

3. SIGURNOST PROJEKTILA U TOKU KRETANJA U CEVI ORUĐA (NA AKTIVNOM DELU PUTANJE)

3.1. Uvodna razmatranja

U toku kretanja u cevi oruđa, odnosno na aktivnom delu putanje (kada je u pitanju raketni projektil), projektil je izložen dejstvu sila koje su uglavnom posledica pogonske sile (pritiska barutnih gasova u cevi, odnosno pogonske sile raketnog motora). Elementi projektila i projektil kao celina moraju biti tako projektovani i dimenzionisani da praktično ne postoji mogućnost da naprezanja izazvana dejstvom spoljnih sila dovedu do takvih deformacija koje bi prouzrokovale prevremeno dejstvo projektila ili nepravilno dejstvo na cilju. Bez obzira na tip i vrstu projektila prevashodan je zahtev za potpunom sigurnošću pri opaljenju i kretanju kroz cev oruđa, odnosno na aktivnom delu putanje. Ovaj zahtev je sasvim prirodan, ako se imaju u vidu posledice koje može da prouzrokuje dejstvo projektila u cevi oruđa, na lansirnom uređaju ili neposredno posle lansiranja.

Intenzitet naprezanja koje se javlja u elementima projektila u fazi kretanja kroz cev oruđa, odnosno u fazi lansiranja, kod većine vrsta projektila je veći od naprezanja u ma kojoj fazi leta, uzimajući u obzir i sudar sa ciljem. Izuzetak su raketni projektili za dejstvo protiv ciljeva na zemlji i protivoklopni projektili kod kojih su naprezanja pri susretu sa ciljem najčešće znatno veća od naprezanja pri polazu. U ovakvim slučajevima kriterijum o izdržljivosti projektila diktiraju određeni zahtevi vezani za efikasnost projektila na cilju, pa su uslovi sigurnosti u cevi oruđa, odnosno u fazi lansiranja, samim tim već ispunjeni.

Za analizu uslova sigurnosti projektila u toku kretanja kroz cev oruđa razmatraćemo najsloženiji slučaj kretanja klasičnog rotirajućeg projektila u žlebljenoj cevi. Svi drugi slučajevi su jednostavniji, pa se na njih lako mogu primeniti zaključci do kojih se dođe razmatranjem sigurnosti klasičnog rotirajućeg projektila.

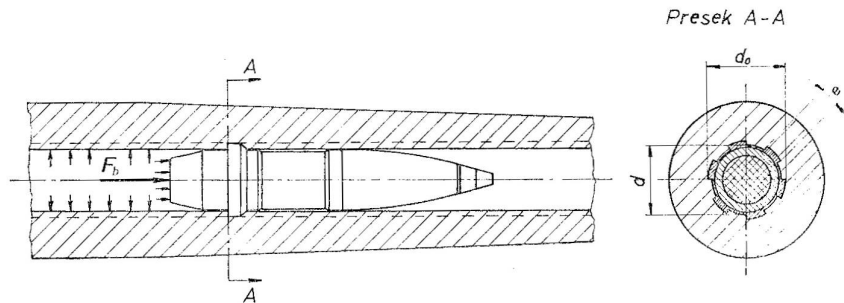
3.2. Analiza sila koje deluju na projektil

Spoljne sile koje deluju na projektil u toku kretanja kroz cev su posledica:

- dejstva barutnih gasova,
- uticaja vodećeg prstena,
- međusobnog uticaja oruđe-projektil, zbog dejstva određenih konstruktivnih parametara i nepravilnosti u kretanju projektila kroz cev oruđa,
- dejstva na košuljicu projektila eksplozivnog punjenja ili drugog oblika punjenja zavisno od vrste projektila,
- uticaja otpora vazduha i zemljine teže.

3.2.1. Dejstvo barutnih gasova

Pritisak barutnih gasova nastao sagorevanjem barutnog pogonskog punjenja dejstvuje praktično ravnomerno na unutrašnju površinu cevi, pa i površinu projektila iza vodećeg prstena (slika 3.1).



Slika 3.1. Dejstvo barutnih gasova na projektil u cevi

Rezultat dejstva pritiska na projektil jeste sila F_b , kolinearna sa uzdužnom osom simetrije projektila, odnosno cevi oruđa i sa smerom u pravcu kretanja projektila. Data je sledećim izrazom:

$$F_b = p \left[\frac{d^2 \pi}{4} + \frac{en}{2} (d_0 - d) \right] \quad (3.1)$$

Ovde je:

- p - pritisak barutnih gasova
- d - minimalni unutrašnji prečnik cevi (od polja do polja); u praksi se najčešće identifikuje sa kalibrom cevi, odnosno projektila
- e - širina žleba cevi
- n - broj žlebova, odnosno polja
- d_0 - maksimalni unutrašnji prečnik cevi (od žleba do žleba).

U slučaju projektila sa konusnim zadnjim delom (kao na slici 3.1) pored sile F_b kolinearne sa uzdužnom osom projektila postoji i radijalna komponenta rezultujuće sile pritiska barutnih gasova. Međutim, odnos radijalne komponente prema aksijalnoj komponenti je mali, pa se radijalna komponenta pri projektovanju obično ne uzima u obzir.

Iz izraza (3.1) sledi da je sila F_b linearna funkcija pritiska barutnih gasova. Prema tome, karakter njene promene u funkciji vremena, u toku čitave faze kretanja projektila kroz cev i u periodu isticanja barutnih gasova, identičan je karakteru promene pritiska.

3.2.2. Uticaj vodećeg prstena

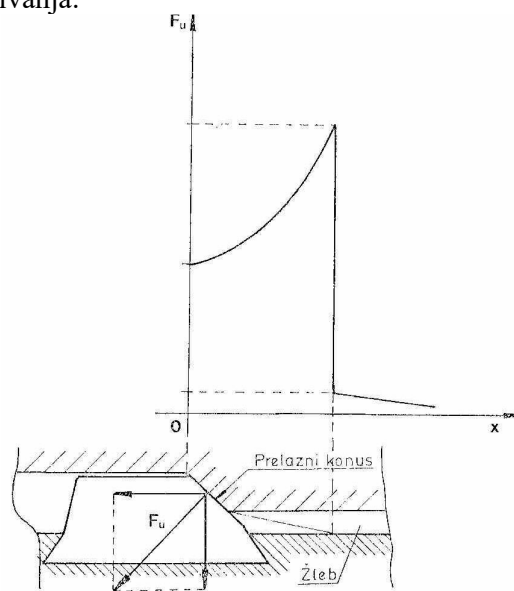
Uticaj vodećeg prstena obično se razmatra u dve faze:

- faza urezivanja vodećeg prstena (često nazvana polaz projektila),
- faza kretanja projektila u cevi oruđa sa urezanim vodećim prstenom.

U prvoj fazi, preko vodećeg prstena na projektil deluje sila urezivanja, odnosno otpor urezivanja (slika 3.2), čija je aksijalna komponenta F_u (kolinearna sa uzdužnom osom simetrije projektila) određena izrazom:

$$F_u = p_o \left[\frac{d^2 \pi}{4} + \frac{en}{2} (d_o - d) \right] \quad (3.2)$$

gde je p_o - pritisak urezivanja.



Slika 3.2. Šema dejstva sile urezivanja

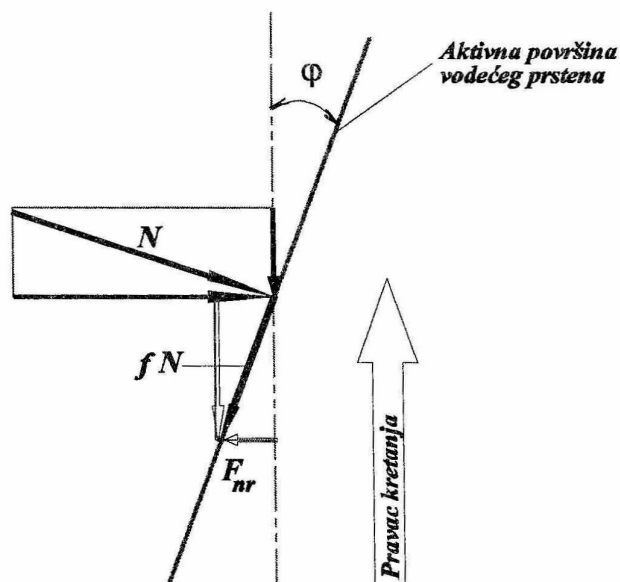
Radijalna komponenta sile urezivanja ne uzima se u obzir pri praktičnom radu, zbog toga što se njena vrednost u odnosu na vrednost aksijalne komponente može zanemariti kod savremenih projektila sa uobičajenom konstrukcijom vodećeg prstena.

U drugoj fazi uticaj vodećeg prstena se manifestuje dejstvom sile normalne na bočnu tzv. aktivnu površinu dela vodećeg prstena koji ispunjava žljebove cevi. Ako se ova sila označi sa N , onda će, prema slici 3.3 njena radijalna i aksijalna komponenta, uzimajući u obzir i trenje, biti:

$$\begin{aligned} F_{nr} &= N(\cos \varphi - f \sin \varphi) \\ F_{na} &= N(\sin \varphi + f \cos \varphi) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ovde je:

φ - ugao uvijanja žlebova cevi,
 f - koeficijent trenja (za najčešći slučaj trenja između čelika i bakra iznosi približno 0.2)



Slika 3.3. Dejstvo normalne sile na aktivnu bočnu stranu zuba vodećeg prstena

Postupak proračuna normalne sile N biće razmatran u poglavlju o vodećem prstenu.

3.2.3. Međusobni uticaj cev-projektil

Da bi se ostvarilo pravilno kretanje projektila kroz cev, prvenstveno treba da budu ispunjeni konstrukciono-tehnološki zahtevi da se geometrijska osa simetrije poklapa sa glavnom osom inercije i istovremeno sa osom simetrije cevi. U tom slučaju, kada su cev oruđa i projektil konstruktivno i fabrikaciono pravilno izvedeni, dovoljno je pri analizi sile koje u toku kretanja kroz cev deluju na projektil uzeti u obzir samo uticaj vodećeg prstena, kao posledicu međusobnog uticaja cev-projektil.

Međutim, u praksi može doći do odstupanja od normalnih uslova, što ima za posledicu pojavu novih, dodatnih sila u spoju cev-projektil, koje mogu kompromitovati i sigurnost i pravilno kretanje projektila u cevi oruđa. Zbog toga ćemo razmatrati sledeća odstupanja od normalnih uslova, koja najviše utiču na pojavu dodatnih sila u spoju cev-projektil:

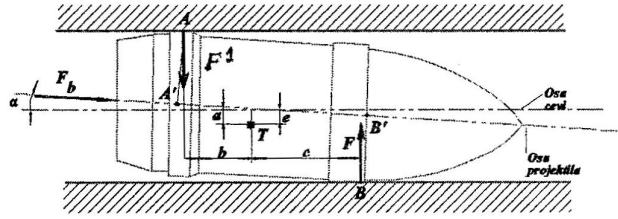
- nepravilan položaj težišta projektila (ne leži na uzdužnoj osi projektila), kao i veliki zazor između projektila i cevi,
- klaćenje projektila u toku kretanja u cevi.

Biće razmatran i uticaj krivine cevi koji dolazi do izražaja u slučajevima moćnih oruđa velikog kalibra kod kojih se cevi krive pod dejstvom sopstvene težine.

Uticaj nepravilnog položaja težišta i velikog zazora između cevi i projektila.

Kod nepravilnog položaja težišta projektila (van ose simetrije projektila) i nedozvoljeno velikog zazora između projektila i cevi (može se javiti u slučaju jako istrošene cevi) geometrijska osa projektila nije više kolinearna sa osom simetrije cevi. Projektil zauzima položaj prikazan na

slici 3.4, pri čemu u oblasti vodećeg prstena na projektil deluje sila F_1 , a u oblasti prednjeg centrirajućeg prstena sila F_2 .



Slika 3.4. Položaj projektila u cevi (veliki zazor i ekscentričnost)

Zbog toga što centar mase projektila (težište-T) ne leži na uzdužnoj geometrijskoj osi, odnosno osi cevi, kretanje centra mase se svodi na helikoidalno kretanje oko ose cevi. Ako se zanemari uticaj zamljine teže, onda se iz uslova ravnoteže svih sila koje deluju na projektil, projektovanih na normalu na osu cevi, dobija izraz:

$$m_p \omega^2 a + F_1 - F_2 + F_b \sin \alpha = 0 \quad (3.4)$$

Ovde je:

- m_p - masa projektila
- ω - ugaona brzina projektila

Druga jednačina potrebna za određivanje sila F_1 i F_2 dobija se iz uslova ravnoteže momenata svih sila u ravni ATB u odnosu na centar mase projektila:

$$F_b e - F_1 b - F_2 c = 0 \quad (3.5)$$

Rešavanjem jednačina (3.4) i (3.5) dobija se:

$$F_1 = \frac{F_b}{b+c} (e - c \sin \alpha) - m_p \omega^2 \frac{ac}{b+c} \quad (3.6)$$

$$F_2 = \frac{F_b}{b+c} (e + b \sin \alpha) + m_p \omega^2 \frac{ab}{b+c} \quad (3.7)$$

Ako se dužine $\overline{AA'} = r_1$ i $\overline{BB'} = r_2$ smatraju poznatim veličinama, onda se približno odstupanje težišta projektila od ose cevi može dobiti iz odnosa:

$$a \approx r_1 + c + b \tan \alpha - \frac{d}{2} \quad (3.8)$$

Ugao α tada se može dobiti iz odnosa:

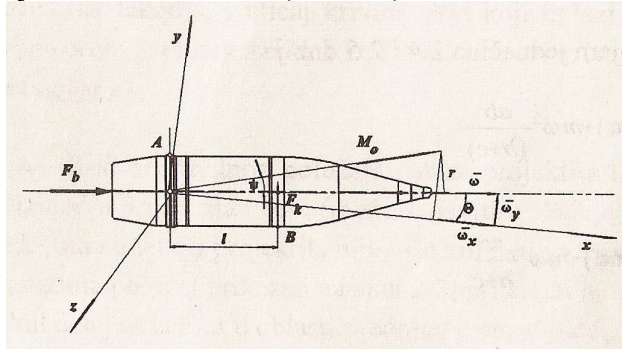
$$\tan \alpha = \frac{d - (r_1 + r_2)}{b+c} \quad (3.9)$$

Klaćenje projektila u toku kretanja kroz cev.

Do klaćenja projektila dolazi u slučaju kada se njegova geometrijska osa ne poklapa sa glavnom osom inercije.

U određenim uslovima proizvodnje (istrošenost alata, nedovoljno efikasan sistem kontrole) nastupaju odstupanja od zahteva konstruktivne dokumentacije u pogledu ekscentričnosti košuljice projektila, ili se, naprimer, u eksplozivnom punjenju mogu javiti nedozvoljeno velike šupljine. Ove pojave imaju za posledicu nesimetričan raspored mase projektila u odnosu na njegovu geometrijsku osu, odnosno dinamičku neuravnoteženost projektila.

Predpostavljajući da se klaćenje projektila kao posledica dinamičke neuravnoteženosti vrši oko tačke O na osi simetrije projektila u ravni vodećeg prstena, sila kojom cev deluje na projektil zbog ovog klaćenja određuje se na sledeći način (slika 3.5)



Slika 3.5. Dodatna sila F_k usled neuravnoteženosti projektila

Moment količine kretanja (zadah) u odnosu na tačku O ($\vec{M}_0 = I_0 \cdot \vec{\omega}$) predstavljen kao vektor leži u ravni AOB, ali je pomeren za ugao ψ u odnosu na osu simetrije projektila. Krajnja tačka vektora \vec{M}_0 opisuje krug oko ose simetrije projektila brzinom koja je jednaka obrtnoj brzini projektila. Ako se sa R označi rastojanje krajnje tačke vektora \vec{M}_0 od ose projektila, onda je obrtna brzina ove krajnje tačke data proizvodom $R\omega$. Kako je ova brzina jednaka (po intenzitetu, pravcu i smeru) rezultujućem momentu sila koje deluju na projektil, a za momentnu tačku za koju je uzet i moment količine kretanja, dolazi se do sledećeg vektorskog odnosa:

$$\frac{d\vec{M}_0}{dt} = \vec{F}_k \times l = R \times \vec{\omega} \quad (3.10)$$

gde je:

l - rastojanje od sredine vodećeg do sredine centrirajućeg prstena.

Ako se ose koordinatnog sistema xyz smatraju glavnim osama elipsoida inercije u odnosu na tačku O, onda se u opštem slučaju kinetički moment projektila za tačku O može predstaviti vektorom:

$$\vec{M}_0 = I_x \omega_x \vec{i} + I_y \omega_y \vec{j} + I_z \omega_z \vec{k} \quad (3.11)$$

gde su:

I_x, I_y i I_z - glavni momenti inercije

Uvođenjem najmanjeg ugla θ , koga osa projektila zaklapa sa jednom glavnom osom inercije u ravni simetrije, vektor \vec{M}_0 može se predstaviti i na sledeći način:

$$\vec{M}_0 = I_x \omega \cos \theta \vec{i} + I_y \omega \sin \theta \vec{j} \quad (3.12)$$

Na osnovu ovog vektorskog izraza lako se dolazi do skalarne vrednosti rastojanja R:

$$\begin{aligned} R &= M_0 \sin \psi \\ \varphi &= \psi + \theta \\ R &= M_0 \sin \varphi \cos \theta - M_0 \cos \varphi \sin \theta \\ R &= M_y \cos \theta - M_x \sin \theta = I_y \omega \sin \theta \cos \theta - I_x \omega \cos \theta \sin \theta \approx I_y \omega \theta - I_x \omega \theta \end{aligned} \quad (3.13)$$

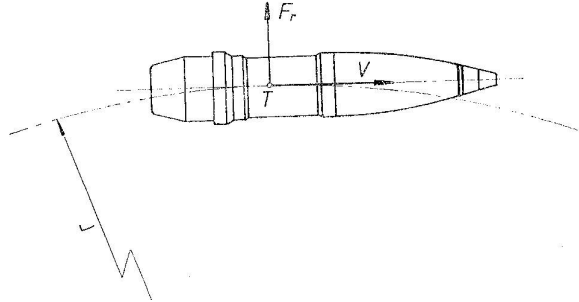
Uvođenjem dobijenog izraza za R u skalarni oblik vektorske jednačine (3.10) dobija se:

$$\begin{aligned} F_k l &= (I_y \omega \theta - I_x \omega \theta) \omega \\ F_k &= \frac{\omega^2 \theta}{l} (I_y - I_x) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Uticaj zakrivljenosti cevi.

Pored krivljenja cevi pod dejstvom sopstvene težine, loša mehanička obrada unutrašnjosti cevi može biti uzrok njenoj iskrivljenosti. Da bi se uticaj krivine cevi na projektil mogao kvantitativno odrediti, potrebno je raspolagati i kvantitativnim karakteristikama krivine cevi. Do ovih podataka se, u slučaju kada se radi o jednoj ostvarenoj cevi, dolazi na jednostavan način - tačnim premeravanjem unutrašnje trase cevi. Međutim od većeg je interesa pitanje na koji način odrediti uticaj krivine cevi na projektil u slučaju kada se radi o projektu jednog novog sistema - kada cev i projektil tek treba realizovati. Da bi se došlo do odgovora na ovo pitanje, razmatraće se slučaj iskrivljene cevi pod dejstvom sopstvene težine uz pretpostavku da je težina cevi jedini uzrok iskrivljenosti njene unutrašnje trase.

Težište projektila kreće se po krivoj liniji koja predstavlja osu kanala cevi (slika 3.6)



Slika 3.6. Dodatna sila na projektil usled zakrivljenosti cevi

Ako se sa r označi poluprečnik krivine u ma kojoj tački putanje projektila, onda će pored translatornog ubrzanja, projektil imati i normalnu komponentu ugaonog ubrzanja V^2/r , gde je V translatorna brzina projektila u posmatranom trenutku. Kao posledica ovog ubrzanja na projektil dejstvuje transversalna sila:

$$F_r = m_p \frac{V^2}{r} \quad (3.15)$$

Uz prethodnu pretpostavku da je krivina prouzrokovana sopstvenom težinom cevi, poluprečnik krivine se može odrediti iz izraza za krivinu u slučaju uklještene kontinualno opterećene konzole:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad (3.16)$$

Ovde je:

- M - moment spoljnih sila desno od posmatranog preseka u odnosu na osu poprečnog preseka u ravni savijanja
- E - modul elastičnosti materijala cevi
- I - moment inercije preseka u odnosu na istu osu

Ako sa m_L označimo podužnu (linijsku) masu cevi po jedinici dužine, može se postaviti izraz:

$$M = \int_0^{L_0} g m_L x dx = g m_L \frac{L_0^2}{2} \quad (3.17)$$

gde je:

- g - ubrzanje zemljine teže
- L_0 - dužina cevi

Prema tome, iz jednačina (3.15) i (3.16), dobijamo konačan izraz za transversalnu silu:

$$F_r = m_p \frac{g m_L L_0^2}{2EI} V^2 \quad (3.18)$$

3.2.4. Dejstvo eksplozivnog punjenja

Ako se pretpostavi cilindrična šupljina košuljice projektila i zanemari sila prianjanja između eksplozivnog punjenja i košuljice, onda jednačina kretanja eksplozivnog punjenja daje mogućnost određivanja sile kojom eksplozivno punjenje napada košuljicu projektila:

$$m_e \frac{dV}{dt} = p_e S_d = F_e \quad (3.19)$$

Ovde je:

- m_e - masa eksplozivnog punjenja
- dV/dt - ubrzanje projektila
- p_e - pritisak eksplozivnog punjenja na dno košuljice
- S_d - površina dna košuljice na koju deluje eksplozivno punjenje

U slučaju konusnog ili drugog oblika šupljine

$$F_e = (m_e)_d \frac{dV}{dt} \quad (3.20)$$

gde je:

$(m_e)_d$ - masa dela eksplozivnog punjenja iznad dna košuljice.

Uticaj obrtnog kretanja eksplozivnog punjenja na naprezanje košuljice projektila određuje se posmatranjem košuljice kao obrtnog tela napunjenog idealnom nestišljivom tečnošću, čija je gustina jednaka gustini eksplozivnog punjenja. Iz mehanike fluida poznato je da pri obrtanju kružnog cilindra napunjenog tečnošću ugaonom brzinom ω , pritisak u nekoj tački tečnosti na rastojanju r od ose obrtanja iznosi:

$$p = \frac{1}{2} \rho_e \omega^2 r^2 \quad (3.21)$$

gde su:

- ρ_e - gustina eksplozivnog punjenja
- ω - ugaona brzina obrtanja projektila
- r - rastojanje posmatrane tačke od ose obrtanja

Na osnovu prethodnog izraza proizilazi da na kontaktnoj površini košuljice i eksplozivnog punjenja usled obrtanja projektila vlada unutrašnji pritisak:

$$p = \frac{1}{2} \rho_e \omega^2 r_i^2 \quad (3.22)$$

gde je:

r - poluprečnik unutrašnje trase košuljice u posmatranom preseku.

3.2.5. Uticaj otpora vazduha i zemljine teže

Kretanje projektila u cevi oruđa identifikuje se sa kretanjem klipa u cilindru, pri čemu se usvaja adijabatska promena stanja vazduha ispred projektila. Za ovakav slučaj pritisak vazduha ispred projektila određuje se sledećim izrazom:

$$p_v = p_a \left(\frac{\kappa - 1}{2a} V + 1 \right)^{\frac{2\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.23)$$

Ovde je:

- p_a - atmosferski pritisak
- a - brzina zvuka u vazduhu
- V - brzina projektila
- κ - odnos specifičnih toplota za vazduh

Sila otpora vazduha koja na projektil deluje u toku kretanja u cevi data je izrazom:

$$F_v = p_a \left[\frac{d^2 \pi}{4} + \frac{en}{2} (d_0 - d) \right] \left(\frac{\kappa - 1}{2a} V + 1 \right)^{\frac{2\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.24)$$

U pravcu kretanja projektila deluje i komponenta težine projektila:

$$F_{qx} = q \sin \theta_0 \quad (3.25)$$

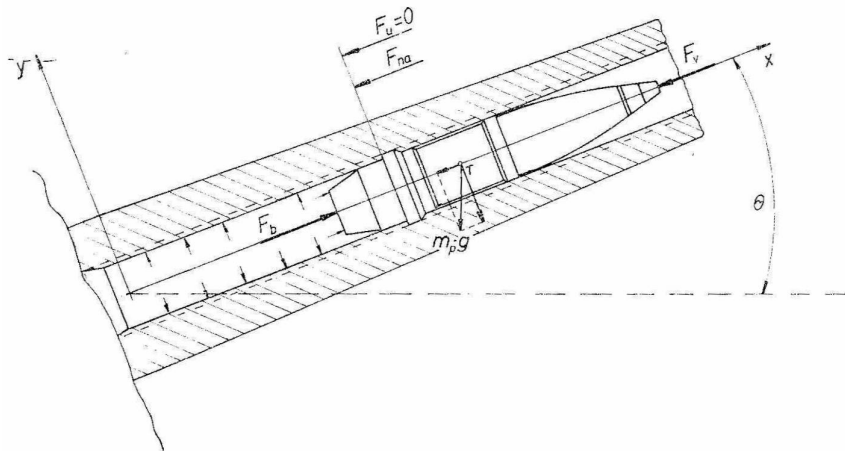
gde je: θ_0 - elevacioni ugao.

3.3. Naprezanje košuljice projektila

3.3.1. Maksimalno translatorno ubrzanje projektila

Ako se poznaju spoljne sile koje deluju na projektil (pri kretanju kroz cev, bilo da prouzrokuju kretanje ili se suprotstavljaju tom kretanju, slika 3.7), može se postaviti diferencijalna jednačina translatornog kretanja težišta projektila, koja glasi:

$$m_p \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum F = F_b - (F_u + F_{na} + F_v + F_{qx}) \quad (3.26)$$



Slika 3.7. Dejstvo spoljnih sila na projektil u cevi oruda

Obrtno kretanje projektila određeno je jednačinom:

$$I_x \frac{d\omega}{dt} = M_x \quad (3.27)$$

gde je M_x obrtni moment spoljnih sila u odnosu na x-osu.

Ako se razmatra normalan slučaj - potpuno pravilno kretanje projektila u cevi, glavno naprezanje košuljice projektila javlja se kao posledica dejstva inercijalne sile koju rađa ubrzanje dato jednačinom (3.26). Zbog toga je od interesa utvrditi najpre karakter promene translatorsnog ubrzanja, odnosno maksimalnu vrednost ubrzanja.

Sile F_{na} , F_v i F_{qx} pojedinačno, a i njihov zbir po intenzitetu su mnogo manji od intenziteta sile pritiska barutnih gasova (F_b), tako da se pri proračunu njihov uticaj može zanemariti. Što se tiče sile F_u , treba imati u vidu da ona deluje samo u fazi polaza projektila (dok traje urezivanje vodećeg prstena), pa se može uzeti da je u fazi kretanja projektila kroz cev $F_u=0$.

Kako je karakter promene sile F_b identičan karakteru promene pritiska barutnih gasova u cevi oruđa, to će F_b naglo rasti odmah po završetku urezivanja vodećeg prstena, pa se za izračunavanje ubrzanja merodavnog za proračun naprezanja košuljice koristi sledeći izraz:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m_p} p \left[\frac{d^2\pi}{4} + \frac{en}{2}(d_0 - d) \right] \quad (3.28)$$

$$\text{odnosno:} \quad \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right)_{\max} = \frac{1}{m_p} p_m \left[\frac{d^2\pi}{4} + \frac{en}{2}(d_0 - d) \right] \quad (3.29)$$

Konstruktivni parametri savremenih projektila i cevi oruđa su takvi da se i izraz (3.29) može pojednostaviti zbog toga što je kod projektila i oruđa kalibra 105 mm i manje:

$$\frac{d^2\pi}{4} \gg \frac{en}{2}(d_0 - d) \quad (3.30)$$

Dakle, najveće ubrzanje projektila u ovom slučaju može se računati izrazom:

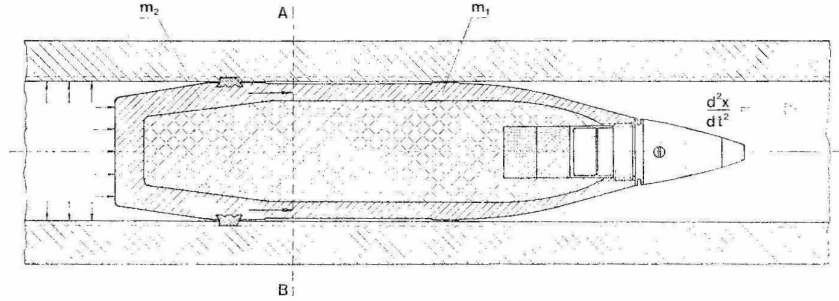
$$\left(\frac{d^2x}{dt^2} \right)_{\max} = \frac{1}{m_p} p_m \frac{d^2\pi}{4} \quad (3.31)$$

Ako pretpostavimo da je m_p proporcionalno d^3 , to se iz izraza (3.31) može implicitno zaključiti da je maksimalno ubrzanje projektila utoliko veće što je kalibar manji. Kod nekih realizovanih projektila maksimalna ubrzanja su:

- 10^6 m/s^2 - za rotirajući projektil 20 mm
- $2 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$ - za rotirajući projektil 105 mm
- $1.5 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$ - za rotirajući projektil 155 mm
- $9 \cdot 10^4 \text{ m/s}^2$ - za minobacački projektil 120 mm
- nekoliko stotina ili nekoliko hiljada m/s^2 za tipične raketne projekte.

3.3.2. Naprezanje u bočnom zidu košuljice projektila

Posmatrajmo normalni presek i-i projektila, koji prolazi kroz bilo koju tačku uzdužne ose (slika 3.8) i deli projektil na dva dela A i B.



Slika 3.8. Naprezanje u bočnom zidu košuljice projektila

Ako se izolovano posmatra deo A (ispred preseka), očigledno je da je njegovo kretanje u cevi određeno diferencijalnom jednačinom:

$$m_A \frac{d^2x}{dt^2} = F_{i-i} \quad (3.32)$$

Ovde je:

m_A - masa dela A projektila (u koju ulazi: masa košuljice, masa upaljača i masa eksploziva dela A, ukoliko postoji čvrsta veza između eksplozivnog punjenja i košuljice projektila)

d^2x/dt^2 - ubrzanje projektila dato izrazom (3.28)

F_{i-i} - sila u preseku i-i (dejstvo dela B na deo A, odnosno dela A na deo B)

Sila F_{i-i} može se predstaviti proizvodom jedinične sile (naprezanja) i površine poprečnog preseka i-i:

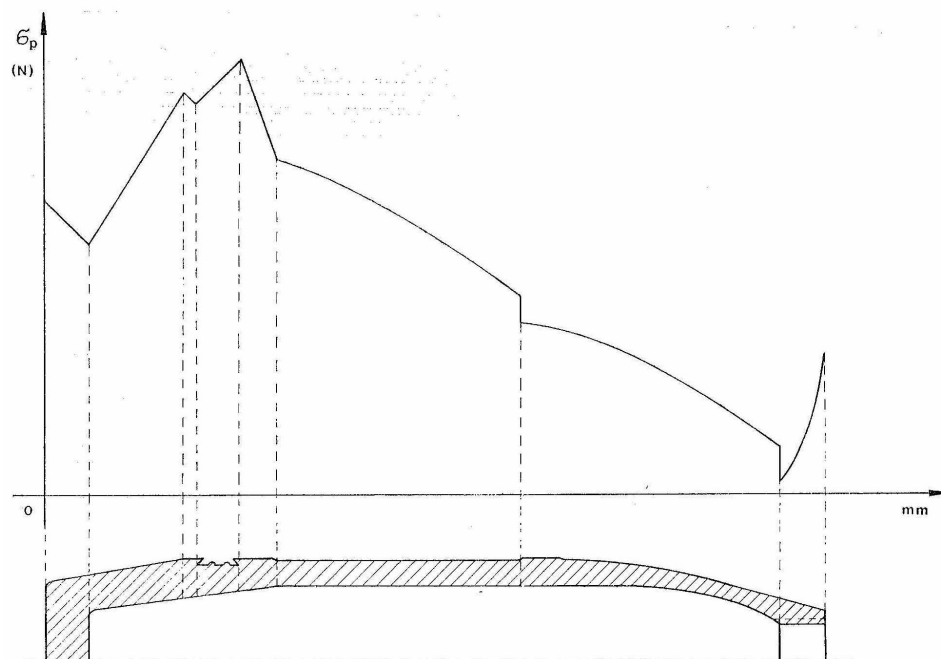
$$F_{i-i} = \sigma_{i-i} S_{i-i} \quad (3.33)$$

Uvođenjem ovako predstavljene sile u izraz (3.32) i posle zamene ubrzanja projektila izrazom (3.28) dobija se za silu koja deluje na jedinicu površine u preseku i-i sledeći izraz:

$$\sigma_{i-i} = \frac{1}{S_{i-i}} \frac{m_A}{m_p} p \left[\frac{d^2\pi}{4} + \frac{en}{2} (d_0 - d) \right] \quad (3.34)$$

Jedinična sila σ_{i-i} predstavlja, s obzirom na smer sile F_{i-i} , naprezanje na pritisak u posmatranom preseku košuljice projektila.

U svakom trenutku pri kretanju projektila kroz cev moguće je pomoću jednačine (3.34) izvršiti proračun naprezanja i nacrtati dijagram promene naprezanja u funkciji položaja preseka i-i (slika 3.9).



Slika 3.9. Dijagram naprezanja u bočnom zidu košuljice projektila

Najveća vrednost naprezanja na ovom dijagramu određuje položaj kritičnog preseka košuljice. Imajući u vidu da je naprezanje linearna funkcija pritiska barutnih gasova, očigledno je da će u kritičnom preseku košuljice naprezanje na pritisak dostići maksimalnu vrednost u trenutku postizanja maksimalnog pritiska p_m . Prema tome, za mehaničku izdržljivost košuljice pri kretanju projektila kroz cev, merodavno je maksimalno naprezanje na pritisak u kritičnom preseku:

$$(\sigma_p)_{\max} = \frac{1}{S_{kr}} \frac{m_A}{m_p} p_m \left[\frac{d^2 \pi}{4} + \frac{en}{2} (d_0 - d) \right] \quad (3.35)$$

Kod projektovanja novog projektila za proračun naprezanja po izrazu (3.35) umesto pritiska p_m uvodi se proračunski pritisak p_{pr} . Proračunski pritisak se može odrediti prema obrascu:

$$p_{pr} = 1.05 p_{mrn} + \frac{\Delta p_m}{\Delta T} (T_{e+} - 15) + 3 \sigma_{mrn} \quad (3.36)$$

Ovde je:

- p_{mrn} - proračunski radni pritisak za normalne uslove
- 1.05 - faktor koji uzima u obzir varijacije karakteristika serije baruta
- $\Delta p_m / \Delta T$ - promena pritiska po jedinici promene temperature punjenja (određuje se koristeći unutrašnjebalističke metode)
- T_{e+} - gornja ekstremna temperatura upotrebe municije ($^{\circ}\text{C}$)
- σ_{mrn} - standardna devijacija p_{mrn} (za prethodne proračune uzima se $\sigma_{mrn} = 0.03 p_{mrn}$)

Ukoliko postoje podaci o izvršenim eksperimentalnim ispitivanjima p_{mrn} se zamenjuje izmerenim $p_{m,sr}$ pri normalnim uslovima, a σ_{mrn} sa σ_m koje se dobija iz sledeće relacije:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum (p_m - p_{m,sr})^2}{N-1}} \quad (3.37)$$

gde je:

- N - broj ispaljenih projektila u grupi
- p_m - izmereni maksimalni pritisak za svaki od N metaka u grupi

Pojednostavljeni postupak određivanja p_{pr} dat je formulom:

$$p_{pr} = k \cdot p_{mrn} \quad (3.38)$$

Smatra se da je proračun naprezanja korektan, ako se računa sa $k=1.12$ za projekte kalibra većeg od 40 mm i sa $k=1.15$ za projekte kalibra 40 mm i manjeg.

Kao kriterijum sigurnosti i kriterijum za izbor materijala za košuljicu projektila pri projektovanju služi sledeća relacija:

$$\sigma_v = v(\sigma_{\max})_{pr} \quad (3.39)$$

Ovde je:

- σ_v - granica razvlačenja materijala pri naprezanju na pritisak
- v - stepen sigurnosti košuljice projektila u fazi kretanja projektila u cevi oruđa
- $(\sigma_{\max})_{pr}$ - najveće proračunsko naprezanje (naprezanje u kritičnom preseku).

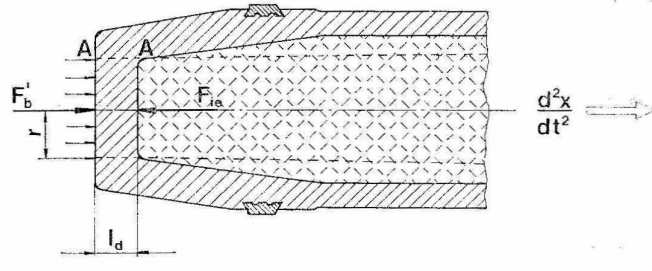
Polazeći od činjenice da je naprezanje $(\sigma_{\max})_{pr}$ posledica isključivo dejstva inercijalne sile, da su zanemarena naprezanja koja nastaju kao posledica dejstva spoljnih sila koje izazivaju obrtanje i da su učinjena određena uprošćenja pri dobijanju izraza za $(\sigma_{\max})_{pr}$, uobičajeno je da se dimenzionisanje košuljice projektila vrši na osnovu uslova $v \geq 1$. Međutim, dinamičko jednosmerno promenljivo impulsno opterećenje klasičnog projektila u fazi lansiranja omogućava da se košuljica dimenzioniše na osnovu $v < 1$. U ovakvim slučajevima tačan odnos između maksimalnog naprezanja u kritičnom preseku i granice razvlačenja metala košuljice utvrđuje se eksperimentalnim putem (poligonskim gađanjem određuje se najniža vrednost granice razvlačenja pri kojoj trajne deformacije košuljice projektila u toku kretanja u cevi oruđa ne kompromituju sigurnost projektila).

Kod razmatranja stepena sigurnosti košuljice projektila treba voditi računa i o izvesnoj povezanosti koja postoji između kriterijuma sigurnosti i efikasnosti košuljice na cilju. Naime, uslovi sigurnosti košuljice su kontradiktorni u odnosu na zahteve maksimalne efikasnosti na cilju, tj. zahteve optimalne fragmentacije.

3.3.3. Naprezanje dna košuljice

Na slici 3.10 prikazano je dno košuljice na koje u fazi kretanja projektila kroz cev dejstvuju dve sile:

- sila pritiska kao posledica dejstva barutnih gasova (F_b'),
- sila pritiska kao posledica inercije eksplozivnog punjenja (F_{ie})



Slika 3.10. Opterećenje dna košuljice

Usled dejstva ovih sila na cilindričnoj površini S , čija je izvodnica A-A javlja se naprezanje na smicanje:

$$\tau = \frac{F_b' - F_{ie}}{S} \quad (3.40)$$

Sa slike 3.10 vidi se da je:

$$F_b' = pr^2\pi \quad (3.41)$$

$$F_{ie} = m_e' \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.42)$$

$$S = 2r\pi l_d \quad (3.43)$$

Ovde su:

- τ - naprezanje na smicanje
- r - poluprečnik cilindra sa izvodnicom A-A
- p - pritisak barutnih gasova
- l_d - debljina dna
- m_e' - masa eksplozivnog punjenja iznad dna
- d^2x/dt^2 - ubrzanje projektila u posmatranom trenutku

Uvođenjem izraza od (3.41) do (3.43) u jednačinu (3.40) dobija se:

$$\tau = \frac{1}{2r\pi l_d} \left(pr^2\pi - m_e' \frac{d^2x}{dt^2} \right) \quad (3.44)$$

Naprezanje na smicanje ima maksimalnu vrednost u trenutku pojave maksimalnog pritiska barutnih gasova, što jasno pokazuje izraz (3.44). Uvođenjem p_{pr} umesto p_{max} dobija se konačno:

$$\tau_{max} = \frac{p_{pr}}{2r\pi l_d} \left\{ r^2\pi - \frac{m_e'}{m_p} \left[\frac{d^2\pi}{4} + \frac{en}{2}(d_0 - d) \right] \right\} \quad (3.45)$$

Pri tome se mora zadovoljiti uslov da je:

$$\tau_{\max} \leq \frac{\sigma_v}{2} \quad (3.46)$$

Kritični smicajni napon je praktično nešto veći od polovine granice razvlačenja pri naprezanju na zatezanje materijala košuljice.

Iz izraza (3.45) i (3.46) sledi da minimalna debljina dna košuljice treba da bude:

$$l_d \geq \frac{p_{pr}}{r\pi\sigma_v} \left\{ r^2\pi - \frac{m'_e}{m_p} \left[\frac{d^2\pi}{4} + \frac{en}{2}(d_0 - d) \right] \right\} \quad (3.47)$$

Pri ovim izvođenjima zanemaren je uticaj inercije samog dna projektila u odnosu na ostale dejstvujuće sile (F_b i F_{ie}).

Dno košuljice projektila opterećeno je na savijanje simetričnim opterećenjem rezultujućeg pritiska koji vrše barutni gasovi i eksplozivno punjenje. Pri ovakvom opterećenju kružne ploče (dna) stalne debljine dolazi do savijanja dna, pri čemu se javljaju unutrašnji naponi u radijalnom (σ_r) i tangencijalnom (σ_t) pravcu.

Maksimalne vrednosti ovih napona javljaju se u centru dna ($r=0$) i zavise od toga da li je dno uklješteno ili slobodno oslonjeno po obodu poluprečnika r (slika 3.10) i iznose:

a) uklješteno dno:

$$(\sigma_r)_{\max} = (\sigma_t)_{\max} = \frac{3(1+\mu)}{8} p \left(\frac{r}{l_d} \right)^2 \quad (3.48)$$

b) slobodno oslonjeno dno:

$$(\sigma_r)_{\max} = (\sigma_t)_{\max} = \frac{3(3+\mu)}{8} p \left(\frac{r}{l_d} \right)^2 \quad (3.49)$$

gde su:

μ - Poasonov koeficijent materijala dna

p - rezultujući pritisak na dno

Kod razornih i drugih projektila gde košuljica sa dnom čini jedinstvenu celinu, proračun napona pri naprezanju na savijanje vrši se jednačinom (3.48) za uklješteno dno, dok se u slučajevima kada je dno košuljice poseban deo (dimni ili osvetljavajući projektil, i sl.) koristi izraz (3.49) za slobodno oslonjeno dno. Oba obrasca važe samo u slučaju dna košuljice konstantne debljine zanemarljive mase, odnosno zanemarljivo malog uticaja inercijalne sile dna u odnosu na sile pritiska. U protivnom, silu inercije treba redukovati na pritisak eksplozivnog punjenja.

Maksimalne vrednosti napona dna košuljice u radijalnom i tangencijalnom pravcu javljaju se u trenutku maksimalnog pritiska barutnih gasova na dno košuljice projektila. Zamenom vrednosti za rezultujući pritisak na dno košuljice $p=p_m - p_e$ (p_e - maksimalni pritisak eksplozivnog punjenja na dno košuljice) u izraze (3.48) i (3.49) dobijaju se izrazi za proračun napona, odnosno debljine dna:

a) uklješteno dno:

$$(\sigma_r)_{\max} = (\sigma_t)_{\max} = \frac{3(1+\mu)}{8} p_m \left(1 - \frac{p_e}{p_m}\right) \left(\frac{r}{l_d}\right)^2 \leq \sigma_d \quad (3.50)$$

b) slobodno oslonjeno dno:

$$(\sigma_r)_{\max} = (\sigma_t)_{\max} = \frac{3(3+\mu)}{8} p_m \left(1 - \frac{p_e}{p_m}\right) \left(\frac{r}{l_d}\right)^2 \leq \sigma_d \quad (3.51)$$

Ovde je σ_d dozvoljeni napon pri naprezanju na savijanje za materijal dna.

Za čelik i većinu drugih materijala Poasonov koeficijent je $\mu=0.3$, pa se izbor debljine dna pri naprezanju na savijanje može vršiti po približnom obrascu:

a) uklješteno dno:

$$l_d \geq r \sqrt{\frac{p_m}{2\sigma_d} \left(1 - \frac{p_e}{p_m}\right)} \quad (3.52)$$

b) slobodno oslonjeno dno:

$$l_d \geq r \sqrt{\frac{5p_m}{4\sigma_d} \left(1 - \frac{p_e}{p_m}\right)} \quad (3.53)$$

Konačan izbor debljine dna vrši se na osnovu naprezanja na smicanje ili savijanje u zavisnosti od toga koje naprezanje je kritično sa stanovišta potrebne otpornosti dna.