

Dr inż. Krzysztof TOMKIEWICZ
Wojskowa Akademia Techniczna
Dr hab. inż. Andrzej PŁASKOWSKI
Instytut Przemysłu Organicznego

Metody tomografii procesowej w diagnozowaniu silników raketowych

Streszczenie: Przedstawiono najnowsze rezultaty otrzymane z zastosowania tomografii pojemnościowej do diagnozowania paliwa raketowego. Otrzymane dane i zrekonstruowane obrazy płomienia dostarczają użytecznej informacji o dynamice spalania w silniku raketowym.

Application of process tomography to diagnose rocket engines

Abstract: In this paper, we review recent results obtained using electrical capacitance tomography to diagnose rocket fuel. The measurement data and reconstructed flame images can provide useful information on the dynamics in rocket engine.

1. WPROWADZENIE

Rakietami nazywa się klasę obiektów, których podstawową cechą jest użycie silnika wykorzystującego zasadę odrzutu, niezależnego od otoczenia (atmosfery). Najczęściej wykorzystuje się silniki chemiczne, w których siłę ciągu wytwarzają wypływające gazy powstające ze spalania materiałów pędnych.

Chemiczne silniki raketowe dzieli się na wykorzystujące paliwo ciekłe i paliwo stałe. Ze względu na łatwiejszą eksploatację obecnie coraz szerzej stosuje się paliwo stałe. Silniki raketowe na stałe środki napędowe są najstarszym i najprostszym silnikiem cieplnym świata. Podstawowymi elementami konstrukcyjnymi każdego silnika raketowego są komora spalania i dysza wylotowa. Ponieważ ciągłe dostarczanie środka napędowego w postaci stałej napotyka na ogromne trudności konstrukcyjne, dlatego cały wymagany zapas paliwa umieszcza się we wnętrzu komory spalania i po uruchomieniu silnika zapas ten stopniowo się wypala.

Warunki pracy silnika raketowego, od którego wymaga się stałego ciągu i stałego ciśnienia, zależą, poza względami konstrukcyjnymi, od użytego paliwa. Konkretnie od geometrii ładunku i jakości struktury wewnętrznej masy paliwa, tj. od rodzaju i nasilenia występujących w nim wad. Nawet najdokładniej ustalone i kontrolowane procesy technologiczne nie mogą zapewnić w 100% otrzymywania ładunków bez defektów. Nie wszystkie jednak wady, jakie występują w ładunkach raketowych mają wpływ na przebieg spalania. Zależy to od ich wielkości, rodzaju i położenia. Wynika stąd konieczność badań zarówno produkcyjnych jak i kontrolnych w czasie eksploatacji.

Obecnie stosowane metody badań nieniszczących są bardzo niedoskonałe, a informacje o ładunkach uzyskuje się głównie z badań niszczących próbki. Stwarza to potrzebę poszukiwań nowych, lepszych metod, które pozwoliłyby na wiarygodną ocenę stanu paliwa zarówno na etapie produkcji jak i okresowo w czasie eksploatacji. Szczególnie ten drugi zakres badań wymaga zastosowania metody relatywnie taniej, nieskomplikowanej, ale

pozwalającej na określenie możliwości i warunków przedłużenia okresu ich dalszego użytkowania. Taką metodą według autorów jest tomografia procesowa.

2. DIAGNOZOWANIE LASEK PROCHOWYCH

Diagnozowanie raket [1] jest prowadzone na wszystkich etapach jej „życia”, z wyjątkiem okresu ostatniego, w którym wykonuje ona swoją misję. Badane są wszystkie podzespoły rakiety, w tym silnik. W przypadku silnika napędzanego stałym materiałem pędym diagnozowanie sprowadza się do badania stanu lasek prochowych i niezależnie komory spalania (tab.1).

Kontrola stanu lasek prochowych jest konieczna ze względu na to, że:

- a) Laski ładunku muszą mieć znaczną wytrzymałość mechaniczną. Pękanie lasek pod działaniem ciśnienia, przeciążeń czy drgań zwiększałoby powierzchnię spalania, wzrost ciśnienia w komorze i rozerwanie silnika.
- b) Poszczególne laski powinny mieć absolutnie jednakowe właściwości, gdyż różnice wywoływałyby różne ciągi identycznych konstrukcyjnie silników.

Tablica 1. Etapy diagnozowania silników raketowych.

PROJEKTOWANIE	WYTWARZANIE	EKSPLLOATOWANIE
wybór rodzaju silnika	badanie podzespołów	badania okresowe
wybór rodzaju paliwa	badanie materiałów	przedłużanie rezerwu
wybór składu chemicznego	badanie wyrobów	badanie przed startem
wybór kształtu lasek		
wybór kształtu komory		
testy na hamowni		
testy w czasie lotu		

2.1. Wady technologiczne lasek prochowych

Technologia ładunków paliwowych ma wiele podobieństwa do technologii wyrobów z mas plastycznych. Głównymi metodami produkcji są: prasowanie, wytłaczanie i odlewanie. Głównym czynnikiem utrudniającym procesy technologiczne ładunków paliwowych jest niedopuszczalność wysokich temperatur, a w konsekwencji niecałkowita płynność formowanej masy. Efektem tego jest niedokładne wypełnienie formy i pozostawienie pęcherzyków powietrza.

2.1.1. Prasowanie

Jak wykazały liczne badania nad prasowaniem stałego polimeru z wypełniaczem w niskich temperaturach, bez osiągnięcia stanu płynności lepszycza, prasowanie nie może zapewnić żądanej jakości wyrobu. W czasie takiego prasowania połączenie polimeru z wypełniaczem (kryształ substancji utleniającej) jest niedostateczne; oprócz składników podstawowych zostaje tam „uwięzione” powietrze, które w postaci szczelinowych mikroporów osłabia cały wyrób. Przy spalaniu takich ładunków paliwowych następuje pokruszenie ładunku i wybuch silnika.

2.1.2. Wytłaczanie

Stosowane do paliw koloidalnych i niektórych złożonych. W laskach wytłaczanych występują najczęściej wady w formie rozwarstwień masy paliwa równoległych do osi ładunku i wtrąceń ciał obcych, głównie metalicznych. W laskach składowanych w warunkach normalnych występują pęknięcia masy paliwa.

Wykrywać należy:

- rozwarstwienia masy paliwa o sumarycznej powierzchni od 250 mm²;
- rozwarstwienia o długości powyżej 30 mm;
- rozwarstwienia o szerokości od 3 mm;
- wtrącenia o powierzchni większej od 60 mm²;
- wszystkie pęknięcia masy paliwa.

2.1.3. Odlewanie

W przypadku paliw złożonych produktem wyjściowym procesu technologicznego jako składnik palny jest zwykle monomer (ciecz) z substancją utleniającą (stała sproszkowana masa krystaliczna), które wymieszane ze sobą odlewa się do form, gdzie zachodzi polimeryzacja. Ciało stałe dodawane do cieczy jest niejednorodne pod względem wielkości kryształów i ciężaru właściwego dlatego podczas polimeryzacji mogą zajść następujące, niepożądane zjawiska:

- rozdzielenie grubych kryształów na dnie od drobnych w górnej części formy;
- rozdzielenie substancji o większej gęstości od substancji o małej gęstości;
- większe zagęszczenie na dnie formy i mniejsze w górnej części.

W laskach odlewanych wykrywać należy:

- pęcherze pojedyncze lub skupiska o sumarycznej powierzchni od 200mm²;
- wtrącenia ciał obcych o wymiarach większych od 5 mm²;
- wszystkie pęknięcia masy paliwa.

2.2. Wady eksploatacyjne lasek prochowych

Eksploatacja silników raketowych sprowadza się do ich przechowywania. Wynika stąd, że powstałe wady można podzielić na:

- mechaniczne spowodowane niewłaściwym postępowaniem;
- chemiczne spowodowane niewłaściwym przechowywaniem;
- chemiczne spowodowane starzeniem;
- mechaniczne spowodowane starzeniem.

2.2.1. Wady mechaniczne

Wady mechaniczne spowodowane niewłaściwym postępowaniem mają charakter uszkodzeń powierzchni laski lub odkształceń. Są one łatwo diagnozowalne metodami organoleptycznymi. Znacznie większym problemem są wady mechaniczne spowodowane starzeniem. Są to najczęściej:

- pęknięcia i wykruszenia masy paliwa;
- rozwarstwienia masy paliwa;
- odklejenie warstwy inhibitora.

2.2.2. Wady chemiczne

Wady chemiczne powstałe w czasie przechowywania są wynikiem reakcji zachodzących w masie paliwa w czasie przechowywania. Niewłaściwe warunki najczęściej przyspieszają te procesy.

Najczęstszymi wadami są:

- zwiększenie zawartości wody i części lotnych (powyżej 0,7%);
- zmniejszenie trwałości chemicznej;
- zmniejszenie stałości;
- obniżenie kaloryczności (ciepła spalania);
- obniżenie prędkości palenia.

Trwałość chemiczna paliw jest oznaczana metodą Bergmanna-Junka jako ilość cm^3 tlenków azotu wydzielonych w czasie badania w przeliczeniu na 1g paliwa. Natomiast stałość określa się procentem ubytku masy paliwa po 48 godzinach ogrzewania w temperaturze 75°C . Obniżenie kaloryczności może spowodować zmianę impulsu całkowitego i siły ciągu. Jednak najistotniejsza jest zmiana prędkości spalania i jej liniowość wpływająca bezpośrednio na dynamikę rakiety.

Nadmienić należy znaczący wpływ rodzaju paliwa (homogeniczne lub heterogeniczne) na powstawanie wad.

3. STAN OBECNY DIAGNOSTYKI LASEK PROCHOWYCH

Obecnie badania lasek prochowych można podzielić na niszczące i nieniszczące. Badania niszczące są prowadzone okresowo na losowo wybranych egzemplarzach z danej partii, najczęściej po upływie gwarantowanego przez producenta okresu eksploatacji. Badania nieniszczące są zazwyczaj badaniami poprodukcyjnymi, mającymi zdecydować o przydatności danej partii do eksploatacji.

3.1. Badania niszczące

Są to badania czasochłonne i wymagające specjalistycznego wyposażenia, a więc bardzo kosztowne. Obejmują one zazwyczaj:

- przegląd wizualny;
- oznaczenie zawartości wody i substancji lotnych;
- oznaczenie gęstości;
- oznaczenie kaloryczności;
- oznaczenie trwałości chemicznej;
- oznaczenie stałości metodą ubytku masy;
- oznaczenie liniowej prędkości spalania.

3.2. Badania nieniszczące

Są prowadzone metodami wykorzystującymi promienie Roentgena ($\lambda = 10^{-4} \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$), lub promienie γ ($\lambda < 10^{-4} \mu\text{m}$), a więc również kosztownymi i czasochłonnymi. Pozwalają na wykrycie większości wad mechanicznych, które dominują na tym etapie. Wyróżnić można metodę radiograficzną i metodę radiometryczną.

3.2.1. Metoda radiograficzna badania lasek prochowych [2]

Na wykrycie i określenie wady w badanej lasce składa się szereg pracochłonnych operacji:

- przygotowanie laski do ekspozycji;
- wykonanie ekspozycji;
- obróbka fotochemiczna napromieniowanego filmu;
- interpretacja wykonanego radiogramu.

Wykrywalność wad jest znacznie lepsza, niż żądają tego odpowiednie wymagania techniczne. Badanie wymaga bardzo precyzyjnego usytuowania laski na filmie. Pęknięcia są wykrywane w zakresie kąta 8° a wymiar najmniejszego wykrywalnego pęknięcia jest rzędu $1 \times 3 \text{ mm}$.

3.2.2. Metoda radiometryczna badania lasek prochowych [3]

Metoda radiometryczna kontroli wyrobów przemysłowych polega na pomiarze gęstości strumienia promieniowania γ przechodzących przez badany wyrób. Zastosowanie tej metody

do kontroli stałego paliwa raketowego jest znane, np. w firmie Allis Chalmers [4] od dość dawna.

Z doświadczeń wynika że metodą radiometryczną możliwe jest wykrywanie pęknięć o szerokości 0,3 – 0,4 mm i głębokości 15 – 20 mm.

4. TOMOGRAFIA PROCESOWA

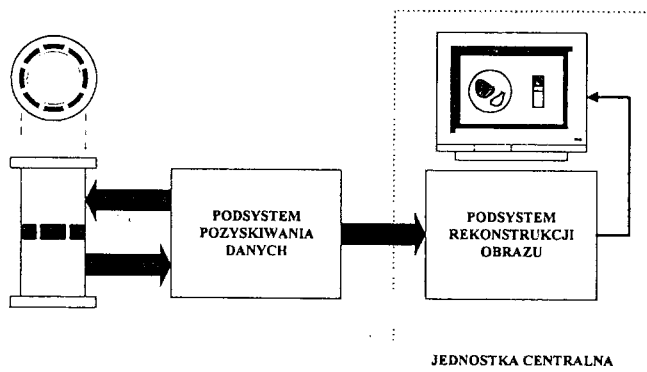
Nowe perspektywy przed diagnozowaniem lasek prochowych otwiera tomografia procesowa [5]. Jest to metoda badania polegająca na pozyskiwaniu obrazu warstwowego w różnych płaszczyznach lub kolejnych chwilach czasu, na podstawie pomiarów w płaszczyznach prostopadłych. Z założenia są to pomiary nieinwazyjne, a często również bezkontaktowe.

4.1. System tomografii procesowej

Typowy system tomografii procesowej składa się z następujących elementów (rys.1):

- czujnika;
- podsystemu pozyskiwania danych;
- podsystemu rekonstrukcji obrazu i wyświetlania.

Jeżeli chcemy otrzymać obraz w różnych płaszczyznach niezbędne jest urządzenie do przesuwania medium roboczego wzdłuż czujnika, z wymaganą dokładnością i możliwością odczytu położenia przez jednostkę centralną.



Rys.1. Typowy system tomografii procesowej

4.2. Techniki tomografii procesowej

W zależności od rodzaju badanego medium, oraz od charakteru pozyskiwanych o nim informacji, tomografia wykorzystuje pomiary różnych wielkości fizycznych. Daje to możliwość korzystania z różnorodnych czujników i związanych z nimi technik tomografii. Różnią się one między sobą zarówno dokładnością odtworzenia obrazu, częstotliwością pomiarów i ceną systemu pomiarowego. Do diagnozowania lasek prochowych można użyć, ze względu na właściwości materiału, następujących technik (tab.2):

- pojemności elektrycznej (Electrical Capacitance Tomography – ECT);
- indukcji elektromagnetycznej (Electromagnetic Inductive Tomography – EMT);
- mikrofalowej (Microwave Tomography – MWT);
- promieniowania γ (Gamma-ray Tomography – GRT);
- promieniowania X (X-ray Tomography – XRT);
- rezonansu magnetycznego (Nuclear Magnetic Resonance Imaging – NMR).

Tablica 2. Porównanie technik tomografii procesowej.

	ECT	EMT	MWT	GRT	XRT	NMR
Prędkość (obrazy/s)	100	100	100	30	0,3	25
Rozdzielczość	5 – 10 % \varnothing	5 – 10 % \varnothing	$\lambda/2$ *	1 mm	< 1 mm	10 – 40 μm
Grubość warstwy	$\varnothing/10$	$\varnothing/5$	$\varnothing/10$	< 5 mm	< 5 mm	< 1 mm
Koszt	niski	niski	średni	wysoki	wysoki	b. wysoki
Główne publikacje	[6]	[7]	[8]	[9]	[10, 11]	[12, 13, 14]

* - $\lambda/10$ przy wykorzystaniu nieliniowej rekonstrukcji obrazu

\varnothing - średnica układu pomiarowego

λ - długość fali elektromagnetycznej (0,5mm – 1m)

4.3. Tomografia pojemnościowa

Czujnik w systemie tomografii procesowej złożony jest z elektrod zamontowanych na zewnątrz. Elektrody wykonane są z blachy miedzianej i umieszczone w obudowie zapewniającej sztywność konstrukcji i ekranowanie wpływu zewnętrznych pól elektromagnetycznych. Podsystem pozyskiwania danych zapewnia wybieranie sekwencyjne odpowiednich par elektrod i przetwarzanie mierzonego sygnału na sygnał cyfrowy proporcjonalny do pojemności elektrycznej między wybranymi elektrodami. Zbiór uzyskanych wyników pomiarów pojemności pomiędzy możliwymi parami elektrod przesyłany jest do podsystemu rekonstrukcji obrazu. Wykorzystując jeden z algorytmów rekonstrukcji [15] otrzymuje się obraz przedstawiający rozkład stałych dielektrycznych w przekroju badanego medium. Zależności między stałymi dielektrycznymi, rozkładem przestrzennym występujących stałych dielektrycznych i wynikową pojemnością powiązane są równaniami Maxwella. Natomiast rozkład stałej dielektrycznej jest związany z rozkładem przestrzennym ładunku równaniem Poissona.

Dokładność odtworzenia rzeczywistości zależy od:

- liczby elektrod w czujniku;
- grubości warstwy równej długości elektrod;
- odległości między elektrodami czyli średnicy układu pomiarowego;
- częstotliwości przełączeń;
- algorytmu rekonstrukcji obrazu.

W obecnie konstruowanych tomografach stosuje się czujniki składające się z sześciu, ośmiu, dwunastu, szesnastu a nawet trzydziestu dwu elektrod. Ze wzrostem ich liczby zwiększa się rozdzielczość (większa liczba niezależnych pomiarów), ale pojawia się problem malenia poziomu sygnału i wzrostu efektu krawędzi. Na poziom sygnału wpływa również odległość między elektrodami i ich długość. Jednak zwiększanie długości powoduje również malenie rozdzielczości ze względu na uśrednianie wartości stałej dielektrycznej. Skonstruowanie odpowiednich elektrod jest więc wynikiem przyjętego kompromisu.

Przy wszystkich stosowanych metodach pomiarowych dokładność rośnie z maleniem częstotliwości przełączeń co jest związane z prędkością zmian zachodzących w badanym medium oraz możliwościami fizycznymi uzyskania wymaganej częstotliwości elektronicznych przełączników.

Do rekonstrukcji obrazu stosuje się różne algorytmy rekonstrukcji (back projection, iteracyjny, analityczny) lub sieci neuronowe. Różnią się one zarówno prędkością działania jak i dokładnością. Najczęściej stosowanym i stosunkowo prostym jest algorytm back projection [5]. Jego główną zaletą jest duża prędkość działania i w wielu zastosowaniach wystarczająca dokładność.

5. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W laboratoriach Zakładu Eksploatacji i Diagnostyki Technicznej WAT i Instytutu Przemysłu Organicznego przeprowadzono szereg eksperymentów w celu stwierdzenia przydatności tomografii procesowej do diagnozowania silników raketowych. Do badań zastosowano tomograf, opracowany w University of Manchester Institute of Science and Technology, typu PTL300-TP-G firmy Process Tomography LTD. Używano dwunastoelektrodowych czujników o długościach elektrod 80 i 25 mm wykonanych w tym celu. Do rekonstrukcji obrazu stosowano zmodyfikowany algorytm back projection a uzyskane wyniki zobrazowywano w programie Microsoft Excel.

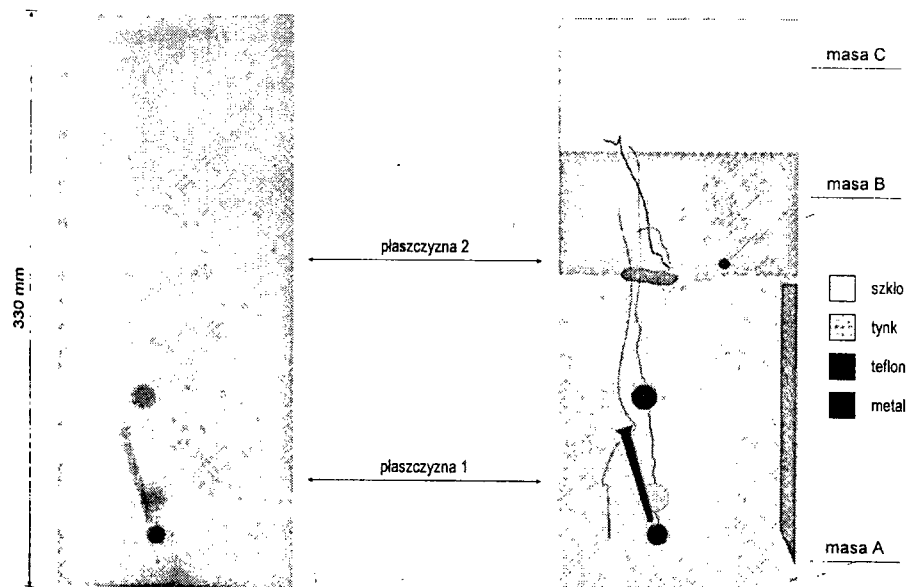
5.1. Badanie lasek prochowych

W pierwszy etapie poddano badaniu laskę wykonaną ze złożonego paliwa, którego podstawowymi składnikami był:

- nadchloran amonu;
- pył aluminium (~ 10%);
- lepiszcze polimerowe.

Niezbędną do badania kalibrację przeprowadzono na lasce wzorcowej, z tego paliwa (masa A), odlanej bez zanieczyszczeń i wtrąceń.

Badana laska (rys.2) zawierała szereg celowo wprowadzonych zanieczyszczeń znajdujących się w oznaczonych miejscach. Były to kulki i płytki wykonane ze stali, ołowiu, szkła i teflonu. Ponadto część laski wykonano z materiału o zmienionym składzie (masa B).



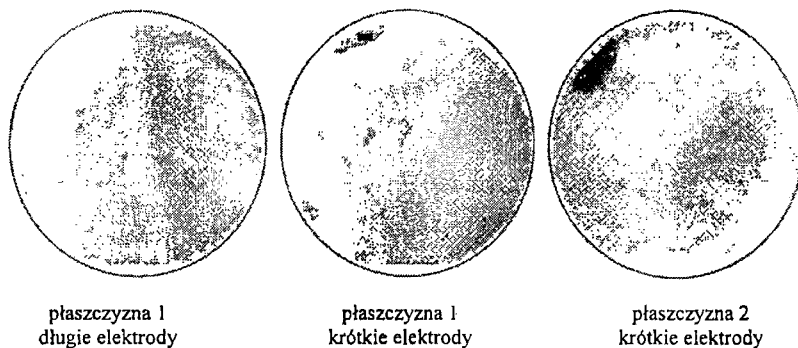
Rys.2. Zdjęcie rentgenowskie i przekrój badanej laski

Zarejestrowano (rys.3) obrazy w dwóch płaszczyznach przechodzących przez różne masy. W płaszczyźnie 1 pomiary wykonano krótkimi (25 mm) i długimi (80 mm) elektrodami. Na obrazach wyraźnie widać obszary o niższej i wyższej wartości stałej dielektrycznej niż stała masy prochowej.

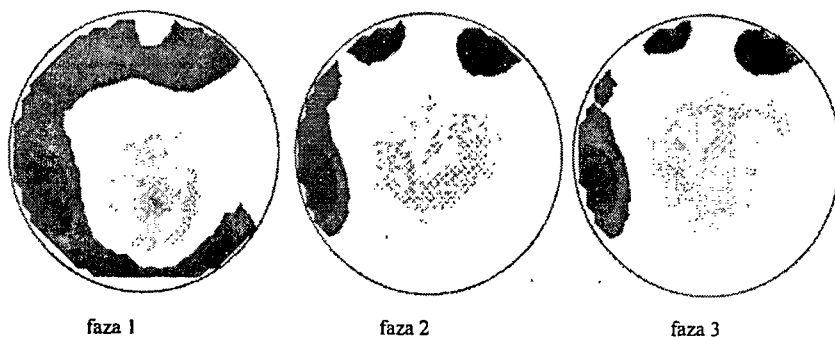
5.2. Badanie spalania masy pirotechnicznej

W następnym etapie badań obserwowano przy pomocy tomografu proces spalania masy pirotechnicznej. Spalano pręt, pokryty inhibitorem, o przekroju kwadratu 10 mm × 10 mm, zawierający:

- nadchloran amonu;
- pył aluminium i cynku;
- lepiszcze kauczukowo-żywicowe.



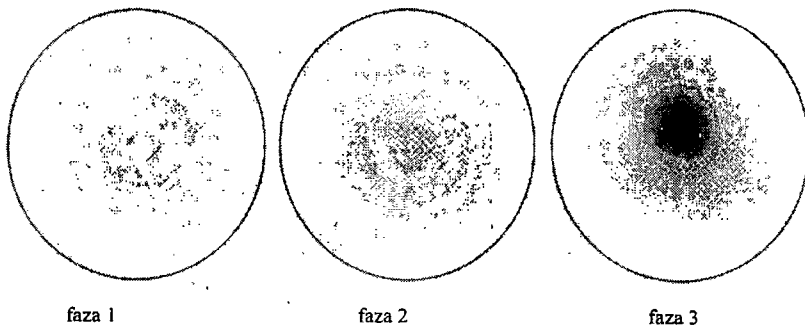
Rys.3. Tomogramy lasek prochowych



Rys.4. Tomogramy spalania masy pirotechnicznej

5.3. Badanie płomienia

Z kolei poddano obserwacji płomień laboratoryjnego palnika gazowego. Zbadano możliwość obserwacji jego temperatury i przemieszczania względem osi czujnika. Wyniki (rys.5) potwierdzają możliwość obserwacji i oceny ilościowej.



Rys.5. Tomogramy płomienia palnika

6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania potwierdziły przypuszczenia o przydatności tomografii procesowej do diagnozowania lasek prochowych na trzech etapach.

Na etapie kontroli poprodukcyjnej tomografia pozwala na wykrycie: zmian struktury masy, wtrąceń i ciał obcych, defektów, pęcherzy powietrza i rozwarstwień. Na obecnym etapie badań ocenę stanu należy traktować jako jakościową a nie ilościową. Dalsze perspektywy stoją przed zwiększeniem dokładności poprzez:

- zastosowanie zasilanego (sterowanego) ekranu podzielonego analogicznie do elektrod;
- ulepszenie algorytmu rekonstrukcji (zwiększenie rozdzielczości kosztem prędkości);
- zwiększenie liczby elektrod i/lub ich skrócenie;
- zastosowanie sieci neuronowych do rekonstrukcji obrazu;
- analizę przestrzenną redukującą efekt warstwy.

Inną drogą są próby wykorzystania tomografii mikrofalowej i indukcji elektromagnetycznej. Wykrywając przestrzenny rozkład innych właściwości badanego medium metody te mogą dostarczyć uzupełniających informacji.

Obecnie największe perspektywy daje tomografia pojemnościowa ze względu na najniższy stosunek kosztów do dokładności odtworzenia obrazu.

Podobne rezultaty może przynieść zastosowanie tomografii na etapie eksploatacji.

Na etapie projektowania można będzie używać tomografii do obserwacji spalania pojedynczych lasek lub obserwacji procesów zachodzących w silniku raketowym.

Warunkiem jest rozwiązanie konstrukcji elektrod, które musiałyby być odporne równocześnie na bardzo wysokie temperatury i wysokie ciśnienie.

W dalszej perspektywie jest montaż czujników pomiarowych tomografu wielowarstwowego w silniku raketowym. Umożliwi to równoczesną obserwację kilku przekrojów komory spalania i zachodzących w niej zjawisk. Największymi problemami tego zagadnienia są:

- wysokie temperatury;
- duża prędkość zachodzących zjawisk;
- konieczność transmisji danych z rakiety na ziemię;
- interpretacja obserwowanych obrazów.

LITERATURA

- [1] Tomkiewicz K.: *Rakieta jako obiekt diagnozowania*. VI Konferencja Naukowa „Sterowanie i regulacja w radiolokacji i obiektach latających”, 1995, tom 2, str. 163-170
- [2] Bończyk J.: *Badanie wad strukturalnych elementów stałych materiałów miotających*. Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, Zeszyt 26/1980, WITU, str. 39-48
- [3] Godlewski Z., Bończyk J.: *Kontrola radiometryczna stałych paliw raketowych*. Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, Zeszyt 26/1980, WITU, str. 69-83
- [4] Rumiancew S. W.: *Defektoskopia radiologiczna*. WNT, Warszawa 1972.
- [5] Płaskowski A., Beck M.S., Byars M., Płaskowski W.: *Tomografia procesowa: zastosowania do wizualizacji, projektowania i sterowania procesami wielofazowymi*. Referaty Konferencji AUTOMATION'97, Warszawa 1997 t.2, str. 367-374
- [6] Yang W.Q., Stott A.L., Beck M.S., Xie C.G.: *Development of capacitance tomographic imaging systems for oil pipeline measurements*. 1995, Rev. Sci. Instrum., 66(8), pp 4326-4332
- [7] Peyton A.J.: *Mutual inductance tomography*. 1995, Process Tomography – principles, techniques and applications., eds Williams & Beck, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp 85-100
- [8] Bolomey J.Ch.: *Microwave Sensors*. 1995, Process Tomography – principles, techniques and applications. eds Williams & Beck, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp 151-166
- [9] Johansen G.A., Frøystein T., Hjertaker B.T., Isaksen Ø., Olsen Ø., McKibben B., Valle A., Hammer E.A.: *Current status of the Bergen dual mode tomographic project*. 1995, Process Tomography-95 implementation for industrial processes, UMIST, Manchester. pp 161-165
- [10] Harding G., Kosaneski J.: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1989, A280, pp517-528
- [11] Toye D., Marchot P., Crine M., L'Homme G.: *Analysis of a liquid flow distribution in a trickle bed reactor*. 1995, Frontiers in Industrial Process Tomography, Eds Scott, DM & Williams, RA, Engineering Foundation, pp 185-196
- [12] Gladden L.F.: *Industrial Applications of NMR Imaging in Process Tomography – a strategy for industrial exploitation*, UMIST, Manchester, pp 466-477
- [13] Gibbs S.J., Newling B., Hall L.D., Haycock D.E., Frith W.J., Ablett S.: *Magnetic resonance velocity*, Frontiers in Industrial Process Tomography, 1995, Eds Scott, DM & Williams, RA, Engineering Foundation, pp 47-58
- [14] Gibbs S.J., Hall L.D.: *Magnetic Resonance flow imaging for rheometry of complex fluids*. Process Tomography – 95 implementation for industrial processes, 1995, UMIST, Manchester, pp. 474 – 483
- [15] Øyvin I.: *A review of reconstruction techniques for capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol. 7 (1996) pp 325-337