

Uticaj brzine deformacije na mehaničke karakteristike raketnih goriva

Dr Radun Jeremić, dipl.inž.¹⁾

Istraživano je ponašanje čvrstih raketnih goriva pri različitim režimima deformisanja. Ispitana je zavisnost modula elastičnosti, maksimalnog napreznja i maksimalne deformacije od brzine deformacije za nekoliko vrsta raketnih goriva u intervalu temperatura od -80 do +50°C. Dobijeni rezultati pokazuju da mehaničke karakteristike raketnih goriva izrazito zavise od brzine deformacije. Pokazano je, takođe, da se princip temperaturno-vremenske analogije može uspešno primeniti za predviđenje mehaničkih karakteristika raketnih goriva u širokom intervalu temperatura i brzina deformacija, a naročito za uslove koji vladaju za vreme pripaljivanja raketnog motora.

Ključne reči: Čvrsta raketna goriva, mehaničke karakteristike, temperaturno-vremenska analogija.

Uvod

IAKO balistički zahtevi uglavnom diktiraju konačnu konfiguraciju pogonskih punjenja raketnih motora, strukturni integritet raketnih goriva je najvažniji faktor pri određivanju pouzdanosti i veka upotrebljivosti raketnih motora. Zbog kompleksnog ponašanja raketnih goriva u uslovima delovanja različitih vrsta opterećenja, analiza strukturnog integriteta raketnih zrna predstavlja veoma složen zadatak. Po svom sastavu raketna goriva spadaju u grupu polimernih materijala zbog čega i njihove mehaničke karakteristike imaju viskoelastični karakter. Poznato je da viskoelastični materijali poseduju izrazitu temperaturno-vremensku zavisnost mehaničkih karakteristika, a često je prisutna i pojava nelinearne viskoelastičnosti [1]. Zato je i potpuna materijalna karakterizacija goriva veoma važna za pouzdanost rezultata strukturne analize.

Mehaničke karakteristike raketnih motora standardno se ispituju pri relativno malim brzinama deformisanja (brzina zatezanja ili pritiskivanja) koje se kreću do 1000 mm/min. Međutim, zavisno od konstrukcije i namene raketnih motora, brzine deformisanja raketnih zrna pri delovanju pritiska pripale kreću se od 1 do 6 m/s [2], pa je za pouzdanu analizu strukturnog integriteta veoma važno poznavanje ponašanja raketnih goriva u takvim režimima deformisanja.

Problem se može rešiti ispitivanjem mehaničkih karakteristika raketnih goriva pomoću specijalnih uređaja koji omogućuju velike brzine deformisanja [2] ili primenom principa temperaturno-vremenske analogije (TVA)[3].

U radu je primenjen kombinovan pristup korišćenjem obe metode.

Princip temperaturno-vremenske analogije

Za eksplicitno izražavanje uticaja vremena, temperature i brzine deformacije na mehaničke karakteristike raketnih goriva, veoma je teško postaviti matematički model koji bi davao zadovoljavajuće rezultate za praktičnu upotrebu.

Razlog tome je nemogućnost postavljanja pouzdane teorijske osnove za razvoj takvih modela, što je posledica složene strukture goriva i njihovog kompleksnog ponašanja pri različitim vremenskim i temperaturnim režimima opterećenja.

Za tu svrhu se za inženjerske potrebe još uvek široko primenjuje princip temperaturno-vremenske analogije, koji se zasniva na postojanju ekvivalentnosti između temperature i vremena. Prema ovom principu, na ponašanje materijala sniženje temperature ima isti efekt kao i skraćenje vremena, odnosno povećanje brzine deformisanja, i obratno. Na taj način, princip omogućava da se na osnovu kratko-vremenih laboratorijskih eksperimenata mogu predvideti mehaničke karakteristike za različite temperature i vremena, odnosno brzine deformisanja.

Na osnovu brojnih eksperimentalnih rezultata ispitivanja različitih polimera Williams, Landel i Ferry [3] su matematički izrazili princip TVA u obliku sledećeg izraza:

$$\lg a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (1)$$

gde su:

a_T – faktor temperaturno-vremenske korekcije ili faktor pomaka,

T_0 – referentna temperatura (obično 50 K iznad temperature ostaklivanja, T_g),

C_1 i C_2 – empirijske konstante.

Prema autorima WLF izraza, za mnoge linearne polimere empirijske konstante imaju univerzalne vrednosti i iznose: $C_1=8,86$, $C_2=101,6$. S obzirom da je to dosta gruba aproksimacija, za pouzdanije proračune neophodno je za svaki tip raketnog goriva odrediti vrednosti faktora pomaka i konstanti C_1 i C_2 što je najjednostavnije pomoću krivih relaksacionog modula $E(t)$, pri različitim temperaturama.

Na osnovu poznatih vrednosti faktora pomaka i rezultata ispitivanja mehaničkih karakteristika pri različitim

¹⁾ Vojnotehnička akademija VJ, 11000 Beograd, Ratka Rasanovića 1

temperaturama i brzinama deformacije, moguće je konstruisati odgovarajuće kompleksne krive modula elastičnosti E , maksimalnog napreznja σ_m i maksimalne deformacije ε_m . Kompleksne krive se obrazuju horizontalnim pomakom eksperimentalnih krivih zavisnosti mehaničkih karakteristika na različitim temperaturama i brzinama deformacije prema referentnoj krivoj za odgovarajuću vrednost faktora pomaka. Na taj način, primenom principa temperaturno-vremenske analogije, dobija se proširenje vremenske skale za nekoliko redova veličina čime je omogućeno predviđanje mehaničkih karakteristika za različite temperaturno-vremenske režime deformisanja.

Eksperiment

Ispitana je zavisnost mehaničkih karakteristika od brzine deformacije za tri tipa kompozitnih raketnih goriva (na bazi PU, CTPB i HTPB) i jednog dvobaznog goriva tipa NGR. Ispitivanja su vršena na standardnim JANAF uzorcima za jednoosno istezanje u temperaturnom intervalu od 193 K do 323 K pri konstantnoj brzini istezanja 0,7, 7, 70, 700, 7000, 70000 i 120000 mm/min (što odgovara brzinama deformacije od 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 i 1800 min^{-1}), sa po pet ponavljanja pri istim uslovima.

Na taj način dobijene su vrednosti modula elastičnosti, maksimalnog napreznja i maksimalne deformacije za svaku temperaturu i brzinu deformacije.

Ispitivanja su vršena na uređaju MTS-810, specijalne konstrukcije, koji omogućuje konstantne brzine deformisanja do 2 m/s, u temperaturnom intervalu od 143 K do 573 K.

Rezultati i diskusija

Na slikama 1, 2 i 3 prikazana je zavisnost modula elastičnosti, maksimalnog napreznja i maksimalne deformacije od brzine deformacije na temperaturi od 293 K za sva ispitivana goriva.

Dobijeni rezultati pokazuju izrazitu zavisnost mehaničkih karakteristika ispitivanih raketnih goriva od brzine deformacije. Pored činjenice da su uređaji za ispitivanje pri velikim brzinama deformacije složeni i veoma skupi, ovakav način ispitivanja povezan je sa nizom teškoća u vezi sa praktičnom realizacijom merenja [4] (pojava šumova u mernom signalu usled vlastitih oscilacija naponske ćelije, proklizavanje ekstenziometra za merenje deformacije i hvataljki za uzorak itd.). To je imalo za posledicu veliko rasturanje rezultata merenja pri brzini deformisanja uzorka od 2 m/s, gde je koeficijent varijacije iznosio preko 20%, dok se za manje brzine kretao ispod 10%.

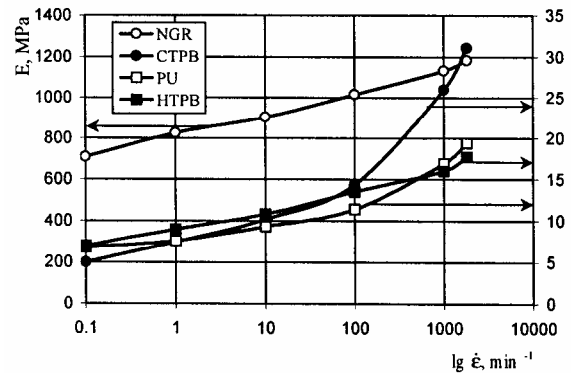
Zato je u mnogim slučajevima u tu svrhu opravdanija primena principa temperaturno-vremenske analogije.

Faktori pomaka, $\log a_T$, potrebni za konstrukciju master krivih, određeni su na osnovu krivih relaksacionih modula dobijenih na svim temperaturama ispitivanja za vreme od 30 min. Proračun relaksacionog modula vršen je prema Farrisovom izrazu [5] koji uzima u obzir promenu poprečnog preseka ispitivanog uzorka (epruvete):

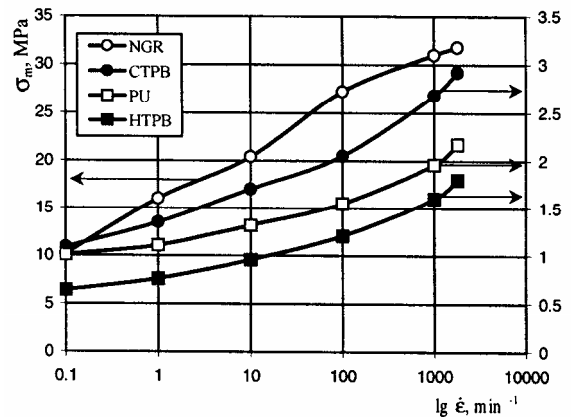
$$E(t) = \frac{\sigma(t_0)(1 + \varepsilon_0)}{\varepsilon_0} \quad \text{za } t_0 > \frac{\varepsilon_0}{\dot{\varepsilon}} \quad (2)$$

gde su:

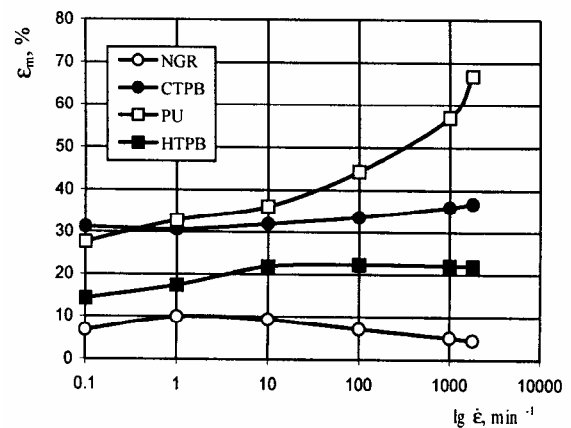
- t_0 – vreme od početka opterećenja uzorka s ,
- $s(t_0)$ – izmereno relaksaciono napreznje Pa ,
- e_0 – početna deformacija,
- $\dot{\varepsilon}$ – brzina deformacije (odnos brzine istezanja i početne dužine epruvete) s^{-1} ,



Slika 1. Zavisnost modula elastičnosti ispitivanih goriva od brzine deformacije ($T=293\text{K}$)



Slika 2. Zavisnost maksimalnog napreznja ispitivanih goriva od brzine deformacije ($T=293\text{K}$)



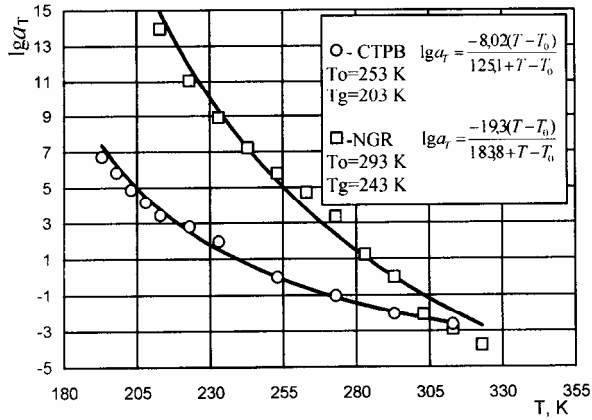
Slika 3. Zavisnost maksimalne deformacije ispitivanih goriva od brzine deformacije ($T=293\text{K}$)

t – relaksaciono vreme koje je jednako:

$$t = t_0 - \varepsilon_0 / 2\dot{\varepsilon}$$

Zavisnost faktora pomaka od temperature za raketna goriva tipa NGR i CTPB prikazana je na sl.4. Regresionom analizom ove zavisnosti određene su vrednosti empirijskih konstanti u WLF izrazu i one iznose:

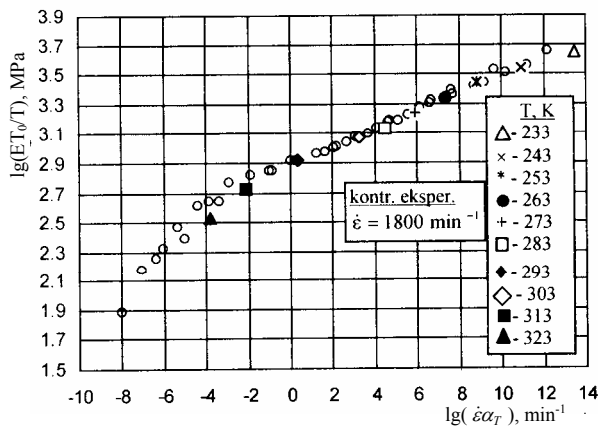
- za gorivo tipa CTPB: $C_1=8,02$; $C_2=125,1$
- za gorivo tipa NGR: $C_1=19,3$; $C_2=183,8$



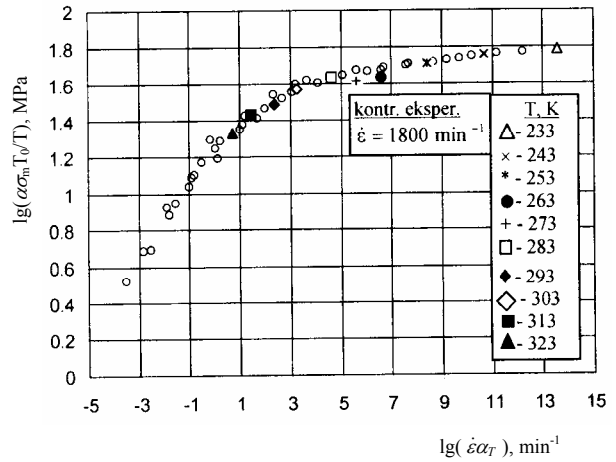
Slika 4. Zavisnost faktora pomaka od temperature CTPB i NGR goriva

Kompleksne krive modula elastičnosti, maksimalnog napreznja i maksimalne deformacije za oba tipa goriva prikazane su na slikama od 5 do 10.

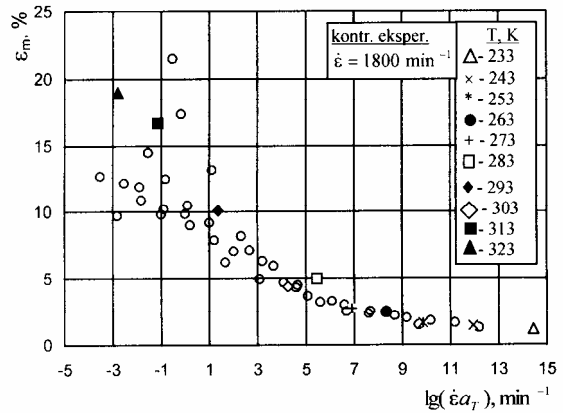
Vrednosti maksimalnog napreznja množene su sa faktorom $\alpha = 1 + \varepsilon_m$, kojim se uzima u obzir promena poprečnog preseka za vreme istezanja uzorka.



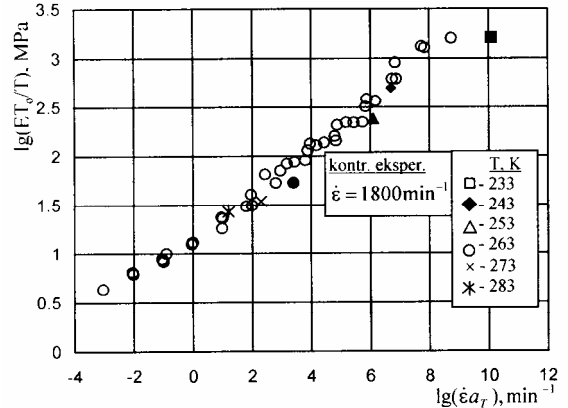
Slika 5. Kompleksna kriva modula elastičnosti goriva tipa NGR



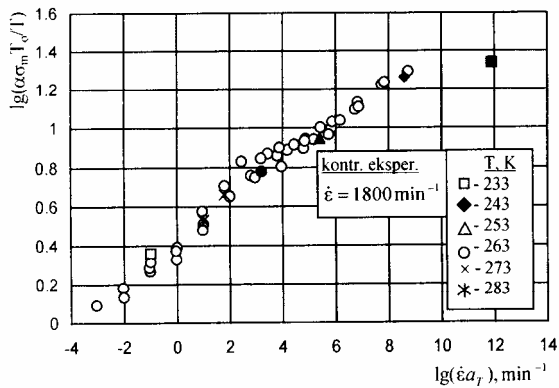
Slika 6. Kompleksna kriva maksimalnog napreznja goriva tipa NGR



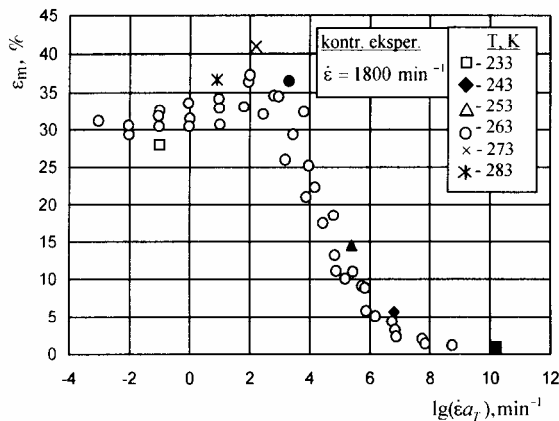
Slika 7. Kompleksna kriva maksimalne deformacije goriva tipa NGR



Slika 8. - Kompleksna kriva modula elastičnosti CTPB goriva



Slika 9. Kompleksna kriva maksimalnog napreznja CTPB goriva



Slika 10. Kompleksna kriva maksimalne deformacije CTPB goriva

Radi provjere primjenljivosti principa TVA urađeni su kontrolni eksperimenti sa velikom brzinom deformiranja (2 m/s) na nekoliko temperatura. Ovi rezultati su ucrtani na odgovarajućim mestima na slikama od 5 do 10.

Slaganje rezultata kontrolnih ispitivanja sa kompleksnom krivom je sasvim zadovoljavajuće. Nešto veće odstupanje je u području maksimuma krive maksimalne deformacije, odnosno u području u kome ne vredi princip TVA. Odstupanje je posebno izraženo kod goriva tipa NGR jer ono u termoreološkom pogledu predstavlja složen materijal.

Postojanje maksimuma na srednjem delu kompleksne krive maksimalne deformacije može da se objasni različitim mehanizmima mehaničke destrukcije levo i desno od maksimuma. Kod malih brzina deformacije presudan uticaj na iznos maksimalne deformacije imaju mikrodefekti u strukturi koji izazivaju koncentracije napreznja, razvoj i rast pukotina, što rezultira mehaničkom destrukcijom pri nižim deformacijama. Porastom brzine deformacije mikrodefekti imaju sve manje uticaja jer nema dovoljno vremena za razvoj i rast pukotina, pa je maksimalna deformacija diktirana relaksacionim procesima, odnosno sposobnošću polimernih lanaca da se ispravljaju i orijentišu u pravcu delovanja sile. U području desno od maksimuma za relaksacione procese nema dovoljno vremena, pa se

destrukcija odvija pri znatno nižim deformacijama.

Ova činjenica je veoma važna u analizi strukturnog integriteta zrna raketnih goriva za vreme aktiviranja raketnih motora na niskim temperaturama i izboru pravog kriterijuma čvrstoće.

Kompleksne krive modula elastičnosti i maksimalnog napreznja pokazuju da se granične vrednosti modula i maksimalnog napreznja dostižu na mnogo nižim temperaturama i većim brzinama deformacije u odnosu na neke literaturne rezultate, što je rezultat proširenja vremenske skale zahvaljujući primeni optimalnih temperatura i brzina deformacija za konstrukciju kompleksnih krivih.

Zaključak

Rezultati ispitivanja ponašanja nekoliko tipova raketnih goriva pri različitim režimima deformiranja pokazuju da modul elastičnosti, maksimalno napreznje i maksimalna deformacija izrazito zavise od brzine deformacije.

Praktična realizacija merenja mehaničkih karakteristika pri velikim brzinama deformiranja (2 m/s) bila je vrlo složena, praćena mnogim smetnjama (proklizavanje ekstenziometra, pojava velikih šumova u mernom signalu itd.) što je imalo za posledicu veliko rasturanje rezultata.

Pokazano je da se princip temperaturno-vremenske analogije može uspešno primeniti za predviđanje mehaničkih karakteristika raketnih goriva na različitim temperaturno-vremenskim režimima deformiranja, a naročito pri velikim brzinama deformacije koje se u praksi postižu u uslovima pripaljivanja raketnih motora. Rezultati pokazuju da pri ovim uslovima dolazi do izrazitog pada vrednosti maksimalne deformacije, čime ona postaje dominantan kriterijum čvrstoće u analizi strukturnog integriteta zrna raketnog goriva.

Literatura

- [1] DUNCAN,E.J.S, MARGETSON, J. Nonlinear Viscoelastic Theory for Solid Rocket Propellants based on cumulative damage approach. *Propell.,Expl.,Pyrot.*, 1998, no.23, p.94-104.
- [2] LEPIE,A.H. *Two Devices for high Speed Tensile Testing*. 14th meeting of the Joint Army-Navy-NASA-Air Force (JANNAF) Structures and Mechanical Behavior Working Group, Laurel, 15-17 February 1977, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Maryland 1977.
- [3] WILLIAMS,M.L.,LANDEL,R.F.,FERRY,J.D. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *J. Am. Chem. Soc.*, 1955, no.77, p.3701-3705.
- [4] FRANCIS,G. BUSWEL,J. *Service Life Prediction and Testing of Com-posite Propellant Rocket Motors*. Environmental Testing in the 90, 20th International Annual Conference of ICT, 27-30 june 1989, Karlsruhe (1989).
- [5] FARRIS,R.J. *Analysis of the Ramp-Strain Stres-Relaksation Test*. JANNAF Mechanical Behavior Working Group 8th Meeting 1969, CPIA Publication, vol.1, no.193, p.455 (March 1970).

Rad primljen: 29.5.2000.god.