8. ODREĐIVANJE BRZINE OBLOGE EKSPLOZIVNOG PUNJENJA POGONJENE PRODUKTIMA DETONACIJE

Kretanje obloge eksplozivnog punjenja, njeno razaranje i razletanje parčadi vrši se na račun energije koja se izdvaja pri detonaciji EM.

Maksimalna brzina kretanja obloge jednake debljine za punjenje obloženo sa svih strana (npr. lopta ili dugačak cilindar) može se odrediti iz jednačine:

$$E_0 + E_k + E_p + E_d + \frac{MV^2}{2} = mQ \tag{8.1}$$

Ovde je:

- E_o - energija koja se predaje okolnoj sredini obloge (vazduh, voda, zemlja)
- E_k - kinetička energija produkata detonacije
- E_p - unutrašnja (potencijalna) energija produkata detonacije
- E_d - energija utrošena na plastičnu deformaciju obloge
- M - masa obloge
- V - maksimalna brzina obloge
- m - masa eksplozivnog punjenja
- Q - toplota eksplozije

Energija predata okolnoj sredini (smatrajući da je pritisak okoline na oblogu konstantan) sračunava se iz izraza:

$$E_0 = Wp\left[\left(\frac{R}{R_0}\right)^N - 1\right] \tag{8.2}$$

Ovde je:

- W - zapremina obloge (za sferu $W=4\pi R_o^3$, N=3; za cilindar $W=\pi R_o^2 H$, N=2; H-visina cilindra; za ravanski slučaj $W=S_o R_o$, S_o=const, N=1)
- p - pritisak okoline na oblogu
- R - spoljni prečnik obloge koji odgovara krajnjem položaju obloge
- R_o - početni spoljni prečnik obloge

Kinetičku energiju produkata detonacije moguće je odrediti kao:

$$E_k = \frac{m}{\psi}\frac{V^2}{2} \tag{8.3}$$

- ψ = 5/3 - za sferični slučaj
- ψ = 2 - za cilindrični slučaj
- ψ = 3 - za ravanski slučaj

Unutrašnja energija produkata detonacije određuje se po formuli:

$$E_p = m\,e_p \tag{8.4}$$

U jednačini (8.4) e_p je unutrašnja energija produkata detonacije po jedinici mase produkata detonacije:

$$e_p = \int_v^{\infty} p\,dv \tag{8.5}$$

Ovde je v specifična zapremina produkata detonacije u trenutku krajnjeg kretanja obloge. Ako se usvoji da je promena pritiska u produktima detonacije data izrazom p=A ρ^k (k=const), dobija se:

$$e_p = \int_v^{\infty} A\,v^{-k}\,dv = \frac{p\,v}{k-1} = \frac{p}{\rho(k-1)} \tag{8.6}$$

Energija utrošena na plastičnu deformaciju tj. razaranje obloge određuje se obrascem:

$$E_d = \frac{M}{\rho_M}\int_0^{\varepsilon_d} \sigma_i\,d\varepsilon_i = \frac{M}{\rho_M}A_d \tag{8.7}$$

Ovde je:

M	-	masa obloge
ρ_M	-	gustina materijala obloge
σ_i, ε_i	-	napon i deformacija
ε_d	-	intenzitet deformacije koji odgovara razaranju materijala
A_d	-	energija razaranja jedinice zapremine metala

Ako se može zanemariti energija predata okolini (npr. vazduhu) izraz za V dobija oblik:

$$V = \sqrt{\left(Q - \frac{A_d}{\beta\,\rho_M} - \frac{p}{\rho(k-1)}\right)\frac{2\beta}{1+2\beta/\psi}} \tag{8.8}$$

Ovde je β=m/M.

Prethodna formula ne uzima u obzir isticanje produkata detonacije duž ose punjenja za cilindrične obloge konačne debljine i isticanje produkata detonacije pri razaranju obloge. Takođe, ne uzima se u obzir međudejstvo detonacionih talasa sa oblogom. Ova formula važi za stalnu debljinu obloge (u protivnom, brzine pojedinih delova bi bile različite).

U jednačini energije (8.1) u mnogim slučajevima mogu se zanemariti energije E_d i E_o. Tada je brzina kretanja obloge jednaka:

$$V = \sqrt{\left(Q - E_p\right)\frac{2\beta}{1+2\beta/\psi}} \tag{8.9}$$

Ako se usvoji da je za veće gustine eksploziva $Q - E_p \approx D^2/16$ dobija se:

$$V \approx \frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{2\left(1+2\beta/\psi\right)}} \tag{8.10}$$

Pod pretpostavkom da se sva energija mQ troši na kretanje obloge, jednačina energije ima oblik:

$$\frac{MV^2}{2} = mQ \tag{8.11}$$

Taj izraz, uz korišćenje veze $D=4Q^{1/2}$, daje:

$$V = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{2}} \tag{8.12}$$

Izraz (8.12) daje teorijski maksimum za brzinu odbacivanja obloge produktima detonacije.

Razmotrimo zakon kretanja sferične obloge sa pretpostavkom trenutne detonacije, što je opravdano za M/m > 1. Smatraćemo da se energija troši samo na kretanje obloge mase M i kretanje samih produkata detonacije. Jednačina kretanja obloge može se napisati u obliku:

$$\left(M+\frac{3}{5}m\right)\frac{dV}{dt} = \left(M+\frac{3}{5}m\right)V\frac{dV}{dr} = Sp \tag{8.13}$$

gde je:

$S = 4\pi r^2$ - površina sferične obloge pri širenju.

Početna površina obloge je $S = S_o = 4\pi r_o^2$, pa je:

$$S = S_0\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \tag{8.14}$$

Kako je za čvrste EM $p/p_{sr} = (\rho/\rho_o)^3$, a iz zakona održanja mase je $r^3\rho = r_o^3\rho_o$, onda je $p=p_{sr}(r_o/r)^9$. Pošto je $p_{sr}=\rho_o D^2/8$, dobija se:

$$p = \frac{\rho_0 D^2}{8}\left(\frac{r_0}{r}\right)^9 \tag{8.15}$$

Zamenjujući (8.14) i (8.15) u jednačinu (8.13) dobija se:

$$V = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{5\beta}{2(5+3\beta)}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^6\right]} \qquad (8.16)$$

Ako je β malo, formula (8.16) dobija oblik:

$$V = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{2}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^6\right]} \qquad (8.17)$$

Odredimo sada brzinu cilindrične obloge, posmatrajući je sve vreme kao jednu celinu ili kao da se sastoji od gotovih fragmenata. Jednačina kretanja sada ima oblik (toplota eksplozije se troši samo na kretanje obloge i produkata detonacije):

$$\left(M+\frac{1}{2}m\right)\frac{dV}{dt} = \left(M+\frac{1}{2}m\right)V\frac{dV}{dr} = Sp \qquad (8.18)$$

gde je S - trenutna površina bočne površine cilindrične obloge ($S=2r\pi l$). Očigledno je da je:

$$S = S_0\left(\frac{r}{r_0}\right) \qquad (8.19)$$

U početnom stadijumu za širenje produkata detonacije važi zakon:

$$p = p_{sr}\left(\frac{r_0}{r}\right)^6 = \frac{\rho_0 D^2}{8}\left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \qquad (8.20)$$

Uvrštavanjem (8.19) i (8.20) u jednačinu (8.18) posle integracije dobija se:

$$V = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{2+\beta}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right]} \qquad (8.21)$$

Kada je $S=S_o$=const (važi za obloge od gotovih fragmenata i za krte materijale) dobija se integracijom jednačina:

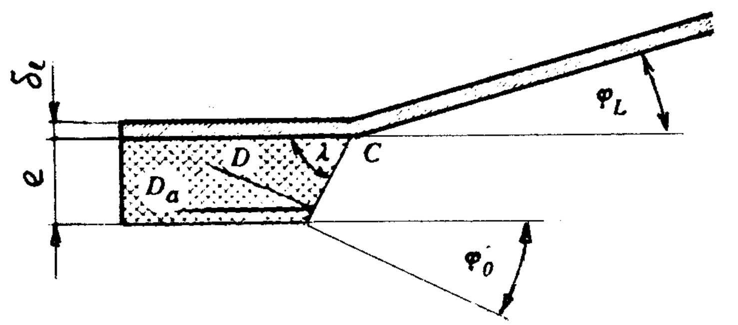
$$V = D\sqrt{\frac{\beta}{5(2+\beta)}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^5\right]} \qquad (8.22)$$

Do brzine odbacivanja metalne obloge može se doći i korišćenjem Richterove jednačine u obliku (videti sliku 8.1):

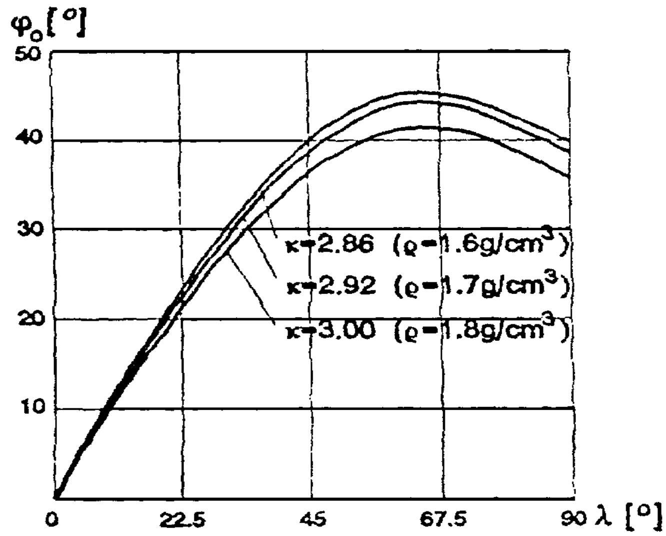
$$\frac{1}{\varphi_g} = \frac{1}{\varphi_0} + K\frac{\rho\delta}{eB} \tag{8.23}$$

Ovde je:

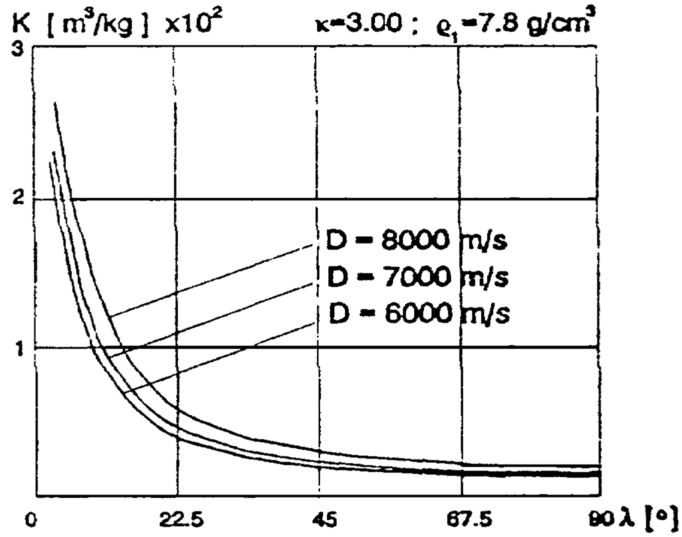
- φ_g - granični ugao odbacivanja metalne obloge
- φ_o - ugao slobodnog širenja (slika 8.2)
- ρ, δ - gustina i debljina materijala obloge
- e - debljina sloja eksploziva
- K - koeficijent koji zavisi od vrste eksploziva i napadnog ugla detonacionog talasa (slika 8.3)
- B - koeficijent koji uzima u obzir uticaj omotača eksplozivnog punjenja



Slika 8.1. Odbacivanje metalne obloge



Slika 8.2. Zavisnost ugla slobodnog širenja produkata detonacije φ_o od napadnog ugla detonacionog talasa λ



Slika 8.3. Zavisnost koeficijenta K od napadnog ugla detonacionog talasa i brzine detonacije eksploziva D za čeličnu oblogu (ρ=7.8 g/cm^3)

Za slučaj lateralnog odbacivanja (λ=90 °) modifikacijom jednačine (8.23) dobija se:

$$\frac{1}{\varphi_g} = \frac{1}{\varphi_0} + K' \frac{\rho\delta}{e\rho_E} = \frac{1}{\varphi_0} + K'\mu \quad , \quad \left(\mu = \frac{\rho\delta}{e\rho_E}\right) \tag{8.24}$$

gde je:

$K' = K\,\rho_E / B$ - koeficijent koji zavisi od vrste eksploziva

ρ_E - gustina eksplozivnog punjenja

Još treba dodati da se koeficijent B određuje iz jednačine:

$$B = 1 + \frac{A}{\rho_0\, e_0} \tag{8.25}$$

Ovde je:

A - eksperimentalna konstanta

ρ_o, e_o - gustina i debljina omotača eksplozivnog punjenja

U slučaju odsustva omotača eksplozivnog punjenja je A=0 i B=1 (za ovaj slučaj su i date zavisnosti na slikama 8.2 i 8.3).

Brzina odbacivanja obloge sada se dobija iz izraza:

$$V = 2D_a \sin(\varphi_g / 2) = \frac{2D\sin(\varphi_g / 2)}{\sin\lambda} \tag{8.26}$$