

# Kompozitna raketna goriva malih brzina sagorevanja

Miomir Bajlovski, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Vesna Rodić, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Mirko Uzelac, inž. tehn.<sup>1)</sup>

Razmatrani su sastavi kompozitnih raketnih goriva malih brzina sagorevanja. Praćen je uticaj sastava i sadržaja čvrste faze, sadržaja deprezenta brzine sagorevanja i odnosa frakcija amonijum perhlorata na brzinu i eksponent pritiska u zakonu brzine sagorevanja, kao i na vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja pri maksimalnoj sili.

*Ključne reči:* kompozitno raketno gorivo, zakon brzine sagorevanja, eksponent pritiska brzine sagorevanja, deprezent, zatezna čvrstoća, izduženje.

## Uvod

KOMPOZITNA raketna goriva su heterogene smeše kod kojih su oksidator neorganskog porekla i metalna gorivna komponenta međusobno fizički odvojeni i povezani u čvrst blok nekom organskom gorivno-vezivnom komponentom. Da bi kao takva imala primenu u raketnoj tehnici, neophodno je da kompozitna goriva kontrolisano i stabilno sagorevaju oslobađajući velike količine niskomolekulskih gasova visoke temperature, čijim se isticanjem kroz grlo mlaznika raketnog motora obezbeđuje potrebna kinetička energija za pogon rakete.

Širok dijapazon primene kompozitnih raketnih goriva u različitim tipovima raketnih motora omogućavaju njihove specifične karakteristike i specifičnost tehnologija koje se koriste u njihovoj primeni.

Kompozitna raketna goriva malih brzina sagorevanja koriste se najčešće kao punjenja za marševske motore raketa, gde je pogon konstrukciono rešen ugradnjom dva raketna motora, ili kod dvofaznih raketnih motora kao jedan raketni motor koji radi na dva nivoa pritiska.

Pogonsko punjenje rakete ostvaruje pritisak unutar komore motora sagorevanjem raketnog goriva. Mehanizam sagorevanja goriva zavisi od svojstava njegovih komponenata, mikrostrukture i parametara sredine. Osnovna balistička karakteristika raketnih goriva je njihova linearna brzina pomeranja granice između čvrstog goriva i gasovitih produkata sagorevanja i zavisi od uslova rada kao što je pritisak u komori za sagorevanje i temperatura na kojoj se sagorevanje odigrava, kao i svojstva samog goriva [1].

Oksidator je komponenta koja najviše utiče na brzinu sagorevanja, kako svojim učešćem tako i odnosom veličina čestica. Povećanjem učešća krupnih čestica oksidatora brzina sagorevanja se smanjuje, jer se na taj način smanjuje ukupna raspoloživa površina sagorevanja. Uloga metala u prahu kao gorivne komponente je da obezbeđuje željeni energetski nivo goriva, a u izvesnoj meri doprinosi i stabilnosti sagorevanja. Takođe i tip izabranog polimera u

gorivno-vezivnoj komponenti utiče na sagorevanje. Ostale komponente gorivno-vezivnog sistema utiču na mehaničke i reološke osobine i vek trajanja goriva.

Dodatak balističkih modifikatora je jedan od načina za podešavanje brzine sagorevanja. Efikasnost deprezenta brzine sagorevanja zavisi od sadržaja oksidatora u sastavu kompozitnog raketnog goriva.

## Eksperiment

U tabeli 1 prikazani su faktori ispitivanja.

**Tabela 1.** Faktori ispitivanja i oblast njihovog variranja

Faktor ispitivanja	Oblast variranja	Komponenta
Metalna komponenta	0.0-20,0%	aluminijum (Al), ( $d_{sr}=5 \mu\text{m}$ )
Deprezent brzine sagorevanja	0,0-2,0%	litijum-fluorid (LiF), pripremljen mlevenjem ( $d_{sr}=5 \mu\text{m}$ )
Oksidator	70,0 - 85,0%	bimodalna smeša amonijum perhlorata
Gorivno-vezivna komponenta	15,0-30,0%	na bazi hidroksiterminiranog polibutadiena (HTPB)
Odnos frakcija oksidatora ( $AP_{10}/AP_{200}$ )	0,43 - 2,3	sitna frakcija pripremana mlevenjem ( $d_{sr}=10 \mu\text{m}$ ) i krupna frakcija ( $d_{sr}=200 \mu\text{m}$ )

Sastavi goriva urađeni tokom ovog ispitivanja prikazani su u tabeli 2.

Gorivo je izrađivano homogenizacijom komponenata na temperaturi od 60°C i pod vakuumom u vakuum planetarnom mešaču. Umrežavanje goriva trajalo je 120 časova na temperaturi od 70°C.

Određivanje zakona brzine sagorevanja obavljano je u eksperimentalnom motoru EM 2 u oblasti pritisaka od 20 bar do 100 bar na temperaturi od 20°C.

Ispitivanje mehaničkih osobina radeno je na kidalici INSTRON model 1122, upotrebom JANAF "C" epruveta brzinom kretanja klema od 50 mm/min, na temperaturi od

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

25°C.

Tabela 2. Ispitivani sastavi goriva

Šarža	Al (%)	Vezivo (%)	LiF (%)	AP-10 (%)	AP-200 (%)	R* (AP <sub>10</sub> /AP <sub>200</sub> )
1591	2000	15,00		19,50	45,50	0,43
1592		30,00		21,00	49,00	0,43
1595	10,00	22,50		20,25	47,25	0,43
1597	10,00	15,00	1,00	22,20	51,80	0,43
1603		15,00		59,50	25,50	2,33
1606	6,67	15,00	0,67	34,63	43,03	0,80
1608		15,00		25,50	59,50	0,43
1611	1000	15,00		22,50	52,50	0,43
1623		15,00		42,50	42,50	1 00
1624	6,67	20,00		22,00	51,33	0,43
1628	6,67	15,00		34,83	43,50	0,80
1708		15,00	1,00	25,20	58,80	0,43
1712		15,00	2,00	24,90	58,10	0,43
1713		22,50	1,00	22,95	53,55	0,43
1720	10,00	14,50	1,50	22,20	51,80	0,43
1721	10,00	14,00	2,00	22,20	51,80	0,43
1722	6,67	14,17	1,50	34,63	43,03	0,80
1723	6,67	13,67	2,00	34,63	43,03	0,80
1724		23,50		22,95	53,55	0,43
1725		21,5	200	22,95	53,55	0,43

\*- odnos frakcija AP<sub>10</sub>/AP<sub>200</sub>

## Rezultati i diskusija

Goriva malih brzina sagorevanja u praksi se najčešće koriste u raketnim motorima koji rade na pritiscima od 30 bar do 50 bar i to je razlog zbog koga je analiza ispitivanih sastava u pogledu brzina sagorevanja rađena na pritisku od 40 bar, a ne na referentnom od 70 bar.

Iz podataka dobijenih ispitivanjem izlivenih sastava izračunati su zakoni brzine sagorevanja. Vrednosti brzina sagorevanja na pritisku od 40 bar i eksponenta pritiska iz dobijenih zakona brzina sagorevanja prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Brzine, eksponenti i predeksponencijalni faktor

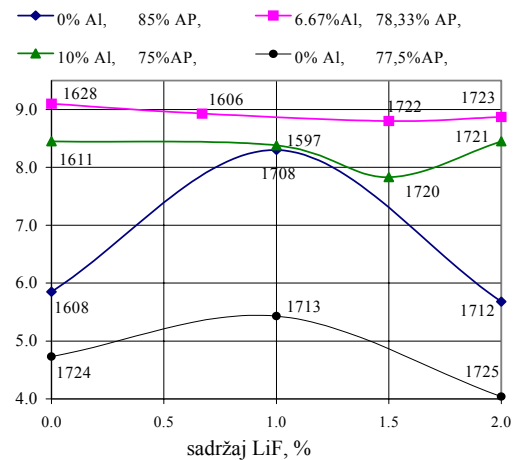
Šarža	V <sub>40</sub> (mm/s)	n	Šarža	V <sub>40</sub> (mm/s)	n
1591	7,29	0,380	1628	9,10	0,443
1592	3,29	0,225	1708	8,30	-0,050
1595	5,09	0,457	1712	5,68	-0,014
1597	8,38	0,380	1713	5,43	-0,331
1603	11,53	0,463	1720	7,83	0,515
1606	8,93	0,419	1721	8,45	0,391
1608	5,85	0,384	1722	8,70	0,473
1611	8,45	0,395	1723	8,87	0,473
1623	9,08	0,424	1724	4,73	0,150
1624	6,66	0,385	1725	4,04	-0,377

### Utjecaj komponenata sastava na brzinu sagorevanja

Promena brzine sagorevanja u funkciji sadržaja LiF za sastave sa sadržajem čvrste faze od 75% do 85%, sa i bez aluminijuma prikazana je na sl.1.

Na sl.1 može se videti da se najniže vrednosti brzine sagorevanja dobijaju za sastave s najmanje čvrste faze i s najvećim sadržajem LiF. Povećavanjem sadržaja čvrste

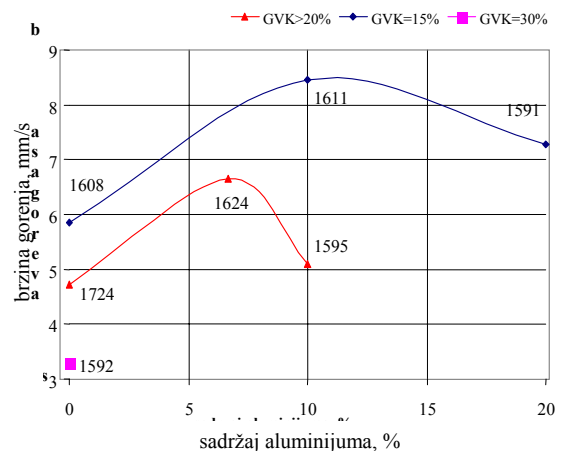
faze, brzine sagorevanja rastu. Zamenom dela oksidatora s aluminijumom, dolazi do daljeg porasta brzine sagorevanja. Najveće brzine dobijene su za sastave sa 6,67% Al zbog toga što je u ove sastave ugrađen oksidator s odnosom frakcija 0,8, dakle preovlađuje učešće sitne frakcije. Za ostale sastave ovaj odnos je bio 0,43.



Slika 1. Zavisnost brzine od sadržaja LiF za sastave sa i bez Al

Jasno se uočava da ugradnja LiF kao depresanta brzine sagorevanja ima značajnijeg efekta samo na sastave bez metalne komponente i kada su sadržaji LiF preko 1,5%.

Zavisnost brzine sagorevanja od udela aluminijuma za goriva sa tri nivoa sadržaja GVK data je na sl.2.



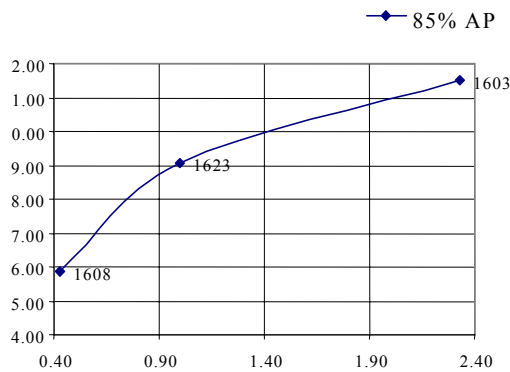
Slika 2. Zavisnost brzine sagorevanja od sadržaja Al za različite sadržaje GVK

Aluminijum kao komponenta goriva povećava vrednost brzine sagorevanja jer svojim prisustvom utiče na nivo oslobođene energije i povećava temperaturu sagorevanja. Veće brzine za sastave sa 6,67% Al su posledica većeg učešća sitne frakcije oksidatora (R=0,8).

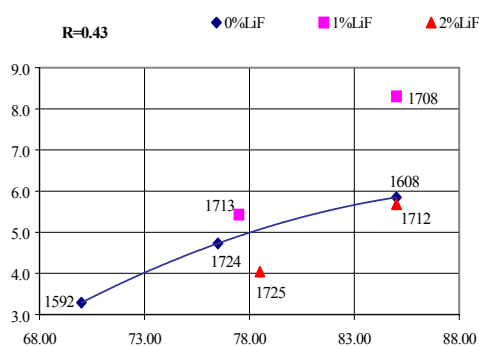
Zavisnost brzine sagorevanja od promene odnosa frakcija amonijum perhlorata za sastave sa 85% čvrste faze bez učešća aluminijuma i LiF prikazana je na sl.3, a zavisnost brzine sagorevanja od sadržaja oksidatora za sastave s konstantnim odnosom frakcija i različitim sadržajem aluminijuma i LiF prikazana je na sl.4.

Promenom odnosa frakcija može se efikasno uticati na promenu brzine sagorevanja. Dve prikazane zavisnosti pokazuju da se veća promena brzine postiže promenom odnosa frakcija R sa 0,43 na 2,33 od povećanja sadržaja oksidatora sa 7% na 85%, tako da se sadržaj krupne frakcije

može povećati do onih granica koje to ostali zahtevi (mehaničke i reološke karakteristike) dozvoljavaju.



Slika 3. Zavisnost brzine sagorevanja od odnosa frakcija AP

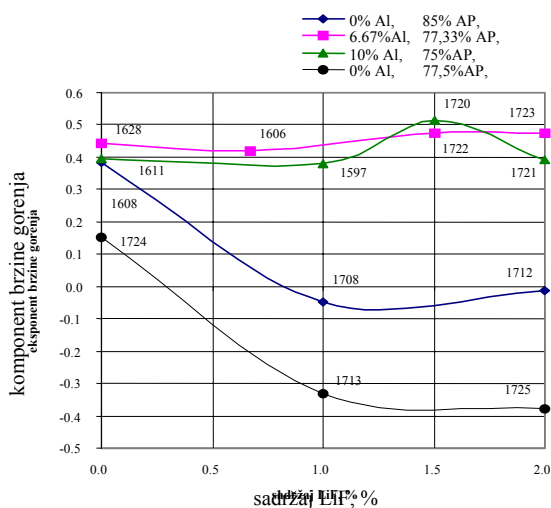


Slika 4. Zavisnost brzine sagorevanja od sadržaja AP

Sastav brzine sagorevanja od 4,04 mm/s na pritisku od 40 bar, dobijen za sadržaj oksidatora od 76,5% i odnosom frakcija 0,43 i sa 2% LiF je sastav najniže brzine dobijen tokom ispitivanja koji je primenljiv u praksi. Ukoliko sve ostale komponente zadržimo na istom nivou a povećamo sadržaj oksidatora na 85%, brzina poraste za oko 40%.

*Uticaj komponenata sastava na eksponent pritiska u zakonu brzine sagorevanja*

Promena eksponenta u zakonu brzine sagorevanja u funkciji sadržaja LiF za sastave sa sadržajem čvrste faze od 85%, sa i bez metalne komponente i za sastav sa sadržajem čvrste faze od 77,5% bez metalne komponente prikazana je na sl.5.



Slika 5. Zavisnost eksponenta pritiska od LiF za sastave sa i bez Al

Vrednosti eksponenta koje su dobijene za sastave sa aluminijumom i sadržajem čvrste faze od 85% nalaze se u rasponu od 0,39 do 0,48, što su karakteristične vrednosti eksponenta za goriva na bazi HTPB. Za sastave sa oko 85% čvrste faze na eksponent nema bitnog uticaja promena sastava čvrste faze, dodavanje aluminijuma ili promena odnosa frakcija oksidatora.

Goriva bez Al sa 85% oksidatora pokazuju da sadržaj LiF od 1% do 2% utiče na snižavanje vrednosti eksponenta do "plato" efekta. Sastavi goriva sa sadržajem oksidatora od 76,5 % do 77, 5% i LiF od 1% do 2% pokazuju takođe neosetljivost brzine sagorevanja na promene pritiska s još nižim, pa i negativnim vrednostima eksponenta. Platoniziranje goriva uz prisustvo LiF bez učešća aluminijuma ograničeno je na oblast pritiska od 40 bar do 80 bar, jer se na višim pritiscima pojavljuje nestabilno sagorevanje.

Veći udeo sitne frakcije oksidatora obezbeđuje bolji kontakt s LiF, kao i s vezivom, što u procesu sagorevanja obezbeđuje jače difuziono mešanje između produkata pirolize oksidatora i produkata razlaganja veziva u gasnoj fazi, a time i veću efikasnost deprezenta. Uloga deprezenta brzine sagorevanja je usporavanje reakcije termičkog razlaganja oksidatora ili reakcije u gasnoj fazi menjajući temperaturni gradijent prenosa toplote iz gasne faze na površinu sagorevanja, izazivajući pad njene temperature, pa tako i smanjenje brzine razlaganja njenih komponenata [2].

*Uticaj komponenata sastava na zateznu čvrstoću i izduženje pri maksimalnoj sili*

Vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja pri maksimalnoj sili prikazane su u tabeli 4.

Tabela 4. Rezultati ispitivanja mehaničkih osobina

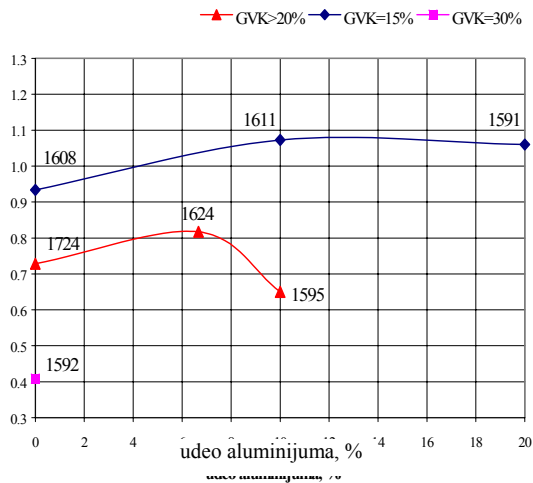
Šarža	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	Šarža	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)
1591	1,060	41,37	1628	1,214	32,3
1592	0,408	105,84	1708	0,949	32,06
1595	0,650	85,09	1712	0,891	31,96
1597	1,000	29,80	1713	0,592	59,24
1603	1,382	25,19	1720	1,109	33,00
1606	1,103	31,42	1721	1,148	38,28
1608	0,934	30,86	1722	1,324	28,60
1611	1,073	33,22	1723	1,392	24,62
1623	1,285	27,7	1724	0,728	63,32
1624	0,817	59,0	1725	0,755	64,01

Značajniji uticaj na mehaničke karakteristike se javlja kod promena sadržaja i sastava čvrste faze. Praćene su vrednosti zatezne čvrstoće  $\sigma_m$ , i izduženja pri maksimalnoj sili  $\epsilon_m$ , na sobnoj temperaturi.

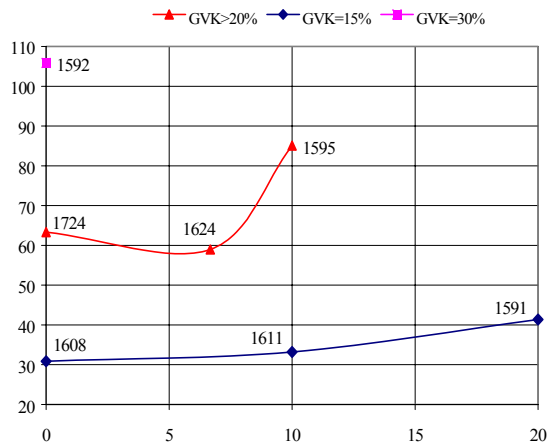
Povećanje sadržaja aluminijuma na račun GVK, prikazano na sl.6, malo utiče na promene zatezne čvrstoće. Međutim, vrednost izduženja, prikazana na sl.7, za sastav sa sadržajem GVK većim od 20% i Al od 10%, pokazuje porast od oko 40% u odnosu na sastave sa 6,67% Al i bez Al.

Može se konstatovati da se kod sastava s većim sadržajem GVK (iznad 20%), dodatkom aluminijuma u

iznosu od deset i više procenta, može postići značajan porast izduženja pri maksimalnoj sili, a da se pri tome ne izazovu veće promene zatezne čvrstoće.

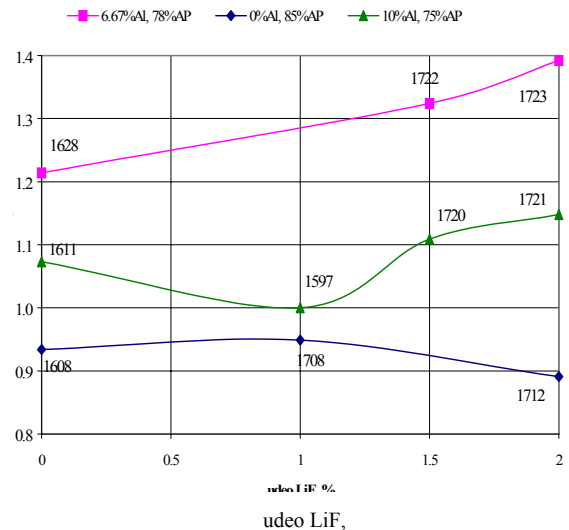


Slika 6. Zavisnost zatezne čvrstoće od udela Al

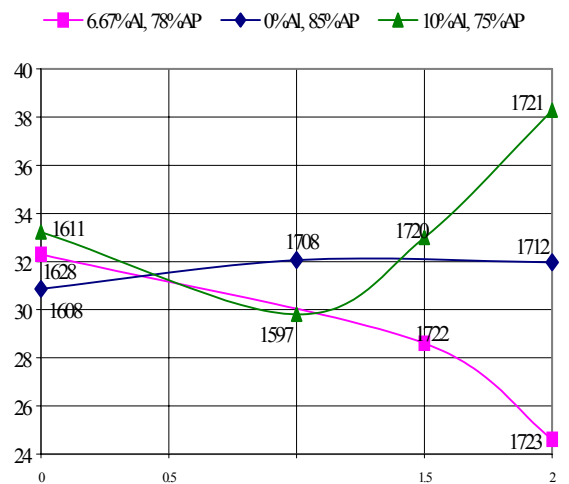


Slika 7. Zavisnost izduženja od udela Al

Promene zatezne čvrstoće i izduženja u zavisnosti od udela LiF za sastave sa 0, 6,67 i 10% Al i ukupnim sadržajem čvrste faze od 85%, prikazane su na slikama 8 i 9.

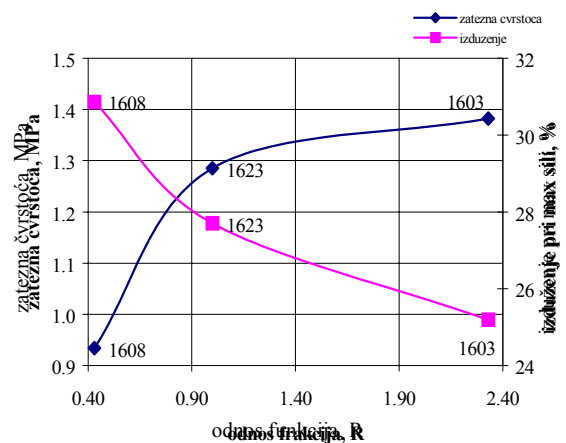


Slika 8. Zavisnost zatezne čvrstoće od udela LiF



Slika 9. Zavisnost izduženja od udela LiF

Najveće promene zatezne čvrstoće i izduženja uočavaju se kod sastava sa 2% LiF gde promene iznose više od 50%. Mora se reći da sastavi sa 6,67% Al imaju oksidator s odnosom frakcija 0,8, dok je kod ostalih sastava taj odnos 0,43. Usled toga se i najznačajnije promene vrednosti mehaničkih osobina po apscisi dešavaju kod sastava s odnosom frakcija od 0,8.



**Slika 10.** Zavisnost zatezne čvrstoće i izduženja od odnosa frakcija

Na osnovu izvršene analize može da se zaključi da promena odnosa frakcija ima veći uticaj na mehaničke karakteristike od uticaja koji imaju zamena dela oksidatora sa Al i LiF. Povećanje sadržaja sitne frakcije sa zamenom dela oksidatora aluminijumom doprinosi povećanju zatezne čvrstoće, ali na izduženje ima suprotan uticaj i smanjuje ga za oko trećinu.

**Zaključak**

U radu je ispitan širok dijapazon goriva u pogledu sastava i sadržaja čvrste faze i deprezenta brzine sagorevanja i s različitim odnosima frakcija oksidatora.

Najniže vrednosti brzine sagorevanja, oko 4 mm/s na pritisku od 40 bar, dobijene su za sastave s najmanjim sadržajem čvrste faze i najvećim sadržajem LiF. Efikasnost LiF kao deprezenta na ispitivanim sastavima nije velika i prisutna je tek kada je njegov sadržaj ~2%, ali je evidentno da je kod zahteva za ekstremno malim brzinama njegovo prisustvo korisno.

Povećavanjem sadržaja čvrste faze i zamenom dela oksidatora sa Al, brzine sagorevanja rastu.

Sastavi u koje je ugrađivan aluminijum rezistentni su u pogledu uticaja LiF na brzinu sagorevanja, što ukazuje da se male brzine sagorevanja aluminiziranih raketnih goriva mogu ostvariti samo izborom pogodnih frakcija oksidatora. Konstatovano je da promena odnosa frakcija ima veći uticaj i na mehaničke karakteristike od uticaja koji imaju zamena dela oksidatora metalom i deprezentom. Povećanje sadržaja

sitne frakcije uz zamenu dela oksidatora aluminijumom doprinosi povećanju zatezne čvrstoće, ali na izduženje ima surpotan uticaj. Generalno se može reći da prisustvo LiF i aluminijuma "ojačava" sastav i u manjoj meri ima ulogu "reinforcing" materijala.

Goriva s manjim sadržajem oksidatora, od oko 77%, i sadržajem LiF preko 1% pokazuju neosetljivost brzine sagorevanja na promene pritiska, eksponent blizak nuli ("plato" efekat), a dobijene su i negativne vrednosti eksponenta. Mala osetljivost na promene pritiska je prednost za goriva koja je poseduju i predstavlja dobru preporuku za njihovu primenu u praksi.

Dobijeni rezultati istraživanja omogućili su proširenje postojeće baze podataka kompozitnih raketnih goriva i predstavljaju dobru osnovu za dalje produblivanje saznanja o relevantnim uticajima konstituenata na kompozitna raketna goriva svrstana u grupu goriva malih brzina sagorevanja.

**Literatura**

- [1] TIMNAT,I. *Raketnie dvigateli na hemičeskom topliv*. Mir Publishers, Moskva, 1990.
- [2] AKHNAZAROVA,A KAFAROV,V. *Experiment Optimization Chemistry and Chemical Engineering*, Mir Publishers, Moskow 1969.
- [3] Gurdip. Burning rate modifiers for composite solid propellants. *J. Scient Ind. Res.*,1978, vol.37, p.80.

Rad primljen: 15.5.2002.god.

