

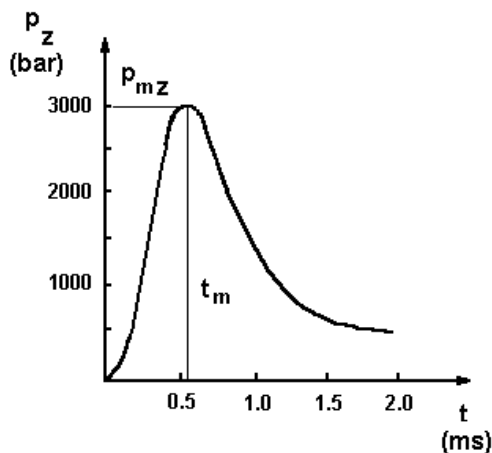
# AUTOMATSKO ORUŽJE NA PRINCIPU TRZANJA ZATVARAČA

Osnovni kriterijum pri projektovanju automatskog oružja koje radi na principu trzanja zatvarača je kontrolisanje ponašanja čaure metka pod dejstvom sile pritiska barutnih gasova. Čaura teži da se kreće unazad pod dejstvom aksijalne sile pritiska barutnih gasova na njeno dno. Istovremeno pod dejstvom radijalne sile pritiska barutnih gasova čaura se širi i pritiska na unutrašnje zidove barutne komore oružja (ležišta metka). Aksijalna sila teži da gurne zatvarač unazad, pri čemu se kretanju suprotstavljaju samo inercija zatvarača i sila trenja između čaure i komore oružja (ležišta metka).

Da bi se omogućilo lako uvođenje metka u ležište, čaura je obično koničnog oblika i sa neznatno manjim prečnikom od odgovarajućeg prečnika ležišta metka. Zazor između čaure i ležišta je u granicama propisanih tolerancija.

Pri opaljenju metka čaura se širi pod dejstvom pritiska barutnih gasova prvo za veličinu zazora čaura/ležište, a zatim zajedno sa ležištem. Pritisak barutnih gasova izaziva naprezanje u zidovima ležišta metka koje je nešto manje od granice elastičnosti, tako da pri opaljenju dolazi do značajnog proširenja ležišta. Naprezanje u zidovima čaure može biti veće od granice elastičnosti materijala čaure, tako da nakon prestanka dejstva pritiska barutnih gasova može da dođe do smanjenja zazora između čaure i ležišta metka.

Karakteristična kriva pritisak-vreme unutrašnjebalističkog ciklusa automatskog oružja prikazana je na slici 1 ( $p_{mz} \approx 3000$  bar,  $t_m \approx 0.5$  ms).



Slika 1. Tipična kriva  $p_z=f(t)$  unutrašnjebalističkog ciklusa automatskog oružja

Jednačina kretanja zatvarača pod dejstvom sile pritiska barutnih gasova je:

$$M_z \cdot a = p_z \cdot A \quad (1)$$

Ovde je

- $M_z$  - masa zatvarača
- $a$  - ubrzanje zatvarača
- $p_z$  - pritisak barutnih gasova na dno čaure (zatvarač)
- $A$  - površina poprečnog preseka cevi

U cilju uprošćene vremenske analize uzlazni deo krive pritiska barutnih gasova (slika 1) može se aproksimirati linearnom zavišnošću:

$$p_z = \frac{p_{mz}}{t_m} \cdot t = K_1 \cdot t \quad (2)$$

Ubrzanje zatvarača je:

$$a = \frac{p_{mz} \cdot A}{t_m \cdot M_z} \cdot t = \frac{K}{M_z} \cdot t \quad (3)$$

Brzina kretanja zatvarača dobija se integraljenjem ubrzanja po vremenu:

$$v = \int a \, dt = \int \frac{K}{M_z} t \, dt = \frac{K}{M_z} \cdot \frac{t^2}{2} + C_1 \quad \boxed{v = \frac{K}{M_z} \cdot \frac{t^2}{2}} \quad (4)$$

Konstanta  $C_1=0$  određuje se iz početnih uslova  $v=0$ ,  $t=0$ .

$$s = \int v \, dt = \int \frac{K}{M_z} \frac{t^2}{2} \, dt = \frac{K}{M_z} \cdot \frac{t^3}{6} + C_2 \quad \boxed{s = \frac{K}{M_z} \cdot \frac{t^3}{6}} \quad (5)$$

Konstanta  $C_2=0$  određuje se iz početnih uslova  $s=0$ ,  $t=0$ .

Predpostavimo da je najveći zazor između čaure i ležišta metka jednak deformaciji (dilataciji) čaure u trenutku kada je naprezanje čaure jednako granici razvlačenja materijala čaure. Tada se vrednost pritiska barutnih gasova u trenutku kada čaura čvrsto nalegne uz ležište metka dobija iz formule za cilindrični sud sa tankim zidovima ("kotlovski obrazac"):

$$p_u = \frac{2\sigma_v \delta}{d} \quad (6)$$

gde je  $\delta$  - debljina zida čaure  
 $d$  - srednji unutrašnji prečnik čaure  
 $\sigma_v$  - granica razvlačenja materijala čaure

#### PRIMER

$$\begin{array}{lll} \delta = 1.3 \, \text{mm} & A = 700 \, \text{mm}^2 & \sigma_v = 350 \, \text{N/mm}^2 \\ d = 37 \, \text{mm} & M_z = 0.5 \, \text{kg} & \end{array}$$

Kod streljačkog naoružanja karakteristične vrednosti na krivoj pritiska  $p$ - $t$  (sl. 1) su  $t_m \sim 0.5 \, \text{ms}$  i  $p_{mz} \sim 3000 \, \text{bar}$ , tako da je u jednačini (2)  $K_1 = 6 \cdot 10^{11} \, [\text{N/m}^2/\text{s}]$ .

Iz jednačine (6) dobija se  $p_u = 246 \, \text{bar}$ , tako da je vreme do postizanja tog pritiska:

$$t_u = \frac{p_u}{K_1} = \frac{246 \cdot 10^5}{6 \cdot 10^{11}} = 4.1 \cdot 10^{-5} \text{ [s]}$$

Put koji čaura pređe za vreme  $t_u$  dobija se iz jednačine (5) ( $K=K_1 \cdot A=6 \cdot 10^{11} \cdot 700 \cdot 10^{-6}=4.2 \cdot 10^8$  N/s):

$$s = \frac{4.2 \cdot 10^8}{6 \cdot 0.5} \cdot (4.1 \cdot 10^{-5})^3 = 9.65 \cdot 10^{-6} \text{ [m]}$$

Dobijeni rezultat pokazuje da i pri maksimalnom dozvoljenom zazoru između čaure i ležišta metka, pređeni put čaure do trenutka poništavanja zazora je izuzetno mali. Nakon poništavanja zazora čaura/ležište metka otpor trenja počinje da igra ulogu, a kretanje čaure se nastavlja dok je:

$$A p_z > f A_c p_i \quad (7)$$

Ovde je:  $A_c$  - površina kontakta čaure i ležišta metka  
 $f$  - koeficijent trenja između čaure i ležišta metka  
 $p_i$  - pritisak između zidova čaure i ležišta metka

### Trenje u ležištu metka

Sila trenja između čaure i ležišta metka pri izvlačenju čaure zavisi od pritiska između čaure i ležišta metka, dimenzija čaure, mehaničkih karakteristika i hrapavosti površina ležišta metka i čaure.

Pošto sila trenja zavisi od velikog broja faktora koji ne mogu dovoljno tačno da se odrede, veličina sile trenja između čaure i ležišta metka može da se proračuna samo kao orijentaciona vrednost.

U cilju olakšavanja proračuna čaura se deli na više pojaseva u kojima se pretpostavlja da je debljina zida konstantna, a zatim se izračunavaju veličine potrebne za određivanje sile trenja u pojedinim pojasevima.

Pritisak između čaure i ležišta metka pri maksimalnom pritisku barutnih gasova je:

$$p_{mi} = p_m - p_u \quad (8)$$

gde je:  $p_m$  - maksimalni pritisak barutnih gasova u cevi  
 $p_u$  - pritisak koji napreže zidove čaure do granice razvlačenja (jedn. 6)

Kružna relativna deformacija ležišta metka može se odrediti iz izraza:

$$\epsilon_1 = \frac{2 p_{mi}}{3 E} \cdot \frac{2 d_l^2 + d_{lu}^2}{d_l^2 - d_{lu}^2} \quad (9)$$

gde je:  $E$  - modul elastičnosti materijala cevi  
 $d_l$  - spoljni prečnik ležišta metka  
 $d_{lu}$  - unutrašnji prečnik ležišta metka

Kružna relativna deformacija čaure je:

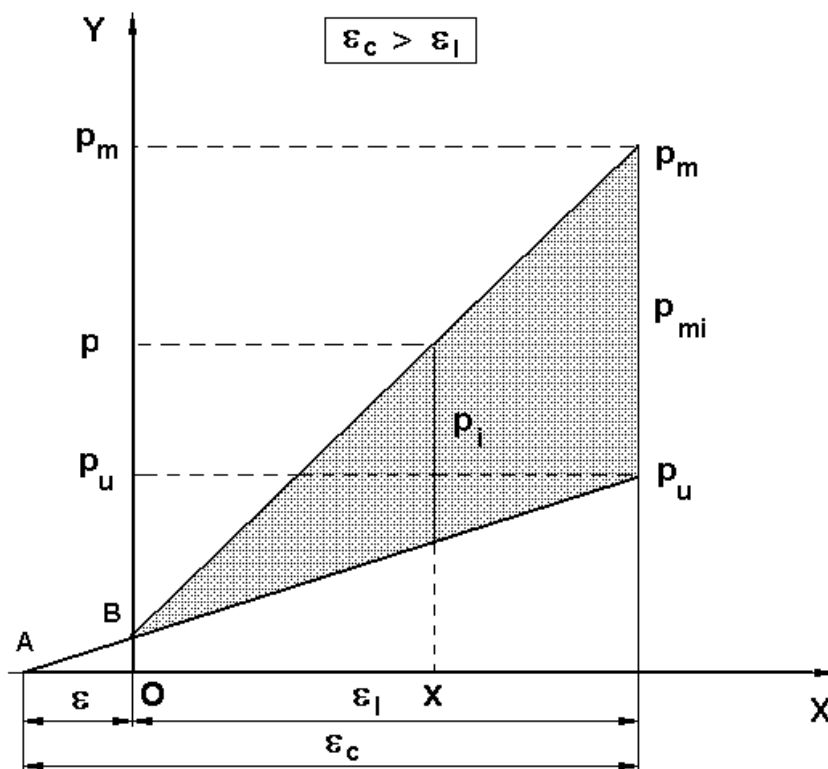
$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_v}{E_1} \quad (10)$$

$E_1$  - modul elastičnosti materijala čaure

Relativni zazor između ležišta metka i čaure je:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_l \quad (11)$$

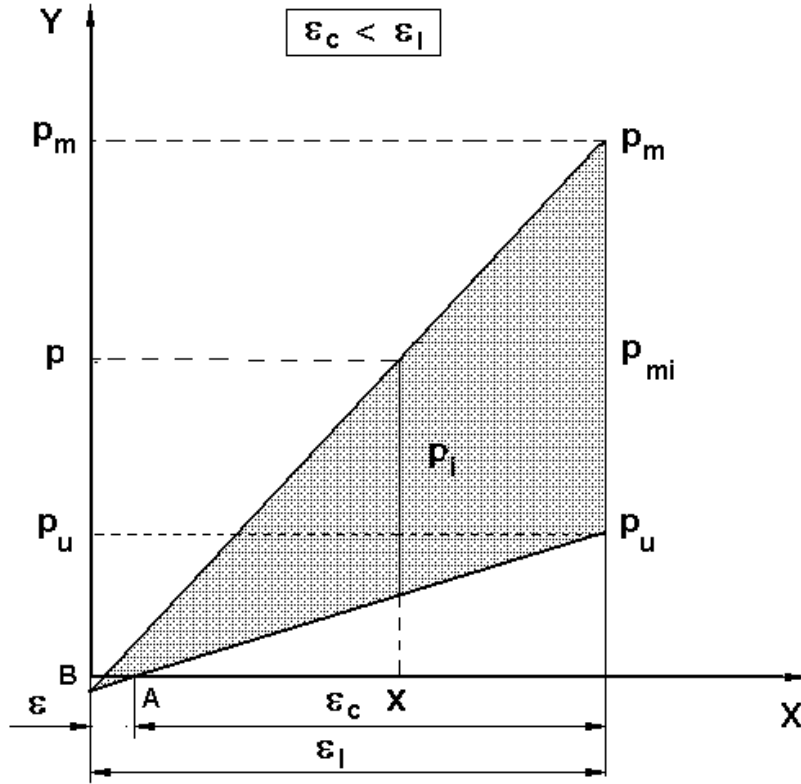
Na slikama 2-a i 2-b grafički su prikazane relativne kružne deformacije čaure i ležišta metka tokom opaljenja.



**Slika 2-a . Relativne kružne deformacije čaure i ležišta pri opaljenju ( $\varepsilon_c > \varepsilon_l$ )**

Na slici 2-a prikazan je slučaj kada je  $\varepsilon_c > \varepsilon_l$ , a na slici 2-b slučaj kada je  $\varepsilon_c < \varepsilon_l$ . Ordinate između pravih linija  $Bp_m$  i  $Bp_u$  predstavljaju pritisak između zidova čaure i ležišta metka (osenčeni deo na dijagramu). Tačka preseka prave  $Bp_m$  sa osom  $X$  označava položaj zida ležišta metka posle opadanja pritiska barutnih gasova u cevi..

Na slici 2-a prikazan je slučaj kada posle prestanka dejstva barutnih gasova nema pritiska između čaure i ležišta metka. Na slici 2-b je prikazan slučaj kada nakon prestanka dejstva barutnih gasova postoji uklinjenje čaure (zidovi ležišta metka pritiskaju zidove čaure). Na osnovu dijagrama na slikama 2-a i 2-b može se odrediti analitički izraz za pritisak između zidova čaure i ležišta metka.



Slika 2-b. Relativne kružne deformacije čaure i ležišta pri opaljenju ( $\epsilon_c < \epsilon_l$ )

$$\frac{p_u}{\epsilon + \epsilon_l} = \frac{p - p_i}{\epsilon + x} \quad (a)$$

$$\frac{p_m - p_u + \frac{p_u \epsilon_l}{\epsilon + \epsilon_l}}{\epsilon_l} = \frac{p_i + \frac{p_u x}{\epsilon + \epsilon_l}}{x} \quad (b)$$

Eliminacijom iz proporcija (a) i (b) koordinate položaja površine ležišta metka  $x$ , koja odgovara pritisku barutnih gasova  $p$ , dobija se izraz za pritisak između zidova čaure i ležišta metka:

$$p_i = \frac{p(\epsilon + \epsilon_l) - p_u \epsilon}{p_m(\epsilon + \epsilon_l) - p_u \epsilon} (p_m - p_u) \quad (12)$$

Pri  $p=0$  (ispražnjena cev) i  $\epsilon > 0$  dobija se negativna vrednost za  $p_{i0}$ , odnosno pritisak između zidova čaure i ležišta metka jednak je atmosferskom pritisku. Pri  $p=0$  i  $\epsilon < 0$  pritisak između zidova čaure i ležišta metka nakon praznjenja cevi je:

$$p_{i0} = -\frac{p_u \epsilon}{p_m(\epsilon + \epsilon_l) - p_u \epsilon} (p_m - p_u) \quad (13)$$

Sila trenja jednog pojasa čaure prečnika  $d_k$  i dužine  $l_k$  pri izvlačenju čaure je:

$$T_k = f p_i d_k \pi l_k \quad (14)$$

a ukupna sila trenja za celu čauru pri pritisku između zidova čaure i ležišta metka  $p_i$  je:

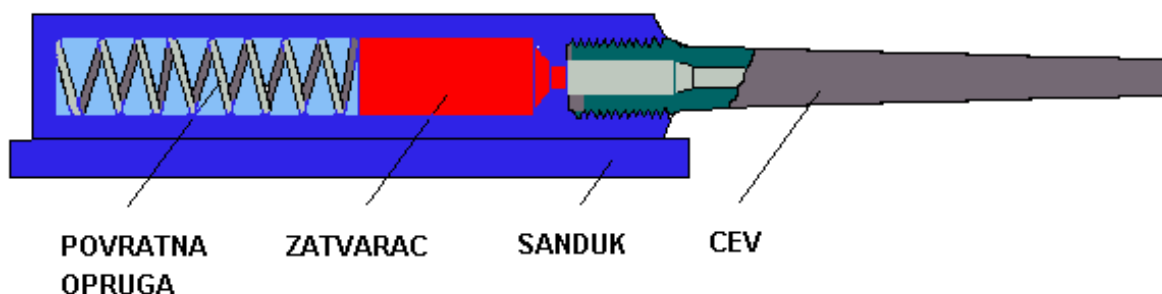
$$T = \sum_{k=1}^n T_i \quad (15)$$

Pri određivanju sile trenja zanemaren je uticaj nagiba čaure, odnosno ležišta metka. Pošto je tangens ugla nagiba čaure (izuzev tangensa ugla prednjeg konusa) veoma mali, navedeno zanemarivanje neznatno utiče na rezultate proračuna ( $\tan 20' = 0.0064$ ). Uticaj prednjeg konusa je takođe neznatan, jer je njegova dužina mala u odnosu na ukupnu dužinu čaure.

Sila izvlačenja čaure povećava se pri povećanju dimenzija čaure, a smanjuje se pri smanjenju koeficijenta trenja. Izborom optimalnih odnosa ovih parametara određuje se sila izvlačenja čaure koja ne sme da bude veća od sile koju izdržavaju izvlakač zatvarača, odnosno venac čaure. Koeficijent trenja između čaure i ležišta metka je  $f=0.10 \div 0.15$ . Kod sistema automatskog oružja sa podmazivanjem municije pre opaljenja postiže se smanjenje koeficijenta trenja do vrednosti  $f=0.01$ .

## 1° SLOBODNO TRZANJE ZATVARAČA

Kod sistema sa slobodnim trzanjem zatvarača osnovni elementi su sam zatvarač i povratna opruga. Šematski prikaz ovog sistema dat je na slici 3. Praktično jedina sila koja se suprotstavlja kretanju zatvarača unazad (trzanju zatvarača) je inercija samog zatvarača. Otpor kretanju koji daje povratna opruga je praktično zanemarljiv u početnoj fazi trzanja.



Slika 3. Šematski prikaz sistema sa slobodnim trzanjem zatvarača.

Zatvarač počinje da se kreće čim počne kretanje projektila u cevi, ali sa mnogo manjim ubrzanjem zbog velike mase zatvarača. Čaura ostaje oslonjena u ležištu metka dok pritisak barutnih gasova ne opadne dovoljno da ne izazove prskanje čaure. Da bi se obezbedilo lagano ubrzavanje zatvarača njegova masa mora da bude znatno veća od one neophodne za primanje opterećenja. Kod oružja sa velikim impulsom pritiska barutnih gasova masa zatvarača mora da bude izuzetno velika. Brzina trzanja ovakvog zatvarača je relativno mala, što prouzrokuje malu brzinu gađanja.

## VREME TRAJANJA CIKLUSA AUTOMATIKE

Vreme trajanja ciklusa automatike određeno je impulsom sile pritiska barutnih gasova, kao i karakteristikama zatvarača i povratne opruge. Impuls sile barutnih gasova proporcionalan je površini ispod unutrašnjebalističke krive krive pritisak - vreme:

$$\int_{t_1}^{t_2} F_g dt = s \int_{t_1}^{t_2} p_z dt \quad (16)$$

gde je:  $F_g$  - sila pritiska barutnih gasova  
 $s$  - površina poprečnog preseka cevi oružja  
 $p_z$  - pritisak barutnih gasova na čelo zatvarača (dno čaure)

Impuls sile pritiska barutnih gasova jednak je količini kretanja sklopa zatvarača pri slobodnom trzanju:

$$\int_{t_1}^{t_2} F_g dt = M_z V_{st} \quad (17)$$

gde je:  $M_z$  - masa sklopa zatvarača  
 $V_{st}$  - brzina slobodnog trzanja

Masa sklopa zatvarača obuhvata oko 1/3 mase opruge (ekvivalentna masa opruge koja se kreće). Međutim, uticaj ekvivalentne mase opruge je obično veoma mali, tako da se u praksi može zanemariti.

Energija slobodnog trzanja je:

$$E_{trz} = \frac{M_z V_{st}^2}{2} \quad (18)$$

Srednja sila u povratnoj opruzi pri trzanju zavisi od efikasnosti mehaničkog sistema:

$$F_{sr} = \frac{\epsilon E_{trz}}{L} \quad (19)$$

gde je:  $L$  - dužina trzanja zatvarača  
 $\epsilon$  - koeficijent efikasnosti povratne opruge pri trzanju ( $\epsilon \sim 0.4$ )

### Vreme trzanja

Dužina trzanja zatvarača mora da bude dovoljna za izvlačenje prazne čaure i uvođenje novog metka u ležište. Početna sila u povratnoj opruzi usvaja se kada god je to moguće kao približno brojno jednaka četverostrukoj težini trzajuće mase ( $F_0 \approx 4 M_z g$ ). Maksimalna sila u povratnoj opruzi (zatvarač u zadnjem položaju) je:

$$F_m = 2F_{sr} - F_0 \quad (20)$$

Sila u povratnoj opruzi (spiralno-zavojna opruga) u tekućem trenutku t trzanja je:

$$F = F_0 + C x \quad (21)$$

gde je:  $C$  - konstanta opruge (krutost)  
 $x$  - dužina trzanja u trenutku t

Energija koju poseduje trzajuća masa u trenutku t je:

$$\frac{M_z V^2}{2} = \frac{M_z V_{st}^2}{2} - \frac{1}{\epsilon} \left( F_0 x + \frac{C}{2} x^2 \right) \quad (22)$$

gde je  $\epsilon$  efikasnost sistema opruge. Neefikasnost sistema omogućuje da se apsorbuje jedan deo energije trzanja.

$$V = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{2}{M_z} \left( \frac{M_z V_{st}^2}{2} - \frac{F_0}{\epsilon} x - \frac{C}{2\epsilon} x^2 \right)} \quad (23)$$

$$dt = \frac{\sqrt{\frac{M_z}{2}}}{\sqrt{\frac{M_z V_{st}^2}{2} - \frac{F_0}{\epsilon} x - \frac{C}{2\epsilon} x^2}} dx \quad (24)$$

Ako za brzinu u početnom trenutku usvojimo brzinu slobodnog trzanja ( $V_0 = V_{st}$ ) proračunato vreme trajanja trzanja neće obuhvatiti period dejstva barutnih gasova. Na taj način integraljenjem jednačine (24) omogućeno je dobijanje jednostavnog rešenja bez ozbiljnije greške:

$$t_{trz} = \sqrt{\frac{\epsilon M_z}{C}} \left( \arcsin \frac{F_0 + C x}{\sqrt{F_0^2 - \epsilon C M_z V_0^2}} \right) \Bigg|_{x=0}^{x=L} \quad (25)$$

Pošto je  $M_z V_0^2 = \frac{L}{\epsilon} (F_0 + F_m)$  i po definiciji  $C = \frac{F_m - F_0}{L} \Rightarrow \sqrt{F_0^2 - \epsilon C M_z V_0^2} = F_m$

$$t_{trz} = \sqrt{\frac{\epsilon M_z}{C}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_0}{F_m} \right) \Rightarrow \boxed{t_{trz} = \sqrt{\frac{\epsilon M_z}{C}} \arccos \frac{F_0}{F_m}} \quad (26)$$



## Vreme vraćanja

Vreme vraćanja određuje se istim postupkom kao vreme trzanja. Neefikasnost sistema opruge usporava vraćanje. Energija mase koja se vraća (sklop zatvarača) u proizvoljnom trenutku  $t$  je:

$$\frac{M_z V_{vr}^2}{2} = \frac{M_z V_{0vr}^2}{2} + \epsilon \left( F_0 x - \frac{C}{2} x^2 \right) \quad (27)$$

gde je  $V_{vr}$  - brzina vraćanja u trenutku  $t$   
 $V_{0vr}$  - početna brzina vraćanja.

Pošto je  $V_{vr} = dx/dt$  dobija se:

$$dt = \frac{\sqrt{\frac{M_z}{2}}}{\sqrt{\frac{M_z V_{0vr}^2}{2} + \epsilon F_m x - \frac{\epsilon C}{2} x^2}} dx \quad (28)$$

Integraljenjem jednačine (28) dobija se:

$$t_{vra} = \sqrt{\frac{M_z}{\epsilon C}} \left( \arcsin \frac{Cx - F_m}{\sqrt{F_m^2 + \frac{C}{\epsilon} M_z V_{0vr}^2}} - \arcsin \frac{-F_m}{\sqrt{F_m^2 + \frac{C}{\epsilon} M_z V_{0vr}^2}} \right) \quad (29)$$

U početnom trenutku vraćanja ( $t=0$ ) je  $V_{0vr}=0$ , tako da se dobija:

$$t_{vra} = \sqrt{\frac{M_z}{\epsilon C}} \left( \arcsin \frac{-F_0}{F_m} - \frac{3\pi}{2} \right) \Rightarrow \boxed{t_{vra} = \sqrt{\frac{M_z}{\epsilon C}} \arccos \frac{F_0}{F_m}} \quad (30)$$

## Vreme trajanja kompletnog ciklusa

Masa sklopa zatvarača i dužina trzanja zatvarača su osnovni parametri koji kontrolišu funkciju sistema sa slobodnim trzanjem zatvarača. Karakteristike povratne opruge određuju se nakon utvrđivanja vrednosti mase i dužine trzanja zatvarača. Zahtevi za ukupnu masu oružja u velikoj meri ograničavaju masu i dužinu trzanja zatvarača.

Zbog efikasnosti opruge ( $\epsilon < 1$ ) vreme vraćanja zatvarača je uvek duže od vremena trzanja ( $t_{vra} > t_{trz}$ ). Vreme trajanja kompletnog ciklusa rada automatike je:

$$t_c = t_{trz} + t_{vra} + t_{op} \quad (31)$$

gde je  $t_{op}$  - vremenski period između završetka vraćanja zatvarača i početka trzanja zatvarača pri narednom opaljenju.

Uobičajeno je da se definiše zahtev za **teorijsku** brzinu gađanja oružja  $f_g$ , izraženu brojem opaljenih metaka u minuti. Na ovaj način specificirano je i potrebno vreme trajanja ciklusa automatike:

$$t_c = \frac{60}{f_g} \left[ \frac{s}{\text{met.}} \right] \quad (32)$$

Približne vrednosti osnovnih parametara sistema slobodnog trzanja mogu se dobiti uspostavljanjem veze između srednje sile u povratnoj opruzi i srednjeg ubrzanja pri trzanju sa energijom trzanja. Srednja sila u povratnoj opruzi potrebna za zaustavljanje trzajuće mase je:

$$F_{sr} = \frac{\epsilon E_{trz}}{L} = \frac{\epsilon M_z V_{st}^2}{2L} \quad (33)$$

Pošto je  $F_{sr} = \epsilon M_z a_{sr}$ , srednje ubrzanje trzajuće mase je:

$$a_{sr} = \frac{F_{sr}}{\epsilon M_z} = \frac{V_{st}^2}{2L} \quad (34)$$

Na osnovu elementarnog izraza za dužinu trzanja  $L = \frac{a_{sr} t_{trz}^2}{2}$  vreme trzanja je:

$$t_{trz} = \sqrt{\frac{2L}{a_{sr}}} = \frac{2L}{V_{st}} \quad (35)$$

Pri vraćanju efikasnost sistema opruge je smanjena, tako da je srednja sila u opruzi:

$$F_{sr,vra} = \epsilon F_{sr} = M_z a_{sr,vra} \quad (36)$$

gde je  $a_{sr,vra}$  - srednje ubrzanje pri vraćanju.

Prema jednačini (33) je:

$$\epsilon F_{sr} = \frac{\epsilon^2 M_z V_{st}^2}{2L} = M_z a_{sr,vra} \quad (37)$$

Sličnim postupkom kao za trzanje dobija se vreme vraćanja:

$$t_{\text{vra}} = \sqrt{\frac{2L}{a_{\text{sr,vra}}}} = \frac{2L}{\epsilon V_{\text{st}}} \quad (38)$$

Približno vreme trajanja ciklusa automatike ( $t_{\text{op}} \ll t_{\text{trz}} + t_{\text{vra}}$ ) postaje:

$$t_c = t_{\text{trz}} + t_{\text{vra}} = \frac{2L}{V_{\text{st}}} \left( 1 + \frac{1}{\epsilon} \right) \quad (39)$$

Na osnovu zahtevanog vremena trajanja ciklusa i izračunate brzine slobodnog trzanja, dužina trzanja zatvarača može se odrediti iz jednačine (39). Ovako izračunata dužina trzanja biće manja od stvarne dužine, jer ubrzanje tokom trzanja i vraćanja nije konstantno, tako da je potrebno kraće vreme da trzajuća masa pređe put  $L$  iz jednačine (39) pri trzanju i vraćanju. Zbog toga se dužina trzanja zatvarača povećava sve dok zbir vremena trzanja i vraćanja iz jednačina (26) i (30) ne bude jednak vremenu trajanja ciklusa  $t_c$  iz jednačine (39).

$$t_c = t_{\text{trz}} + t_{\text{vra}} = \left( \sqrt{\frac{\epsilon M_z}{C}} + \sqrt{\frac{M_z}{\epsilon C}} \right) \arccos \frac{F_0}{F_m} \quad (40)$$

Ako se zameni  $F_0 = 2F_{\text{sr}} - F_m$  u jednačinu (40) dobija se:

$$\cos \frac{t_c \sqrt{C}}{\sqrt{\epsilon M_z} + \sqrt{\frac{M_z}{\epsilon}}} = \frac{2F_{\text{sr}} - F_m}{F_m} \quad (41)$$

Srednja sila u opruzi  $F_{\text{sr}}$  izračunava se iz jednačine (33). Treba naglasiti da za bilo koji dati problem

veličina  $\frac{t_c}{\sqrt{\epsilon M_z} + \sqrt{\frac{M_z}{\epsilon}}}$  predstavlja konstantu.

Odgovarajućim izborom dužine trzanja  $L$  (koristeći kao orijentaciju jednačinu (39)) i krutosti povratne opruge  $C$ , mogu se iterativnim postupkom odrediti sile u opruzi tako da se

- 1° iz jednačine (40) dobije vreme trajanja ciklusa  $t_c^*$  koje odgovara traženoj brzini gađanja  $f_g$ .
- 2° dobije sila  $F_{\text{sr}} = (F_0 + F_m)/2$  koja odgovara vrednosti dobijenoj iz jednačine (33).

Ostvarena teorijska brzina gađanja dobija se na osnovu usvojenog proračunatog vremena trajanja ciklusa:

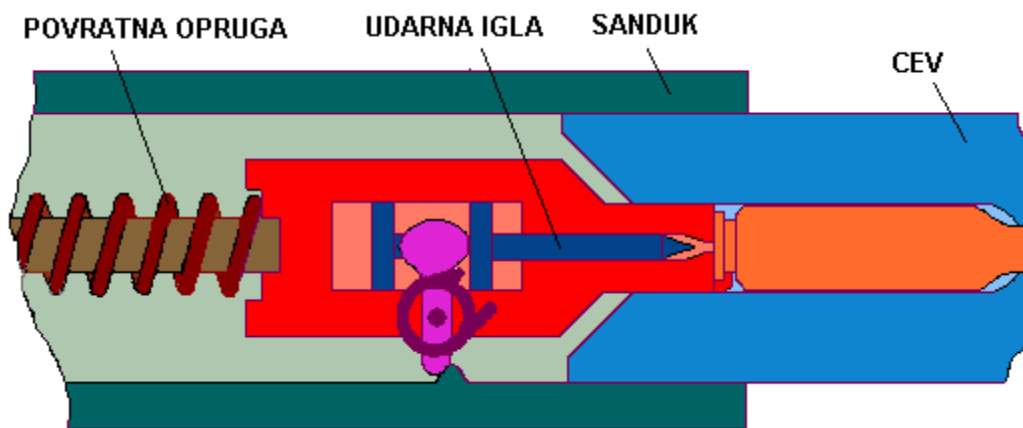
$$f_g^* = \frac{60}{t_c^*} \left[ \frac{\text{met.}}{\text{min}} \right] \quad (42)$$

## 2° TRZANJE ZATVARAČA SA RANIJIM OPALJENJEM

Kod ovog sistema automatskog oružja opaljenje novog metka obavlja se neposredno pre nego što se zatvarač vrati u krajnji prednji položaj. Na taj način se jedan deo impulsa barutnih gasova koristi za kočenje zatvarača pri vraćanju. Preostali deo impulsa obezbeđuje silu trzanja zatvarača..

Absorbovanjem dela impulsa barutnih gasova sistem trzanja zatvarača sa ranijim opaljenjem omogućuje postizanje većih brzina gađanja. Korišćenjem polovine impulsa barutnih gasova za kočenje zatvarača pri vraćanju omogućuje da se masa zatvarača svede na polovinu, uz značajno povećanje brzine gađanja.

Šematski prikaz sistema trzanja zatvarača sa ranijim opaljenjem dat je na slici 4. Ciklus rada automatike počinje kada zatvaraš pod dejstvom sile pritiska barutnih gasova krene unazad sabijajući povratnu oprugu, izvlačeći i izbacujući praznu čauru. Povratna opruga potiskuje zatvarač napred. Pri vraćanju zatvarač povlači novi metak iz mehanizma za hranjenje oružja i uvodi ga u ležište metka. Neposredno pre nego što metak dođe u krajnji prednji položaj mehanizam za okidanje aktivira inicijalnu kapslu. Mehanizam za okidanje je tako prostorno i vremenski podešen da je čaura adekvatno oslonjena u ležištu metka u trenutku kada pritisak barutnih gasova u čauri poraste do vrednosti koja bi izazvala oštećenje čaure. Zatvarač i čaura su u krajnjem prednjem položaju upravo u trenutku kada je preostali impuls pritiska barutnih gasova jednak količini kretanja zatvarača pri trzanju. Ovaj preostali deo čini obično polovinu impulsa pritiska barutnih gasova.



Slika 4. Šematski prikaz sistema trzanja zatvarača sa ranijim opaljenjem

Efikasnost sistema sa ranijim opaljenjem može se pokazati ako se zadrže svi isti parametri kao kod slobodnog trzanja zatvarača, osim što se samo 1/2 impulsa pritiska barutnih gasova koristi za trzanja zatvarača. Sada je za dobijanje iste brzine slobodnog trzanja potrebno da masa zatvarača bude upola manja:

$$\frac{1}{2} \int F_g dt = M'_z V_{st} = \frac{M_z}{2} V_{st} \quad (43)$$

Energija trzanja je upola manja u odnosu na slobodno trzanje zatvarača:

$$E'_{\text{trz}} = \frac{1}{2} M'_z V_{\text{st}}^2 = \frac{1}{2} \frac{M_z}{2} V_{\text{st}}^2 = \frac{1}{2} E_{\text{trz}} \quad (44)$$

Za istu dužinu trzanja zatvarača  $L'=L$  i brzinu gađanja  $f'_g=f_g$  (odnosno  $t'_c=t_c$ ) krutost povratne opruge treba da je upola manja ( $C'=C/2$ ).

$$t'_c = \left( \sqrt{\frac{\epsilon M'_z}{C'}} + \sqrt{\frac{M'_z}{\epsilon C'}} \right) \arccos \frac{F_0}{F_m} \quad (45)$$

Dužina puta zatvarača kod slobodnog trzanja ( $L$ ) bila je izabrana tako da uravnoteži dinamiku problema i nije bila jednaka idealnoj minimalnoj dužini trzanja ( $L'$ ).

$$\boxed{L' = aL} \quad (a < 1) \quad (46)$$

Ako je sila trzanja kod slobodnog trzanja zatvarača prihvatljiva, onda se masa zatvarača podešava na sledeći način.

$$C' = \frac{F_m - F_0}{L'} = \frac{F_m - F_0}{aL} \Rightarrow \boxed{C' = \frac{1}{a} C} \quad (47)$$

$$E'_{\text{trz}} = \frac{1}{2} M'_z V_{\text{st}}'^2 \quad M'_z V_{\text{st}}' = \frac{1}{2} \int F_g dt \quad E'_{\text{trz}} = \frac{1}{2} M'_z \frac{\left( \int F_g dt \right)^2}{4 M_z'^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left( \int F_g dt \right)^2}{4 M'_z}$$

$$E'_{\text{trz}} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{F_0 + F_m}{2} \cdot L' \Rightarrow M'_z = \frac{\epsilon \left( \int F_g dt \right)^2}{4 a L (F_0 + F_m)} \quad \boxed{M'_z = \frac{1}{4a} M_z} \quad (48)$$

$$V_{\text{st}}' = \frac{1}{2 M'_z} \int F_g dt = \frac{1}{2 \frac{1}{4a} M_z} \int F_g dt = 2a \frac{\int F_g dt}{M_z} \quad \boxed{V_{\text{st}}' = 2a V_{\text{st}}} \quad (49)$$

$$E'_{\text{trz}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4a} M_z \cdot 4a^2 V_{\text{st}}'^2 = \frac{a}{2} M_z V_{\text{st}}'^2 \quad \boxed{E'_{\text{trz}} = a E_{\text{trz}}} \quad (50)$$

$$t'_c = \left( \sqrt{\frac{\epsilon M'_z}{C'}} + \sqrt{\frac{M'_z}{\epsilon C'}} \right) \arccos \frac{F_0}{F_m} = \left( \sqrt{\frac{\epsilon M'_z}{4a \frac{C}{a}}} + \sqrt{\frac{M'_z}{\epsilon 4a \frac{C}{a}}} \right) \arccos \frac{F_0}{F_m}$$

$$= \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{\epsilon M'_z}{C}} + \sqrt{\frac{M'_z}{\epsilon C}} \right) \arccos \frac{F_0}{F_m} \quad \boxed{t'_c = \frac{t_c}{2}} \quad (51)$$

$$f'_g = \frac{60}{t'_c} \quad \boxed{f'_g = 2f_g} \quad (52)$$

## OPRUGE

U konstrukciji automatskog oružja primenjuje se više vrsta opruga.

Najčešće se primenjuju cilindrično-zavojne opruge sa zavojnicom okruglog, kvadratnog i pravougaonog preseka. Povratne opruge i opruge amortizera su obično cilindrično-zavojne. Pri sabijanju ovih opruga akumulira se mehanička energija koja se iskorišćava za vraćanje delova automatike u početni položaj.

U mehanizmima za okidanje obično se koriste torzione opruge.

U mehanizmima za hranjenje često se koriste zavojne prizmatične opruge (magacini – okviri) i spiralne opruge (doboši).

U konstrukciji izbacaca i mehanizmima za okidanje primenjuju se lisnate opruge.

U konstrukciji amortizera ponekad se primenjuju prstenaste opruge.

Opruge automatskog oružja rade u dinamičkim uslovima. Međutim, pošto je vreme ugiba (sabijanja) opruge obično znatno veće od perioda sopstvenih oscilacija zavojnice opruge, pravilnim izborom karakteristika opruge mogu se pod određenim uslovima koristiti metode statičkog proračuna opruga.

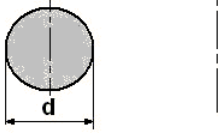
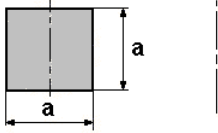
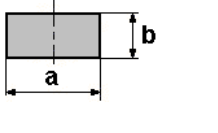
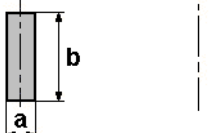
### Cilindrično-zavojne opruge

Za cilindrično-zavojne opruge sila opruge je:

$$F = F_0 + CX$$

gde je:  $F_0$  - početna sila opruge  
 $C$  - krutost opruge  
 $X$  - dužina sabijanja opruge

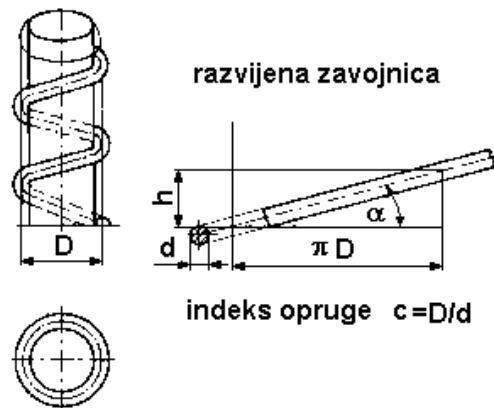
**Tabela 1. Krutost cilindrično-zavojnih opruga**

				
<b>C</b>	$\frac{G d^4}{8 D^3 \text{ N}}$	$\frac{G a^4}{5.57 D^3 \text{ N}}$	$\frac{G b^4}{\Delta D^3 \text{ N}}$	$\frac{G a^4}{\Delta D^3 \text{ N}}$

modul klizanja  $G \sim 8 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

<b>a/b</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.75</b>	<b>2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>3.0</b>	<b>4.0</b>
<b><math>\Delta</math></b>	<b>5.57</b>	<b>2.67</b>	<b>2.10</b>	<b>1.72</b>	<b>1.26</b>	<b>1.00</b>	<b>0.70</b>

Osnovni parametri cilindrično-zavojne opruge su srednji prečnik opruge (D), broj radnih zavoja N, ugao nagiba srednje linije zavojnice ( $\alpha$ ) (slika 5).



**Slika 5. Osnovni parametri cilindrično-zavojne opruge sa okruglim poprečnim presekom**

Savijenost zavojnice karakteriše se indeksom opruge koji je kod okruglog poprečnog preseka  $c=D/d$ . Opruge sa indeksom  $c<4$  nije preporučljivo primenjivati zbog otežane izrade i veće koncentracije napona na unutrašnjim vlaknima zavojaka.

Pri  $\alpha \leq 12^\circ$  naprezanje u zavojcima opruge približava se čistom smicanju. Najveći tangencijalni napon u poprečnom preseku zavojka (obično na unutrašnjem zavojku) je:

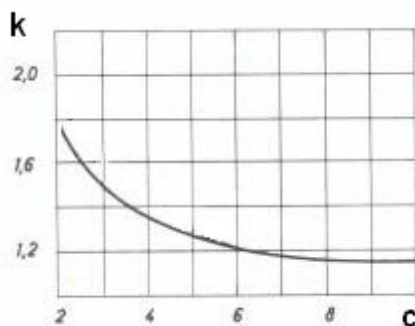
$$\tau_{\max} = k \tau_s = k \frac{F_m D}{A}$$

gde su:  $k$  - koeficijent koji zavisi od oblika preseka i savijenosti zavojaka  
 $F_m$  - najveća sila koja opterećuje oprugu  
 $A$  - geometrijski faktor određen veličinom i oblikom poprečnog preseka opruge

Za zavojke okruglog poprečnog preseka je  $A = \frac{\pi d^3}{8}$ ,  
 a za zavojke pravougaonog poprečnog preseka  $A = a b \sqrt{a b}$ .

gde je:  $d$  - prečnik preseka žice  
 $a, b$  - dužine strana preseka žice

Vrednosti koeficijenta  $k$  za opruge sa zavojnim okruglim presekom date su na slici 6.



**Slika 6. Koeficijent opruge  $k$  u funkciji indeksa opruge  $c=D/d$  sa zavojcima okruglog preseka**

Ugib opruge pri sabijanju može da se odredi iz izraza:

$$f = \frac{F}{C}$$

Osnovna formula za projektovanje zavojno-cilindričnih opruga sa zavojcima okruglog preseka je:

$$\tau_{\max} < \tau_{\text{doz}} \quad \frac{8 k F_m D}{\pi d^3} < \tau_{\text{doz}}$$

Najveće dozvoljeno opterećenje opruge je

$$F_m = \frac{\pi d^3}{8 k D} \tau_{\text{doz}}$$

a najveći dozvoljeni ugib pri sabijanju je

$$f_m = \frac{8 F_m D^3 N}{G d^4} = \frac{\pi D^2 N}{k G d} \tau_{\text{doz}}$$



prečnik žice je:

$$d = \sqrt{\frac{8 k F_m \cdot D}{\pi \tau_{\text{doz}} \cdot d}}$$

Dozvoljeni napon za opruge od žice prečnika  $d < 8$  mm obično se uzima u zavisnosti od zatezne čvrstoće materijala žice:

$$\tau_{\text{doz}} = \nu \sigma_m$$

Koeficijent  $\nu < 1$  zavisi od vrste materijala i uslova rada opruge. Za opruge koje se primenjuju u konstrukciji automatskog oružja uzima se  $\nu = 0.5$ , tako da je  $\tau_{\text{doz}} = 900 \div 1100 \text{ N/mm}^2$ .

Dužina opruge u slobodnom stanju je:

$$H = N d + (1.5 \div 2) d + N e + f$$

gde je  $e$  - zazor između zavojaka pri maksimalno opterećenoj opruzi ( $e \sim 0.1 \cdot d$ )

### Proračun povratne opruge (Springfield metoda)

Povratna opruga mora da bude kompatibilna sa funkcijom oružja, kao i sa raspoloživim prostorom za njeno montiranje. Ovi faktori ograničavaju spoljni prečnik opruge, montažnu dužinu opruge, kao i njenu dužinu u sabijenom stanju. Povratna opruga mora da ispunjava vremenske i energetske zahteve ciklusa rada automatike, a da pri tome ima karakteristike koje održavaju niske napone pri dinamičkom opterećenju.

Kriterijumi za napone pri dinamičkim opterećenjima opruga formirani su u fabrici oružja Springfield. Prema Springfield teoriji udarnih talasa u opruzi naponi pri dinamičkom opterećenju veoma malo nadmašuju napone pri statičkom opterećenju ako je:

$$\begin{aligned} 1.67 < \frac{T_c}{T_u} < 2.0 & \quad 7.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} < V_u < 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ 3.33 < \frac{T_c}{T_u} < 4.0 & \quad 6.0 \frac{\text{m}}{\text{s}} < V_u < 7.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ 5.0 < \frac{T_c}{T_u} < 6.0 & \quad V_u < 6.0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (53)$$

$V_u$  - udarna brzina (m/s), koja je jednaka brzini slobodnog trzanja ( $V_u = V_{\text{st}}$ )  
 $T_c$  - vreme sabijanja opruge, koje je jednako vremenu trzanja ( $T_c = t_{\text{trz}}$ )  
 $T_u$  - vreme udara

Brzina udara ne bi trebalo da bude veća od 15 m/s, ali ni manja od donje granice svakog intervala. Odnos  $T_c/T_u$  se usvaja prema udarnoj brzini  $V_u$ , pri čemu ovaj odnos nije obavezno ograničen na dva niža opsega. Naprimjer, ako je udarna brzina  $V_u$  manja od 6 m/s odnos  $T_c/T_u$  može da se usvoji u višem opsegu (između 3.33 i 4.0), a za udarne brzine između 6 i 7.5 m/s odnos  $T_c/T_u$  može da se uzme u najvišem opsegu (između 1.67 i 2.0).

Veza između vremena udara i karakteristika opruge je:

$$T_u = 1.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{D^2}{d} \cdot N \quad [s] \quad (54)$$

gde je  $D$  [mm] - srednji prečnik zavoja opruge  
 $d$  [mm] - prečnik žice opruge  
 $N$  - broj radnih zavoja opruge

$$N = \frac{G d^4}{8 D^3 C} \quad (55)$$

gde je  $C$  [N/mm] - krutost opruge  
 $G$  [N/mm<sup>2</sup>] - modul klizanja

Zamenom jednačine (55) u jednačinu (54) i rešavanjem po  $d$  dobija se:

$$d = 4.14 \sqrt[3]{D C T_u} \quad (56)$$

Maksimalni statički tangencijalni napon u opruzi je:

$$\tau_{\max} = \frac{8 F_m D}{\pi d^3} \quad \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right] \quad (57)$$

Maksimalni dinamički tangencijalni napon u opruzi je:

$$(\tau_d)_{\max} = \tau_{\max} \left( \frac{T_u}{T_c} \right) \left[ \gamma \left( \frac{T_c}{T_u} \right) \right] \quad \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right] \quad (58)$$

Ovde je  $\gamma \left( \frac{T_c}{T_u} \right)$  - funkcija koja je jednaka prvom većem celom parnom broju od odnosa  $\frac{T_c}{T_u}$ , ukoliko taj odnos nije jednak celom parnom broju.

Ovako određeni tangencijalni napon pri dinamičkom opterećenju treba da je manji od dozvoljenog napona:

$$(\tau_d)_{\max} < \tau_{\text{doz}} \quad , \quad \tau_{\text{doz}} = 1000 \frac{N}{\text{mm}^2}$$