Dr Radun Jeremić,
kapetan I klase, dipl. inž.

Primena principa temperaturno-vremenske analogije u reološkoj karakterizaciji raketnih goriva

Uvod

Čvrsta goriva za raketni pogon, pored fizičko-hemijskih i balističkih karakteristika, moraju da poseduju i odgovarajuće reološke*) (mehaničke) karakteristike, koje presudno utiču na pouzdanost raketnih motora.

Od trenutka proizvodnje, pa do eksploatacije (aktiviranja), raketni motor je izložen dejstvu mnogobrojnih opterećenja koja prouzrokuju različita naprezanja u pogonskom punjenju, utiču na promene reoloških karakteristika raketnih goriva, što ima za posledicu smanjenje pouzdanosti sistema u celini.

Naravno, pogonsko punjenje mora izdržati sva ova naprezanja bez oštećenja, ili narušavanja strukturnog integriteta. U protivnom, pri aktiviranju i letu rakete može doći do eksplozije raketnog motora usled narušenog režima sagorevanja i porasta pritiska u komori iznad dozvoljene vrednosti.

U inženjerskoj praksi, za utvrđivanje strukturnog integriteta, pouzdanosti i veka upotrebljivosti raketnih mo-

tora sa čvrstim gorivom, uobičajen je pojam strukturna analiza.

Cilj strukturne analize je da se, na osnovu geometrije pogonskog punjenja, uslova okoline i opterećenja, izvrši proračun naponskog stanja raketnog motora i, uz korišćenje odgovarajućeg kriterijuma čvrstoće, predvidi njegovo ponašanje u različitim uslovima skladištenja i eksploatacije.

Po svom sastavu raketna goriva spadaju u grupu polimernih materijala, pa njihova fizičko-mehanička svojstva u osnovi imaju viskoelastični karakter.

Razlika između viskoelastičnih i elastičnih materijala jeste u relaciji između naprezanja i deformacije. Dok se elastična analiza zasniva na postojanju konstanti proporcionalnosti (Youngov modul elastičnosti) između naprezanja i deformacije, kod viskoelastičnih materijala ova relacija je daleko složenija, jer mora, istovremeno, uzeti u obzir faktore vreme, temperaturu i brzinu deformacije, koji izrazito utiču na njihova reološka svojstva [1—3].

Na osnovu nekih literaturnih izvora iz problematike reološke karakterizacije, kao i na osnovu rezultata sopstvenih istraživanja [1—5], može se zaključiti da je za eksplicitno izražavanje uticaja vremena, temperature i brzine deformacije na reološka svojstva

*) Samo ime reologija doslovce označava nauku o tečenju. Međutim, danas pojam reologija obuhvata i gotovo sve aspekte deformacije polimernih materijala pod dejstvom bilo kakvih sila.

raketnih goriva nemoguće postaviti odgovarajući matematički model, koji bi davao zadovoljavajuće rezultate za praktičnu upotrebu. Razlog tome jeste u nemogućnosti postavljanja pouzdane teorijske osnove za razvoj takvih modela, što je posledica složene strukture raketnih goriva na mikroskopskom nivou i njihovog kompleksnog ponašanja na makroskopskom nivou.

U tu svrhu još uvek je nezamenljiv princip temperaturno-vremenske analogije (TVA) koji se zasniva na ekvivalentnosti između temperature i vremena. Po ovom principu, na ponašanje materijala smanjenje temperature ima isti efekat kao i skraćanje vremena, odnosno povećanje brzine deformacije, i obratno. Na taj način, princip omogućava da se na osnovu kratkovremenih laboratorijskih eksperimenata vrši prognoziranje vrednosti reoloških parametara za različite temperature i vremena, odnosno brzine deformacije.

U radu su, na osnovu rezultata ispitivanja temperaturno-vremenske zavisnosti relaksacije naprezanja i testova jednoosnog zatezanja za različite temperature i brzine deformacije, primenom principa TVA, dobijene kompleksne krive relaksacionog modula, modula elastičnosti, maksimalnog naprezanja i maksimalne deformacije za kompozitno raketno gorivo na bazi poliuretana (PU).

Osnove principa temperaturno-vremenske analogije (TVA)

Interesantno je da je princip TVA empirijski definisan pre nego što su utvrđene njegove teoretske osnove, koje leže u Rouseovoj teoriji molekulskih relaksacionih procesa [6]. U zoni prelaza iz staklastog u viskoelastično stanje, gde su odgovarajuća viskoelastična svojstva posledica koordiniranog kretanja strukturnih jedinica koje je definisano jednim prosečnim koeficijentom trenja ξ_0 , Rouse je dao izraz za

predviđanje distribucije relaksacionog spektra:

$$H = \frac{\rho R T}{M} \sum_{i=1}^n \tau_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (1)$$

$$\tau_i = a^2 z^2 \xi_0 / 6 \pi^2 i^2 k T \quad (2)$$

gde je:

- ρ — gustoća,
- M — molekulska masa,
- δ — Dirakovo delta,
- a — karakteristična dimenzija,
- z — stepen polimerizacije,
- k — Boltzmanova konstanta.

Na osnovu izraza (1) i (2) vidi se da temperatura utiče preko nekoliko faktora. Izraz (1) sadrži faktor temperature, ali će se i gustoća, u izvesnoj meri, sa povećanjem temperature, smanjivati zbog termičke dilatacije. U izrazu (2), takođe, postoji faktor T , ali se i karakteristična dimenzija može malo menjati, naročito ako postoje jake prepreke slobodnoj rotaciji u polimernom lancu. Međutim, efekat temperature najizraženiji je kod koeficijenta trenja, koji se jako smanjuje sa temperaturom. Ova tri efekta mogu se objediniti u faktor a_T , koji je jednak odnosu između vremena relaksacije τ_i na temperaturi T i nekoj referentnoj temperaturi T_0 :

$$\frac{(\tau_i)_T}{(\tau_i)_{T_0}} = a_T = \frac{(a^2 \xi_0)_T \cdot T_0}{(a^2 \xi_0)_{T_0} \cdot T} \quad (3)$$

Budući da je ovaj odnos isti za sve τ_i , efekat povećanja temperature T_0 do T na logaritamsku zavisnost spektra H ispoljava se u vertikalnom pomaku krive za $\log \rho T / \rho_0 T_0$ i horizontalnom pomaku za $\log a_T$, dok će oblik krive ostati isti (sl. 1).

U primeni ovih pomaka na eksperimentalne krive podrazumeva se da je svaka distribucija na spektru proporcionalna iznosu $\rho R T$, a da je svako relaksaciono vreme proporcionalno iznosu $a^2 \xi_0 / T$, bez obzira na to što drugi elementi Rouseove teorije mogu biti predmet modifikacije zbog faktora dis-

tribucije molekulskih masa, hidrodinamske interakcije i drugih uticaja [1].

Na taj način, eksperimentalna kriva, dobijena na temperaturi T , može se »redukovati« na poziciju koju bi imala na temperaturi T_0 prikazivanjem zavisnosti $H_p = HT_0\rho_0/T\rho$ u funkciji τ/a_T , pod uslovom da su koeficijent termičkog širenja $\alpha = -(1/\rho)(\partial\rho/\partial T)$ i faktor a_T poznati. Ako se rezultati eksperimentalnih merenja na nekoliko različitih temperatura redukuju na T_0 za odgovarajuću vrednost a_T , trebalo bi da se dobije jedna zajednička, kompleksna kriva, koja predstavlja relaksacioni spektar H na temperaturi T_0 .

na, poznat kao WLF izraz, koji se i danas široko primenjuje u praksi [8]:

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_0)}{C_2+T-T_0} \quad (4)$$

Na osnovu mnogih literaturnih podataka o eksperimentalnim merenjima viskoziteta, autori WLF izraza utvrdili su da za mnoge linearne amorfne polimere, nezavisno od hemijske strukture, konstante C_1 i C_2 imaju univerzalne vrednosti:

$$\log \left(\frac{n}{n_g} \right) = \frac{-17,44 (T-T_g)}{51,6+T-T_g} \quad (5)$$

Sl. 1 Efekat povećanja temperature od T_0 do T na relaksacioni spektar

U daljem razvoju principa TVA bilo je pokušaja da se eksplicitno izrazi zavisnost $\log a_T$ od temperature. U početku se mislilo da je zavisnost $\log a_T \rightarrow f(1/T)$ linearna [7] (po analogiji sa temperaturnom zavisnošću brzina reakcije), što je, međutim, demantovano mnogobrojnim eksperimentalnim rezultatima. Godine 1953. Williams, Landell i Ferry za ovu zavisnost dali su analitički izraz, zasnovan na teoriji slobodnog volume-

Autori su, takođe, utvrdili da njihov izraz vredi u intervalu temperatura između T_g i $T_g + 100^\circ\text{K}$. U tom smislu predložili su da se, umesto T_g u izrazu 4, koristi neka referentna temperatura T_0 , koja je približno 50°K iznad T_g . U tom slučaju, konstante poprimaju nove vrednosti:

$$\log a_T = \frac{-8,86 (T-T_0)}{101,6+T-T_0} \quad (6)$$

Sl. 2 Rezultati merenja relaksacionog modula PU goriva

Značaj WLF jednačine jeste u nje-
noj generalnosti. Ona je, sve do danas,
ostala osnova mnogih teorijskih i prak-
tičnih istraživanja iz područja polime-
ra i reologije.

Eksperimentalni rad i diskusija

Merenje relaksacije naprezanja i
testovi jednoosnog zatezanja ispitivanog
kompozitnog goriva na bazi poliureta-
na realizovani su na uređaju za ispiti-
vanje materijala »MTS — 810«.

Za razliku od klasičnih kidalica,
koje omogućavaju brzine deformisanja
do 1 m/min, uređaj »MTS — 810« mo-
že postići konstantnu brzinu deforma-
sanja od 120 m/min. Snabdeven je tem-
peraturnom komorom za rad u tempe-
raturnom intervalu od -130 do 300°C .

Rezultati merenja relaksacionog modula

Relaksaciona merenja realizovana
su na uzorcima PU goriva u obliku
»JANNAF« epruveta [5] u tempera-
turnom intervalu od 193 do 313°K u
trajanju od 30 min. Vreme temperira-
nja uzoraka na radnu temperaturu iz-
nosilo je 2 sata.

Eksperimenti su izvođeni tako što
je epruveta deformisana na početnu
deformaciju, ϵ_0 , a zatim je na ploteru
beležena promena naprezanja sa vre-
menom.

Proračun relaksacionog modula vr-
šen je prema Farrisovoj jednačini [9]:

$$E(t) = \frac{\sigma(t_0)(1 + \epsilon_0)}{\epsilon_0} \quad \text{za } t_0 > \epsilon_0/\dot{\epsilon} \quad (7)$$

gde je:

$E(t)$ — relaksacioni modul u funkciji
vremena,

t_0 — vreme od početka opterećiva-
nja uzorka,

$\sigma(t_0)$ — izmereno relaksaciono napre-
zanje,

ϵ_0 — početna deformacija,
 $\dot{\epsilon}$ — brzina postizanja početne de-
formacije,
 t — relaksaciono vreme koje je je-
dnako:

$$t = t_0 - \epsilon_0/2\dot{\epsilon} \quad (8)$$

Postizanje početne deformacije vr-
šeno je konstantnom brzinom deforma-
cije od $2\%/s$. Eksperimenti su izvođeni
sa po pet ponavljanja pri istim uslovi-
ma. Koeficijent varijacije nije prelazio
 12% . Rezultati merenja relaksacionog
modula PU goriva grafički su prikazani
na slici 2.

Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezanjem

Ispitni uzorci raketnih goriva u ob-
liku »JANNAF« epruveta ispitivani su
jednoosnim zatezanjem. Na osnovu li-
teraturnih podataka [3] za ova ispiti-
vanja specijalno su izrađene »JANNAF«
hvataljke za ovaj tip epruveta (sl. 3).

SL. 3 »JANNAF« hvataljke

Prednost »JANNAF« hvataljki nad
hidrauličkim ili klasičnim hvataljkama
je u jednostavnosti postavljanja epru-
veta, kao i eliminaciji negativnih efe-
kata, kao što su proklizavanje, nepode-
šenost uzorka sa osom deformisanja,
uticaj sile stezanja, i dr. Kao rezultat

Rezultati jednoosnog zatezanja kompozitnog goriva tipa PU

Temperat. [°K]	Mereni parametri	Brzina deformacije, [mm/mm/min]							
		0,1		1		10		100	
		$\bar{X}$	V, [%]	$\bar{X}$	V, [%]	$\bar{X}$	V, [%]	$\bar{X}$	V, [%]
193	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	15,2	6,9	15,4	12,3	17,9	21,6	16,0	22,2
	ϵ_m , [%]	1,27	4,3	1,54	22,8	1,30	17,5	1,23	16,2
	E, [MPa]	1337	10,2	1405	7,7	1439	9,5	1450	15,9
203	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	18,7	9,8	20,0	1,4	21,0	7,5	17,0	9,3
	ϵ_m , [%]	2,18	16,5	2,01	3,3	2,23	8,8	1,42	11,2
	E, [MPa]	1181	8,5	1281	8,3	1420	6,1	1430	7,9
213	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	9,49	4,4	10,6	2,3	13,6	4,1	16,2	12,4
	ϵ_m , [%]	8,10	13,3	6,10	5,3	3,22	4,9	2,03	16,9
	E, [MPa]	304	10,2	462	7,9	781	4,4	1179	7,3
223	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	7,17	2,3	8,22	1,9	9,66	2,8	10,3	8,4
	ϵ_m , [%]	25,2	11,9	17,0	5,8	9,22	2,6	3,25	10,5
	E, [MPa]	101	6,6	203	0,3	359	3,9	500	6,6
233	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	4,48	2,2	6,43	2,4	6,65	3,9	9,04	5,2
	ϵ_m , [%]	35,2	11,7	40,0	6,1	12,5	5,1	7,30	6,5
	E, [MPa]	43,8	6,5	74,4	8,8	159	3,6	310	4,8
243	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	3,10	3,1	3,82	3,6	5,46	1,7	32,1	1,5
	ϵ_m , [%]	40,6	6,2	41,5	9,7	37,5	5,2	7,73	0,4
	E, [MPa]	19,3	4,9	26,4	7,9	57,8	7,6	150	7,1
253	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	2,21	0,8	2,72	3,7	3,91	3,1	5,55	0,9
	ϵ_m , [%]	40,9	5,1	43,4	4,1	50,3	5,5	47,3	3,7
	E, [MPa]	11,5	3,2	17,1	3,3	27,5	8,2	40,3	3,1
273	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	1,66	2,9	2,10	1,3	2,56	1,1	3,21	3,2
	ϵ_m , [%]	35,2	2,3	42,9	5,7	48,8	5,5	55,1	10,6
	E, [MPa]	7,97	4,3	9,60	2,9	12,5	2,9	16,4	0,5
293	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	1,30	2,9	1,50	3,3	1,85	4,9	2,22	0,4
	ϵ_m , [%]	28,6	2,2	34,8	5,7	40,1	7,0	49,4	3,6
	E, [MPa]	6,79	4,3	7,60	0,8	9,30	2,0	10,5	1,1
313	$\alpha\sigma_m$, [MPa]	0,93	7,8	1,09	3,2	1,39	3,2	1,93	1,3
	ϵ_m , [%]	19,6	2,9	24,8	5,8	30,7	4,1	43,1	1,8
	E, [MPa]	6,35	6,0	6,95	1,1	8,02	1,8	9,40	0,9

ispitivanja na zatezanje dobija se zavisnost naprezanja σ od deformacije ε , na osnovu koje se određuju ostali parametri, kao što su: tangentni modul elastičnosti E , maksimalna deformacija ε_m , maksimalno naprezanje σ_m , prekidna deformacija ε_{pr} , tačka popuštanja, i drugo.

Ispitivanje epruveta na zatezanje izvođeno je u temperaturnom intervalu od 193 do 313°K sa brzinama deformacije 0,01; 0,1; 1; 10; 100 i 1800 mm/mm/min, što odgovara brzini istezanja 0,7; 7; 70; 700; 7000 i 126000 mm/min.

Pre testiranja ispitni uzorci su temperirani na radnu temperaturu u trajanju od dva sata.

Potrebno je istaći da se maksimalna brzina deformisanja, sa kojom je rađeno, nalazi u granicama realnih brzina deformisanja koje se ostvaruju prilikom pripaljivanja raketnog motora, a koje se, prema nekim podacima [10], kreću u granicama od 1 do 6 m/s.

Eksperimenti su izvođeni sa po pet ponavljanja pri istim uslovima. Svi rezultati sadržani su u tabeli 1.

Određivanje faktora pomaka

Korišćenje principa TVA u praktične svrhe zahteva određivanje faktora pomaka (faktor temperaturno-vremenske redukcije), $\log a_T$, i konstrukciju odgovarajuće kompleksne krive.

Faktor pomaka može se odrediti na osnovu promene različitih reoloških parametara sa temperaturom i vremenom, odnosno brzinom deformacije, kao što su viskozitet, relaksacioni modul, podatljivost, modul elastičnosti, maksimalno naprezanje, maksimalna deformacija, zatim zavisnosti dinamičkog modula elastičnosti od frekvence, itd. Sa teorijskog stanovišta vrednosti faktora pomaka ne bi trebalo da zavise od načina određivanja.

U radu su faktori pomaka određivani na osnovu sledećih zavisnosti:

1. relaksacionog modula, $E(t)$, od temperature i vremena,
2. modula elastičnosti, E , od temperature i brzine deformacije,
3. maksimalnog naprezanja, σ_m , od temperature i brzine deformacije,
4. maksimalne deformacije, ε_m , od temperature i brzine deformacije.

U skladu sa WLF jednačinom, u radu je, kao referentna usvojena temperatura za 50°K iznad temperature staklastog prelaza.

Pri izboru uslova ispitivanja vođeno je računa da se izabere dovoljno mali interval između različitih temperatura koji obezbeđuje preklapanje eksperimentalnih krivih, tako da je moguće praktično merenje horizontalnih rastojanja među njima, tj. određivanje vrednosti faktora pomaka.

Radi određivanja faktora pomaka, izvršena je odgovarajuća obrada i grafičko predstavljanje eksperimentalnih rezultata u polulogaritamskim koordinatama, analogno relaksacionom modulu (sl. 2).

Modul elastičnosti, maksimalno naprezanje, maksimalna deformacija i relaksacioni modul množeni su faktorom T_0/T , u skladu sa kinetičkom teorijom gumolike elastičnosti [1]. Maksimalno naprezanje množeno je i sa faktorom $\alpha = 1 + \varepsilon_m$, kojim se uzima u obzir promena poprečnog preseka za vreme istezanja uzorka [9].

Kao referentne uzete su temperature za 50°K iznad temperature staklastog prelaza, u skladu sa WLF izrazom.

Faktori pomaka određivani su kao srednje rastojanje između određene krive na nekoj temperaturi T , i referentne krive na temperaturi T_0 . Predznak je utvrđen na osnovu položaja u odnosu na referentnu krivu.

Iznosi faktora pomaka za ispitivana raketna goriva, mereni na osnovu temperaturno-vremenske zavisnosti različitih reoloških parametara, sadržani su u tabeli 2.

Faktori pomaka PU goriva ($T_0=273$ K, $T_g=223$ K)

Temp. [°K]	Parametri na osnovu kojih su određivani $\log a_T$							
	E		σ_m		E_m		E (t)	
	$\Delta \log a_T$	$\log a_T$	$\Delta \log a_T$	$\log a_T$	$\Delta \log a_T$	$\log a_T$	$\Delta \log a_T$	$\log a_T$
193	2,68	14,00	2,02	13,62	2,60	12,76	2,08	11,06
203	3,16	11,32	3,06	11,60	2,32	10,16	2,10	8,98
213	1,82	8,16	2,32	8,54	1,76	7,84	1,70	6,88
223	1,32	6,34	2,10	6,22	0,90	6,08	1,86	5,18
233	1,28	5,02	1,32	4,12	1,88	5,18	1,06	3,32
243	1,60	3,74	1,22	2,80	2,70	3,30	0,98	2,26
253	2,14	2,14	1,58	1,58	0,60	0,60	1,28	1,28
273	0	0	0	0	0	0	0	0
293	-1,86	-1,86	-1,82	-1,82			-1,22	-1,22
313	-1,94	-3,80	-1,52	-3,34			-1,68	-2,90

Zavisnosti faktora pomaka od temperature ispitivanog goriva, dobijene na osnovu gornjih parametara, zbirno su prikazane na slici 4.

Tabela 3

Vrednosti empirijskih konstanti u WLF izrazu za različite načine određivanja

Regresionom analizom zavisnosti:

$$\log a_T = -C_1 - C_2 \frac{\log a_T}{\Delta T} \quad (9)$$

koji se dobija preuređenjem WLF izraza, određene su srednje i pojedinačne vrednosti empirijskih konstanti C_1 i C_2 za svaki način određivanja faktora pomaka (tabela 2).

Na slici 4 prikazane su i odgovarajuće teorijske zavisnosti faktora pomaka od temperature izračunate na osnovu srednjih vrednosti konstanti C_1 i C_2 .

Očigledno je da su odstupanja u granicama eksperimentalne greške, pa se može zaključiti da iznosi faktora pomaka ne bi trebalo da zavise od načina određivanja.

Međutim, postoji jedan izuzetak. Naime, zavisnost maksimalne deformacije od temperature i brzine deformacije nije u celom području u skladu sa principom TVA, po kojem bi povećanje brzine deformacije (skraćanje vremena) trebalo imati isti efekat, kao i smanje-

Zavisnost	C_1	C_2	$\bar{C}_1$	$\bar{C}_2$
E (t)	10,28	151,5	11,20	151,1
E ($\dot{\epsilon}$)	20,8	202,8		
σ_m ($\dot{\epsilon}$)	13,21	154,4		

nje temperature. Radi ilustracije na slici 5 dat je grafički prikaz zavisnosti maksimalne deformacije od brzine deformacije pri različitim temperaturama za poliuretansko gorivo. Vidi se da pri višim temperaturama i manjim brzinama deformacije, povećanje brzine deformacije ima suprotan efekat smanjenja temperature, pa u ovom području princip TVA ne važi i ne mogu se odrediti iznosi faktora pomaka.

Za niže temperature i veće brzine deformacije princip važi, pa su faktori pomaka određeni samo za ovo područje.

Sl. 4 Zavisnost faktora pomaka PU goriva od temperature za različite načine određivanja

Pored toga, treba naglasiti da je rasturanje rezultata maksimalne deformacije dosta veće od ostalih parametara, pa je i sa tog aspekta nepouzdanu određivanje faktora pomaka na ovaj način.

Konstrukcija kompleksnih krivih

Horizontalnim pomakom eksperimentalnih krivih zavisnosti ispitivanih reoloških parametara od vremena, od-

Sl. 5 Zavisnost maksimalne deformacije PU goriva od brzine deformacije za različite temperature

nosno brzine deformacije, prema referentnoj krivoj za određene vrednosti faktora pomaka, konstruisane su odgovarajuće kompleksne krive za ispitivano raketno gorivo koje su, sa svim neophodnim podacima, prikazane na slikama 6 do 9.

Radi provere primenljivosti principa temperaturno-vremenske analogije na uređaju »MTS — 810«, napravljen je veći broj kontrolnih eksperimenata.

Kontrolna ispitivanja relaksacionog modula realizovana su na po dve temperature u trajanju od 10 sati. Rezultati merenja ucrtani su na odgovarajućem mestu na kompleksnoj krivoj relaksacionog modula ovih goriva (sl. 6).

Kontrolna ispitivanja jednoosnim zatezanjem provedena su na nekoliko temperatura, pri brzini deformacije od $0,01 \text{ mm/mm/min}$ i maksimalnoj brzini od 1800 min^{-1} (što odgovara brzini zatezanja od 2 m/s), koju je moguće postići ovim uređajem. Srednje vrednosti rezultata eksperimenata od po pet ponavljanja, pri istim uslovima, ucrtani su na odgovarajućim mestima na kompleksnim krivama (sl. 7 do 9).

Očigledno je da je slaganje rezultata kontrolnih eksperimenata sa kompleksnim krivama odlično za sve ispitivane reološke parametre, sa izuzetkom prekidne deformacije u području manjih brzina deformacije i viših temperatura.

U dostupnoj literaturi [1, 2, 5, 11—13] nije primećeno da je posebno analizirano, pa čak ni isticano, da u jednom području zavisnosti maksimalne deformacije od temperature i brzine deformacije ne vredi princip TVA.

To se može objasniti činjenicom da su u tim eksperimentima korišćene male brzine deformacije, odnosno, primenjene su brzine koje omogućuju klasične kidalice, do 500 mm/min , što je, u poređenju sa mogućnostima sistema »MTS — 810« (2 m/s), manje za 240 puta.

Tako dobijene kompleksne krive pokrivaju samo područje levo od maksimuma kompleksnih krivih koje su dobijene u ovom radu (sl. 7 do 9), odnosno baš ono područje u kojem princip ne vredi. Time se može i objasniti veliko rasturanje rezultata u ovom području. Tako, u predelu maksimuma, pojedini rezultati kontrolnih eksperimenata za ϵ_m odstupaju i do 50% od srednje vrednosti na kompleksnoj krivoj.

Kontrolnim eksperimentima potvrđeno je slaganje samo desno od maksimuma (područje većih brzina i nižih temperatura), kako je to prikazano na slikama 7 do 9.

Analizom vremenske baze može se zaključiti koliki je efekat primene principa TVA, odnosno, kolika je mogućnost prognožiranja promene reoloških parametara sa temperaturom i vremenom, odnosno brzinom deformacije.

Na osnovu kompleksnih krivih, prikazanih na slikama 6 do 9, očigledno je da je vremenska baza za nekoliko redova veličina veća od vremena trajanja eksperimenata, odnosno eksperimentalnih brzina deformacija. Tako, na primer, na sobnoj temperaturi, kompleksne krive pokrivaju područje brzina deformacija do približno 10^{10} min^{-1} , dok najveća brzina primenjena u eksperimentima, iznosi 10^2 min^{-1} .

Zaključak

Rezultati istraživanja pokazali su da se, uz određena ograničenja, princip temperaturno-vremenske analogije može uspešno primeniti za prognožiranje reoloških svojstava čvrstih raketnih goriva u širokom intervalu temperatura i vremena, odnosno brzina deformacije.

Rezultati merenja faktora pomaka različitim metodama pokazuju da njegova vrednost ne bi trebalo da zavisi od načina određivanja.

Sl. 6 Kompleksna kriva relaksacionog modula PU goriva

Sl. 7 Kompleksna kriva modula elastičnosti PU goriva

Sl. 8 Kompleksna kriva maksimalnog naprezanja PU goriva

Sl. 9 Kompleksna kriva maksimalne deformacije PU goriva

Literatura:

- [1] Ferry J. D.: »Viscoelastic Properties of Polymers«, J. Wiley and Sons, Inc., New York-London, 1961.
- [2] Nielsen L. E.: »Mechanical Properties of Polymers and Composites«, Marcel Dekker, Inc., New York, 1974.
- [3] Tobolsky A. V.: »Properties and Structure of Polymers«, J. Wiley, New York, 1960.
- [4] Jeremić R.: »Temperaturno-vremenska analogija u reološkoj karakterizaciji raketnih goriva«, doktorska disertacija, VVTŠ, Zagreb, 1991.
- [5] Fitzgerald J. E., Huferd W. L.: »Handbook for The Engineering Structural Analysis of Solid Propellants«, CPIA pub. 214, 1971.
- [6] Rouse P. E., J. Chem. Phys., vol. 21, 1272 1953.
- [7] Harper R. C., Markovitz H., Wizz T. W., J. Polym. Sci., Vol. 8, 435 1952.
- [8] Williams M. L., Landel R. F., Ferry J. D., J. Am. Chem. Soc., vol. 77, 3701 1955.
- [9] Bills K. W., Bischel K. H.: »Time-Temperature Superposition does not hold for Solid Propellant Stress Relaxation«, CPIA Publication 283, The Johns Hopkins University, Laurel, 1977.
- [10] Barrere M., Haung N. C., Williams F. A.: »Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets«, The Advisory Group for Aerospace Research and Development, NATO, 1966.
- [11] Svob G. J., Mc Conel J. D.: »Structural Integrity of Solid Propellant Grains«, (simp. 82, Švedska).
- [12] Williams M. L., Blatz P. J., Shapery R. A.: »Fundamental Studies Relating to Systems Analysis of Solid Propellants«, Final Report GALCIT101, Guddenheim Aeronautical Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1961.
- [13] NASA: »Solid Propellant Grain Structural Integrity Analysis«, Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion), NASA-SP-83, 1973.