

## METODA ODREĐIVANJA ČVRSTOĆE NA SMICANJE VEZE IZMEĐU DVOBAZNOG RAKETNOG GORIVA I INHIBITORA

UDC: 621.45.07-6 : 620.179.4

### Rezime:

*U ovom radu prikazana je metoda za određivanje čvrstoće na smicanje (adhezione čvrstoće) spoja između dvobaznog raketnog goriva (DRG) i inhibitora, na bočno i čeonu inhibiranim pogonskim punjenjima. Određena je čvrstoća na smicanje korišćenjem metode pritiskivanja na više bočno i čeonu inhibiranih pogonskih punjenja. Opisan je i uticaj sastava inhibitora na karakter i jačinu veze DRG-a i inhibitora.*

*Ključne reči: čvrstoća na smicanje, inhibitor, dvobazno raketno gorivo.*

---

## METHOD OF DETERMINATION OF THE SHEAR STRENGTH OF THE DOUBLE BASE ROCKET PROPELLANT-INHIBITOR BOND

### Summary:

*This study shows a method for determining the shear strength (adhesion strength) of the double base propellant-inhibitor bond on laterally and frontly inhibited grains. Shear strength is determined on several laterally and frontly inhibited grains. The influence of inhibitor composition on the bond nature and strength is described.*

*Key words: shear strength, inhibitor, double base propellant.*

---

### Uvod

Pogonska punjenja raketnog motora, punjenje generatora gasa, obično je inhibirano po nekim površinama. U određenim slučajevima, npr.: neodgovarajući sastav inhibitora, dugotrajno skladištenje, termička opterećenja i slično može doći do slabljenja ili narušavanja – odlepljenja veze goriva i inhibitora. To najvećim delom može biti posledica razlika u temperaturnim koeficijentima dilatacije između goriva i inhibitora, zaostalih unutrašnjih napona kao rezul-

tat skupljanja inhibitora u toku očvršćavanja, nedovoljne termodinamičke podnošljivosti osnovnih komponenti u gorivu i inhibitoru i drugo [1].

Ukoliko spoj inhibitora i pogonskog punjenja nije odgovarajuće jačine, doći će do neželjenog povećanja površine sagorevanja, odnosno nekontrolisanog prirasta produkata sagorevanja. Usled porasta pritiska u komori može doći i do eksplozije ili progorevanja komore raketnog motora. Radi toga je važno poznavati veličinu čvrstoće na smicanje (adhezionu čvrstoću) veze inhibitora i goriva.

U dostupnoj literaturi postoji nekoliko metoda kojima se može meriti jačina veze između goriva i inhibitora, kao što su: metoda za određivanje adhezivne čvrstoće i energije aktivacije procesa odlepljivanja, metoda merenja unutrašnjih napona u inhibiranom barutnom zrnju KONZOLNOM metodom [1], Peel test (metoda ljuštenja), ispitivanje otpornosti lepka na smicanje pri zatezanju [3], određivanje smicajne čvrstoće [5] i dr.

Pomenutim metodama moguće je odrediti čvrstoću veze goriva i inhibitora na posebno pripremljenim uzorcima u laboratorijskim uslovima.

Osnovna ideja autora je da se definiše metoda za određivanje jačine veze goriva i inhibitora na realnim pogonskim punjenjima uzetim iz tekuće proizvodnje ili iz skladišta.

Ovom metodom može se određivati čvrstoća na smicanje spoja DRG-a i inhibitora za svako slobodno pogonsko punjenje cilindričnog oblika, koje je inhibirano po spoljnim, unutrašnjim ili čeonim površinama, a ne može se određivati čvrstoća na smicanje spoja DRG-a inhibitora u obliku kalota. Proizilazi da se ova metoda može koristiti kao standardna metoda za određivanje jačine veze goriva i inhibitora.

Čvrstoća na smicanje, dobijena na ovaj način, služi za kontrolu kvaliteta spoja DRG – inhibitor (DRG – I), lepljenog spoja DRG – DRG ili kompaktnosti i čvrstoće DRG. Ovom metodom može se ispitivati uticaj starenja na čvrstoću veze spoja DRG – inhibitor [2], a pogodna je za kontrolu kvaliteta u serijskoj proizvodnji, kao i u fazama istraživanja i razvoja.

## Eksperimentalni deo

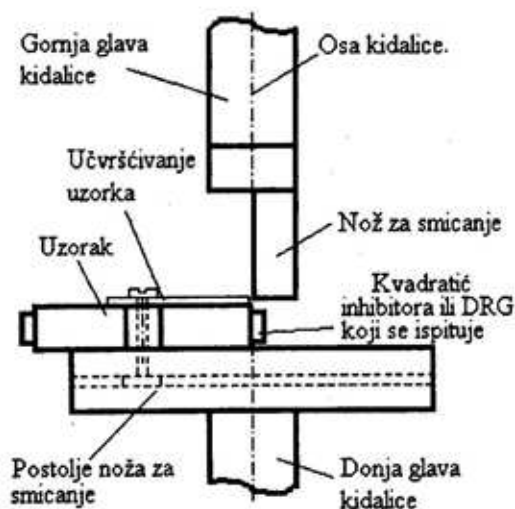
### Uredaj za ispitivanje otpornosti na smicanje

Za određivanje čvrstoće na smicanje koristi se kidalica sa termokomorom koja ima odgovarajuću konstrukciju, tako da se glava (gornja ili donja) može pomicati u vertikalnom pravcu konstantnom brzinom. Opseg opterećenja uređaja treba da bude takav da opterećenje pri smicanju bude u području od 15% do 85% najveće vrednosti na skali [3].

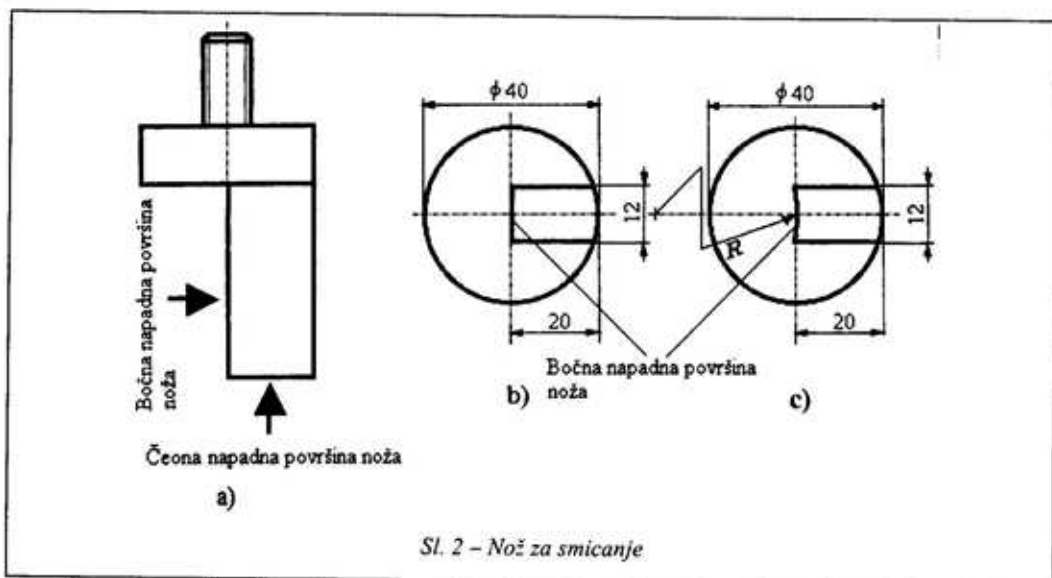
### Alat za smicanje

Alat za smicanje [4] sastoji se od noža za smicanje, postolja noža za smicanje i učvršćivača uzorka. Skica alata za smicanje i način postavljanja na kidalicu prikazani su na slici 1.

Nož za smicanje (slika 2) postavlja se u gornju glavu kidalice. Profil bočne na-



Sl. 1 – Alat za smicanje i način postavljanja na kidalicu



Sl. 2 – Nož za smicanje

padne površine noža za smicanje (slike 2b i 2c) mora biti ravan (u slučaju ispitivanja ravnih površina čeonih inhibitora – slika 2b) ili sa odgovarajućim radijusom,  $R$ , (u slučaju ispitivanja zakrivljenih površina inhibitora slika 2c), a koji je jednak radijusu veze inhibitora – DRG (slika 4).

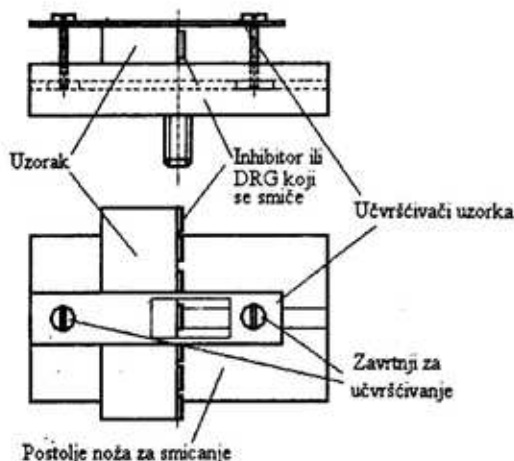
Postolje noža za smicanje (slika 3), pričvršćuje se na donju glavu kidalice (sli-

ka 1). Uzorak se postavlja i učvršćuje na postolje noža za smicanje, tako da površina smicanja bude u osi kidalice. Učvršćivanjem se sprečava proklizavanje uzorka u toku delovanja opterećenja, tj. omogućava se održavanje saosnosti sistema.

Učvršćivač uzorka može biti ravan (neperforiran sa učvršćivanjem u jednoj tački – slika 1), ili perforiran (sa učvršćivanjem u dve tačke – slika 3), što zavisi od oblika korišćenog uzorka.

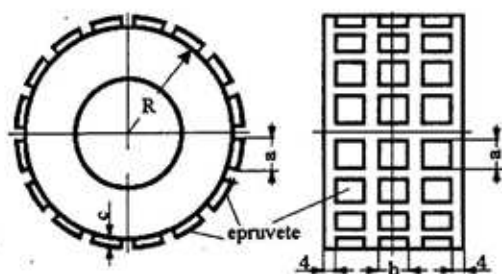
#### Priprema uzoraka i epruveta

Uzorak za ispitivanje može biti pogonsko punjenje ili segment pogonskog punjenja, cilindričnog (pun ili šupalj) ili kvadratnog oblika, sa maksimalnom visinom DRG do 50 mm. Oblik uzorka mora biti takav da obezbedi dobro učvršćivanje za postolje noža za smicanje, radi sprečavanja proklizavanja tokom opterećivanja. Mehaničkom obradom se, na datom uzorku, izrađuju epruvete usecanjem do baruta (kvadratići inhibitora), nominalnih dimenzija: širine  $a = 10$  mm, visine  $b = 10$  mm i



Sl. 3 – Postolje noža za smicanje i način učvršćivanja uzorka

debljine  $c$  jednake debljini inhibitora. Medusobno rastojanje između epruveta inhibitora (na uzorku) mora biti minimalno 4 mm. Jedna od mogućih konfiguracija uzorka (pogonskog punjenja ili segmenta pogonskog punjenja), spolja bočno inhibiranog, sa epruvetama za smicanje prikazana je na slici 4.



Sl. 4 – Izgled uzorka (pogonskog punjenja ili segmenta pogonskog punjenja), spolja bočno inhibiranog, sa urađenim epruvetama za smicanje

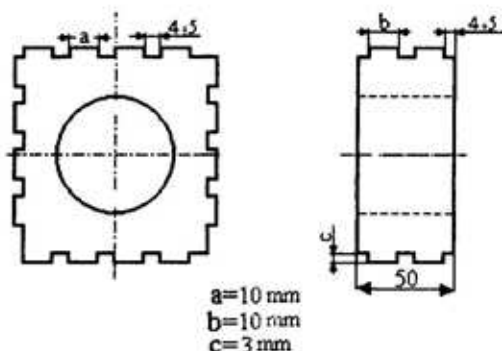
Za određivanje čvrstoće na smicanje strukture DRG koriste se uzorci sa epruvetama kao što je prikazano na slici 5.

Izrada epruveta na čeonom inhibitoru obavlja se na uzorku koji je isečen mehaničkom obradom iz pogonskog punjenja na način prikazan na slici 6.

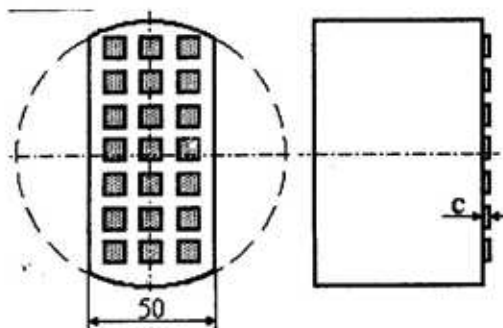
#### Postupak ispitivanja i obrada rezultata merenja

U ovom radu korišćena je brzina hoda glave kidalice od 10 mm/min. Uzorci su kondicionirani na 20°C i 50°C, u trajanju od 2 sata pre ispitivanja.

Epruveta koja se smiče postavlja se tako da smicajna površina bude u osi kidalice (slike 1 i 3). Na taj način se vrši učvršćivanje uzorka. U gornju glavu kidalice postavi se nož čija bočna napadna



Sl. 5 – Izgled uzorka DRG sa urađenim epruvetama za smicanje DRG u pravcu presovanja



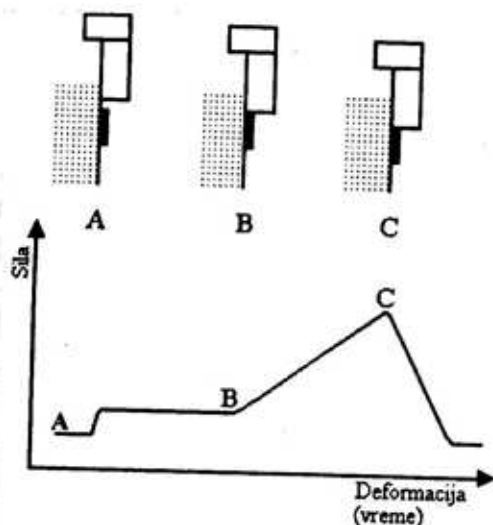
Sl. 6 – Izgled uzorka sa epruvetama za smicanje čeonih inhibitora

površina ima radijus jednak radijusu smicajne površine.

Izvrši se smicanje sve dok ne dođe do odvajanja inhibitora od DRG, tj. dok ne dođe do vraćanja sile na vrednost nula. Tokom izvršenog opita dobijaju se dijagrami sila – deformacija (vreme), oblika sličnog kao na slici 7.

Opit startuje u položaju A. Nož još ne dotiče gornju površinu epruvete, a između A i B može se registrovati sila trenja alata. U nekim slučajevima ova sila trenja ne mora se pojaviti. U položaju B nož počinje da smiče epruvetu, a sila raste sa vremenom. U položaju C epruveta je odvojena od uzorka. Maksimalna sila

smicanja epruvete,  $F_b$ , jeste razlika između C i nivoa sile trenja B. Ukoliko nema sile trenja onda je sila smicanja razlika nivoa sila C i A (slika 7).



Sli. 7 - Izgled dijagrama sila-deformacija (vreme)

Čvrstoća na smicanje izračunava se iz poznate sile smicanja,  $F_b$ , i površine epruvete koja se smiče. Čvrstoća na smicanje,  $\tau$ , je:

$$\tau = \frac{F_b}{a \cdot b}$$

gde je:

$F_b$  – sila smicanja pri odvajanju epruvete od uzorka (daN);

$a$  – širina epruvete koja se smiče (cm);

$b$  – visina epruvete koja se smiče (cm).

### Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

Obavljena su ispitivanja čvrstoće na smicanje DRG i veze DRG-a i inhibitora na bočno i čeonu inhibiranim pogonskim punjenjima. Sastavi inhibitorne mase,

kojima je vršeno bočno inhibiranje, prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1

Sastavi ispitivanih inhibitora

Sastavi inhibitora			
A		B	
Komponenta	Mas. udeo (%)	Komponenta	Mas. udeo (%)
Etilceluloza	40,0	Polimetilmetakrilat	20,0
Punilac	41,0	$Cr_2O_3$	0,9
$Cn_2O_3$	1,0	B.kis.	3,5
B. kis.	3,0	GNC	5,5
GNC	7,0	Punilac	31,0
Plastif. - 1	8,0	Plastif. - 2	14,0
		Metilmetakrilat	25,0
		Katalizator	0,1

Na 100 mas. delova inhibitora A dodaje se 30/100 delova smeše etilacetat : etilalkohol (75:25)

Ispitivanje čvrstoće na smicanje DRG i veze DRG-a u inhibitora radeno je na tri bočno inhibirana pogonska punjenja. Pogonsko punjenje AA (probe E-39 i E-61) je iz faze razvoja starosti 10, odnosno 2 meseca. Pogonska punjenja BB i CC su iz serija koja su pre ispitivanja bila 18, odnosno 14 godina uskladištena u magacinima. Pogonska punjenja AA inhibirana su inhibitorom sastava A (tabela 1), a pogonska punjenja BB i CC inhibitorom sastava B (tabela 1). Sva tri pogonska punjenja su spoljnog prečnika oko 120 mm, a pogonsko punjenje BB je sa unutrašnjom zvezdom [4]. Uzorci sa epruvetama izrađeni su na način prikazan na slikama 4 i 5.

Srednje vrednosti rezultata ispitivanja, na datim temperaturama, sa odgovarajućim standardnim devijacijama i koeficijentima varijacije prikazane su u tabelama 2 i 3.

Kod ispitivanja veze DRG-I pogonskih punjenja BB i CC došlo je do odlepljenja pri smicanju po spoju DRG – in-

Rezultati ispitivanja čvrstoće na smicanje veze između DRG-a i inhibitora (DRG-I) i čvrstoće DRG, na 20°C

Karakteristike merenih veličina	Oznaka uzorka							
	E-39/01		E-61/01		CC		BB	
	DRG-I	DRG	DRG-I	DRG	DRG-I	DRG	DRG-I	DRG
Sred. vred. (MPa)	6,38	5,62	5,59	5,91	2,99	4,53	3,13	5,13
Stand. dev. (MPa)	0,48	0,28	0,62	0,28	0,19	0,23	0,23	0,18
Koef. varij. (%)	7,52	4,98	11,09	4,74	6,35	5,08	7,35	3,51
Br. ispitivanja	25	13	25	14	13	8	10	7

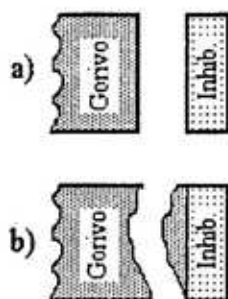
Tabela 3

Rezultati ispitivanja čvrstoće na smicanje veze između DRG-I i DRG, na 50°C

Karakteristike merenih veličina	Oznaka uzorka							
	E-39/01		E-61/01		CC		BB	
	DRG-I	DRG	DRG-I	DRG	DRG-I	DRG	DRG-I	DRG
Sred. vred. (MPa)	2,22	1,75	1,70	1,97	1,18	1,65	1,11	1,97
Stand. dev. (MPa)	0,11	0,09	0,19	0,12	0,15	0,15	0,10	0,09
Koef. varij. (%)	4,95	5,14	11,18	6,09	12,71	9,09	9,01	4,57
Br. ispitivanja	24	14	25	13	12	9	12	6

hibitor, tj. površina odlepljenja je ravna – glatka (slika 8a). Kod ostalih uzoraka došlo je do smicanja u masi DRG, tj. površina smicanja nije ravna već razudena – hrapava, slika 8b.

Ispitivanje čvrstoće na smicanje DRG i veze DRG – inhibitor radeno je na dva čeonu inhibirana pogonska punjenja. Pogonska punjenja DD i EE su iz serija koja su pre ispitivanja bila 16, odnosno 6 godina uskladištena u magacinima. Oba pogonska punjenja su čeonu inhibirana inhibitorom od etilceluloze (EC) [4]. Uzorci sa epruvtama prikazani su na slici 6.



Sl. 8 – Prikaz karaktera odlepljenja-smicanja koje se opaža na kontaktnim površinama veze DRG-a i inhibitora

Srednje vrednosti rezultata ispitivanja, na datim temperaturama, sa odgovarajućim standardnim devijacijama i koeficijentima varijacije, prikazane su u tabelama 4 i 5.

Tabela 4

Rezultati ispitivanja čvrstoće na smicanje veze DRG-I i DRG, na 20°C

Karakteristike merenih veličina	Oznaka uzorka			
	EE		DD	
	DRG-I	DRG	DRG-I	DRG
Sred. vred., MPa	6,25	5,87	7,14	5,26
Stand. dev., MPa	0,27	0,21	0,67	0,23
Koef. varij., %	4,32	3,58	9,38	4,37
Br. ispitivanja	5	6	10	18

Tabela 5

Rezultati ispitivanja čvrstoće na smicanje veze DRG-I i DRG, na 50°C

Karakteristike merenih veličina	Oznaka uzorka	
	EE	
	DRG-I	DRG
Sred. vred., MPa	2,28	2,23
Stand. dev., MPa	0,02	0,10
Koef. varij., %	0,88	4,48
Br. ispitivanja	5	5



Kod oba ispitivana uzorka došlo je do smicanja u strukturi DRG, tj. površina smicanja nije ravna već razuđena – hrpava (slika 8b).

### **Analiza rezultata eksperimentalnih ispitivanja**

Analiza rezultata ispitivanja čvrstoće na smicanje veze između DRG inhibitora, na spolja – bočno inhibiranim realnim pogonskim punjenjima, na 20°C i 50°C (tabele 2 i 3), pokazuje da najveću čvrstoću na smicanje ima uzorak E-39/01. Najmanje vrednosti čvrstoće na smicanje veze DRG-a i inhibitora ustanovljene su kod pogonskih punjenja CC i BB, i one su približno dvostruko manje nego kod uzorka E-39/01.

Analiza rezultata ispitivanja čvrstoće na smicanje DRG, na 20°C i 50°C, tabela 2 i tabela 3, pokazuje da su srednje vrednosti čvrstoće na smicanje kod ispitivanih uzoraka međusobno vrlo slične, osim kod punjenja CC gde je ova vrednost manja.

Kod uzorka E-39/01, na obe ispitivane temperature, ustanovljeno je da je vrednost čvrstoće na smicanje veze između DRG-a i inhibitora veća od odgovarajuće vrednosti čvrstoće na smicanje DRG.

Može se pretpostaviti da na kontaktnoj površini veze između DRG-a i inhibitora kod pogonskog punjenja AA (probe E-39 i E-61) nastaje čvrsti rastvor kao rezultat rastvaranja nitroceluloze (NC) iz DRG i etilceluloze iz inhibitora u etilacetatu (tabela 1, sastav inhibitora A). Nakon isparavanja etilacetata ova smesa je odgovorna za dobijenu adhezionu čvrstoću između DRG i inhibitora. Zbog toga i

dolazi do kidanja kao što je prikazano na slici 8b, tj. došlo je do smicanja u masi DRG. Slično se može zaključiti i kod ispitivanja otpornosti na smicanje veze između DRG-a i inhibitora, na čeonu inhibiranim pogonskim punjenjima, sa inhibitorom od etilceluloze. Ovde isparljive komponente lepka rastvaraju, odnosno razmekšavaju kontakte površine DRG tj. NC i etilceluloze, stvarajući čvrsti rastvor NC i EC. Nakon isparavanja komponenti lepka nastala smesa je odgovorna za dobijenu adhezionu čvrstoću između DRG i inhibitora. Zbog toga se dešava tip kidanja prikazan na slici 8b.

Razlog što je čvrstoća na smicanje veze između DRG-a i inhibitora kod punjenja CC i BB znatno manja nego kod AA može biti razlika u sastavima inhibitora (tabela 1), dugotrajno skladištenje i/ili da je početna adheziona čvrstoća bila manja u momentu izrade. Da bi se znalo šta je u pitanju trebalo bi poznavati početno stanje. Može se pretpostaviti da ovde nije došlo do značajnijeg rastvaranja NC i DRG od metilmetakrilata, pa ni do stvaranja čvrstog rastvora između NC i PMMA (tabela 1), sastav inhibitora B, već da je adheziona čvrstoća rezultat pretežno „uklinjavanja“ inhibitorске mase u pore DRG.

Analiza rezultata ispitivanja čvrstoće na smicanje veze između DRG-a i inhibitora, na čeonu inhibiranim realnim pogonskim punjenjima, na 20°C (tabele 4 i 5), pokazuje da najveću čvrstoću na smicanje ima uzorak DD.

Analiza rezultata ispitivanja čvrstoće na smicanje DRG, na 20°C i 50°C (tabele 4 i 5), pokazuje da su srednje vrednosti čvrstoće na smicanje kod ispitiva-

nih uzoraka međusobno vrlo slične, kao i da su slične vrednostima prikazanim u tabelama 2 i 3.

Kod oba ispitivana uzorka, na obe ispitivane temperature, ustanovljeno je da je vrednost čvrstoće na smicanje veze između DRG-a i inhibitora veća od odgovarajuće vrednosti čvrstoće na smicanje DRG.

### Zaključak

Metodom opisanom u ovom radu određivana je čvrstoća na smicanje veze između DRG-a i inhibitora i kompaktnosti DRG. Čvrstoća na smicanje ove veze ispitivana je na inhibitorima na bazi polimetilmetakrilata i na etilceluloznim inhibitorima. Dobijene vrednosti slične su vrednostima prikazanim u literaturi, [1], iako je primenjena potpuno drugačija metoda, tj. u [1] je određivanje jačine veze između DRG-a i inhibitora vršeno na prethodno pripremljenim epruvetama, a

ne na epruvetama realnih pogonskih punjenja.

Ovom metodom moguće je na realnim pogonskim punjenjima odrediti čvrstoću na smicanje veze DRG-a i inhibitora, kao i praćenje promene čvrstoće na smicanje te veze, tokom vremena provedenog u skladištu. Kako se, u isto vreme, može pratiti i promena čvrstoće na smicanje unutar strukture DRG, moglo bi se ustanoviti i kolika je brzina smanjenja čvrstoće na smicanje ispitivane veze između DRG-a i inhibitora i unutar strukture DRG.

#### Literatura:

- [1] Čolaković, M.: Karakter i dugovečnost kontakta između inhibitora na bazi polimetilmetakrilata i čvrstog pogonskog goriva, doktorska disertacija, Zagreb, 1978.
- [2] Schwartz, A.: Aging effects on adhesion of inhibitor to propellant grains, National Defence Research Institute, Tumby, Sweden, 1976.
- [3] SNO 1094: Ispitivanje otpornosti lepka na smicanje pri zatezanju, 1987.
- [4] Tot, L.: Tehnički izveštaj, TI-004-01-0286, Vojnotehnički institut KoV VJ, Beograd, 2002.
- [5] JUS N.K.8.024: Određivanje smicajne čvrstoće, 1979.