty, mieszaniny zapłonowe, pirotechnika widowiskowa, szybka kamera*

Keywords: *pyrolants, ignition mixture, fireworks, high-speed camera*

1. Wprowadzenie

Szybkość spalania jest jednym z podstawowych parametrów różnego rodzaju paliw. Dla paliw stałych pomiar prędkości spalania może być realizowany przez umieszczenie w badanej próbce w ściśle określonej odległości od siebie przewodów elektrycznych, które tworzą obwód czasomierza [1]. Przepalenie jednego przewodu rozpoczyna pomiar czasu, natomiast przepalenie drugiego daje sygnał zatrzymania pomiaru czasu. Metoda

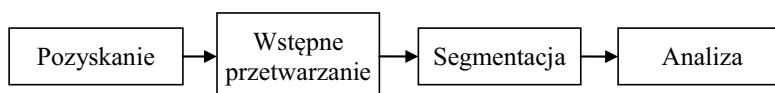
ta pozwala na pomiar tylko liniowej szybkości spalania. Pomiar szybkości spalania może być wykonywany przy pomocy urządzeń wykorzystujących emisję światła generowaną przez proces spalania. W artykule zaproponowano zastosowanie komputerowej analizy i przetwarzania obrazów w celu badań dynamiki eksplozji i procesów spalania materiałów wysokoenergetycznych.

Dzięki zastosowaniu rejestracji szybkimi technikami wizyjnymi a następnie dzięki odpowiednim operacjom przetwarzania obrazów możemy uzyskać informacje, których system wzrokowy człowieka w czasie rzeczywistym nie pozwoli zaobserwować.

2. Przetwarzanie obrazów

Do przetwarzania obrazów wykorzystano środowisko Matlab, do którego dołączona jest biblioteka *Image Processing Toolbox* (IPT). Zawarte w niej specjalizowane funkcje przeznaczone są do przetwarzania, transformacji, przekształceń geometrycznych, poprawy jakości oraz analizy obrazów.

Przetwarzanie obrazów to proces składający się z następujących etapów:



Rys. 1. Schemat procesu przetwarzania obrazów

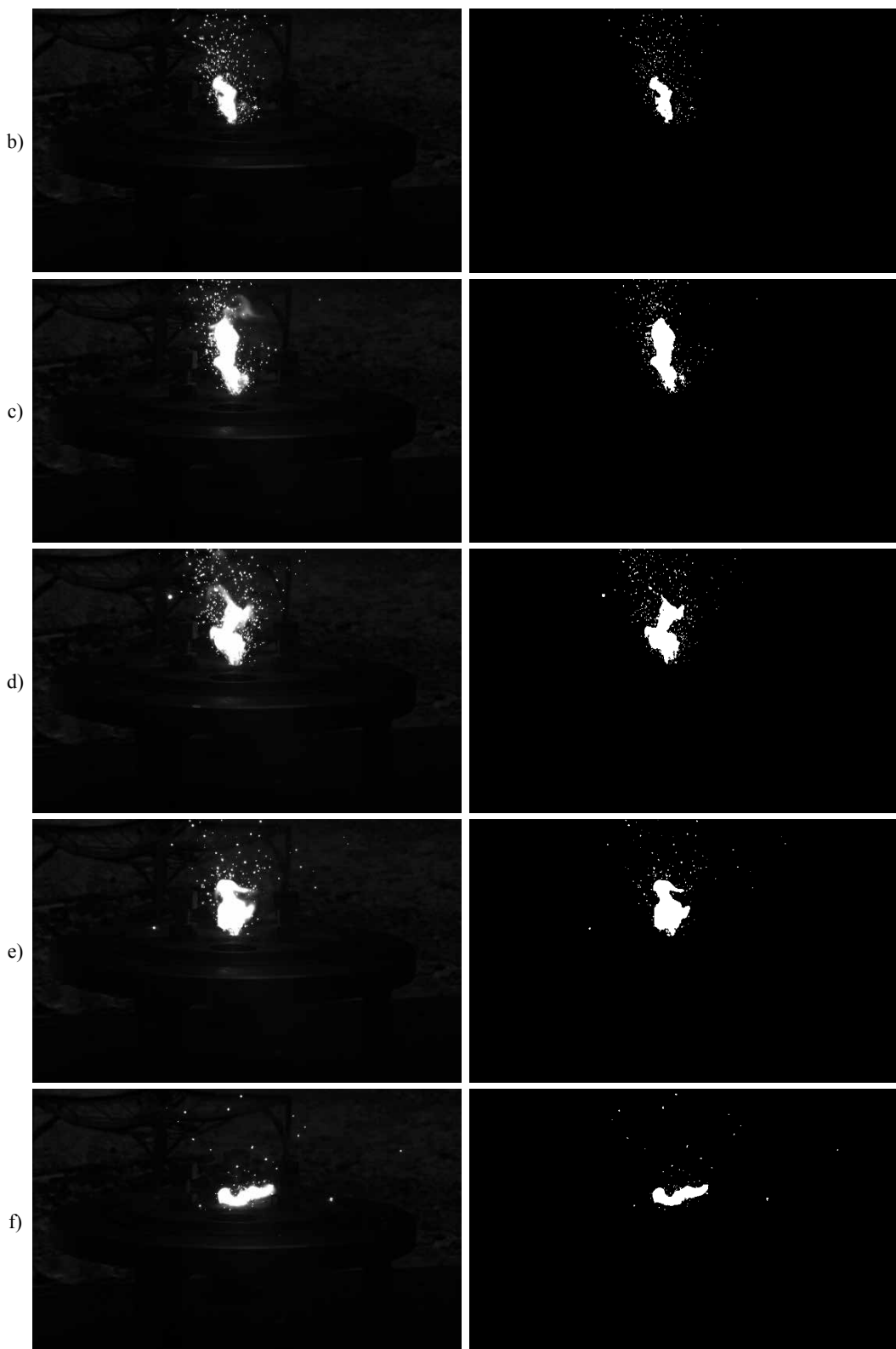
W związku z tym że każdy obraz charakteryzuje wysoki poziom nadmiarowości informacji, często przy analizie zarejestrowanych obrazów pomija się własności pojedynczych pikseli i bada własności większych obszarów. [2]

Segmentacja jest podstawowym etapem przetwarzania obrazów. Jest to proces podziału obrazu na homogeniczne obszary. Wynikiem segmentacji są wyodrębnione widoczne fragmenty obrazu charakteryzujące się szczególnymi cechami np. kolor obszaru, tekstura, poziom jasności, obszary nie będące przedmiotem analizy przenoszone są do tła. Z tego powodu niewłaściwie przeprowadzona segmentacja uniemożliwia i wprowadza błędy w dalszej analizie obrazu. Celem segmentacji jest przygotowanie obrazu do właściwego etapu rozpoznawania obiektów oraz określenia przestrzennych relacji między nimi.

Podstawową metodą segmentacji obrazu jest progowanie jasności, polegające na określeniu progowej wartości X w skali jasności obrazu [2,3]. Piksele, których poziom jasności przekracza X kwalifikują się do jednej grupy, pozostałe piksele do drugiej. Otrzymujemy obraz zbinaryzowany, którego piksele przyjmują wyłącznie wartości 0 lub 1. Na rys 2. pokazano sekwencję obrazów zarejestrowanych podczas spalania zapłonników do stałego paliwa raketowego wraz z obrazami poddanymi binaryzacji.

a)



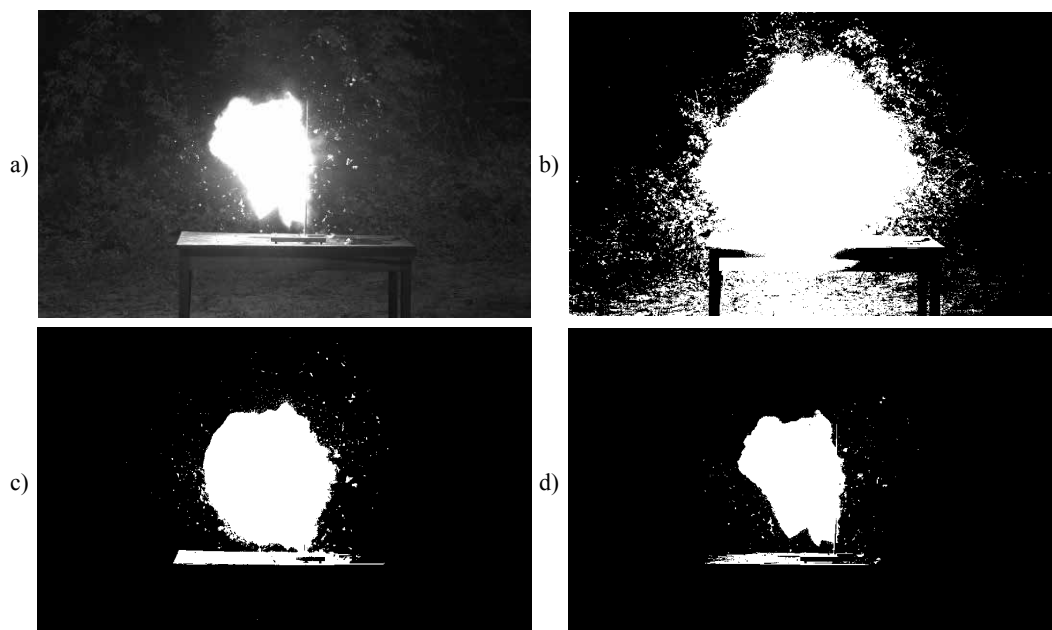




Rys. 2. Proces spalania zapłonników do stałego paliwa raketowego (rozdzielczość 1280x800, czas naświetlania pojedynczej klatki 500 μ s, 700 fps)

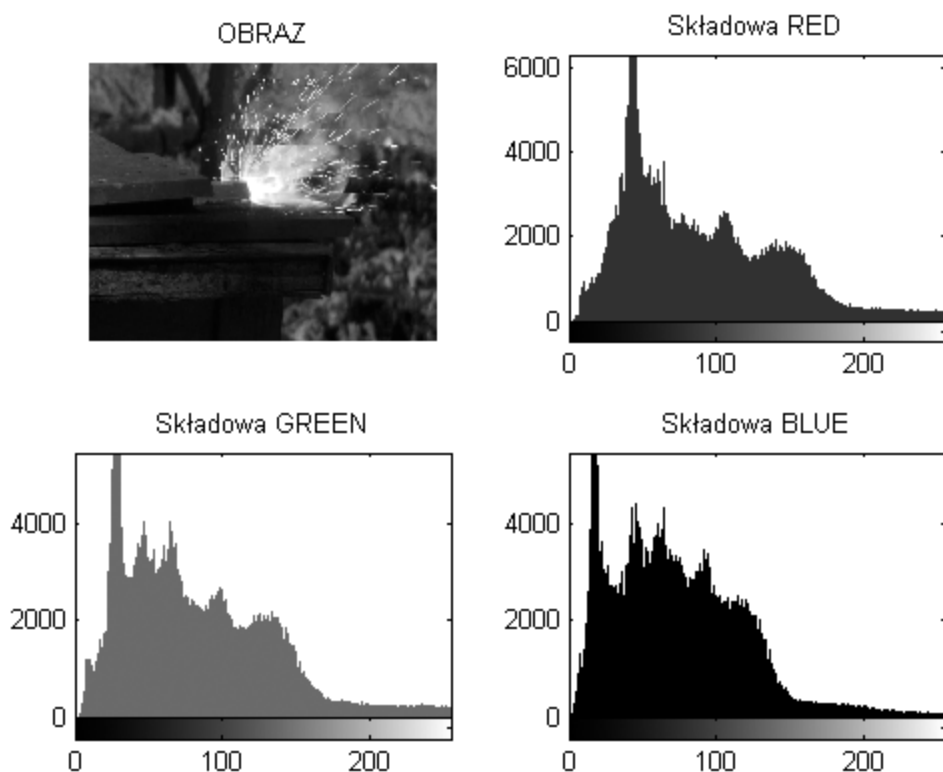
Problemem przy binaryzacji obrazu jest dobór progu X . Najkorzystniej jest dobierać próg w zależności od własności analizowanego obrazu lub sekwencji obrazów.

Na rys. 3. pokazano obraz źródłowy przedstawiający wybuch petardy hukowej oraz obrazy zbinaryzowane dla trzech różnych progów binaryzacji.



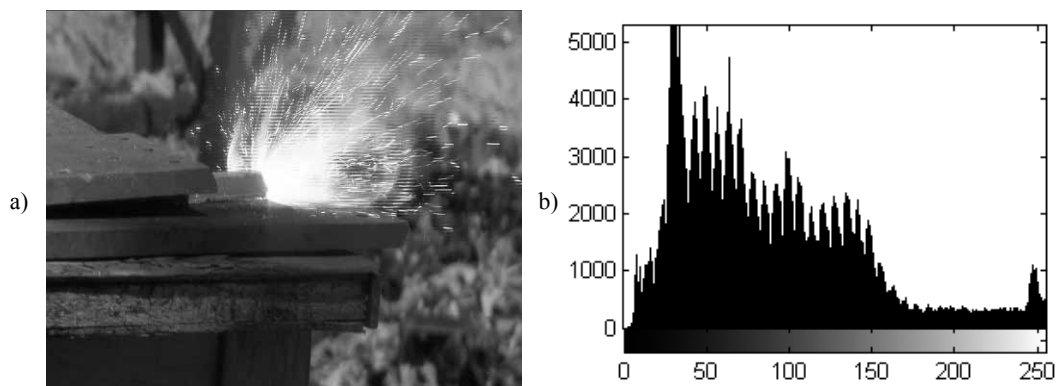
Rys. 3. Wybuch petardy hukowej

Próg binaryzacji najczęściej dobiera się na podstawie histogramu obrazu. Histogram obrazu to wykres reprezentujący rozkład intensywności lub kolorów w obrazie. Jest on najprostszym globalnym opisem obrazu. W przypadku obrazu w skali szarości histogram pokazuje informację ile pikseli o danym poziomie jasności znajdują się w obrazie. Dla obrazów kolorowych histogram można również zdefiniować, ale otrzymujemy wtedy 3 histogramy osobne dla każdej składowej obrazu R, G, B. Na rys. 4. przedstawiono obraz źródłowy otrzymany podczas rejestracji procesu spalania stałego paliwa raketowego oraz histogramy dla trzech składowych obrazu R, G i B.



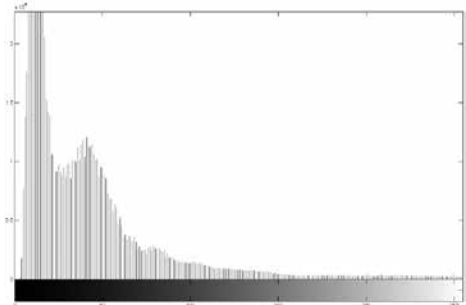
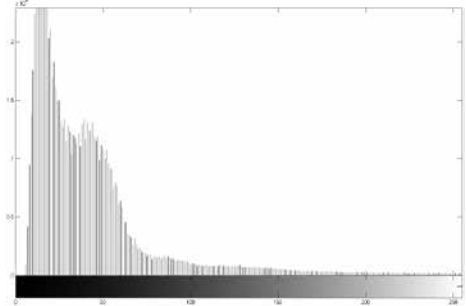
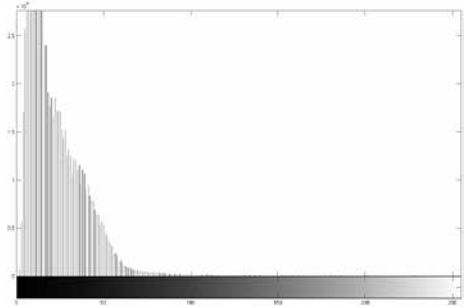
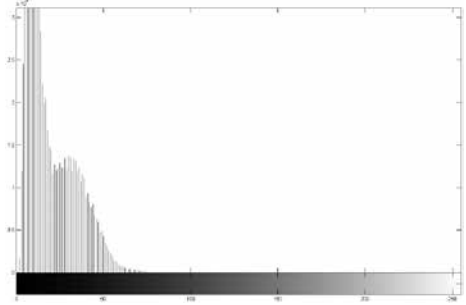
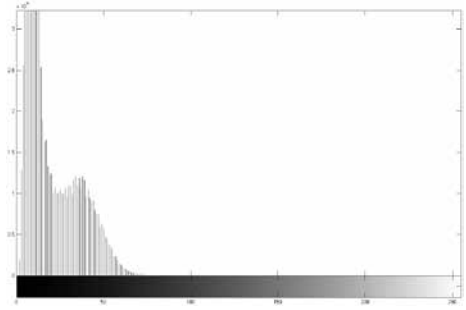
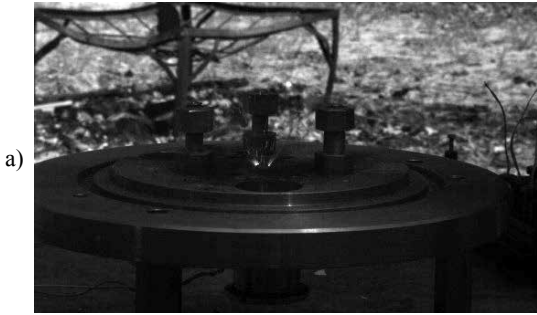
Rys. 4. Spalanie stałego paliwa raketowego i histogram dla składowych R, G, B

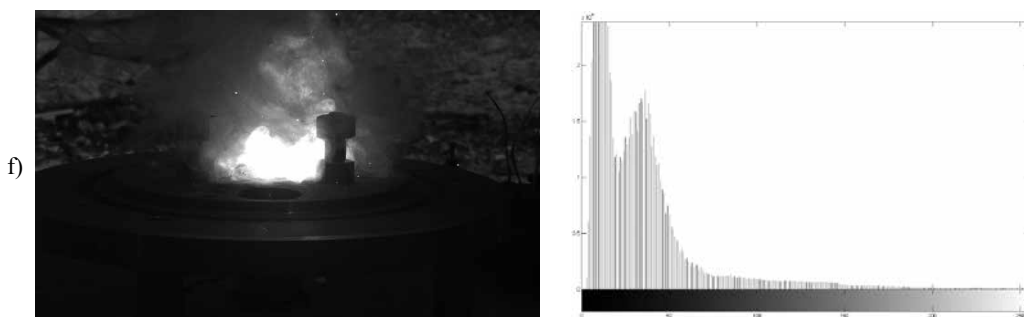
Obraz spalania stałego paliwa raketowego poddany konwersji do skali szarości przedstawiono na rys. 5a, na rys. 5b histogram tego obrazu.



Rys. 5. Spalanie stałego paliwa raketowego a - obraz poddany konwersji do skali szarości, b – histogram obrazu

Na rys. 6. przedstawiono proces spalania zapłonników paliw raketowych wraz z histogramami dla każdego obrazu. Łatwo można zauważyć zmianę kształtu i rozszerzenie histogramów wraz z rozwojem strefy płomienia.

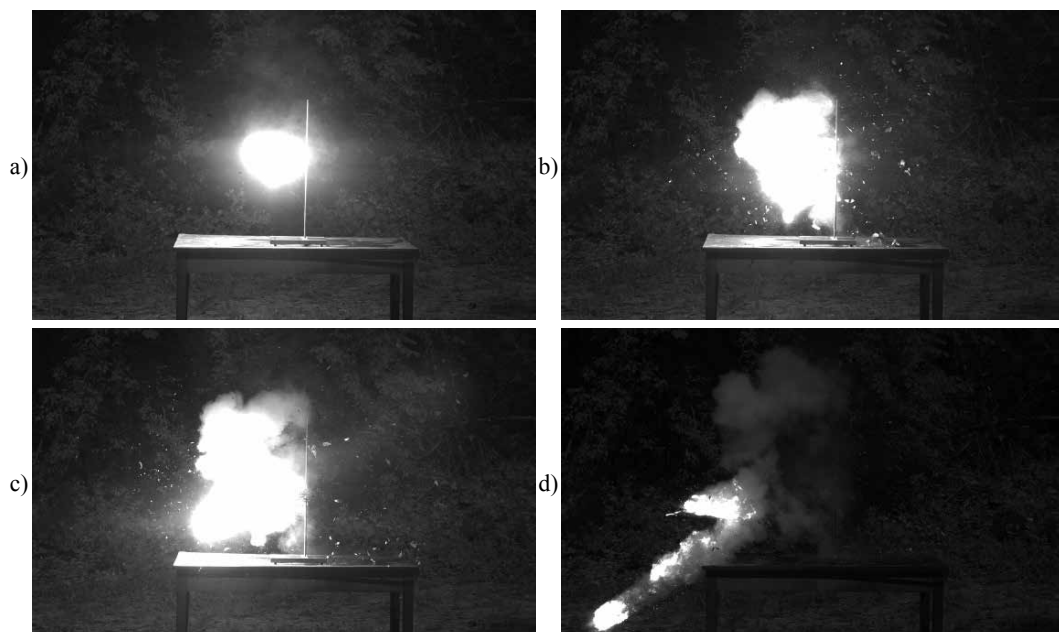




Rys. 6. Proces spalania zapłonników do stałego paliwa raketowego. Obraz zarejestrowany i histogramy: a) 20 ms po inicjacji b) 50 ms po inicjacji c) 100 ms po inicjacji d) 150 ms po inicjacji e) 200 ms po inicjacji f) 250 ms po inicjacji (rozdzielczość 1280x800, czas naświetlania pojedynczej klatki 500 μ s, 700 fps)



Rys. 7. Wyświetnik z zamocowanymi petardami

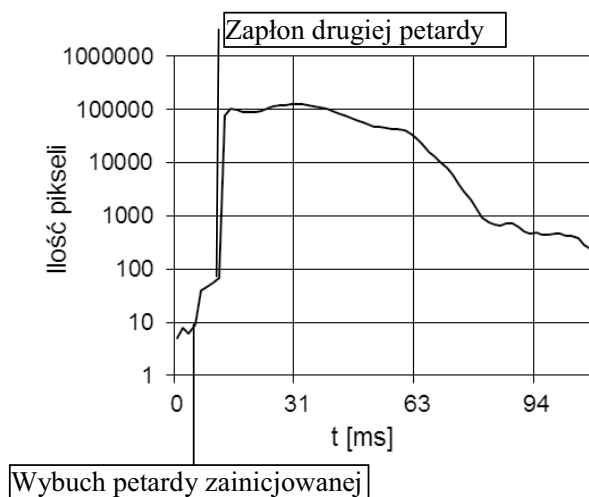


Rys. 8. Wybuch petard (rozdzielczość 1280x800, czas naświetlania pojedynczej klatki 50 μ s, 3200 fps)

Histogram może posłużyć do wyznaczenia czasu generowania promieniowania świetlnego przez proces spalania, a przez to na określenie szybkości spalania. Na rys. 6 przedstawiono sekwencję obrazów z filmu zarejestrowanego szybką kamerą podczas badań petard hukowych, kiedy to dwie petardy zostały ze sobą sklejone i zamocowane na stojaku z wysięgnikiem (rys. 7), a następnie został zainicjowany wybuch jednej z petard.

Na rys. 8a widoczna jest inicjacja wybuchu pierwszej petardy. Eksplozja pierwszej petardy spowodowała rozerwanie kartonowego korpusu drugiej petardy i zapłon mieszanki pirotechnicznej w niej zawartej (rys. 8 b, c, d).

Dla każdej klatki filmu wyznaczono histogram, a następnie porównano wszystkie klatki zliczając ilość pikseli o jasności większej niż maksymalna jasność piksela z pierwszej kratki filmu gdzie brak było oznak spalania. Wykres (rys. 9) pozwala zaobserwować proces generowania promieniowania świetlnego.



Rys. 9. Wykres ilości pikseli o jasności powyżej 112 w skali szarości w funkcji czasu zarejestrowanego filmu

Rejestracja przy pomocy szybkiej kamery i późniejsza analiza pozwoliły na stwierdzenie, że zapłon mieszanki pirotechnicznej drugiej petardy nastąpił 5 ms po eksplozji pierwszej petardy. Inną metodą pomiaru prędkości spalania materiałów pirotechnicznych jest użycie przyrządu z czujnikami światłowodowymi wykorzystującego emisję światła generowanego przez front reakcji spalania. Metoda ta pozwala na wyznaczenie szybkości spalania, natomiast nie pozwala na rejestrację przebiegu procesu.

Wykorzystując szybkie techniki wizyjne do rejestracji procesów spalania należy przewidzieć rozmiar strefy płomienia, aby rejestrowany kadr obejmował całą strefę. W przypadku badań środków pirotechnicznych należy przewidzieć zasięg odłamków powstałych po wybuchu.[5,6] Dobór parametrów rejestracji powinien opierać się na przeprowadzonych wcześniej eksperymentach. Nie można dopuścić aby na zarejestrowanych obrazach większość pikseli stanowiły obszary „przeżalone” takie jak na rys. 10.



Rys. 10. Wybuch petardy - obraz zarejestrowany nieprawidłowo. (rozdzielczość 1280x800, czas naświetlania pojedynczej klatki 200 μ s, 3200 fps)

3. Wnioski

Użycie szybkich technik wizyjnych do rejestracji zjawiska eksplozji przedstawionego powyżej pozwala na wielowymiarowe badanie przebiegu procesu. Dzięki rejestracji i późniejszej analizie możliwe jest określenie czasu spalania ładunku pirotechnicznego, określenie zasięgu i rozmiaru kuli ognia oraz strefy odłamków powstałych w wyniku eksplozji. Badanie spalania stałych paliw raketowych i zapłonników do takich paliw pozwala określić parametry procesów ich spalania. Wykorzystanie metody przetwarzania obrazów zarejestrowanych szybkimi technikami wizyjnymi pozwala dostarczyć wiele informacji niemożliwych do uzyskania innymi metodami. W pracy przedstawiono tylko wybrane z wielu możliwości przetworzenia obrazów.

Literatura

- [1] Szymczak K., Gawor T., Wolszakiewicz T., *Metodyka badań liniowej szybkości spalania stałych paliw raketowych*. Materiały Wysokoenergetyczne. (2009) 107-116, Instytut Przemysłu Organicznego, Warszawa.
- [2] Tadeusiewicz R., Korohodam P., *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.
- [3] Wróbel Z., Koproński R., *Praktyka przetwarzania obrazów w programie Matlab*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2004.
- [4] Witkowski W., Maranda A., Szmańczyk L., Żmuda W., *Wyroby pirotechniki widowiskowej jako szczególne towary na rynku*. Chemik. 1, 66 (2012), Gliwice.
- [5] Yucai Dong, Hongyan Li, Hongtao Shi, lianghai Yi, *Study of FAE Explosive Image Analysis Based on the Fractional Dimensio*. Journal of Mathematics Research. 1, 1 (2009).
- [6] Ling Zhang, Yucai Dong, Hongtao Shi, Ping Chen & Xuhui Li, *The Extraction of the FAE Image Profilogram Based on the Grey Level Thresholding*. Computer and Information Science. 4, 1 (styczeń 2011).