

ANALIZA METOD BADANIA FIZYKOCHEMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI STAŁYCH PALIW RAKIETOWYCH NA PODSTAWIE POLSKICH STANDARDÓW

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę oraz dyskusję metod oznaczania/określania i oceny fizykochemicznych właściwości homogenicznych i heterogenicznych stałych (kompozytowych/złożonych) paliw raketowych na podstawie aktualnych polskich dokumentów standaryzacyjnych bezpośrednio dotyczących stałych paliw raketowych, tj. norm obronnych (przeznaczonych do obowiązkowego stosowania w SZ RP) oraz polskich norm (przeznaczonych do nieobowiązkowego stosowania). Normy obronne opisują przede wszystkim metody badania mechanicznych/wytrzymałościowych właściwości stałych paliw raketowych, typowych dla tworzyw sztucznych, zaś polskie normy obejmują w znacznej mierze badania fizykochemicznych, zwłaszcza termochemicznych parametrów stałych paliw raketowych, takich jak stałość termiczna, wrażliwość na tarcie i uderzenie oraz liniowa szybkość spalania. Wszystkie ww. właściwości charakteryzują poziom bezpieczeństwa eksploatacji i niezawodność działania stałych paliw raketowych. Z powyższej analizy i dyskusji wynika pilna potrzeba kontynuowania prac analityczno-badawczych, w tym prac standaryzacyjnych, w celu osiągnięcia postępu w zakresie ustalenia, specyfikacji oraz wyboru metod badawczych a także kryteriów oceny jakości stałych paliw raketowych rozumianych jako materiał wysokoenergetyczny o ustalonym składzie chemicznym oraz jako ładunek o określonym, zaprojektowanym kształcie i strukturze/konstrukcji.

AN ANALYSIS OF TEST METHODS ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF SOLID ROCKET PROPELLANTS ON THE BASIS OF THE POLISH STANDARDS

Abstract: In this paper it was presented an analysis and discussion on test methods for determination and assessment of physicochemical properties of homogeneous and heterogeneous (composite) solid rocket propellants on the basis of currently valid Polish standardizing documents directly dealing with solid rocket propellants i.e. Defense Standards (for obligatory usage in Polish Military Forces) and Polish Standards (for not obvious application). Defense Standards describe first of all test methods on mechanical/strength properties of solid rocket propellants, typical for plastics, and Polish Standards include in considerable degree testing of solid rocket propellant physicochemical properties, esp. thermochemical ones, such as thermal stability, sensitivity to friction and impact and linear burning rate. All above properties determine hazard level and operation reliability in life cycle of solid rocket propellant. From above presented analysis and discussion, it appears urgent necessity to continue and develop analytical and research works, incl. standardizing ones, in order to achieve progress in determination, specification and selection of test methods incl. new ones for quality assessment of solid rocket propellants understood as materials of strictly determined chemical composition and as grains (high-energetic loads) of designed shapes and structures/constructions.

1. Wstęp

W ramach prac analityczno-badawczych dokonano przeglądu, analizy i oceny aktualnych metod badania stałych paliw raketowych, prezentowanych w polskich dokumentach standaryzacyjnych, takich jak normy obronne oraz polskie normy. Prace te miały na celu określenie przydatności i perspektyw stosowania standardowych metod badania stałych paliw raketowych w SZ RP. Pomocne w tym względzie jest odniesienie ww. polskich dokumentów standaryzacyjnych do standardów NATO tj. porozumień standaryzacyjnych (STANAG-ów) [13, 14, 23, 24] oraz publikacji sojuszniczej z zakresu uzbrojenia AOP-7 [1], obejmujących badania homogenicznych i heterogenicznych paliw raketowych.

2. Przegląd, analiza i ocena metod badania stałych paliw raketowych według norm obronnych

Normy obronne dotyczące badań stałych paliw raketowych przedstawiają metody badań określające przede wszystkim mechaniczne właściwości paliw [2-10]. Metody dotyczące badań właściwości mechanicznych opisane są w normach obronnych – arkuszach, posiadających wspólne oznaczenie „NO-91-A523” [2-9], odnoszących się do postanowień ogólnych [2], warunków wykonania, termostatowania i badania próbek [3], oznaczania cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu [4], statycznym ściskaniu [5], oznaczania modułu sprężystości przy statycznym ściskaniu i rozciąganiu [6], oznaczania udarności metodą Charpy’ego [7], oznaczania dynamicznego modułu sprężystości poprzecznej i logarytmicznego dekrementu tłumienia za pomocą wahadła skrętnego [8] a także oznaczania statycznej temperatury zeszklenia za pomocą konsystometru Hoesppler’a [9]. Powyższe parametry mechaniczne/wytrzymałościowe przydatne są jako wstępne dane przy projektowaniu raketowych układów napędowych, zwłaszcza w zakresie wyboru paliwa. Wśród norm obronnych istnieje tylko jedna norma [10] dotycząca metod badania innych niż mechaniczne, właściwości stałych paliw raketowych, a mianowicie – trwałości chemicznej określanej na podstawie ilości tlenków azotu wydzielanych podczas termicznego rozkładu paliwa, zachodzącego w temperaturze $(120 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$ przez 4 h, lub na podstawie zmian zawartości (tzw. „ubytku”) stabilizatora wyjściowego – centralitu-I, w wyniku ogrzewania paliwa w temperaturze $(120 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$ w ciągu 1 h. Norma ta ma ograniczony zasięg, ponieważ dotyczy stałych homogenicznych paliw raketowych na bazie nitrocelulozy, zawierających określony stabilizator powstrzymujący ich fizykochemiczny rozkład.

Norma obronna NO-91-A523-1 [2], w ramach postanowień ogólnych, oprócz podania docelowej struktury normy arkuszowej NO-91-A523 i definicji stałych paliw raketowych - homogenicznych i heterogenicznych, jako materiałów oraz ładunków napędowych, zawiera podstawowe informacje dotyczące wykonywania próbek do badań a także określa ogólne zasady bezpieczeństwa, które powinny być przestrzegane przy stosowaniu badań, zwłaszcza na etapie przygotowywania próbek do badań. Przede wszystkim zaleca wykonanie próbek z ładunków napędowych metodą obróbki mechanicznej poprzez cięcie, toczenie i frezowanie. W przypadku ładunków o małych gabarytach i/lub złożonych kształtach dopuszcza metodę ich otrzymywania za pomocą wyłaczania (homogeniczne paliwa raketowe) lub odlewania (heterogeniczne paliwa raketowe).

Z powyższego wynika, że może pojawić się istotne ograniczenie w wykonaniu próbek z ładunków napędowych tj. takich, którym skończył się okres gwarancyjny, posiadających małe wymiary i/lub skomplikowane kształty, których nie można poddawać innej niż mechanicznej, obróbce technologicznej, aby nie „zaburzyć” fizykochemicznych zmian, które zaszły w paliwach podczas długoletniej eksploatacji, a które należy zbadać.

Norma obronna NO-91-A523-2 [3] uściśla warunki wykonywania próbek do badań, podaje warunki ich kondycjonowania/termostatowania dla poszczególnych metod badań właściwości mechanicznych, opcjonalnie w temperaturach $(-40 \pm 2) ^\circ\text{C}$, $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ i $(50 \pm 2) ^\circ\text{C}$ przez co najmniej 5 h w każdej temperaturze, zazwyczaj przy względnej wilgotności atmosfery komory klimatycznej (termostatu) wynoszącej $(65 \pm 5) \%$. Skrajne zakresy temperaturowe kondycjonowania próbek stałych paliw rakietowych odpowiadają w znacznym stopniu skrajnym temperaturom eksploatacji – podczas transportu i przechowywania wojskowych środków materiałowych, w tym środków bojowych, a zatem również układów napędowych pocisków rakietowych i samych ładunków napędowych – paliw rakietowych, odpowiednio w strefie klimatycznej Polski, obejmującej dwie kategorie klimatyczne o niskich temperaturach tj. kategorię klimatyczną „średnio zimną”, oznaczoną symbolem „C1” kategorię klimatyczną „zimną”, oznaczoną symbolem „C2” oraz jedną kategorię klimatyczną umiarkowanie ciepłą, oznaczoną symbolem „A3” [11, 12]. Ponadto norma obronna NO-91-A523-2 [3] określa wymagania w zakresie kontroli jakości próbek paliw wykonanych metodą wytłaczania i odlewania poprzez sprawdzenie wzrokowe oraz za pomocą badań rentgenograficznych, według których próbki przeznaczone do badań nie powinny mieć pęcherzy, rys, pęknięć, rozwarstwień, wżerów oraz niezgodności z wymaganymi wymiarami, ani innych widocznych wad.

Norma obronna NO-91-A523-3 [4] określa metodę oraz warunki oznaczania następujących mechanicznych właściwości stałych paliw rakietowych przy statycznym rozciąganiu ich próbek w wyniku działania na nie wzrastających sił rozciągających przy założonej prędkości odkształcania wynoszącej $(50 \pm 5) \text{ mm/min}$ i pomiarze powstającego odkształcenia:

- wytrzymałość na rozciąganie (maksymalne naprężenie rozciągające);
- naprężenie zrywające;
- granica plastyczności;
- umowna granica plastyczności, określana, gdy paliwo nie ma wyraźnej granicy plastyczności, wyznaczona graficznie z krzywej wykresu „obciążenie – wydłużenie względne”, jako punkt przecięcia krzywej z prostą równoległą do początkowej, liniowej części wykresu, przechodzącą przez punkt na osi wydłużenia względnego, odpowiadającemu 2 % wydłużeniu;
- naprężenie przy umownej granicy plastyczności;
- wydłużenie względne przy maksymalnym naprężeniu;
- wydłużenie względne przy zerwaniu;
- wydłużenie względne przy granicy plastyczności.

Norma ta przewiduje dwa typy próbek w kształcie „wiosełek”, o zróżnicowanych wymiarach: typu 1-go o długości 150 mm, posiadających odcinek pomiarowy długości ok. 50 mm oraz typu 2-go o długości 115 mm i odcinku pomiarowym długości ok. 25 mm, przy czym dla paliwa wykazującego wydłużenie względne przy zerwaniu większe niż 15 %, stosowane są próbki mniejsze (typu 2-go). Ponadto, gdy nie jest możliwe uzyskanie z ładunku paliwa próbek typu 1-go lub 2-go, można zastosować próbki o podobnym kształcie do próbek typu 1-go, lecz wymiarach proporcjonalnie zmniejszonych w skali 1:2 lub 1:5, przy czym stosunek prędkości rozciągania do długości odcinka pomiarowego próbki powinien być identyczny, jak w przypadku próbki typu 1-go.

Norma obronna NO-91-A523-4 [5] określa metodę oraz warunki oznaczania następujących mechanicznych właściwości stałych paliw rakietowych przy statycznym ścisaniu ich próbek w kształcie walca o średnicy $(10 \pm 0,5) \text{ mm}$ i wysokości $(15 \pm 0,5) \text{ mm}$, w wyniku działania na nie wzrastających sił ścisających przy założonej prędkości odkształcania wynoszącej $(10 \pm 1) \text{ mm/min}$ i pomiarze powstającego odkształcenia do chwili pojawienia się na próbce pierwszego pęknięcia lub do chwili spadku obciążenia wywołanego

przekroczeniem granicy wytrzymałości, jednak nie dłużej niż do osiągnięcia odkształcenia względnego wynoszącego 50 %:

- wytrzymałość przy ściskaniu (maksymalne naprężenie ściskające);
- naprężenie przy zniszczeniu;
- granica plastyczności;
- umowna granica plastyczności, określana analogicznie jak w przypadku rozciągania;
- naprężenie przy umownej granicy plastyczności;
- odkształcenie względne przy maksymalnym naprężeniu;
- odkształcenie względne przy zniszczeniu;
- odkształcenie względne przy granicy plastyczności.

Norma obronna NO-91-A523-5 [6] określa metody oraz warunki oznaczania modułu sprężystości przy statycznym ściskaniu i rozciąganiu. Moduł sprężystości wyrażony jest stosunkiem przyrostu naprężenia i odpowiadającemu mu przyrostowi odkształcenia względnego, wynoszącego 0,1 % i 0,3 %, zarówno w przypadku rozciągania jak i ściskania, przy czym szybkość rozciągania i ściskania wynosi ok. 1 mm/min. Próbki przeznaczone do rozciągania mają kształt próbek typu 1-go, opisanych w normie obronnej NO-91-A523-3 [4], zaś przeznaczone do ściskania, mają kształt walca o średnicy ($6 \pm 0,3$) mm i wysokości ($25 \pm 0,5$) mm.

Norma obronna NO-91-A523-6 [7] podaje metody oraz warunki oznaczania uderzeniowości metodą Charpy'ego, podpartych obustronnie prostopadłościennych próbek stałych paliw rakietowych z karbem i bez karbu oraz walcowych bez karbu, poprzez ich złamanie jednym uderzeniem młota wahadłowego, w celu oceny kruchości lub plastyczności. Biorąc pod uwagę poprzeczne usytuowanie próbki paliwa rakietowego względem ostrza młota wahadłowego oraz występowanie rzeczywistych, znacznych obciążeń dynamicznych działających wzdłuż osi ładunku paliwa, zwłaszcza podczas jego zapłonu i startu pocisku rakietowego, wydaje się zasadnym rozszerzenie badań uderzeniowości stałych paliw rakietowych o badania poprzez ich obciążanie udarowe wzdłuż osi ładunku paliwa.

Norma obronna NO-91-A523-7 [8] przedstawia dwie metody oraz warunki oznaczania liniowych, dynamicznych, mechanicznych charakterystyk stałych paliw rakietowych-dynamicznego modułu sprężystości poprzecznej, czyli modułu ścinania przy skręcaniu tj. modułu zachowawczego, a zatem składowej rzeczywistej modułu zespolonego oraz logarytmicznego dekrementu tłumienia podczas skręcania za pomocą wahadła skrętnego, w zależności od temperatury, przy małych odkształceniach, w zakresie częstotliwości od 0,1 Hz do 10 Hz, w celu określenia odporności próbek paliw na działanie drgań. Drgania z powyższego zakresu częstotliwości występują dosyć powszechnie podczas transportu, przemieszczania i prac związanych z przygotowaniem pocisków rakietowych do odpalenia z wyrzutni. Moduł zachowawczy równy jest stosunkowi dynamicznego naprężenia do dynamicznego odkształcenia materiału lepkosprężystego (jakim jest zazwyczaj stałe paliwo rakietowe w zakresie temperatur eksploatacji) poddanego drganiom. Moduł ten jest proporcjonalny do maksymalnej energii zgromadzonej w materiale paliwa podczas jednego okresu obciążenia i wyraża sztywność materiału. Logarytmiczny dekrement tłumienia określony jest jako logarytm naturalny ilorazu dwu amplitud następujących po sobie w tym samym kierunku, stanowiąc miarę tłumienia materiału lepkosprężystego. W ramach obu metod, próbka paliwa rakietowego o jednolitym przekroju jest zamocowana między dwoma uchwytami, z których jeden jest nieruchomy, zaś drugi podłączony za pomocą pręta z tarczą stanowiącą element bezwładnościowy. Koniec próbki połączony z tarczą pobudzany jest za pomocą urządzenia wzbudzającego, wywołującego drgania skrętne tłumione o amplitudzie swobodnie zanikającej. Badania mogą być wykonywane w ustalonej, stałej temperaturze albo w zakresie temperatur od -50 °C do 100 °C. Podczas badań mierzona jest częstotliwość i zanikająca amplituda skręcanej (drgającej) próbki. Urządzenie wzbudzające drgania skrętne

powinno umożliwić doprowadzenie do wahadła skrętnego takiego impulsu skrętnego, aby początkowe drgania wahadła nie przekraczały kąta 3 stopni w żadnym kierunku. Mimo, iż norma NO-91-A 523-7 [8], tego nie akcentuje, to wydaje się, że jedną z najbardziej istotnych charakterystyk paliw z punktu widzenia ich bezpieczeństwa eksploatacji i niezawodności działania, jest przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i dekrementu tłumienia w funkcji zmian temperatury, obejmujący eksploatacyjny zakres temperaturowy paliw raketowych, zazwyczaj mieszczący się między $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na podstawie tych przebiegów można określić ze stosunkowo dużą dokładnością, dynamiczną temperaturę zeszklenia paliwa raketowego tj. temperaturę przejścia paliwa ze stanu wysokoelelastycznego (wysokosprężystego) w stan szklisty. Temperaturze zeszklenia odpowiada najszybszy spadek wartości modułu zachowawczego (punkt przegięcia krzywej zmian tego modułu) oraz maksymalna wartość dekrementu tłumienia.

Z kolei norma obronna NO-91-A523-8 [9] dotyczy oznaczania statycznej temperatury zeszklenia stałych paliw raketowych, na podstawie określania odkształcenia względnego przy ścisaniu ich próbek cylindrycznych o średnicy i wysokości wynoszącej 10 mm, pod stałym obciążeniem i w stałym przedziale czasu, w funkcji temperatury dla odkształceń odwracalnych za pomocą konsystometru Hoesppler'a. Temperaturę zeszklenia wyznacza się z krzywej przedstawiającej zmiany odkształcenia względnego w funkcji temperatury, w wyniku przecięcia stycznej do odcinka krzywej wolnego wzrostu odkształcenia oraz stycznej do odcinka krzywej najszybszego wzrostu odkształcenia. Statyczna temperatura zeszklenia wyraża przydatność eksploatacyjną paliwa raketowego w zakresie niskich temperatur.

Analizę i określanie dynamicznych - mechanicznych właściwości stałych paliw raketowych, w tym temperatury zeszklenia, rekomendują i opisują następujące dokumenty standaryzacyjne NATO : AOP-7 [1] i STANAG 4540 [13] opisujący procedurę badania stałych paliw raketowych oraz innych stałych materiałów wysokoenergetycznych (wybuchowych) podatnych na odkształcenia, za pomocą dynamiczno-mechanicznej-termicznej analizy (oznaczanej w literaturze anglojęzycznej skrótem DMA (Dynamic Mechanical Analysis) lub DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis)). STANAG 4540 [13] podaje sposób określania nie tylko dynamicznego modułu zachowawczego (sprężystego), podobnie jak w przypadku normy obronnej NO-91-A523-7 [8], lecz również sposób określania dynamicznego modułu stratności, będącego urojoną składową zespolonego modułu, charakteryzującą zdolność ciała lepkosprężystego do nieodwracalnego rozpraszania przekazywanej mu energii mechanicznej (przede wszystkim zamienianej na energię ciepłą). Zamiast logarytmicznego dekrementu tłumienia występującego w ww. normie obronnej, jako parametr opisujący zdolności tłumienia obciążeń okresowych, STANAG 4540 [13] przedstawia tangens kąta przesunięcia fazowego między cyklicznym (sinusoidalnym) naprężeniem w materiale lepkosprężystym a odkształceniem materiału, wywołanym przez to naprężenie, nazywany współczynnikiem tłumienia lub tarcia wewnętrznego. Ponadto w STANAG-u 4540 [13] podany jest sposób określania dynamicznej temperatury zeszklenia, zalecany w AOP-7 [1] jako najbardziej precyzyjny spośród znanych metod oznaczających tę właściwość materiałową, na podstawie temperatury odpowiadającej maksymalnej wartości modułu stratności, którego zmiany w funkcji temperatury, przy ustalonej częstotliwości drgań wymuszonych, przedstawione są w postaci krzywej.

W kategorii metod badania reologicznych właściwości stałych paliw raketowych AOP-7 [1] zaleca posługiwanie się STANAG-iem 4507 [14], opisującym metody badania mechanicznych/fizycznych właściwości paliw poprzez badanie przebiegu relaksacji naprężeń w nich występujących, powstałych w wyniku działania obciążenia utrzymującego stałe rozciągające odkształcenie paliwa. Niestety polskie normy obronne nie obejmują określania tego rodzaju mechanicznych właściwości stałych paliw raketowych, a przecież właściwości

te mają szczególnie istotne znaczenie w przypadku długotrwałej eksploatacji ładunków paliw raketowych posiadających duże gabaryty (masy).

3. Przegląd, analiza i ocena metod badania stałych paliw raketowych na podstawie norm polskich

Polskie normy dotyczące badań stałych paliw raketowych [15-22] umożliwiają przede wszystkim określenie/oznaczenie ich fizykochemicznych, w tym termochemicznych właściwości, takich jak: stabilność termiczna [15, 16], wrażliwość na tarcie [15, 17], uderzenie [15, 18], liniowa szybkość spalania w mikrosilniku raketowym w funkcji ciśnienia produktów spalania, występującego w jego komorze [19] oraz zawartość i jednorodność strukturalna ładunków paliw [15, 20-22], określana w przytłaczającej większości metodami nieniszczącymi, głównie radiograficznymi.

Norma Polska PN-EN 13631-2:2003 [16] dotycząca materiałów wybuchowych kruszących, powołana przez normę PN-EN 13938-1 [15] odnoszącą się do wymagań na stałe paliwa raketowe, podaje, iż materiał wybuchowy wykazuje stabilność termiczną, gdy w wyniku jego termostatowania w temperaturze 75 °C przez 48 h nie wystąpią efekty dźwiękowe i wizualne świadczące o zajściu zapłonu, spalania, przemiany wybuchowej, i/lub nie nastąpi uwolnienie produktów rozkładu (głównie gazowych) powodujących rozerwanie przepony bezpieczeństwa albo wzrost ciśnienia powyżej 60 kPa i/lub nie będzie miało miejsce tzw. „samoogrzewanie” badanej substancji, czyli wzrost jej temperatury względem temperatury próbki odniesienia, termostatowanych w identycznych ww. warunkach o co najmniej 3 °C. Norma ta, ze względu na ww. określone, przede wszystkim temperaturowe, cieplne właściwości badanych substancji, jest bardziej uniwersalna niż norma obronna NO-13-A505 [10] dotycząca określania fizykochemicznej trwałości/stałości stałych paliw raketowych (i prochów bezdymnych) na podstawie zmian zawartości stabilizatora i/lub ilości wydzielanych tlenków azotu, czyli parametrów charakterystycznych dla homogenicznych paliw raketowych (na bazie nitroestrów).

Analogicznie, Norma Polska PN-EN 13938-1 [15] zawierająca wymagania dotyczące stałych paliw raketowych, powołując się na procedury oznaczania wrażliwości materiałów wybuchowych kruszących na tarcie i uderzenie, podanych odpowiednio w normach PN-EN 13631-3 [17] oraz PN-EN 13631-4 [18], podaje, że wrażliwość stałych paliw raketowych na tarcie nie powinna być mniejsza niż 50 N, zaś na uderzenie – nie mniejsza niż 1 J, w zakresie temperatur od 10 °C do 40 °C. Wrażliwość na uderzenie i tarcie wraz ze stałością (chemiczna, termiczna), tworzy grupę właściwości stałych paliw raketowych bezpośrednio charakteryzujących poziom bezpieczeństwa podczas ich eksploatacji jako materiałów wybuchowych (wysokoenergetycznych).

Polska Norma PN-V-04014 [19] przedstawia metodę określania liniowej szybkości spalania paliw raketowych w zależności od ustalonej temperatury początkowej z zakresu od -50 °C do 50 °C, w przedziale ciśnień od 2 MPa do 20 MPa oraz sposób obliczania szybkości spalania w funkcji ciśnienia. Norma ta dotyczy homogenicznych paliw raketowych oraz heterogenicznych o wartości opałowej nie większej niż 6280 J/g. W ramach badań wykonuje się siedem pomiarów liniowej szybkości spalania inhibitowanych czołowo, rurowych kształtek danego rodzaju paliwa o średnicy zewnętrznej ok. 30 mm, wewnętrznej ok. 10 mm i długości ok. 30 mm, w określonej temperaturze przy różnych ciśnieniach w komorach spalania mikrosilników raketowych wyposażonych w przetworniki ciśnienia oraz żaroodporne wkładki dyszowe o różnych średnicach krytycznych, wynoszących co najmniej 4 mm. Zapłon ładunku paliwa raketowego jest inicjowany elektrycznie od strony przedniego dna komory spalania silnika raketowego, ładunkiem zapłonowym o masie ok. 1g,

wykonanym z drobnoziarnistego prochu czarnego. W ramach pojedynczego pomiaru (spalania), z krzywej ciśnienia w funkcji czasu spalania ładunku, na jej odcinku plateau, odczytuje się ciśnienie pracy silnika, wyrażone w MPa, zaś liniową szybkość spalania (u) oblicza się według następującego wzoru: $u = 0.5e/t_p$, gdzie (e) jest grubością ścianki ładunku rurowego, wyrażona w milimetrach, zaś (t_p) jest czasem palenia ładunku (palącego się jednocześnie od strony ścianki wewnętrznej i zewnętrznej), wyrażonym w sekundach. Warunki określania liniowej szybkości spalania paliw raketowych w mikrosilniku raketowym są bliższe warunkom rzeczywistym panującym podczas spalania ładunku paliwa raketowego niż w klasycznych bombach ciśnieniowych.

Interesującym przewodnikiem w zakresie klasyfikowania wad strukturalnych paliw raketowych oraz kryteriów oceny wad pod względem ich dopuszczalnych wielkości, jest Polska Norma PN-V-04024 [20] dotycząca radiograficznych badań ładunków paliw homogenicznych i heterogenicznych, z wykorzystaniem promieniowania jonizującego X i gamma. Według tej normy podstawowymi wadami, jakie mogą występować w strukturze ładunku raketowego są: pęcherze, jamy, porowatości, pęknięcia, włosowiny, naderwania, nie przyleganie powłoki ekranującej (inhibitora) do powierzchni paliwa, wtrącenia oraz niezgodności budowy ładunku z wymaganiami konstrukcyjnymi. Z kolei Polska Norma PN-EN 13938-5 [21] zaleca badanie takich wad, jak ubytki (pęcherze) i pęknięcia, przede wszystkim za pomocą metod nieniszczących – radiologicznych i ultradźwiękowych oraz metody niszczącej z wykorzystaniem małowymiarowych silników raketowych. Tylko w przypadku metody niszczącej podano kryterium oceny jednorodności strukturalnej ładunku paliwa na podstawie przebiegu zmian siły ciągu podczas spalania paliwa w komorze silnika raketowego. Ocena jednorodności ładunku pod względem występowania w nim wad – ubytków i pęknięć, według tego kryterium przebiega następująco. Dla każdego spalania określa się średnią siłę ciągu w jej przedziale plateau (t.zw. wypadkową uśrednioną siłę ciągu). Następnie, należy podzielić przedział plateau siły ciągu na 10 jednakowych odcinków i określić dla każdego z nich średnią wartość siły ciągu (t.zw. uśrednioną cząstkową siłę ciągu). Jeżeli różnica między wypadkową uśrednioną siłą ciągu a którąkolwiek cząstkową uśrednioną siłą ciągu jest większa niż 10 % wartości wypadkowej uśrednionej siły ciągu, to istnieją poważne przesłanki do stwierdzenia, że w badanych ładunkach paliwa występują wady w postaci ubytków i/lub pęknięć. A zatem pojawienie się wyraźnych, dosyć gwałtownych zmian siły ciągu jest wskaźnikiem występowania istotnych wad materiałowych w spalonym ładunku paliwa raketowego.

Ostatnią z serii Polskich Norm oznaczonych jako PN-EN 13983 [15, 17, 18, 21-22] dotyczących stałych paliw raketowych i prochów bezdymnych, jest Polska Norma PN-EN 13938-6 [22] podająca wytyczne w zakresie oznaczania integralności powłoki (ekranującej) inhibitora z zasadniczym ładunkiem stałego paliwa raketowego oraz rodzajów wad ekranującej powłoki (inhibitora). Ponadto, norma PN-EN 13938-6 [22] przedstawia szeroką grupę, potencjalnie przydatnych w tym zakresie, technik nieniszczących, takich jak: radiografia, radioskopia i tomografia rentgenowska, metody ultradźwiękowe oraz detekcja w podczerwieni, podając rodzaj wad, które za pomocą danej metody można wykryć. Wadami potencjalnie wykrywanymi mogą być pęcherze oraz wtrącenia ciał obcych w powłocę ekranującej, oddzielenia i/lub brak powłoki ekranującej. Norma 13938-6 [22] zaleca, aby przy ocenie integralności powłoki ekranującej określić minimalne, dopuszczalne wielkości powierzchni paliwa, która może nie być pokryta inhibitorem oraz wielkości pęknięć i pęcherzy, przy jednoczesnym ustaleniu granicznych wielkości wykrywanych wad za pomocą określonej metody nieniszczącej.

Porównując wytyczne podane w AOP-7 [1] w zakresie standardowych metod NATO dotyczących badań stałych paliw raketowych pod względem właściwości fizykochemicznych, w tym termicznych, polskie standardy, w tym normy obronne nie

obejmują wykorzystywania podstawowych, nowoczesnych technik analizy, określania i oceny termicznych charakterystyk stałych paliw raketowych, takich jak różnicowa mikrokalorymetria skaningowa (DSC) i termogravimetria (TGA) [23], tym bardziej, że techniki te są również bardzo przydatne do oceny zgodności materiałowej (fizykochemicznej kompatybilności) [24] materiałów wysokoenergetycznych, a zatem również – fizykochemicznej zgodności stałych paliw raketowych z materiałami konstrukcyjnymi układów napędowych pocisków raketowych. Warto przy tym zauważyć, że polskie standardy również nie obejmują metod badania fizykochemicznej zgodności materiałowej stałych paliw raketowych, szczególnie w aspekcie ich reaktywności z materiałami kontaktowymi, którymi w większości są materiały konstrukcyjne, w tym nośne oraz powłoki ochronne a także izolacyjne.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu, analizy i oceny metod badania stałych paliw raketowych na podstawie aktualnych polskich standardów, zwłaszcza w kontekście wymagań NATO w tym zakresie, wydaje się słusznym jak najszybsze wprowadzenie w SZ RP metody badawczej umożliwiającej precyzyjne określenie dynamicznej temperatury zeszklenia paliw za pomocą techniki DMA, która bardziej adekwatnie odzwierciedla ich wytrzymałość na dynamiczne obciążenia, występujące zwłaszcza podczas zapłonu układu napędowego i startu pocisku raketowego w skrajnie ujemnych temperaturach otoczenia, bliskich temperaturze zeszklenia, niż statyczna temperatura zeszklenia, tj. w warunkach, gdy wytrzymałość paliwa raketowego na obciążenia statyczne jest znacznie wyższa niż na obciążenia dynamiczne. Określenie ww. parametru ma kardynalne znaczenie w zakresie bezpieczeństwa i niezawodności działania układów napędowych pocisków raketowych, zwłaszcza eksploatowanych w niskich temperaturach.

Pozostając w zakresie badań mechanicznych właściwości materiałowych stałych paliw raketowych, należałoby również dokonać implementacji w SZ RP standardowej metody określania ich parametrów reologicznych, jako normy obronnej, co pozwoli na stworzenie bardziej kompletnego i reprezentatywnego zestawu badanych, mechanicznych właściwości tej klasy materiałów wysokoenergetycznych (wybuchowych).

W zakresie badania charakterystyk termicznych oraz fizykochemicznej zgodności materiałowej stałych paliw raketowych, należy pilnie wprowadzić w SZ RP metody wykorzystujące techniki DSC i TGA.

Literatura

- [1] NATO Allied Ordnance Publication -7 (AOP-7); Manual for data requirements and tests for qualification of explosive materials for military use; Ed. 2; 2001; str. 7-11 – 7-12.
- [2] Norma Obronna NO-91-A523-1:2000; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Postanowienia ogólne.
- [3] Norma Obronna NO-91-A523-2:2001; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Warunki wykonania, termostatowania i badania próbek.
- [4] Norma Obronna NO-91-A523-3:2003; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Oznaczanie cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu.
- [5] Norma Obronna NO-91-A523-4:2003; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Oznaczanie cech wytrzymałościowych przy statycznym ściskaniu.

- [6] Norma Obronna NO-91-A523-5:2003; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Oznaczanie modułu sprężystości przy rozciąganiu i ściskaniu.
- [7] Norma Obronna NO-91-A523-6: 2003; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Oznaczanie udarności metodą Charpy'ego.
- [8] Norma Obronna NO-91-A523-7: 2003; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Oznaczanie dynamicznego modułu sprężystości poprzecznej (G') i logarytmicznego dekrementu tłumienia (λ) za pomocą wahadła skrętnego.
- [9] Norma Obronna NO-91-A523-8: 2003; Paliwa raketowe. Metody badań właściwości mechanicznych. Oznaczanie statycznej temperatury zeszklenia.
- [10] Norma Obronna NO-13-A505:2001; Prochy bezdymne i stałe homogeniczne paliwa raketowe. Metody badania trwałości chemicznej.
- [11] Norma Obronna NO-06-A503: 2002; Technika wojskowa. Ekstremalne warunki klimatyczne. Dane do opracowania wymagań dotyczących projektowania i badań, str. 10.
- [12] Standardization Agreement 2895 (STANAG 2895); Extreme climatic conditions and derived conditions for use in defining design/test criteria for NATO Forces Materiel; Ed.1; 1990; str. A-2.
- [13] Standardization Agreement 4540 (STANAG 4540); Explosives. Procedures for dynamic mechanical analysis (DMA) and determination of glass transition temperature; Ed.1; 2002.
- [14] Standardization Agreement 4507 (STANAG 4507); Explosives. Physical/mechanical properties stress relaxation test in tension; Ed.1; 2002.
- [15] Polska Norma PN-EN 13938-1; Materiały wybuchowe do użytku cywilnego. Materiały miotające i paliwa raketowe. Część 1: Wymagania; PKN; Warszawa; 2005.
- [16] Polska Norma PN-EN 13631-2; Materiały do użytku cywilnego. Materiały wybuchowe kruszące. Część 2: Oznaczanie stabilności termicznej materiałów wybuchowych; PKN; Warszawa; 2003.
- [17] Polska Norma PN-EN 13631-3; Materiały do użytku cywilnego. Materiały wybuchowe kruszące. Część 3: Wrażliwość materiałów wybuchowych na tarcie; PKN; Warszawa; 2003.
- [18] Polska Norma PN-EN 13631-4; Materiały do użytku cywilnego. Materiały wybuchowe kruszące. Część 4: Wrażliwość materiałów wybuchowych na uderzenie; PKN; Warszawa; 2003.
- [19] Polska Norma PN-V-04014; Homogeniczne i złożone stałe paliwa raketowe. Metody badań. Oznaczanie liniowej szybkości spalania w zależności od ciśnienia w mikrosilniku; PKN; Warszawa; 1997.
- [20] Polska Norma PN-V-04024; Metody badań homogenicznych i heterogenicznych stałych paliw raketowych. Badanie radiograficzne ładunków; PKN; Warszawa; 2000.
- [21] Polska Norma PN-EN 13938-5; Materiały wybuchowe do użytku cywilnego. Materiały miotające i paliwa raketowe. Część 5: Oznaczanie ubytków i pęknięć; PKN; Warszawa; 2005.
- [22] Polska Norma PN-EN 13938-6; Materiały wybuchowe do użytku cywilnego. Materiały miotające i paliwa raketowe. Część 6: Wytyczne oznaczenia integralności powłoki inhibitora; PKN; Warszawa; 2005.
- [23] Standardization Agreement 4515 (STANAG 4515); Explosives. Thermal characterization by Differential Thermal Analysis, Differential Scanning Calorimetry and Thermogravimetric Analysis; Ed. 1; 2002.
- [24] Standardization Agreement (STANAG 4147); Chemical compatibility of ammunition components with explosives (non nuclear application); Ed. 2; 2001.