

# Osnovi konstruisanja sistema naoružanja

## KONSTRUKCIJA PROJEKTILA

Prof. dr Predrag Elek

# Sadržaj

1. Sigurnost projektila u toku kretanja u cevi oruđa
2. Određivanje unutrašnje trase košuljice projektila
3. Vodeći prsten

# 1. Sigurnost projektila u toku kretanja u cevi oruđa

## 1.1. Uvodna razmatranja

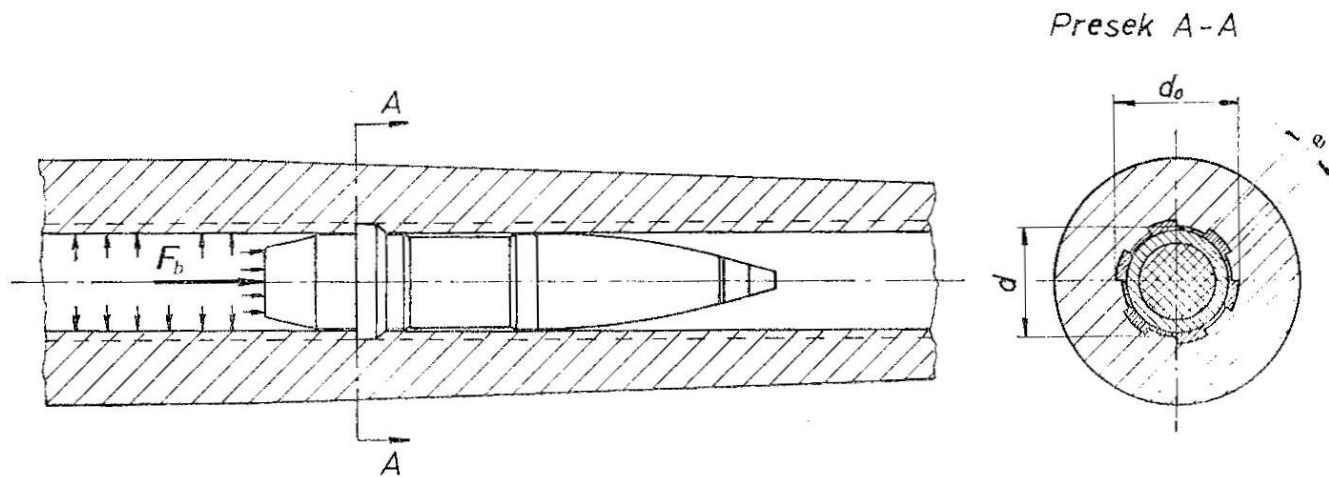
- elementi projektila i projektil kao celina moraju biti tako projektovani da ne postoji mogućnost da naprezanja dovedu do takvih deformacija koje bi prouzrokovale prevremeno dejstvo projektila ili nepravilno dejstvo na cilju
- razmotrićemo najsloženiji slučaj kretanja klasičnog rotirajućeg projektila u ožlebljenoj cevi

## 1.2. Sile koje deluju na projektil

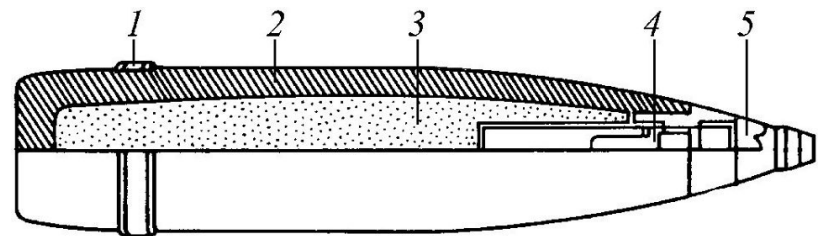
Spoljne sile koje deluju na projektil u toku kretanja kroz cev su posledica:

- 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.

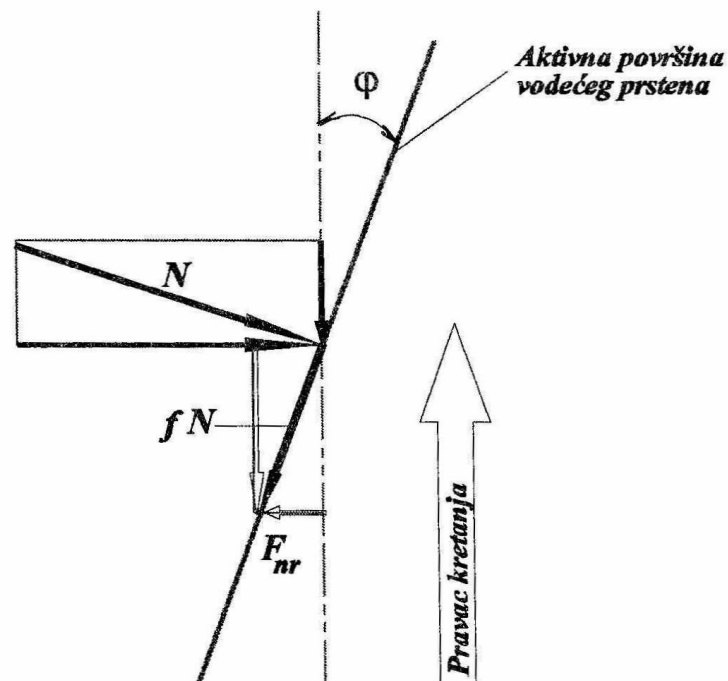
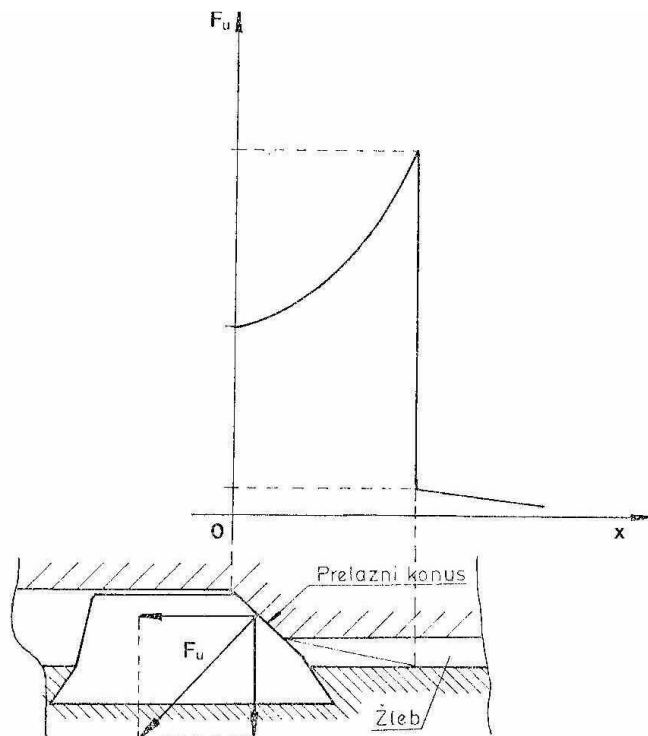
## 1.2.1. Dejstvo barutnih gasova



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



## 1.2.2. Uticaj vodećeg prstena



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

$$F_{nr} = N (\cos \varphi - f \sin \varphi)$$

$$F_{na} = N (\sin \varphi + f \cos \varphi)$$

### 1.2.3. Međusobni uticaj cev-projektil

Kada su cev i projektil pravilno izvedeni, ova opterećenja se mogu **zanemariti**. Nastaju usled:

- **nepravilnog položaja težišta projektila** (ne leži na uzdužnoj osi projektila) i velikog zazora između projektila i cevi
- **klaćenja projektila** u toku kretanja u cevi
- **uticaja krivine cevi**, koji dolazi do izražaja u slučajevima oruđa velikog kalibra kod kojih se cevi krive pod dejstvom sopstvene težine

## 1.2.4. Dejstvo eksplozivnog punjenja

Sila koje deluje na dno košuljice projektila:

$$m_e \frac{dV}{dt} = p_e S_d = F_e$$

$m_e$  - 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

Pritisak na zid košuljice usled obrtanja projektila:

$$p = \frac{1}{2} \rho_e \omega^2 r_i^2$$



## 1.2.5. Uticaj otpora vazduha i Zemljine teže

Pritisak stuba vazduha ispred projektila:

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

$p_a$  - atmosferski pritisak

$a$  - brzina zvuka u vazduhu

$V$  - brzina projektila

$\kappa$  - odnos specifičnih toplota za vazduh

Sila otpora vazduha:

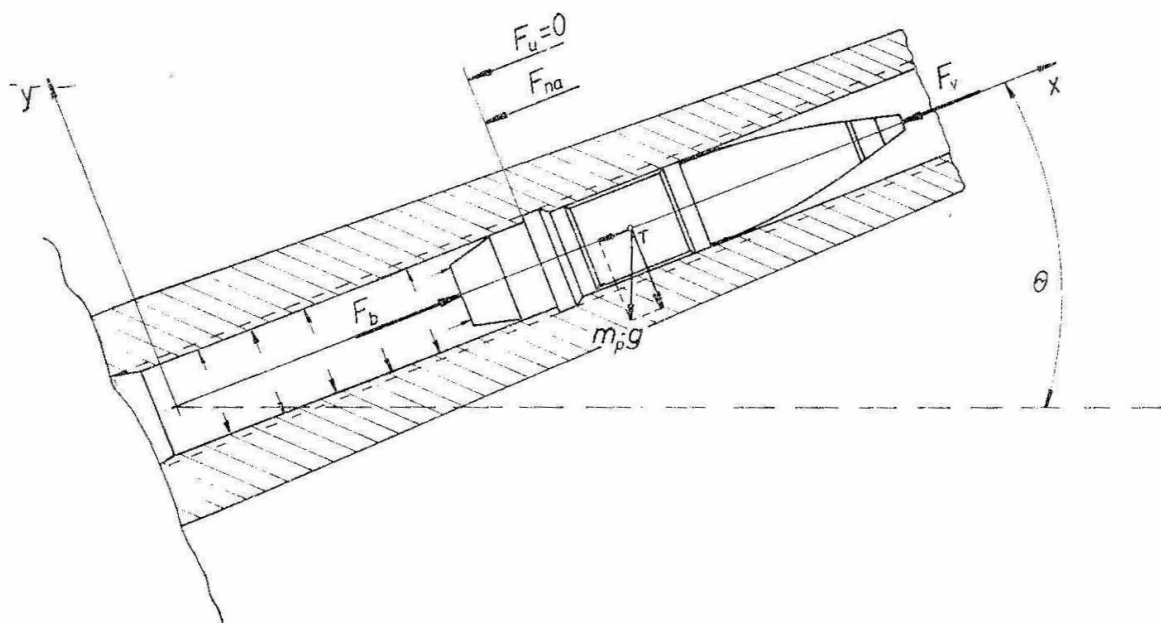
$$F_v = p_a \left[ \frac{d^2 \pi}{4} + \frac{en}{2} (d_0 - d) \right] \left( \frac{\kappa - 1}{2a} V + 1 \right)^{\frac{2\kappa}{\kappa - 1}}$$

Komponenta sile gravitacije:

$$F_{gx} = mg \sin \theta_0$$

## 1.3. Naprezanje košuljice projektila

### 1.3.1. Maksimalno translatorno ubrzanje projektila



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

$$I_x \frac{d\omega}{dt} = M_x$$

## 1.3.1. Maksimalno translatorno ubrzanje projektila

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

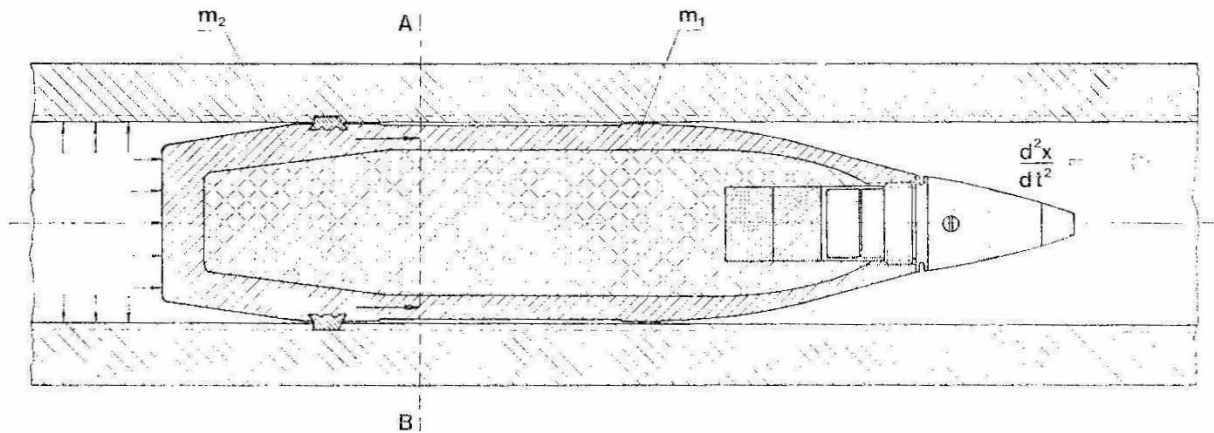
$$\left( \frac{d^2 x}{dt^2} \right)_{\max} = \frac{1}{m_p} p_m \left[ \frac{d^2 \pi}{4} + \frac{e n}{2} (d_0 - d) \right]$$

$$\frac{d^2 \pi}{4} \gg \frac{e n}{2} (d_0 - d)$$

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

- $10^6 \text{ m/s}^2$  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  $\text{m/s}^2$  za raketni projektil

## 1.3.2. Naprezanje u bočnom zidu košuljice projektila



$$m_A \frac{d^2x}{dt^2} = F_{i-i}$$

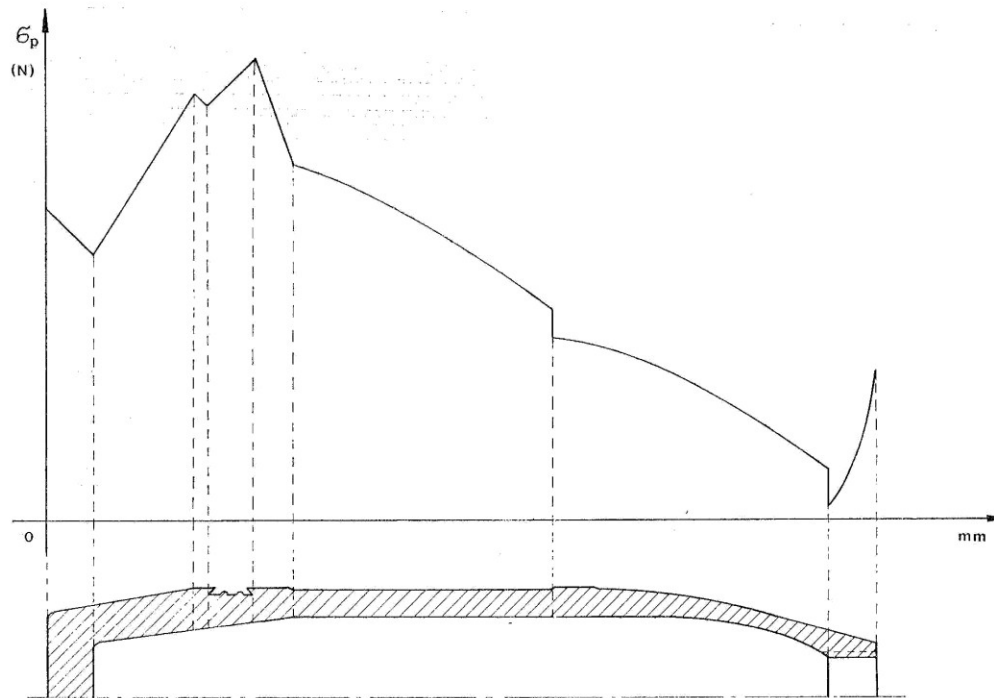
$m_A$  - masa dela A projektila (u koju ulazi: masa košuljice, masa upaljača i masa eksploziva dela A)

$d^2x/dt^2$  - ubrzanje projektila

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

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

## 1.3.2. Naprezanje u bočnom zidu košuljice projektila



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

## 1.3.2. Naprezanje u bočnom zidu košuljice projektila

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

- $p_{mrn}$  - 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 (°C)  
 $\sigma_{mrn}$  - standardna devijacija  $p_{mrn}$  (za prethodne proračune uzima se  $0.03 p_{mrn}$ )

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

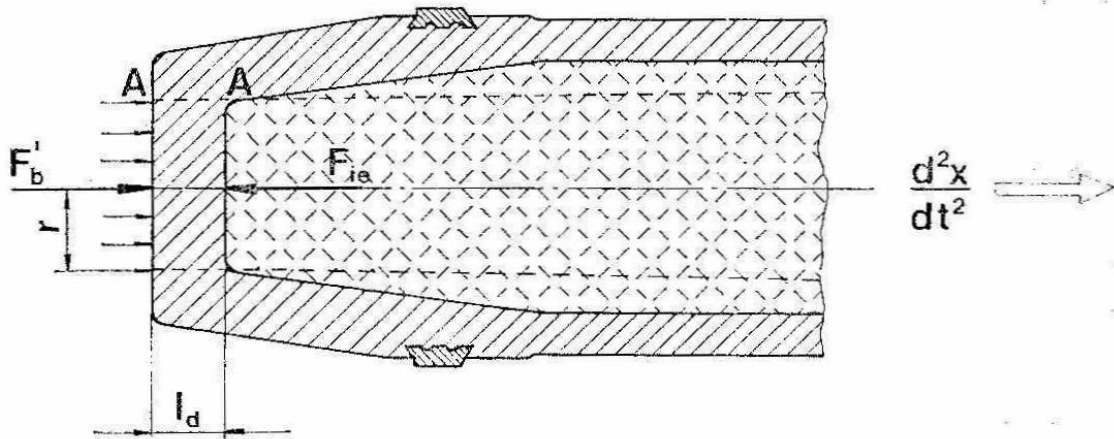
$$p_{pr} = k \cdot p_{mrn}$$

Stepen sigurnosti

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

# 1.3.3. Naprezanje dna košuljice

- naprezanje na smicanje



$$\tau = \frac{F'_b - F_{ie}}{S}$$

$$F'_b = p r^2 \pi$$

$$F_{ie} = m'_e \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$S = 2 r \pi l_d$$

$$\tau = \frac{1}{2 r \pi l_d} \left( p r^2 \pi - m'_e \frac{d^2 x}{dt^2} \right)$$

$$\tau_{\max} = \frac{p_{pr}}{2 r \pi l_d} \left\{ r^2 \pi - \frac{m'_e}{m_p} \left[ \frac{d^2 \pi}{4} + \frac{e n}{2} (d_0 - d) \right] \right\}$$

$$\tau_{\max} \leq \frac{\sigma_v}{2}$$

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

# 1.3.3. Naprezanje dna košuljice

- naprezenje na **savijanje**

– vključeno dno

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

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

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

- slobodno oslonjeno dno

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

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

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



## 2. Određivanje unutrašnje trase košuljice projektila

- **osnovni zahtev**: minimalno potrebna izdržljivost košuljice u fazi kretanja projektila u cevi oruđa
- **ostali zahtevi** (na primer, zahtev u pogledu **efikasnosti na cilju** i broja parčadi pri eksploziji projektila; zahtevi u vezi sa načinom laboracije i sa načinom proizvodnje košuljice i sl.) - **sekundarni**
- polazna osnova:
  - **naprezanja** koja se u košuljici javljaju u toku kretanja projektila u cevi orudja; mora se raspolagati parametrima metala izabranog za košuljicu projektila
  - **poznata spoljašnja trasa košuljice**

## 2.1. Unutrašnja trasa prednjeg oživala

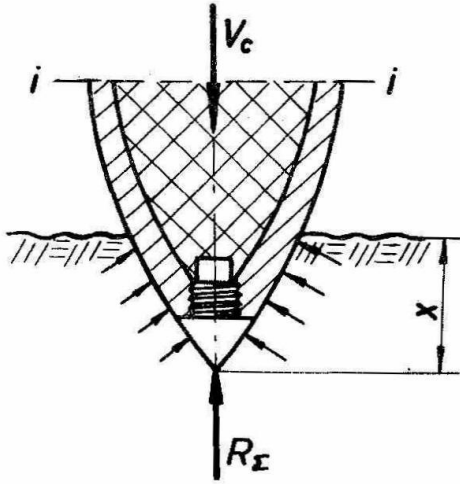
$$r_0 = \left\{ R_0^2 - \frac{1}{\pi \sigma_v} \frac{m_A}{m_p} p_{pr} \left[ \frac{\pi d^2}{4} + \frac{ne}{2} (d_0 - d) \right] \right\}^{1/2}$$

$r_0$  - unutrašnji poluprečnik prednjeg oživala u preseku i-i

$R_0$  - spoljni poluprečnik prednjeg oživala u preseku i-i

- kod **razornih projektila parčadnog i parčadno-rušećeg dejstva** koji eksplodiraju praktično na površini cilja, debljina zida prednjeg oživala košuljice određuje se na osnovu analogije sa već ostvarenim projektilima
- kod **razornih projektila rušećeg dejstva** koji eksplodiraju na cilju posle izvesnog prodiranja, debljina zida prednjeg oživala košuljice određuje se kao u prethodnom slučaju projektila parčadnog i parčadno-rušećeg dejstva, ali je neophodno izvršiti teorijsku proveru izdržljivosti prednjeg oživala

## 2.1. Unutrašnja trasa prednjeg oživala



$$m_p \frac{d^2 x}{dt^2} = R$$

$$F_i = m_i \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{m_i}{m_p} R$$

$$\frac{m_p V_c^2}{2} = \frac{1}{2} (R)_{\max} \cdot l_p$$

$$(R)_{\max} = m_p \frac{V_c^2}{l_p}$$

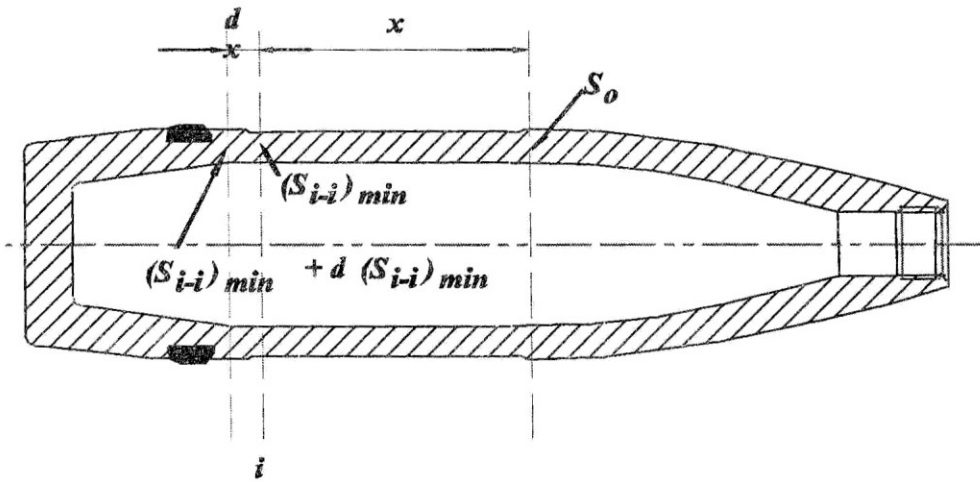
$$(\sigma_{i-i})_{\max} = \frac{1}{S_{i-i}} m_i \frac{V_c^2}{l_p}$$

$$(\sigma_{i-i})_{\max} \leq \sigma_m$$

Pretpostavke:

1. Analogija sa naprezanjem pri ubrzavanju
2. Sila otpora linearno raste sa dubinom prodiranja

## 2.1. Unutrašnja trasa cilindričnog dela košuljice



$$(S_{i-i})_{\min} = \frac{1}{\sigma_v} \frac{m_A}{m_p} p_{pr} \left[ \frac{\pi d^2}{4} + \frac{ne}{2} (d_0 - d) \right]$$

$$d(S_{i-i})_{\min} = \frac{K_1}{\sigma_v} \frac{p_{pr}}{m_p} dm_A$$

$$\frac{d(S_{i-i})_{\min}}{(S_{i-i})_{\min}} = \frac{K_1}{\sigma_v} \frac{p_{pr}}{m_p} \rho_k dx$$

$$\ln(S_{i-i})_{\min} = Kx + \ln C \quad K = \frac{K_1}{\sigma_v} \frac{p_{pr}}{m_p} \rho_k$$

$$\delta_{\min} = \frac{S_0}{\pi d} e^{Kx}$$

# 3. Vodeći prsten

Uloge vodećeg prstena su 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 onemogući 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.

## 3.1. Vodeći prsten - ilustracije

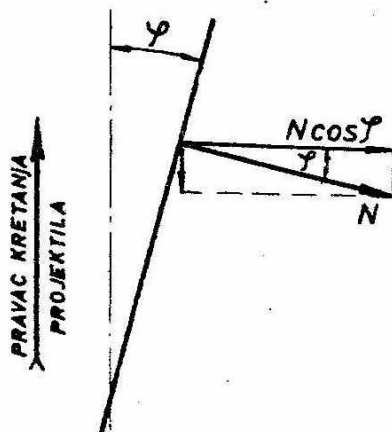
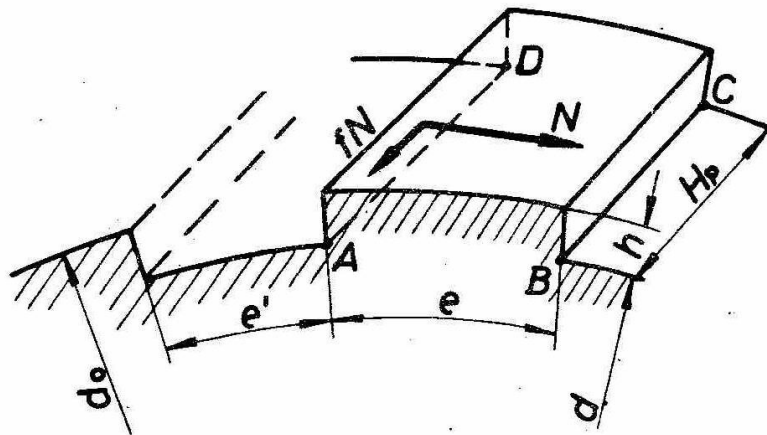


**Vodeći prsten artiljerijskog projektila  
pre ispaljivanja**



**Projektil 122 mm – istrošen vodeći  
prsten**

## 3.2. Određivanje normalne sile na aktivnu stranu zuba



$$I_x \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{2} n N \cos \varphi$$

$$N = \frac{2}{d} \frac{I_x}{n \cos \varphi} \frac{d\omega}{dt}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dx} \frac{dx}{dt} = V \frac{d\omega}{dx}$$

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

$$\omega = \frac{2V \tan \varphi}{d}$$

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

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

### 3.2.1. Konstantan ugao uvijanja žlebova

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

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

### 3.2.2. Promenljiv ugao uvijanja žlebova

$$\varphi(x) = \varphi_0 + kx$$

Maksimalnu vrednost sila  $N$  dostiže negde na intervalu izmedju položaja  $p_m$  i usta cevi, što u svakom konkretnom slučaju treba odrediti.



## 3.3. Trošenje vodećeg prstena

Konstantan ugao uvijanja žlebova



Pretpostavka:

Elementarna zapremina istrošenog metala na jednom zubu vodećeg prstena proporcionalna je radu trenja.

$$dW = hH_p dS_t$$

$$dA_t = f_d N \frac{dx}{\cos \varphi}$$

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

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

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

## 3.3. Trošenje vodećeg prstena

Promenljiv ugao uvijanja žlebova



Pretpostavka:

Elementarna zapremina istrošenog metala na jednom zubu vodećeg prstena proporcionalna je radu trenja.

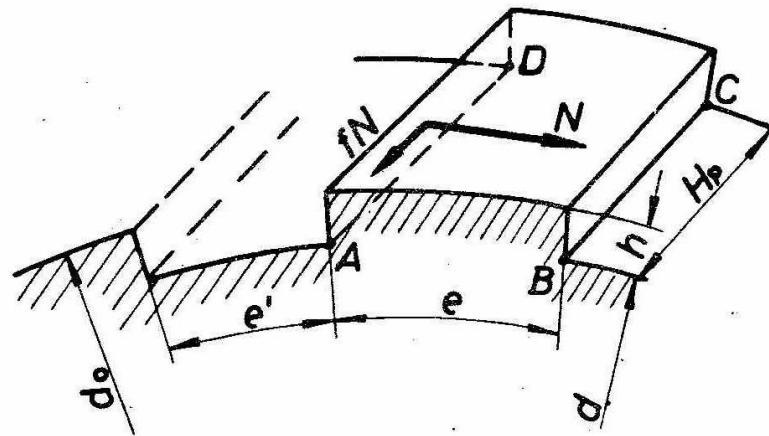
$$S_{t,\max} = \frac{2.303k' I_x}{hH_p} \frac{4}{n d^2} \left\{ \frac{(tg\varphi)_{sr}}{2b} \log \left( 1 + \frac{bV_0^2}{\cos^2 \varphi_u} \right) + \frac{tg\varphi_u}{b^2 V_0^2} \left[ bV_0^2 - \log \left( 1 + \frac{bV_0^2}{\cos^2 \varphi_u} \right) \right] \right\}$$

**Najveće trošenje prstena je utoliko manje**, ukoliko je:

- širina vodećeg prstena  $H_p$  veća
- visina zuba vodećeg prstena  $h$  veća
- broj žlebova  $n$  veći
- aksijalni moment projektila  $I_x$  manji (manja masa projektila)
- ugao uvijanja žlebova manji i početna brzina projektila  $V_0$  manja

## 3.4. Naprezanje vodećeg prstena

Naprezanje na pritisak:



$$\sigma_p = \frac{N}{h H_p} \quad \frac{N_m}{h H_p} \leq \sigma_{pd}$$

$$\sigma_{dp} = 250 \dots 350 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Naprezanje na smicanje:

$$\tau = \frac{N}{(e - S_t) H_p} \quad \tau_{\max} = \frac{N_m}{e H_p}$$

$$\tau_{\max} \leq \tau_d \quad \tau_d = 10 \dots 50 \frac{N}{\text{mm}^2}$$