

Mieszanki zapłonowe stosowane w urządzeniach zapłonowych silników raketowych

Ignition mixtures applied into ignition system of rocket motor

Bogdan Florczak¹⁾, Ryszard Rot²⁾

1) Instytut Przemysłu Organicznego, ul. Annopol 6, 03-236 Warszawa, PL

2) Zakłady Metalowe „MESKO” S. A., ul. Legionów 122, 26-111 Skarżysko-Kamienna, PL

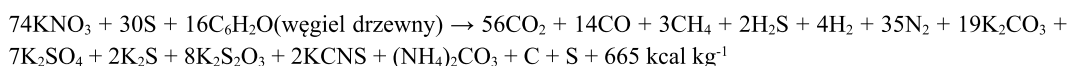
Streszczenie: Przedstawiono typowe pirolanty (mieszanki zapłonowe) stosowane w zapłonnikach silników raketowych. Z danych literaturowych wynika, że są to najczęściej mieszanki typu B-KNO₃, Alclo lub Mg/Teflon. Generalnie charakteryzują się one bardzo niskim wykładnikiem potęgowym szybkości spalania i niską procentową zawartością produktów gazowych i efektywnym zapłonem.

Słowa kluczowe: pirolanty, mieszanki zapłonowe, urządzenie zapłonowe.

Keywords: pyrolants, ignition mixture, ignition system.

1. Wstęp

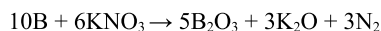
Zapłonnik jest źródłem energii cieplnej dla zapłonu ładunku ze stałego paliwa raketowego w silniku raketowym. Kiedy ciepło jest dostarczone do powierzchni ładunku, zewnętrzna temperatura jest powiększona od początkowej temperatury do temperatury zapłonu. Dwa rodzaje zapłonników są używane do zapłonu paliw w silnikach raketowych na paliwo stałe, dające 1) dużą objętość albo 2) wysoką temperaturę produktów spalania. Np. spalanie paliw nitropolimerowych składających się z estrów azotanów takich jak nitroceluloza i nitrogliceryna staje się niestabilne, jeżeli ciśnienie jest poniżej 5 MPa. Żeby utrzymać stabilne spalanie paliwa w komorze silnika raketowego, ciśnienie ustanowione przez zapłonnik powinno być wyższe niż 5 MPa. Klasyczne zapłonnik stosowane do zapalania stałych paliw raketowych oparte są na prochu czarnym, który produkuje wysokoobjętościowe produkty spalania [1] zgodnie z poniższą reakcją:



Spala się on na ogół dość gwałtownie i w przypadku dużego rozdrobnienia, a gdy masa zapłonowa zawiera kilka procent bardzo rozdrobnionego prochu - dość niepowtarzalnie. Jego szybkość spalania, jak podaje [1], w zależności od ciśnienia w zakresie (2 ÷ 30) atm jest określona zależnością $u = 72p^{0.24} \text{ cm min}^{-1}$, gdzie p jest określone w atmosferach.

2. Typowe pirolanty stosowane jako masy zapłonowe

Złożone stałe paliwa raketowe składające się z chloranu(VII) amonu (NA) i polimerowych materiałów są zapalane metalizowanymi materiałami energetycznymi zwanymi pirolantami, najczęściej jest to mieszanina boru (B) i azotanu potasu (KNO₃). Stechiometryczna reakcja takiej mieszaniny jest następująca [2]:



Typowe pirolanty stosowane jako zapłonnik są przedstawione w tab. 1.

Tab. 1. Typowe mieszanki pirotechniczne stosowane w zapłonnikach.

Skład	Stosunek masowy mieszanki	Powstające tlenki podczas spalania	Temperatura spalania, [K]
B-KNO ₃	40:60	B ₂ O ₃	3000
Mg-Tf	30:70	MgF ₂	3700
Al-NA-PB	15:70:15	Al ₂ O ₃	3100
B-NA-PB	10:75:15	B ₂ O ₃	2200

Tf – politetrafluoroetylen; PB – polibutadien z końcowymi grupami hydroksylowymi

Z [3] wynika, że stosowane jako masy zapłonowe w silnikach raketowych są mieszanki:

- 1) B-KNO₃ o składzie: 23,7% B, 7,7% KNO₃ i 5,6% lepiszcza (Laminac).
Charakteryzuje się ona łatwością zapłonu przy niskich ciśnieniach, wysoką zawartością gazów i niską wrażliwością szybkości spalania od ciśnienia.
- 2) Alco o składzie: 35% aluminium, 64% KClO₄ i 1% olej roślinny.
Charakteryzuje się ona wysoką koncentracją energii lecz trudnością jej zapłonu w niskich ciśnieniach.
- 3) Mg/Teflon o składzie np.:
 - 54% Mg, 30% teflon i 16% Viton A, lub
 - 60% Mg, 40% teflon i 1% grafit.

Generalnie charakteryzują się one bardzo niskim wykładnikiem potęgowym szybkości spalania i niską procentową zawartością gazów i efektywnym zapłonem.

3. Określenie masy zapłonowej

Zgodnie z [3] masa zapłonika może być określona z zależności (1):

$$m_z = Q/Q_{ex} \quad (1)$$

gdzie m_z – masa zapłonika, Q – całkowita energia potrzebna do zapłonu paliwa, Q_{ex} – kaloryczność masy zapłonowej, lub z równania Bryan'a-Lawrence'a (2):

$$m_z = 38 [(Aq_c)(4\pi L_g A_p)^{0,59}]^{1,06}/Q_{ex} \quad (2)$$

gdzie L_g – długość ziarna, cm; A_p – powierzchnia otworu przelotowego, cm²; q_c – zapalność paliwa, kal cm⁻².

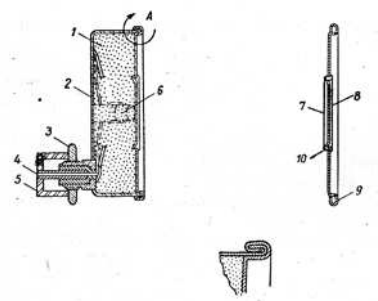
4. Konstrukcje zapłonników

Wyróżnia się następujące typy zapłonników:

1. Zapłonniki o zamkniętej objętości. Ładunek takiego zapłonika znajduje się w hermetycznym korpusie, przepona którego otwiera się (pęka) kiedy ciśnienie produktów spalania osiąga odpowiedni poziom.
2. Zapłonniki bezkorpusowe. W tym przypadku ładunek zapłonika i ładunek stałego paliwa raketowego mają wspólny korpus.
3. Zapłonniki o półzamkniętej objętości. Podczas spalania ładunku takiego zapłonika produkty spalania wypływają przez otwory lub dysze do komory silnika raketowego.

4.1. Zapłonniki o zamkniętej objętości

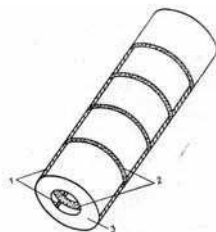
Typowym zapłonikiem o zamkniętej objętości jest zapłonnik pudełkowy. Jest on najwcześniejszym zapłonikiem, konstrukcyjnie najprostszym, stosowanym także obecnie. Składa się z niedużego wymiarowo korpusu metalowego lub z tworzywa sztucznego, w którym znajduje się zapalnik elektryczny i główny ładunek z prochu czarnego (rys. 1) lub ładunek w postaci tabletek na bazie mieszanin pirotechnicznych zawierających metal i utleniacz.



Rys.1. Typowa konstrukcja pudełkowego zapłonika: 1 – ładunek zapłonika, 2 – korpus, 3 – nakrętka, 4 – tulejka, 5 – krawędź, 6 – zapalnik elektryczny, 7 – strefa oddziaływania ciśnienia, 8 – zaślepka, 9 – pokrywka, 10 – kryza. [4]

4.2. Zapłonniki bezkorpusowe

Przykładem zapłonika bezkorpusowego jest konstrukcja na bazie elektroprzewodzącego filmu (warstewki, błonki) pokrywającego ziarno paliwa – rys. 2.

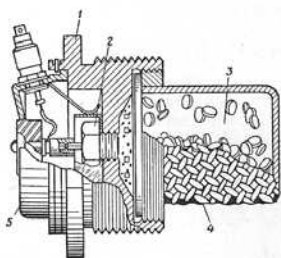


Rys. 2. Zapłonnik z elektroprzewodzącej błonki naniesionej na powierzchnię spalania ładunku stałego paliwa raketowego: 1) przewód; 2) elektroprzewodząca warstwa z mieszaniny pirotechnicznej; 3) stałe paliwo raketowe. [4]

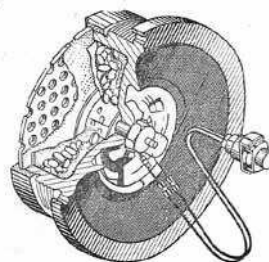
Mieszanina pirotechniczna takiego zapłonika składa się z paliwa (np. bor), krystalicznego utleniacza (np. chloran(VII) potasu), elektroprzewodzącego materiału (srebro) i lepiszcza na bazie polimeru, który jest także składnikiem paliwa.

4.3. Zapłonniki o półzamkniętej objętości

Szczególną właściwością tego typu zapłonników jest rozmieszczenie głównego ładunku w korpusie, który ma otwory dla wypływu produktów spalania mieszaniny pirotechnicznej do komory silnika raketowego. Przykładami tego typu zapłonników są tzw. zapłonnik koszykowy (rys. 3) i zapłonnik z regulowanym wypływem (rys. 4). Poprzez zmianę wymiarów i ilości otworów można regulować poziom ciśnienia i szybkość jego narastania w komorze silnika raketowego. Taka konstrukcja umożliwia pełne spalanie ładunku zapłonika, poprawia zapłon silnika bez powstawania piku ciśnienia, zwiększa czas oddziaływania nagranych produktów spalania mieszaniny pirotechnicznej zapłonika na powierzchnię ładunku stałego paliwa raketowego.



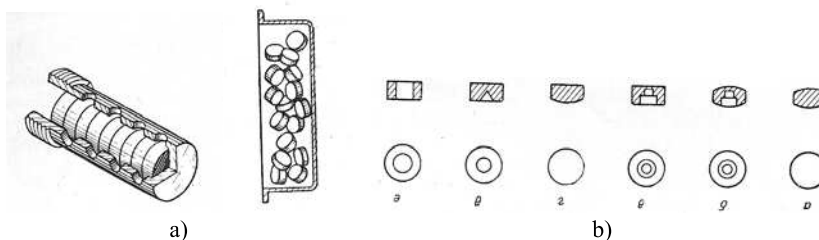
Rys. 3. Typowa konstrukcja koszykowego zapłonika: 1) króciec; 2) zapalnik; 3) tabletki pirotechniczne; 4) koszyczek; 5) złącze. [4]



Rys. 4. Zapłonnik z regulowanym wypływem. [4]

5. Kształty pirotechnicznych elementów ładunku zasadniczego zapłonika

Rozmiar i kształt są ważnymi charakterystykami pirotechnicznymi komponentów ładunku zasadniczego zapłonika. Choć fizyczne i chemiczne właściwości różnych składów mieszanin pirotechnicznych zapłonników nakładają techniczne ograniczenia na wybór kształtu, to bardzo dużo mieszanin pirotechnicznych może być stosowanych w postaci proszku, granул, małych lub większych tabletek, a także ładunków otrzymywanych metodą prasowania lub wytłaczania. Typowe tego typu konfiguracje przedstawiono na rys. 7. Dla polepszenia odtwarzalności wewnętrzbalistycznych charakterystyk i zabezpieczenia długotrwałego i kontrolowanego (w porównaniu z proszkami) spalania w zapłonnikach często stosuje się prasowane elementy w postaci tabletek. Oczywiście, że w skład takich tabletek oprócz składników w postaci proszku wchodzi także lepiszcze umożliwiające granulację oraz tabletkowanie. Przykłady kształtu takich tabletek przedstawiono na rys. 7b. Wymagana jakość i jednorodność tabletek, a także zachowanie ich charakterystyk mogą być zagwarantowane standardowym technicznym oprzyrządowaniem. Możliwe są różne warianty kształtu tabletek dla zapłonników, jednakże są one ograniczone w praktyce charakterystykami stempla i matrycy prasy obrotowej. Średnica i wysokość tabletek może zmieniać się od 1,27 do ponad 25 mm. Na ogół średnica tabletek stosowanych w zapłonnikach mieści się w zakresie 3,2÷9,5 mm. Wysokość tabletek dobiera się w zależności od technicznych potrzeb. Tabletki mają kształt cylindryczny, jedynie różnią się konturem czół.



Rys. 7. Kształty pirotechnicznych elementów zapłonika (a) i tabletek (b). [4]

Kształt tabletek ma bardzo duży wpływ na masowy wypływ produktów spalania zapłonika. Do parametrów wpływających na jednostkowy wypływ zalicza się gęstość, powierzchnię spalania, a także charakterystyki lepiszcza które jest stosowane podczas wytwarzania tabletek.

6. Kompozycje mas zapłonowych

Poniżej podano 10 najbardziej rozpowszechnionych i znanych od lat kompozycji pirotechnicznych stosowanych do przygotowania głównego ładunku zapłonika. Podano je w kolejności ważności ich stosowania z punktu widzenia praktycznego bezpieczeństwa i powszechności zastosowania.

6.1. Bor + azotan potasu (B + KNO₃)

Mieszanina tego typu stosowana jest głównie w postaci tabletek różnego kształtu i wymiarów i znajduje szerokie zastosowanie zamiast prochu czarnego. Charakterystyczne właściwości tej kompozycji to: łatwość zapłonu przy niskich ciśnieniach (na dużych wysokościach), wysoka zawartość fazy gazowej w produktach spalania, słaba zależność szybkości spalania od ciśnienia. Kaloryczność mieszaniny wynosi 1550 kal g⁻¹, szybkość spalania 9,9 mm s⁻¹ przy ciśnieniu 1 bar.

6.2. Aluminium + chloran(VII) potasu (Al + KClO₄)

Mieszanina ta znana jest jako „AlClO”. Stosowana głównie w postaci tabletek, a także w kształcie bloków. Jest ona jedną z najbardziej wysokoenergetycznych mieszanin znajdujących zastosowanie, jednakże ona słabo zapala się przy niskich ciśnieniach. Kaloryczność tej mieszaniny wynosi 2490 kal g⁻¹, szybkość spalania 9,9 mm s⁻¹ przy ciśnieniu 1 bar.

6.3. Magnez + teflon + viton

Mieszanina ta oprócz zastosowania w zapłonnikach stosowana jest także jako źródło promieniowania podczerwonego. Mieszanina może być stosowana w postaci proszku i tabletek, a także w formie bloków i ma różne zastosowania dla wykorzystania w zapłonnikach silników raketowych na paliwo stałe. W szczególności: jest wysokoenergetycznym źródłem generującym produkty spalania z podwyższoną entalpią i temperaturą, łatwo poddaje się prasowaniu i wyłaczaniu, zabezpiecza niski poziom produktów gazowych. Produkty spalania są toksyczne, kaloryczność wynosi 2200 kal g⁻¹, szybkość spalania jest rzędu 1,8 mm s⁻¹ przy ciśnieniu 1 bar.

6.4. Cyrkon + chromian(VI) baru (Zr + BaCrO₄)

Jest jedną z najbardziej łatwo zapalających się mieszanin, która stosowana jest w bezgazowych zapłonnikach. Zestaw ma z reguły postać proszku lub granuli i podczas spalania generuje rozgrzane cząstki fazy skondensowanej. Charakteryzuje się niskim wykładnikiem potęgowym w zależności szybkości spalania od ciśnienia, a także niską kalorycznością (501 kal g⁻¹). Szybkość spalania wynosi 712 mm s⁻¹ przy ciśnieniu 1 bar.

6.5. Aluminium + tlenek miedzi(II) (Al + CuO)

Mieszanina ta stosowana jest w postaci proszku i tabletek. Charakteryzuje się termiczną stabilnością i podczas spalania małą zawartością produktów gazowych oraz rozgrzany cząstkami fazy skondensowanej. Kaloryczność wynosi 864 kal g⁻¹, szybkość spalania 39,5 mm s⁻¹ przy ciśnieniu 1 bar.

6.6. Proch czarny (siarka + węgiel drzewny + azotan potasu)

Stosowany jest w formie granuli i tabletek i jest jednym z pierwszych mieszanin pirotechnicznych stosowanych w zapłonnikach. Jest stosowany w zapłonnikach, co do których nie stawia się wysokich wewnątrzbalistycznych wymagań. Charakteryzuje się łatwością zapłonu, niską kalorycznością, wysoką hydroskopijnością. Kaloryczność wynosi 755 kal g⁻¹, szybkość spalania 29 mm s⁻¹ przy ciśnieniu 1 bar.

6.7. Proch czarny + magnez

Stosowany jest w formie proszku i tabletek. W związku niską kalorycznością czarnego prochu w wielu zestawach stosuje się dodatek magnezu w celu podwyższenia charakterystyk energetycznych. Chociaż ta mieszanina znalazła szerokie zastosowanie, pojawiło się jednak szereg problemów spowodowanych rozwarstwieniem składników mieszaniny i zachodzeniem reakcji chemicznej między magnezem i zawartością wilgoci w prochu czarnym, wynikiem której jest pogorszenie roboczych charakterystyk zapłonika. Kaloryczność układu wynosi 1040 kal g⁻¹.

6.8. Magnez + azotan sodu + azotan potasu ($Mg + NaNO_3 + KNO_3$)

Stosowana jest w postaci proszku i tabletek. Dla przygotowania zapłonika z dłuższym czasem palenia w skład mieszanki wprowadza się żywice w charakterze lepiszcza. Dzięki takiemu pokryciu układ charakteryzuje się niską higroskopijnością. W wyniku powstawania podczas spalania nagranych cząstek skondensowanych produktów spalania zapewniają one efektywne przekazania ciepła. Mieszanka charakteryzuje się wysoką kalorycznością (1456 kal g^{-1}). Szybkość spalania wynosi ok. $3,8 \text{ mm s}^{-1}$ przy ciśnieniu 1 bar.

6.9. Cyrkon + chromian(VI) ołowiu ($Zr + PbCrO_4$)

Mieszanka stosowana jest w formie proszku i tabletek. Charakteryzuje się bardzo dobrym zapłonem w wyniku powstawania podczas spalania gorących skondensowanych cząstek oraz niskim wykładnikiem potęgowym w zależności szybkości spalania od ciśnienia. Zestawy tego typu stosowane są w bezgazowych układach zapłonowych. W praktyce mieszanka tego typu stosowana jest zamiast mieszanki $Zr + BaCrO_4$, kiedy wymagana jest wysoka szybkość spalania. Kaloryczność wynosi 496 kal g^{-1} . Szybkość spalania 305 mm s^{-1} przy ciśnieniu 1 bar.

6.10. Stop cyrkon-nikiel + chloran(VII) potasu + azotan baru ($ZrNi + KClO_4 + Ba(NO_3)_2$)

Zestaw tego typu stosowany jest w układach gdzie zastosowanie innych mieszanin zapłonowych zawierających metal i utleniacz i mających podwyższoną właściwość wybuchowości powoduje nieporządane piki ciśnienia. Tego typu mieszanki stosuje się w postaci proszku lub tabletek. Charakteryzują się one niską higroskopijnością i podwyższonym wydzielaniem ciepła, zapewniają bardzo dobre robocze charakterystyki zapłonu przeznaczone dla wysokościowego odpalenia silników raketowych na paliwo stałe. Kaloryczność wynosi ok. 900 kal g^{-1} , a szybkość spalania $3,55 \text{ mm s}^{-1}$ przy ciśnieniu 1 bar.

7. Podsumowanie

Jednym z ważnych problemów, który pojawia się podczas projektowania zapłonika i układów zapłonowych silnika raketowego na paliwo stałe jest zawsze wybór komponentów zapewniających optymalny zespół roboczych charakterystyk przy takich ograniczających czynnikach jak: zapalność stałego paliwa raketowego, parametry konstrukcyjne, charakterystyki otaczającego środowiska. Przy projektowaniu pojawiają się także trudności związane z pozyskaniem niezbędnych danych dotyczących właściwości komponentów zapłonników. Dlatego też konstruktorzy zapłonników przy wyborze komponentów opierają się na własnym doświadczeniu oraz zmuszeni są do poświęcenia znacznego czasu na prowadzenie uzupełniających badań. Każdy składnik zapłonika charakteryzuje się określonymi fizyko-chemicznymi właściwościami, które mają zasadnicze znaczenie przy ich wyborze. Do takich charakterystyk należy: poziom szybkości spalania, współczynnik wykładniczy w zależności szybkości spalania od ciśnienia, temperatura płomienia, stosunek fazy gazowej do skondensowanej w produktach spalania, zdolność do przemiany wybuchowej, zależność charakterystyki zapłonu od ciśnienia, kaloryczność. Podczas projektowania zapłonika i wyborze układu zapłonowego przede wszystkim należy określić w jakich warunkach będzie funkcjonował zapłonnik i jakie są charakterystyki zapalności danego układu w tych warunkach.

Podziękowanie

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt rozwojowy.

Literatura

- [1] Urbański T., *Chemistry and Technology of Explosives*. Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, 1967.
- [2] N. Kubota, *Propellants and Explosives. Thermochemical Aspects of Combustion*, WILEY-VCH GmbH, Weinheim, 2007.
- [3] Keller R. B. Jr, ed., *Solid rocket motor igniter*, NASA SP-8051, 1971.
- [4] Robertson W. E., *Igniter Material Considerations and Applications*, AIAA Paper No. 72-1195, November, 1972.