Dr Miloš Čolaković,
pukovnik, dipl. inž.

PRILOG IZUČAVANJU STRUKTURNE ANALIZE RAKETNOG GORIVA

Rezime:

Dat je kratak pregled mogućih naprezanja i deformacija kojima je raketno gorivo izloženo za vreme čuvanja u skladištu, pripreme za eksploataciju i u toku eksploatacije. Opisan je postupak realizacije strukturne analize i navedeni nedostaci proračuna koji se zasniva na osobini viskoelastičnosti materijala. Na osnovu vlastitih istraživanja i iskustva u drugim zemljama istaknuta je potreba da se za dobijanje tačnijih rezultata strukturna analiza vrši uzimajući u obzir nelinearnu viskoelastičnost raketnog goriva.

Ključne reči: vreme upotrebe, predviđanje, modul relaksacije, struktura analiza, raketno gorivo, analitički postupak, metoda konačnih elemenata.

CONTRIBUTION TO STUDYING THE STRUCTURAL ANALYSIS OF ROCKET FUEL

Summary:

A brief review of possible stresses and deformation of rocket fuel while stored, in its preparation for exploitation and in the course of exploitation. The procedure of its structural analysis is described and shortcomings of the calculation based on the visco-elasticity of material are listed. On the basis of own research and experience from the other countries is underlined the need that for getting the more precise results in the structural analysis it should be performed with taking into account the non-linear visco-elasticity of the rocket fuel.

Key words: utilization time, relaxation module, structural analysis, rocket fuel, analytic procedure, final elements method.

Uvod

U uslovima skladištenja, povišene borbene gotovosti, u fazi pripreme za eksploataciju i u toku eksploatacije gorivo u raketnom motoru je izloženo različitim vidovima naprezanja i deformacija koja utiču na promenu mehaničkih osobina, a samim tim i na stvaranje uslova za nepravilno funkcionisanje sistema, eksploziju u trenutku paljivanja ili za vreme leta raketa.

S obzirom na složenost raketnog goriva, kao kompozitnog polimernog materijala, istaknute su karakteristike homogenih i kompozitnih goriva. Da bi se dobio jasniji uvid u to šta je do sada kod nas i u svetu urađeno u vezi sa predviđanjem vremena upotrebe raketnog goriva, data je šema strukturne analize, analize loma i verifikacije proračunom dobijenih rezultata. Neslaganje rezultata strukturne analize i analize loma dobijenih proračunom, uz raz-

matranje goriva kao viskoelastičnog materijala, nametnulo je ideju o proračunu koji će se zasnivati na nelinearnoj viskoelastičnosti. Na osnovu eksperimenata i podataka iz literature dati su dijagrami koji ukazuju na neophodnost proračuna, s obzirom na to da raketno gorivo ima osobine nelinearnog viskoelastičnog materijala.

Način proračuna naprezanja, pomoću metode konačnih elemenata, takođe utiče na vrednost dobijenih rezultata. Razlog tome je način formiranja mreže konačnih elemenata, što zavisi od vida naprezanja, odnosno oblika, konfiguracije zrna i načina njegove laboracije u raketni motor.

Korišćene oznake:

E	— modul elastičnosti,
$E(t)$	— modul relaksacije,
G	— modul smicanja,
K	— modul kompresibilnosti,
μ	— Poissonov broj,
α_1	— temperaturni koeficijent dilatacije,
λ	— toplotna provodljivost,
C_p	— specifična toplota,
ρ	— specifična masa,
v	— brzina kidanja,
t	— vreme,
a_T	— faktor temperaturno-vremenskog pomaka,
σ	— napon,
ε	— deformacija,
σ_m	— maksimalni napon,
ΔV	— promena volumena,
ε_m	— maksimalna deformacija.

Karakteristike goriva za raketne motore

Materijal na bazi polimera vremenom gubi svoje početne karakteristike, čak i u uslovima starenja na normalnoj temperaturi, a ovi procesi se ubrzavaju ako se temperatura menja i ako je materijal izložen bilo kom vidu optereće-

nja ili deformacija. Promene se manifestuju u mehaničkim osobinama i pojavom pukotina ili odlepljenja inhibitora, koja u trenutku pripaljivanja prouzrokuje porast pritiska i, najčešće, eksploziju raketnog motora. Kolika i kakva odlepljenja i deformacije će nastati zavisi, pre svega, od vrste materijala od kojeg je gorivo izrađeno, kompatibilnosti goriva sa ostalim elementima motora, a najviše od vrste i veličine naprezanja i deformacija kojima je gorivo izloženo. Pojavljuju se:

— temperaturna naprezanja koja su najizrazitija kod goriva ulivenog u raketni motor, a javljaju se i kod slobodnih punjenja za vreme dok se ne postigne termička ravnoteža, nakon čega nestaju (slika 1);

Slika 1 — Promena napona sa vremenom

— naprezanja usled porasta pritiska za vreme pripaljivanja, koja se povećavaju u slučaju nestabilnog sagorevanja (slika 2);

Slika 2 — Porast pritiska u fazi pripaljivanja

— naprezanja nastala usled akceleracije i rotacije;

— naprezanja kao posledica cikličnog opterećenja (temperatura, vibraciona, usled nestabilnog sagorevanja, i sl.).

Svi vidovi naprezanja mogu se izračunavati analitičkim i numeričkim metodama.

Da bi se naprezanja odredila treba raspolagati osnovnim mehaničkim, reološkim i termičkim karakteristikama goriva kao što su: modul kompresibilnosti (K), modul elastičnosti (E), Poissonov broj (μ), modul smicanja (G), toplotna provodljivost (λ), temperaturni koeficijent dilatacije (α_t), specifična toplota (C_p), specifična masa (ρ) i faktor temperaturno-vremenskog pomaka (a_T).

U proračunu se moraju uzeti u obzir zakonitosti ponašanja materijala, i to:

— elastično i elastoplastično, koje se karakteriše nezavisnošću mehaničkih i reoloških parametara,

— viskoelastično i viskoplastično, na koje utiču brzina i vreme.

Elastično i viskoelastično ponašanje može biti linearno i nelinearno. U prvom slučaju mehaničke i reološke osobine materijala zavise samo od brzine i vremena, a u drugom i od stepena deformacije i pritiska.

Pre početka proračuna mora se utvrditi zakon promene mehaničkih veličina sa vremenom. Za ovo utvrđivanje najjednostavniji je test kidanja sa rasterećenjem i praćenje povratnog hoda krive σ (ϵ).

Raketna goriva su, uglavnom, kompozitna i homogena. Pri deformaciji kompozitnih goriva dolazi do pojave vakuola, što je posledica odlepljenja polimera od oksidatora, a kao rezultat se javlja promena volumena, odnosno promena Poissonovog broja. Homogena goriva (dvobazna) homogena su po prirodi, ali ih tehnologija čini nehomogenim. Karakterišu se prisustvom tečne

faze koja pri naprezanju doprinosi disipaciji energije, što im daje više ili manje izražen viskozni karakter, čija posledica je diskontinuitet i nekompresibilnost, odnosno Poissonov broj $\mu = 0,5$.

Mehanička svojstva goriva definišu se u zavisnosti od stepena deformacije, brzine deformacije, pritiska i temperature, metodama kao što su: kidanje, relaksacija, puzanje, deformacija — relaksacija — kidanje i deformacija — prekid opterećenja — kidanje.

Postupak određivanja veka upotrebe

Procena veka upotrebe raketnog goriva, u pogledu njegove mehaničke izdržljivosti, zasniva se na upoređenju rezultata strukturne analize sistema motor-gorivo u trenutku proizvodnje i nakon određenog vremena. Opšta šema procene veka trajanja data je na slici 3.

Strukturna analiza se radi za sistem gorivo, inhibitor, lajner, termozaštita, komora.

Priložena opterećenja i geometrija zrna zavise od vrste motora, njegove namene i načina laboracije. Analitička metoda, kao način izračunavanja stvarnih napona i deformacija, daje vrednosti po poprečnom preseku zrna, ali ne i njihovu promenu duž ose zrna. Dobijene vrednosti množe se sa koeficijentom koncentracije napona i deformacija koji se moraju odrediti pomoću metode konačnih elemenata ili fotoelastičnom metodom.

Metoda konačnih elemenata daje napone i deformacije po celom volumenu zrna i na kontaktnim površinama. Ona je rutinska za linearni viskoelastični i elastični materijal, ali nije razrađena, bez nedostataka do inženjerske primene, u slučaju kada se materijal ponaša nelinearno viskoelastično.

Kriterijumi loma definišu se na osnovu maksimalnih višeosnih napona i

STRUKTURNA ANALIZA

ANALIZA LOMA

VERIFIKACIJA

Sl. 3 — Šematski prikaz postupka za realizaciju strukturne analize raketnog goriva

deformacija, ili na osnovu ekvivalentnih za različite temperature i brzine deformacije. Upoređivanjem stvarnih sa ovim naponima i deformacijama, dobija se koeficijent oštećenja (D) ili koeficijent sigurnosti (S):

$$D = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} < 1; \quad S = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon} > 1; \quad (1)$$

Na osnovu analize loma, preko D ili S, određuje se vek trajanja prema trendu promene ovih vrednosti u zavisnosti od vremena.

Do vrednosti ovih koeficijenata nakon nekog vremena dolazi se:

— eksperimentalno, ponavljanjem kompletnog postupka prikazanog na slici 3, na istom materijalu nakon od-

ređenog vremena provedenog u uslovi-
ma skladištenja,

— analitičkim modelom kojim se opisuje ponašanje ovog materijala tokom vremena. Model predstavlja krivu dobijenu na osnovu analitičkih izraza koji predstavljaju zakon ponašanja materijala izloženog različitim vidovima opterećenja tokom vremena.

Zbog uočenih odstupanja izračunatih i stvarnih napona i deformacija, poželjna je verifikacija rezultata dobijenih strukturnom analizom. Verifikacija se obavlja eksperimentalnim određivanjem napona i deformacija u:

— analognim ili eksperimentalnim motorima,

— realnim motorima, odmah nakon proizvodnje ili nakon određenog vremena skladištenja,

— delovima eksperimentalnog motora.

Nelinearno ponašanje baruta

Primećena znatnija odstupanja ponašanja raketnih motora za vreme eksploatacije od predviđenih na osnovu proračuna preko strukturne analize, zahtevala su ozbiljan pristup analizi postojeće metodologije.

Najčešće se dolazi do zaključka da do odstupanja dolazi zbog toga što se proračuni vrše uz pretpostavku da se materijal ponaša linearno, a nelinearno viskoelastično. Kada se radi o području većih napona i deformacija neminovna je nelinearna viskoelastična analiza koja nije najuspešnija. Kod nekih materijala nelinearnost je toliko izražena da njeno zanemarivanje može izazvati neprihvatljivo velike greške pri proceni veka upotrebe. Na osnovu raspoloživih podataka može se konstatovati da se nelinearnost kod raketnih goriva izražava kroz njihove sledeće karakteristike:

— osetljivost modula na promenu stepena deformacije.

Na slici 4 prikazana je zavisnost modula od vremena i stepena deformacije na temperaturi od $+50^{\circ}\text{C}$. Za tu temperaturu i stepen deformacije od 0,5 do 5,2% u vremenu od 0,1 minuta, razlika iznosi oko 100%. Modul relaksacije konvencionalno se određuje pri deformaciji od 2,6% što se, takođe, uočava na slici 4, gde je prikazan u funkciji vremena t , odnosno t/a_T . Ako se iz ove »master« krive odredi modul za $t=0,1$ i $T=+50^{\circ}\text{C}$ (pri $a_T \approx -0,3$) dobiće se vrednost od $8,60 \cdot 10^5$ Pa, što je približno 2 puta manje od $18,6 \cdot 10^5$ Pa koji se realno dobije za $\epsilon=0,5\%$, ili 0,2 puta veća od iste vrednosti pri $\epsilon=5,2\%$. Na nižim temperaturama razlike su manje za manje stepene deformacije, a veće pri većim stepenima deformacije i za kraće vreme.

Sli. 4 — Promena modula elastičnosti sa vremenom i stepenom deformacije na 50°C

— promena volumena — dekohezija.

Promena volumena posledica je odlepljenja polimera od čestica oksidatora. Ona je jednim delom odgovorna za promenu modula relaksacije. Sa slike 4 vidi se da je najveći deo promene modula relaksacije upravo u području gde nema dekohezije, odnosno pri malim deformacijama i Poisonovom broju $\mu=0,5$.

Na slici 5 prikazana je promena Poisonovog broja (μ) sa stepenom deformacije (ϵ), a na slici 6 promena vo-

volumena sa deformacijom. Promena volumena za vreme deformacije drastično utiče na promenu modula relaksacije, zbog stvaranja defekata u materijalu.

Sl. 5 — Promena Poissonovog broja sa deformacijom

Sl. 6 — Promena volumena sa deformacijom

Promene volumena (ΔV) i maksimalnog napona (σ_m), zavise i od hidrostatičkog pritiska. Funkcije $\sigma_m(\epsilon)$ za dve vrste baruta (a i b) i pritiske od 0,1 do 6,0 MPa, prikazane su na slikama 7 i 8. Smanjenje maksimalne deformacije nastaje sa povećanjem pritiska samo u barutima kod kojih je σ_m , pri manjem hidrostatičkom pritisku veće od σ_m pri kojem je stvaranje vakuola izvršeno.

Kod kompozitnih goriva maksimalni napon (σ_m) i maksimalna deformacija (ϵ_m) u funkciji su od hidrostatičkog pritiska, i drastično se menjaju pri pro-

Sl. 7 — Dijagram $\sigma_m(\epsilon_m)$ za dve vrednosti hidrostatičkog pritiska za barut A

Sl. 8 — Dijagram $\sigma_m(\epsilon_m)$ za dve vrednosti hidrostatičkog pritiska za barut B

meni brzine deformacije. Pri manjim brzinama promene nastaju samo dok hidrostatički pritisak ne dostigne određenu vrednost, a kod većih brzina ova promena je kontinualna;

— istovremeno hlađenje i deformacija.

U realnim uslovima skladištenja na niskoj temperaturi raketni motor je opterećen tako što se pothlađivanje i deformacija odvijaju istovremeno. U proračunima termičkih naprezanja po bilo kojoj metodi, ovaj fenomen se ne uzima u obzir, pa se eksperimentalne i izračunate vrednosti razlikuju i do

$\Delta T/\Delta t$ (°C/h)	v (mm/mm)	T_f (°C)	ε_m (%)	σ_m (MPa)	$\frac{\varepsilon}{\Delta T}$ (%/°C)
10	0,05	—72	55	13,5	0,6
10	0,1	—67,5	105	6,3	1,2
5	0,05	—70,5	109	7,8	1,2
20	0,1	—70,0	54	9	0,6
7	0,1	—65,8	147	4,5	1,71
T = konst.	0,1	—60	11,4	12	—

100%, kao što je prikazano na slici 9 [1, 2, 3]. Rezultati ispitivanja, prikazani u tabeli 1, takođe to potvrđuju [5].

Sl. 9 — Promena napona sa temperaturom

Razlike su znatno manje ako se proračun opterećenja obavlja po principu nelinearne viskoelastičnosti, kao što je prikazano na slici 10;

— oštećenja i ponovljeni procesi.

Sl. 10 — Promena napona sa vremenom

U kompozitnom i homogenom barmutu nastaju izrazita oštećenja ako se procesi opterećenja ili deformacija po-

navljaju. To se može ustanoviti testom kidanja ako se krive σ (ε) nakon oslobađanja sile i ponovnog deformisanja nalaze ispod početne krive σ (ε). Slično se događa i kada se uzorak optereti konstantnim naponom do konstantne deformacije nekoliko puta. Svako novo opterećenje istom silom prouzrokuje veće deformacije, što znači da je u prethodnom ciklusu materijal pretrpeo oštećenja.

Ako se nakon nekog stepena deformacije dejstvo sile prekida, a materijal relaksira i ponovo deformiše sa istim stepenom deformacije (slika 11), površina između prve i povratne krive je sve veća, što govori o disipaciji energije, odnosno pojavi pukotina u materijalu.

Sl. 11 — Promena $\sigma(\varepsilon)$ i rasterećenje

Razlike zbog načina izračunavanja naprezanja i deformacija

Do sada primenjivane metode za izračunavanje stvarnih naprezanja i deformacija u gorivu laborisanom u ra-

ketnom motoru, analitička metoda i metoda konačnih elemenata, imaju nedostatke zbog kojih se javlja razlika između izračunatih i izmerenih vrednosti.

Analitička metoda zahteva poznavanje koeficijenta koncentracije naprezanja i ne daje raspored naprezanja po uzdužnoj osi zrna.

Metoda konačnih elemenata, ako se radi po sistemu klasičnih elemenata, u području gde se materijal ponaša nekompresibilno (to je područje deformacije oko 10%, a po volumenu zrna preko 90%), daje nereproduktivne i neprihvatljive vrednosti. Područje nekompresibilnosti zavisi i od geometrije pogonskog goriva, odnosno pojave Stasovih ili Von Misovih naprezanja po volumenu, pa se preporučuje da se za sva ulivena goriva, u radu sa metodom konačnih elemenata, koristi specijalni Hermanov postupak.

U ovom slučaju moguće je proračun izvršiti i na nekompresibilnom materijalu čiji je $\mu=0,5$. U suštini ovde se radi o principu da se po Hermanu izračunavaju devijatorni, a po klasičnim elementima srednji naponi.

U sledećim primerima pokazaće se kako nekompresibilnost ($\mu=0,5$) utiče

Sl. 12 — Promena ekvivalentnih napona

na rezultate proračuna u zavisnosti od načina formiranja mreže konačnih elemenata.

Razmatran je beskonačno dug cilindar čiji je unutrašnji poluprečnik $r=100$ mm, a spoljašnji $R=400$ mm. Cilindar je podvrgnut promeni temperature od 100°C .

U prvom slučaju na slici 12 data je zavisnost srednjeg ekvivalentnog napona u Stasijevom području, od poluprečnika ($\bar{\sigma}(R)$) za nekoliko vrednosti μ .

U drugom slučaju barut je razmatran kao veoma kompresibilan ($\mu=0,33$) a proračun je vršen pomoću klasičnih elemenata i po Hermanu. Rezultati su upoređivani sa rezultatima dobijenim analitičkim putem, što je prikazano na slici 13, gde se uočava malo odstupanje.

Sl. 13 — Zavisnost ekvivalentnog napona od spoljašnjeg poluprečnika

U trećem slučaju proračun je vršen za malo kompresibilan barut ($\mu=0,485$) pomoću klasičnih elemenata, po Hermanu i analitičkim postupkom. Dobijeni rezultati po Hermanu i analitičkim postupkom se slažu, dok proračun pomoću klasičnih elemenata daje veoma različite vrednosti.

U četvrtom slučaju računata su pozitivna naprezanja (Von Misova područja)

čja) koja zavise samo od devijatornih, a ne i od srednjih ekvivalentnih naprezanja, pomoću klasičnih elemenata, po Hermanu i analitičkim postupkom za skoro nekompresibilan materijal ($\mu = 0,499$). Dobijeni rezultati ukazuju da se korektan proračun naprezanja metodom konačnih elemenata može obaviti samo izračunavanjem srednjeg ekvivalentnog naprezanja u svakom elementu.

Pošto su Von Misova naprezanja pozitivna i zavise samo od devijatornih naprezanja, da bi rezultati bili korektni proračun se može obaviti i klasičnim putem.

U volumenu zrna daleko veća naprezanja nalaze se u Stasijevom području (cilindrični deo paraboloida) i imaju negativan predznak. S obzirom na to da zavise samo od srednjih ekvivalentnih naprezanja, moraju se računati po Hermanu. Ovaj vid naprezanja izrazito se javlja kod ulivenih kompozitnih goriva, naročito pri promenama temperature, pa ih je zbog toga neophodno izračunavati uz uslov nekompresibilnosti pri svim deformacijama koje su manje od 10%.

Zaključak

Za predviđanje veka upotrebe potrebno je odrediti strukturni integritet

goriva u raketnom motoru, postupkom koji će omogućiti korektno izračunavanje svih vrsta stvarnih naprezanja i deformacija. Eksperimentalnim putem treba odrediti njihove maksimalne veličine, pa iz odnosa stvarnih i maksimalnih ekvivalentnih naprezanja doći do koeficijenta sigurnosti.

Izračunavanja se mogu sprovoditi numeričkim ili analitičkim postupkom. Analitički postupak zahteva da se unapred odredi koeficijent koncentracije naprezanja i promena naprezanja duž aksijalne ose zrna.

Kod proračuna stvarnih napona i deformacija mora se voditi računa o ponašanju goriva, kao kompleksnog materijala kod kojeg dolazi do izražaja nelinearna viskoelastičnost. Zbog problema u primeni zakona nelinearne viskoelastičnosti, u metodi konačnih elemenata preporučuje se pretpostavka da se materijal ponaša linearno elastično, a zatim izvrše korekcije zbog uticaja parametara nelinearnosti.

Pri upotrebi metode konačnih elemenata, za negativna naprezanja (Stasi), kojih je daleko najveći deo u zrnu ulivenom u raketni motor, treba koristiti Hermanov princip, koji se zasniva na izračunavanju srednjih ekvivalentnih naprezanja. To je neophodno kada se radi o nekompresibilnom materijalu, odnosno pri deformaciji manjoj od 10%, tj. u područje gde je $\mu = 0,5$.

Literatura:

- [1] Schapery, R. H.: A Theory of Nonlinear Thermoviscoelasticity based on Irreversible Thermodynamics, Proceedings of the 5-th US National Congress of Applied Mechanics, 1966.
- [2] Francis, E. C., Briggs, W. E.: Use of Structural Analysis in Optimum Design of improved Stresse Transducers, 23 — International Instrumentation Symposium, Las Vegas, NV, May, 1977.
- [3] Buswell, H. J., Owens, A.: Solid inclusion stresse gänge in composite propellant charges, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 12, No 8, Aug. 1975.
- [4] Francis, G., Buswell, J.: Service Life Prediction and testing of Composite Propellant Rocket Motors, 20-th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, 1989.
- [5] Davens, A. et collaborateurs: Technologie des propengols solides, Masson, Paris, 1989.