

3. VODEĆI PRSTEN

3.1 Uloga vodećeg prstena

Svi projektili koji se ispaljuju iz klasičnih artiljerijskih sistema sa izlebljenim cevima imaju vodeći prsten. On predstavlja jedan od elemenata za vodjenje projektila i izveden je u obliku prstena koji je upresovan u kanal na košuljici nešto ispred dna projektila. Kao takav vodeći prsten ima ulogu da:

- prenese na projektil obrtno kretanje oko njegove uzdužne ose simetrije, čime se ostvaruje jedan od elemenata za stabilizaciju projektila - brza rotacija,
- vrši što potpunije zaptivanje cevi u toku kretanja projektila i onemogućuje prodiranje barutnih gasova u prostor cevi ispred projektila,
- obezbedi koaksijalnost uzdužne ose simetrije projektila sa uzdužnom osom simetrije cevi orudja u toku kretanja projektila,
- obezbedi identičan polazni položaj od projektila do projektila u slučajevima kada projektil nije čvrsto vezan za čauru (polusjedinjeni i dvodelni metak),
- osigura pri polazu projektila početni pritisak barutnih gasova (pritisak forsiranja-forsman) koji će omogućiti pravilno sagorevanje barutnog punjenja.

Iz navedene višestruke uloge vodećeg prstena jasno se vidi delikatnost problema projektovanja vodećeg prstena pri konstrukciji i usvajanju novog projektila.

Pri polazu projektila dolazi do tzv. urezivanja vodećeg prstena u žljebove cevi, zbog čega je u toku daljeg kretanja projektila, zahvaljujući čvrstoj vezi vodećeg prstena i košuljice, translatorno kretanje projektila praćeno i obrtnim kretanjem. Nije teško pretpostaviti i bez prethodne kvantitativne analize da postoji izvesna funkcionalna veza između parametara translatornog i parametara obrtnog kretanja projektila, pa je, s obzirom na činjenicu da translatorno kretanje ima karakter ubrzanog kretanja, sasvim izvesno da je u pitanju promenljivo obrtno kretanje projektila. Dakle, u fazi kretanja projektila u cevi orudja, na projektil preko vodećeg prstena deluje neka sila nN promenljivog intenziteta koja prouzrokuje obrtno kretanje projektila. Vodeći prsten mora biti tako projektovan da može da izdrži naprezanja izazvana dejstvom sile nN i sile trenja f_nN , odnosno:

- da se pod dejstvom sile nN ne kompromituje čvrsta veza između vodećeg prstena i košuljice projektila,
- da pod dejstvom sile N ne dodje do smicanja u podnožju zuba vodećeg prstena koji ispunjava žleb cevi,
- da se pod dejstvom sile fN na bočnu stranu zuba vodećeg prstena zub do te mere ne istroši da dolazi do kompromitovanja funkcije vodećeg prstena.

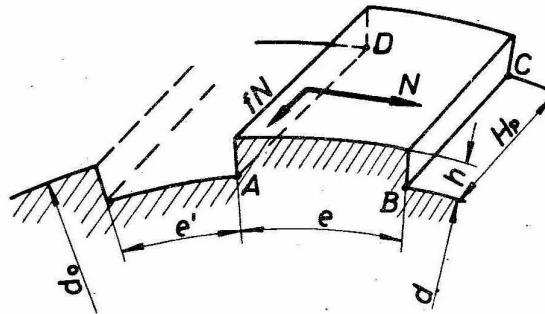
3.2 Određivanje normalne sile na aktivnu stranu zuba

Diferencijalna jednačina obrtnog kretanja projektila glasi (slike 3.1 i 3.2):

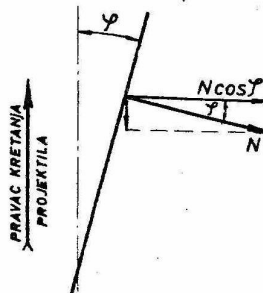
$$I_x \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{2} n N \cos \varphi \quad (3.1)$$

Ovde je:

- I_x - moment inercije projektila oko uzdužne ose
- $d\omega/dt$ - ugaono ubrzanje projektila
- nN - ukupna normalna sila na "zubima" vodećeg prstena (n-broj žljebova, N-normalna sila na aktivnoj strani zuba)
- φ - ugao uvijanja tj. ugao nagiba zuba u odnosu na uzdužnu osu projektila



Slika 3.1. Izgled vodećeg prstena posle urezivanja u žljebove cevi



Slika 3.2. Opterećenje aktivne strane zuba vodećeg prstena

Normalna sila N koja napada bočnu, aktivnu stranu zuba vodećeg prstena dobija se rešenjem jednačine (3.1) po N:

$$N = \frac{2}{d} \frac{I_x}{n \cos \varphi} \frac{d\omega}{dt} \quad (3.2)$$

Uvodjenjem puta projektila u cev umesto vremena kao nezavisno promenljive, izraz za silu N može se napisati i u drugom obliku:

$$N = \frac{2}{d} \frac{I_x V}{n \cos \varphi} \frac{d\omega}{dx} \quad (3.3)$$

jer je:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dx} \frac{dx}{dt} = V \frac{d\omega}{dx} \quad (3.4)$$

Kako se obrtna brzina projektila može predstaviti izrazom:

$$\omega = \frac{2V \operatorname{tg} \varphi}{d} \quad (3.5)$$

odnosno:

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{2}{d} \frac{d(V \operatorname{tg} \varphi)}{dx} = \frac{2}{d} \left[\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \operatorname{tg} \varphi + V \frac{d(\operatorname{tg} \varphi)}{dx} \right] \quad (3.6)$$

izraz za silu N može se napisati u konačnom obliku:

$$N = \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{1}{\cos \varphi} \left[\frac{dV}{dt} \operatorname{tg} \varphi + V^2 \frac{d(\operatorname{tg} \varphi)}{dx} \right] \quad (3.7)$$

Sila N je funkcija nekoliko promenljivih veličina, pa su sa stanovišta izdržljivosti vodećeg prstena od interesa uslovi pod kojima sila N dostiže maksimalnu vrednost. Odmah je jasno da se moraju razmatrati dva slučaja: konstantan ugao uvijanja žljebova i promenljiv ugao uvijanja žljebova.

3.2.1 Konstantan ugao uvijanja žljebova

Za $\varphi = \text{const}$ izraz za silu N svodi se na:

$$N = \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} \frac{dV}{dt} \quad (3.8)$$

Najveću vrednost sila N u ovom slučaju dostiže u momentu kada translatorno ubrzanje projektila ima najveću vrednost, odnosno u momentu kada pritisak barutnih gasova u cevi orudja dostigne svoj maksimum, jer je $dV/dt = f(p)$. Prema tome, ako se dV/dt izrazi preko p_m dobija se:

$$N_m = \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} \frac{p_m}{m_p} \left[\frac{d^2 \pi}{4} + \frac{en}{2} (d_0 - d) \right] \quad (3.9)$$

ili

$$N_m = \frac{I_x}{n} \frac{\pi}{m_p} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} p_m \quad (3.10)$$

3.2.2 Promenljiv ugao uvijanja žljebova

Kada je u pitanju promenljiv ugao uvijanja uvek se radi o tzv. progresivnom uglu uvijanja žljebova: ugao nagiba žljebova progresivno raste od minimalne vrednosti na početku žljebljenog

dela cevi (φ_0) do maksimalne vrednosti na ustima cevi (φ_u). Najčešće je promena ugla uvijanja data zavisnošću $\varphi = \varphi_0 + kx$, a nekad i znatno komplikovanijom funkcijom (k je konstanta koja se za konkretnu cev, kada je poznata dužina žljebljenog dela, lako određuje). U ovim uslovima je normalna sila N , prema izrazu (3.7), funkcija od p , V i φ , pa je i postupak određivanja njene najveće vrednosti komplikovaniji nego u slučaju kada je φ konstantno.

Da bi se došlo do najveće vrednosti sile N mora se za konkretno orudje raspolagati krivama $p=p(x)$, $V=V(x)$ i $\varphi=\varphi(x)$ na osnovu kojih se grafičkim putem, uz pomoć izraza (3.7), dolazi do krive $N=N(x)$. Iz te krive nije teško utvrditi njenu najveću vrednost i položaj projektila u cevi koji odgovara najvećoj vrednosti sile N . Maksimalnu vrednost sile N dostiže negde na intervalu između položaja p_m i usta cevi, što u svakom konkretnom slučaju treba odrediti.

1.3 Trošenje vodećeg prstena

Pod dejstvom normalne sile N , odnosno sile trenja fN i usled translatornog kretanja projektila, dolazi do trošenja aktivne bočne strane vodećeg prstena. Ovo trošenje ima za posledicu smanjivanje širine zuba vodećeg prstena (slika 3.3), a time i njegove izdržljivosti, što nameće potrebu razmatranja ovog procesa.



Slika 3.3. Trošenje zuba vodećeg prstena

3.3.1 Konstantan ugao uvijanja žljebova

Da bi se izračunalo trošenje zuba vodećeg prstena mora se usvojiti pretpostavka da je elementarna zapremina istrošenog metala na jednom zubu vodećeg prstena proporcionalna radu trenja.

Ako je elementarna zapremina istrošenog metala:

$$dW = h H_p dS_t \quad (3.11)$$

a elementarni rad sile trenja:

$$dA_t = f_d N \frac{dx}{\cos \varphi} \quad (3.12)$$

na osnovu usvojene pretpostavke biće:

$$h H_p dS_t = k f_d N \frac{dx}{\cos \varphi} \quad (3.13)$$

Ovde su:

- h - visina zuba vodećeg prstena
- H_p - širina vodećeg prstena, odnosno zuba vodećeg prstena
- S_t - dužina istrošenja zuba vodećeg prstena
- k - koeficijent proporcionalnosti
- f_d - dinamički koeficijent trenja
- x - put težišta projektila

Brzina trenja od koje zavisi dinamički koeficijent trenja u konkretnom slučaju iznosi $V/\cos \varphi$, gde je V translatorna brzina projektila u cevi orudja, pa je dinamički koeficijent trenja dat sledećom relacijom:

$$f_d = \frac{f}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} \quad (3.14)$$

gde je f - statički koeficijent trenja.

Uvodjenjem izraza za f_d i N (jednačina (3.8) i transformacijom jednačine (3.13) dobija se:

$$h H_p dS_t = \frac{k f}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} \frac{dV}{dt} \frac{dx}{\cos \varphi} \quad (3.15)$$

$$h H_p dS_t = k' \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} \frac{V}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} dV \quad (3.16)$$

Ovde je $k' = k \cdot f$. Dalje je:

$$dS_t = \frac{k'}{h H_p} \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} \frac{V}{1 + b \frac{V^2}{\cos^2 \varphi}} dV \quad (3.17)$$

Integracijom jednačine (3.17) u granicama $t=0$ do t, odnosno od $V=0$ do V dobija se izraz za S_t :

$$S_t = \frac{k'}{h H_p} \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2b} \ln \left(1 + \frac{b}{\cos^2 \varphi} V^2 \right) \quad (3.18)$$

Vrednost koeficijenta k' zavisi od prirode materijala od koga je izradjen vodeći prsten i određuje se eksperimentalnim putem. Za vodeći prsten od bakra kakav se najčešće upotrebljava za artiljerijske projekte, koeficijent k' iznosi $23.3 \cdot 10^{-6}$, a konstanta $b=9 \cdot 10^{-6}$, pri čemu se veličine od kojih zavisi S_t moraju uzeti u sledećim jedinicama: h(mm), H_p (mm), I_x (kgcm²), d(mm), V(m/s) i istrošenje S_t dobijamo u milimetrima.

Iz izraza (3.18) vidi se da istrošenje S_t ima najveću vrednost u trenutku kada se projektil nalazi na ustima cevi:

$$S_{t,max} = \frac{2.303k'}{hH_p} \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \frac{\operatorname{tg}\varphi}{2b} \log\left(1 + \frac{b}{\cos^2 \varphi} V_0^2\right) \quad (3.19)$$

3.3.2 Promenljiv ugao uvijanja žljebova

I u ovom slučaju osnova proračuna je ista kao u prethodnom slučaju (elementarna istrošena zapremina vodećeg prstena proporcionalna je elementarnom radu sile trenja). Nakon dužeg izvođenja dobijamo izraz za veličinu maksimalnog istrošenja vodećeg prstena:

$$S_{t,max} = \frac{2.303k'}{hH_p} \frac{I_x}{n} \frac{4}{d^2} \left\{ \frac{(\operatorname{tg}\varphi)_{sr}}{2b} \log\left(1 + \frac{b V_0^2}{\cos^2 \varphi_u}\right) + \frac{\operatorname{tg}\varphi_u}{b^2 V_0^2} \left[b V_0^2 - \log\left(1 + \frac{b V_0^2}{\cos^2 \varphi_u}\right) \right] \right\} \quad (3.20)$$

$$\text{Ovde je } (\operatorname{tg}\varphi)_{sr} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_0 + \operatorname{tg}\varphi_u}{2}.$$

Analizom izraza za najveće trošenje pri konstantnom i promenljivom uglu uvijanja žljebova dolazi se do zaključka da je najveće trošenje utoliko manje, ukoliko je:

- širina vodećeg prstena H_p veća
- visina zuba vodećeg prstena h veća
- broj žljebova n veći
- aksijalni moment projektila I_x manji (manja masa projektila)
- ugao uvijanja žljebova φ manji i početna brzina projektila V_0 manja za slučaj konstantnog ugla uvijanja; u slučaju promenljivog ugla uvijanja uticaj ugla φ i početne brzine projektila nije tako očigledan i zavisi od konkretnih parametara.

3.4 Naprezanja vodećeg prstena

Stav o izdržljivosti vodećeg prstena donosi se na osnovu vrednosti naprezanja koja su posledica dejstva normalne sile. Naprezanja imaju karakter pritiska i smicanja, ali se za osnovu kriterijuma sigurnosti (izdržljivosti) vodećeg prstena ne uzima rezultujuće složeno naprezanje. Kriterijum sigurnosti dat je za svaku vrstu naprezanja posebno, pri čemu svi uslovi moraju biti istovremeno ispunjeni.

3.4.1 Naprezanje na pritisak

Predpostavljajući da normalna sila N ravnomerno opterećuje celu bočnu aktivnu stranu zuba vodećeg prstena, naprezanje na pritisak je dato izrazom:

$$\sigma_p = \frac{N}{hH_p} \quad (3.21)$$

Do razaranja metala na aktivnoj strani zuba vodećeg prstena neće doći ako je ispunjen sledeći uslov:

$$\frac{N_m}{hH_p} \leq \sigma_{pd} \quad (3.22)$$

gde je σ_{pd} - dozvoljeno naprezanje na pritisak za metal vodećeg prstena.

Pri izboru dozvoljenog napona pri naprezanju vodećeg prstena na pritisak treba imati u vidu i uslove dopunskog termičkog naprezanja vodećeg prstena pod dejstvom barutnih gasova i usled trenja. Eksperimentalno je utvrđeno da za vodeći prsten od bakra vrednost dozvoljenog napona pri naprezanju na pritisak ne sme prelaziti vrednost od 25 daN/mm², za orudja sa velikom početnom brzinom i 35 daN/mm² za orudja sa malom početnom brzinom projektila.

3.4.2 Naprezanje na smicanje

U osnovi zuba vodećeg prstena (površina ABCD na slici 3.1) postoji naprezanje na smicanje kao posledica dejstva normalne sile N. Kako se površina ABCD menja zbog pojave trošenja vodećeg prstena, to je naprezanje na smicanje dato izrazom:

$$\tau = \frac{N}{(e - S_t)H_p} \quad (3.23)$$

Sa stanovišta izdržljivosti interesantna je najveća vrednost naprezanja na smicanje. Medjutim, kako pokazuje izraz (3.23), naprezanje na smicanje istovremeno zavisi i od normalne sile i od vrednosti trošenja vodećeg prstena. Kod konstantnog ugla uvijanja žljebova, sila N ima najveću vrednost u trenutku kada pritisak barutnih gasova dostigne svoj maksimum, a najveće trošenje je prirodno, u trenutku kada projektil napušta cev. Prema tome, kod konstantnog ugla uvijanja žljebova najveću vrednost naprezanja na smicanje treba očekivati za vrednost N_m , jer je vrednost sile N na ustima cevi nekoliko puta manja od vrednosti N_m . Kako je za položaj projektila u kome normalna sila ima najveću vrednost trošenje vodećeg prstena tek otpočelo, to se najveće naprezanje na smicanje izračunava sledećim izrazom:

$$\tau_{\max} = \frac{N_m}{eH_p} \quad (3.24)$$

Kod promenljivog ugla uvijanja žljebova maksimalno naprezanje na smicanje takodje se očekuje oko vrednosti maksimalne sile, između položaja maksimalnog pritiska i usta cevi, samo u širem intervalu s obzirom da se radi o većem istrošenju vodećeg prstena.

U oba slučaja mora biti ispunjen uslov:

$$\tau_{\max} \leq \tau_d \quad (3.25)$$

Kod vodećih prstenova izradjenih od bakra τ_d se kreće od 1 do 3 daN/mm² (eksperimenti pokazuju da se proračun može vršiti i sa duplo većim vrednostima dozvoljenog naprezanja na smicanje τ_d).

Konačan izbor širine vodećeg prstena H_p (sledi iz jednačina (3.22) i (3.24)) vrši se na osnovu onog naprezanja koje je kritično sa aspekta njegove otpornosti.

Pri razmatranju naprezanja i izdržljivosti vodećeg prstena mora se uzeti u obzir trošenje i bakarisanje cevi. Trošenje cevi je najintenzivnije od početka žljebljenog dela cevi do položaja maksimalnog pritiska, zatim nastupa izvesna dužina trase cevi koja se jako malo troši, a posle toga trošenje se povećava prema ustima cevi. Između dve oblasti žljebljenog dela cevi koje karakteriše značajno trošenje nalazi se oblast minimalnog trošenja koju karakterišu naslage materijala vodećeg prstena, tzv. bakarisanje. Bakarisanje je naročito intenzivno u osnovi žljebova. Trošenje i bakarisanje cevi menjaju u izvesnom smislu unutrašnju trasu cevi, odnosno menjaju visinu kontaktne površine između vodećeg prstena i polja cevi, što dovodi do izvesnog odstupanja naprezanja vodećeg prstena u odnosu na proračunata naprezanja tj. smanjuje izdržljivost vodećeg prstena. Takodje, treba imati u vidu promenu mehaničkih karakteristika bakra kada je u pitanju bakarni vodeći prsten (ove promene su posledica trajnih deformacija materijala vodećeg prstena pri njegovom nameštanju i urezivanju, kao i uticaja povećanja temperature vodećeg prstena usled uticaja visokih temperatura barutnih gasova i trenja između vodećeg prstena i cevi orudja).