Mr Panto Maslak,
potpukovnik, dipl. inž.

Mr Lajoš Tot,
dipl. inž.

Mirko Uzelac,
inž.

Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

MOGUĆNOST I SVRHA UPOTREBE METALNIH PROVODNIKA U DVOBAZNIM RAKETNIM GORIVIMA

UDC: 621.45.07-6

Rezime:

Na osnovu prethodno razvijenog postupka dobijanja blokova dvobaznih raketnih goriva izvršena su ispitivanja unutrašnjebalističkih i mehaničkih karakteristika goriva sa i bez metalnih provodnika. Unutrašnjebalistička ispitivanja rađena su u Crawfordovoj bombi i opitnom motoru. Iz rezultata dobijenih eksperimentom vidi se da su brzine sagorevanja dvobaznih raketnih goriva sa metalnim provodnicima znatno uvećane. Najveći katalitički uticaj na brzinu sagorevanja pokazuje srebro prečnika žice 0,20 mm (uvećanje brzine od 220 do 260% u odnosu na brzinu osnovnog goriva, u opsegu pritisaka od 80 do 140 bara). Ugradnjom metalnih provodnika u dvobazna raketna goriva mogu se dobiti punjenja koja obezbeđuju veću brzinu leta i bolje manevarske karakteristike taktičkih protivavionskih i protivoklopnih raketnih sistema.

Ključne reči: dvobazno raketno gorivo, metalni provodnik, brzina sagorevanja, katalitička aktivnost.

POSSIBILITY AND PURPOSE OF USING METALLIC CONDUCTORS IN DOUBLE BASE PROPELLANTS

Summary:

Based on preliminary developed treatment of obtaining blocks of double base propellants, examinations of internal-ballistics and mechanical characteristics of propellants with and without metallic conductors of wire configuration have been performed. Internal-ballistics examinations have been done in the Crawford-s bomb and an experimental motor. From the obtained experimental results it is clear that the combustion rate with metal conductors considerably increases. The best catalytical influence on the combustion rate shows Silver with diameter of wire 0,20 mm (enlargement rate from 220 to 260% in relation to the rate of basic propellants, in pressure interval from 80 to 140 bar). By building in metallic conductors in double base propellants filling can be obtained that ensure higher flight rate and best manoeuvre characteristics in tactical antiarmour and antflight missile systems.

Key words: double base propellants, metallic conductor, combustion rate, catalytic activity.

Uvod

Savremeni protivoklopni (PO) projektili i protivavionski (PA) taktički raketni sistemi koriste čvrstu pogonsku materiju, a rad njihovih pogonskih grupa u velikoj meri zavisi od masenog protoka

produkata sagorevanja koji se, prema zakonu o održanju mase, može prikazati kao funkcija gustine pogonske materije, površine sagorevanja i brzine sagorevanja.

Kao osnovni zahtev pogonskoj grupi vođenog PA sistema za borbu protiv

brzih i niskoletjećih ciljeva nameće se maksimalno povećanje brzine leta i manevarskih karakteristika rakete, što se može ostvariti povećanjem potiska raketnog motora, odnosno povećanjem brzine sagorevanja pogonske materije. Na osnovu podataka iz literature poznato je da se brzina sagorevanja pogonske materije može uvećati nekoliko puta, ugrađivanjem metalnih provodnika kao katalizatora gorenja.

Pošto, za sada, nismo u mogućnosti ugrađivati metalne provodnike u dvobazna raketna goriva (DRG) postupkom livenja, došlo se na ideju da se ostvari veza po spoju gorivo–gorivo, i da se dobije gorivo približnih karakteristika gorivu dobijenom postupkom ekstrudovanja. Cilj je bio da se određenim postupkom dobije gorivo sa reproduktivnim unutrašnjebalističkim parametrima, a da postupak omogućava upotrebu metalnih provodnika, prema određenom rasporedu, broju, odnosno modelu sagorevanja [5,6].

Teorijska razmatranja

Uvećanje brzine sagorevanja pogonske materije sa metalnim provodnicima – toploprovodnim elementima (TE) povezano je sa fizičkim procesom prenosa toplote. Toploprovodni elementi dobro provode oslobođenu toplotu od produkata sagorevanja ka gorivu, što dovodi do lokalnog povećanja temperature, a to uslovljava rast brzine sagorevanja oko

TE. Teorijski proračun brzine sagorevanja goriva sa TE predstavlja složen zadatak povezan sa rešavanjem više jednačina toplotne provodljivosti. Takođe, veoma je teško određivanje pojedinih parametara, kao što su: koeficijenti toplotne provodljivosti (od oslobođenih gasova pri sagorevanju pogonske materije ka provodniku), temperature pripaljivanja kondenzovanih sistema u razmatranim uslovima, nedovoljno je razjašnjena reakcija oksidacije koja se može odigravati na površini metalnih provodnika i sl. Rešenja ovih jednačina po pravilu su glomazna i nepraktična za proračun. Zato se iznalaze približni proračuni za svaki konkretni model sagorevanja. Istraživanja su sprovedena na modelu čeonog sagorevanja sa neprekidnim provodnicima paralelnim uzdužnoj osi punjenja. Za praktičnu primenu najprihvatljiviji je bio tzv. Model rasprostiranja plamena uzduž „beskonačnog“ provodnika, N. N. Bohmana i I. N. Lobanova [1], zbog njegovog dobrog slaganja sa eksperimentalnim rezultatima prema [2]. Prema tom modelu konačni oblik jednačine za brzinu plamena W , u slučaju velike brzine sagorevanja osnovnog goriva v i velikog prečnika (debljine) provodnika d glasi:

$$W = A_1 \lambda_M^{0,5} v^{m/2} d^{m/2-1} = A_1 \lambda_M^{0,5} v^{0,23} d^{-0,53} \quad (1)$$

gde je:

$$A_1 = \frac{A}{\rho_M C_M} \sqrt{(T_p - T_0)/(T_{pt} - T_0)}$$

$$A = \frac{2}{T_p - T_0} \sqrt{\lambda_g k (\rho_{ks} / \eta_g)^m (T_{pt} - T_p) \left(T_g - \frac{T_{pt} + T_p}{2} \right)}$$

v – brzina sagorevanja osnovnog goriva bez provodnika (kondenzovanog sistema);

d – prečnik provodnika;
 ρ – gustina;
 C – specifična toplota;

λ – koeficijent toplotne provodljivosti;
 T_0 – početna temperatura na površini kondenzovanog sistema
 T_p – temperatura provodnika;
 T_{pt} – temperatura topljenja provodnika;
 m, k – veličine iz kriterijuma sličnosti gde je $m = 0,47$; $k = 0,59$;
 η_g = viskozitet oslobođenih gasova pri sagorevanju kondenzovanog sistema.

Indeksi ks, m i g označavaju kondenzovani sistem, metalni provodnik i gasne produkte sagorevanja kondenzovanog sistema.

Iz jednačine (1) se vidi da W primetno raste sa umanjem prečnika provodnika d .

Teorijska izračunavanja brzine plamena [1] u skladu su sa objavljenim eksperimentalnim rezultatima [2].

Teorijska zavisnost brzine plamena W u zavisnosti od tipa metalnog provodnika prikazana je na slici 1, gde je koordinata X data izrazom:

$$X = \frac{1}{\rho_M C_M} \left[\frac{\lambda_M \left(T_g - \frac{T_{pt} + T_p}{2} \right) (T_{pt} - T_p)}{T_{pt} - T_0} \right]^{0,5}$$

Posmatrajući uticaj ispitivanih provodnika na brzinu plamena može se zaključiti da magnezijum i aluminijum imaju najmanji uticaj jer su temperature topljenja ovih provodnika bliske tempe-

Sl. 1 – Teorijska zavisnost brzine plamena od tipa metalnog provodnika za $T_g = 3000^{\circ}\text{C}$ i $T_p = 600^{\circ}\text{C}$ [7]

raturi površine gorenja kondenzovanog sistema. Pri temperaturi $T = T_{pt}$ dolazi do odvajanja rastopljene faze metala od provodnika, što znači da metalni provodnici kod kojih je $T_{pt} = T_p$ uopšte ne mogu uvećati brzinu gorenja pogonske materije, odnosno, proizilazi da je:

$$W_{T_{pt} = T_p} = 0$$

Međutim ako je T_{pt} oksida odgovarajućeg metala viša od T_{pt} samog metala, imajući u vidu da se na površini provodnika stvara oksidna skrama, može biti uvećana i temperatura provodnika.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja

Osvojen je odgovarajući postupak i definisani su bitni parametri procesa. Po-

Tabela 1
Brzine sagorevanja u Crawfordovoj bombi na temperaturi 22°C goriva sastava DRG10

Gorivo	Brzina sagorevanja (mm/s) na pritiscima P (bar)							Zakon br. sa $v = bP^n$	
	80	90	100	110	120	130	140	n(1)	b(mm/s.bar)
DRG10/E	21,25	22,00	23,00	23,84	24,65	25,17	25,51	0,343	4,725
NGR10	23,40	24,30	25,20	25,30	26,00	26,30	26,00	0,200	9,890

DRG10/E – gorivo dobijeno postupkom ekstrudovanja
NGR10 – gorivo dobijeno novim postupkom

stupak je proveravan indirektnom metodom upoređenja unutrašnjebalističkih parametara goriva dobijenog na ovaj način i postupkom ekstrudovanja.

Uporedni prikaz brzine sagorevanja goriva, približno istog sastava kao gorivo DRG10, izrađenog postupkom ekstrudovanja (DRG10/E) i postupkom slepljivanja (DRG10) prikazan je u tabeli 1.

Rezultati brzine sagorevanja, prikazani u tabeli 1, predstavljaju srednje vrednosti dobijene iz pet merenja. Odstupanje od srednje vrednosti brzine sagorevanja za konkretni pritisak nije veće od 5%. Novim postupkom izrađena su i pogonska punjenja sa i bez toploprovodnih elemenata (metalnih provodnika).

Ispitivanja uticaja metalnih provodnika na brzinu sagorevanja dvobaznih raketnih goriva izvedena su dvobaznim raketnim gorivom DRG10 i provodnicima od srebra (Ag), prečnika 0,20; 0,30 i 0,40 mm, bakra (Cu) prečnika 0,15 mm i mesinga To-80 prečnika 0,22 mm.

Radi prikaza reproduktivnosti procesa (homogenost goriva) u tabeli 2 prikazane su vrednosti vremena sagorevanja goriva DRG10 sa provodnikom od mesinga To-80.

Homogenost goriva DRG testirana je i preko mehaničkih karakteristika goriva, a rezultati su prikazani u tabeli 3.

Tabela 2

Vreme sagorevanja DRG10 sa mesingom To-80

Pritisak (bar)	Vreme (s)
80	1,976
	2,077
100	1,950
	1,995
120	2,043
	2,032
140	1,838
	1,861
160	1,797
	1,724

Tabela 3

Čvrstoća na pritisak goriva DRG10 izrađenog novim postupkom

Br. opita	Maks. čvrstoća (daN/cm ²)	Krit. čvrstoća (daN/cm ²)	Temp. (°C)
1	86,09	28,76	50
2	81,90	27,50	50
3	84,50	26,99	50
4	84,60	27,01	50
5	84,60	27,00	50
6	160,32	51,70	20
7	169,81	52,12	20

Rezultati govore da se dobija zadovoljavajući kvalitet dvobaznog raketnog goriva u pogledu unutrašnjebalističkih i mehaničkih karakteristika goriva.

Epruvete za Crawfordovu bombu pripremane su iz više uzoraka koji su rađeni prema definisanom tehnološkom postupku [5, 6].

Rezultati ispitivanja brzina gorenja u Crawfordovoj bombi prikazani su na slikama 2, 3 i 4.

Radi lakše procene uticaja pojedinih metalnih provodnika na brzinu sagorevanja osnovnog sastava goriva DRG10, prikazana je i zavisnost tzv. katalitičkog odnosa z u funkciji pritiska (slika 5):

$$z = \frac{v_p}{v}$$

Sl. 2 – Prikaz brzina gorenja goriva DRG10 bez provodnika i sa metalnim provodnikom od bakra

gde je:
 v_p – brzina sagorevanja goriva DRG10 sa provodnikom,
 v – brzina sagorevanja goriva DRG bez provodnika

Sl. 3 – Prikaz brzina gorenja goriva DRG10 bez provodnika i sa metalnim provodnikom od mesinga

Sl. 4 – Prikaz brzina gorenja goriva DRG10 bez provodnika i sa metalnim provodnikom od srebra

Sl. 5 – Katalitička aktivnost metalnih provodnika u procesu gorenja goriva DRG

Tabela 4
Rezultati statičkih opita u eksperimentalnom motoru NS-81 za DRG10

Br. op.	P _{sr} (bar)	V (mm/s)	T (K)	d _t (mm)
1	61	19,5	323	5
2	62	20,0	323	5
3	58	19,4	323	5
4	229	26,9	323	3,5
5	37	14,3	293	5
6	38	14,6	293	5
7	37	13,8	293	5

Pored eksperimentalnih rezultata iz Krafordove bombe, rezultati ispitivanja u opitnom motoru prikazani su u tabelama 4, 5 i 6. Sklopni crtež opitnog motora, OM-NS/81 (slika 6) namenski je konstruisan za ispitivanje goriva DRG sa metalnim provodnicima.

Oznake u tabelama imaju sledeća značenja:

- P_{sr} – srednji pritisak u komori motora;
- V – brzina gorenja;
- d_t – kritični presek mlaznika;
- U.v.r. – ukupno vreme rada motora;
- E.v.r. – efektivno vreme rada motora,
- T – temperatura ispitivanja.

Pri projektovanju pogonskih punjenja posebna pažnja mora se obratiti na definisanje početne površine gorenja. Ona treba da bude proizvod βSo , gde je So početna površina gorenja pogonskog punjenja bez metalnih provodnika, a koeficijent $\beta \geq z$, gde je z – koeficijent katalitičke aktivnosti odgovarajućeg metalnog provodnika. Koeficijent β raste sa porastom parametara erozivnog sagorevanja, što nije slučaj kod čeonog sagorevanja, tako da se može usvojiti da je $\beta = z$. Izgled pogonskog punjenja prikazan je na slici 7. Dimenzije pogonskog punjenja sa bakarnim provodnikom prečnika 0,15 mm, prema proračunu, iznose u mm: $a = 58$; $b = 40$; $c = 28$; $e = 130$; $f = 24$.

Sl. 6 – Opitni motor OM-NS/81

Tabela 5

Rezultati statičkih opita u eksperimentalnom motoru NS-81 za DRG10 sa provodnikom od mesinga To-80

Br. op.	P _{sr} (bar)	U.v.r.(s)	E.v.r.(s)	T(K)	V (mm/s)
1	87	4,2	3,8	293	35,5
2	91	4,1	3,7	293	36,5
3	110	4,2	3,7	293	36,5
4	92	5,1	4,5	243	30,0
5	101	4,5	3,9	243	34,6
6	59	5,6	5,2	243	26,0
7	58	4,2	3,9	313	34,6
8	53	3,6	3,3	313	41,0

Tabela 6

Rezultati statičkih opita u eksperimentalnom motoru NS-81 za DRG10 sa provodnikom Cu 0,15

Br. op.	P _{sr} (bar)	U.v.r.(s)	E.v.r.(s)	V (mm/s)	T (K)	d _t (mm)
1	178	2,60	2,10	64,5	293	5,0
2	204	2,25	1,75	77,1	293	4,5
3	153	2,80	2,30	58,6	293	5,0
4	169	2,60	2,10	64,3	293	4,5
5	54	3,60	3,30	38,6	243	7,0
6	172	2,50	2,00	67,5	313	5,0

Sl. 7 – Pogonsko punjenje sa metalnim provodnicima: 1 – pogonsko punjenje, 2 – metalni provodnik

Osnovne karakteristike korišćenih metalnih provodnika

MESING

Mesingana (legura bakra i cinka) žica prečnika 0,20 mm

Fizičke osobine mesinga CuZn20:

- gustina (g/cm³) 8,65
- temperatura topljenja (K) 1238–1273
- temperatura isparavanja (K) 1513
- toplotna provodljivost pri 20°C (J/cm*s.°C) 1,42

BAKAR

Bakarna žica prečnika 0,15 mm

Fizičko-hemijske karakteristike:

čistoća (%) 99,9

gustina (g/cm^3) 8,93

temperatura topljenja (K) 1356

temperatura ključanja (K) 2811

toplotna provodljivost na 810 K

(W/mK) 352,904

specifična toplota na 810 K (kJ/kgK) 0,443

toplota topljenja (kJ/kg) 125

toplota isparavanja (kJ/kg) 5058

SREBRO

Srebrna žica prečnika 0,2; 0,3 i 0,4 mm

Fizičko-hemijske karakteristike:

čistoća (%) 99,9

gustina (g/cm^3) 10,49

temperatura topljenja (K) 1235

temperatura ključanja (K) 2468

toplotna provodljivost na 810 K

(W/mK) 347,67

specifična toplota na 810 K (kJ/kgK) 0,268

toplota topljenja (kJ/kg) 84

toplotna isparavanja (kJ/kg) 2424

Analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja

Iz eksperimentalnih rezultata vidi se da se prikazanim postupkom mogu dobiti goriva, sa i bez metalnih provodnika, zadovoljavajućih unutrašnjebalističkih i mehaničkih karakteristika.

Brzine sagorevanja goriva DRG10 sa metalnim provodnicima znatno su uvećane. Najveći katalitički uticaj na brzinu sagorevanja pokazao je provodnik od srebra, prečnika 0,20 mm (uvećanje brzine sagorevanja 220 do 260% u odnosu

na osnovnu brzinu sagorevanja goriva u opsegu pritisaka 80 do 140 bar), a zatim provodnik od bakra prečnika 0,15 mm (slika 5). Brzina plamena, a time i brzina sagorevanja goriva, zavisi od prirode i debljine provodnika (slike 2, 3 i 4).

Ispitivanje uticaja debljine provodnika na brzinu sagorevanja praćena je na provodniku od srebra, prečnika 0,20; 0,30 i 0,40 mm. Za sada se ne može dati optimalna debljina provodnika (maksimum funkcije brzine plamena), pa treba ispitati uticaj provodnika od srebra prečnika manjeg od 0,20 mm. U ispitivanom opsegu prečnika provodnika, bolju efikasnost pokazuju goriva sa ugrađenim srebrnim provodnikom manjeg prečnika.

Analizom efekta ispitivanih metalnih provodnika na brzinu sagorevanja goriva DRG10, može se zaključiti da je najopravdanija primena provodnika od bakra i njegovih legura, pogotovo ako se ima u vidu da se do postizanja odgovarajućih unutrašnjebalističkih zahteva goriva sa provodnikom, može doći izborom provodnika, kao i prečnikom provodnika i polaznog goriva. Interesantno je da kataliza reakcije goriva DRG sa metalnim provodnicima ima suprotan trend od katalize sa balističkim modifikatorima, što se vidi iz funkcije porasta katalitičke aktivnosti sa porastom pritiska.

Goriva sa toploprovodnim elementima, koja su predmet ovog rada, interesantna su sa stanovišta njihove primene u PO i PA raketnim sistemima.

Ako se pođe od definicije specifičnog impulsa, može se uočiti da je potisak $F = I_{sp} m = I_{sp} \rho A_B v$ funkcija fizičko-hemijskih karakteristika i geometrije pogonskog punjenja, gde je:

m – maseni protok produkata sagorevanja pogonske materije;

ρ – gustina;

A_B – površina sagorevanja;
 v – brzina sagorevanja.

Za unapred izabranu pogonsku materiju I_{sp} i ρ su konstantni parametri, pa se potisak može povećavati povećanjem površine sagorevanja iil povećanjem brzine sagorevanja, što je ovde slučaj. To važi za motore čija konstrukcija ne omogućava promenu površine kritičnog preseka mlaznika u funkciji vremena.

Geometrijska konfiguracija pogonskog punjenja mora zadovoljiti niz protivrečnih zahteva:

- što veću površinu sagorevanja u neutralnom režimu rada (bez progresije ili regresije);
- što veći koeficijent zapreminske popunjenosti komore pogonskom materijom;
- što duže onemogućavanje kontakta vrelih produkata sagorevanja sa zidovima komore motora;
- što manju količinu regresivno dogorevajućih ostataka pogonske materije („sliver“).

Izbor geometrijske konfiguracije, kojom bi se povećala površina sagorevanja radi povećanja sile potiska, svodi se na neku od varijanti pogonskog punjenja sa unutrašnjim sagorevanjem. Pored svih balističkih prednosti ovakve konfiguracije, ona ima i niz nedostataka koji ograničavaju mogućnosti povećanja površine sagorevanja, a to su:

- tehnološke poteškoće izrade raznih unutrašnjih perforacija, pogotovo kod punjenja malog kalibra;
- velike dužine;
- mogućnost pojave erozivnog sagorevanja u kanalu;
- ograničena debljina svoda (zbog čvrstoće punjenja i vremena rada motora);
- pojava „slivera“ na kraju sagorevanja punjenja.

Izbor pogonskog punjenja sa čeonim sagorevanjem, koje obezbeđuje (na datom kalibru) konstantnu površinu sagorevanja, i povećanje, nekom od fizičkih ili hemijskih metoda, brzine sagorevanja, kvalitetan je način za povećanje sile potiska.

Jedna od tih metoda je ugradnja metalnih toplotnih provodnika u blok pogonske materije sa „cigaretnim“ sagorevanjem, čime se mogu postići bolje manevarske karakteristike i veća brzina leta taktičkih raketa, što je i ostvareno eksperimentima prikazanim u radu.

Zaključak

Značaj sprovedenog eksperimenta je u osvajanju postupka kojim se mogu dobiti punjenja većih prečnika nego postupkom ekstrudovanja, tako da se na ovaj način mogu ugraditi toploprovodni elementi u dvobazna raketna goriva radi značajnog uvećanja brzine sagorevanja [5, 6].

Primetan je trend smanjenja eksponenta pritiska u zakonitosti sagorevanja za gorivo dobijeno novim postupkom.

Rezultati ispitivanja brzine sagorevanja goriva sa provodnikom pokazali su da je najveći katalitički uticaj dao provodnik od srebra prečnika 0,20 mm. Uvećanje brzine sagorevanja u odnosu na brzinu sagorevanja osnovnog goriva iznosi 220 do 260% u intervalu pritiska 80 do 140 bara na temperaturi 22°C.

Može se konstatovati da je brzina sagorevanja goriva sa metalnim provodnicima funkcija materijala i debljine provodnika. Na primer, provodnik od bakra prečnika 0,15 mm ima veći uticaj na brzinu sagorevanja nego provodnik od srebra prečnika 0,40 i 0,30 mm, što je u

saglasnosti sa podacima iz [1, 2]. To ima praktičan značaj, pošto se izborom referentnog sastava većeg nivoa osnovnih brzina gorenja i manjim prečnikom provodnika od bakra mogu postići približno isti rezultati kao i sa provodnikom od srebra, cena pogonskih punjenja je znatno manja.

Eksperimentalni rezultati ukazuju na mogućnost ugradnje metalnih provodnika u dvobazna raketna goriva, čime se postižu bolje manevarske karakteristike i veća brzina leta taktičkih protivavionskih i protivoklopnih raketnih sistema.

Literatura:

- [1] Maslak, P., Lazić, Ž. Uzelac, M.: Postupak dobijanja blokova dvobaznog raketnog goriva, Naučno-tehnički pregled, VTI KoV JNA, Vol. XL., 1990.
- [2] Golub, G.: Journal of. Spacecraft, 1965., 2, 4, strana 593.
- [3] Boldorieva, A. V. i dr.: Fizika Gorenja i Vzriva № 4, 1976., str. 502–506.
- [4] Bjelogrić, Z.: Identifikacija pogonske grupe lakog prenosnog PVO sistema STINGER, diplomski rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1979.
- [5] Maslak, P., Uzelac, M.: Tehnički izveštaj, TI-607, Vojnotehnički institut KoV JNA, Beograd, 1981.
- [6] Jekić, D., Zukan, Lj., Maslak, P.: Elaborat, OP-203, Vojnotehnički institut KoV JNA, 1979.
- [7] Bahman, N., Lobanov, N.: Vlijanje teploprovođačkih elementov na skorost gorenja, Fizika Gorenja i Vzriva, № 3, 1976.