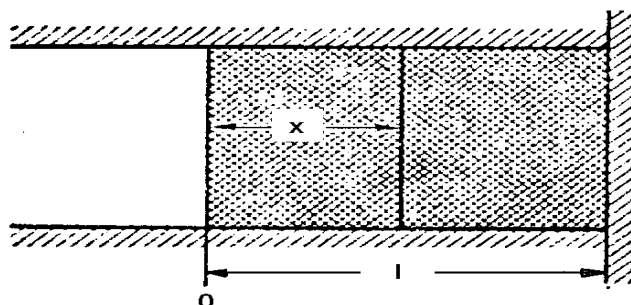


6. OSNOVNE KARAKTERISTIKE KONTAKTNE DETONACIJE

Pri odbijanju detonacionog talasa od prepreke pri kontaktnoj detonaciji (slika 6.1) u opštem slučaju deo impulsa eksplozivnog punjenja se prenosi na prepreku, a deo se pretvara u količinu kretanja produkata detonacije.



Slika 6.1. Eksplozivno punjenje u kontaktu sa preprekom

Kakva će biti preraspodela impulsa u konkretnom slučaju zavisi od vrste materijala (stišljiv ili nestišljiv) i inercije (pokretna ili nepokretna) prepreke. Nezavisno od karakteristika prepreke ukupan impuls eksplozivnog punjenja, koji se prenosi na prepreku ili produkte detonacije zavisi od uslova širenja produkata detonacije. Ako se iniciranje detonacije vrši sa jednog kraja, tada uslovi širenja produkata detonacije zavise samo od karakteristika obloge oko eksplozivnog punjenja. Obloge mogu biti stišljive ili nestišljive i masivne ili tanke. Pod masivnom oblogom podrazumevamo oblogu koja se ne razleće pri detonaciji, dok se tanka obloga razleće pri detonaciji eksplozivnog punjenja.

Teorijsko rešenje za promenu pritiska na nedeformabilnoj prepenci (nestišljivoj) pri kontaktnoj detonaciji i jednosmernom širenju produkata detonacije ima oblik:

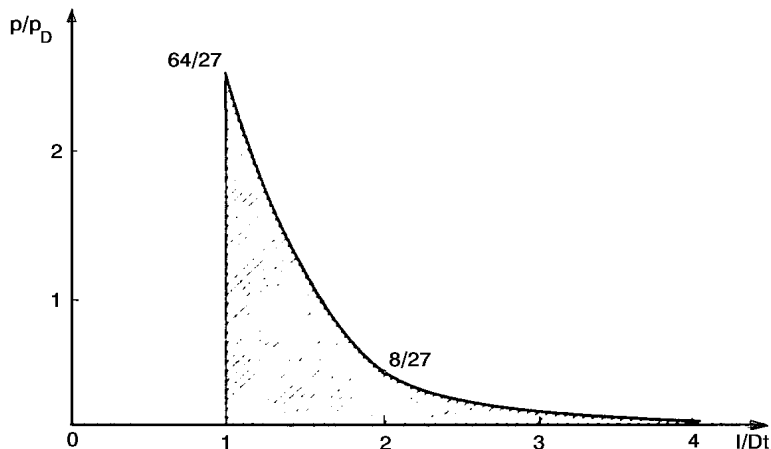
$$p = \frac{64}{27} p_D \left(\frac{l}{Dt} \right)^3 \quad (6.1)$$

Ovde je:

- p_D - pritisak u detonacionom talasu
- l - dužina eksplozivnog punjenja u kontaktu sa preprekom
- D - detonaciona brzina
- t - vreme od trenutka pobuđivanja detonacije u eksplozivnom punjenju (u trenutku kontakta detonacionog talasa i prepreke $t=t_0=l/D$)

Predpostavka o jednosmernom širenju produkata detonacije znači da se eksplozivno punjenje nalazi u oblozi beskonačne otpornosti ili o neobloženom punjenju kod koga je $l > 9d_e/4$ (d_e -prečnik eksplozivnog punjenja). Za $t=t_0=l/D$ talas dolazi na kontaktnu površinu i tada je $p_0=64p_D/27=2.37p_D$. Ovo znači da je u trenutku dolaska detonacionog talasa na kontaktnu površinu pritisak na njoj 2.37 puta veći od pritiska u detonacionom talasu.

Jednačina (6.1) daje promenu pritiska na prepreku. Grafički je ova zavisnost prikazana na slici 6.2.



Slika 6.2. Pad pritiska na prepreci pri odbijanju detonacionog talasa

Impuls po jedinici površine dobija se integraljenjem jednačine (6.1) u vremenu t :

$$i = \int_{t_0}^t p dt = \frac{64}{27} p_D \int_{t_0}^t \left(\frac{l}{Dt} \right)^3 dt = \frac{32}{27} p_D \frac{l}{D} \left[1 - \left(\frac{l}{Dt} \right)^2 \right] \quad (6.2)$$

gde je $t_0 = l/d$.

Ukupni impuls pri odbijanju detonacionog talasa od pregrade površine S pri $t = \infty$ iznosi:

$$I = \frac{32}{27} S p_D \frac{l}{D} = \frac{8}{27} S \rho_0 l D = \frac{8}{27} m D \quad (6.3)$$

Ovde su iskorišćene veze: $p_D = \rho_0 D^2/4$ i $m = \rho_0 S l$.

Ako je prepreka stišljiva, usled sabijanja materijala dolazi do kretanja kontaktne površine, što dovodi do razređenja produkata detonacije i pada brzine zvuka u produktima detonacije uz kontaktnu površinu. Polazeći ponovo od pretpostavke jednosmernog širenja produkata detonacije razmatra se vreme od dolaska detonacionog talasa na prepreku do dolaska talasa razređenja sa suprotne strane prepreke na kontaktnu površinu.

Koristeći Tate-ovu jednačinu udarne stišljivosti izotropnih sredina:

$$p = A_p \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_{op}} \right)^{n_p} - 1 \right] \quad (6.4)$$

gde su:

- A_p i n_p - parametri stišljivosti sredine (za čelik $A_p = 4.41 \cdot 10^{10}$ i $n_p = 4$ pri sabijanju udarnim talasom do intenziteta 10^{11} Pa)
- ρ_p - gustina sredine u čelu udarnog talasa pritiska p

ρ_{0p} - početna gustina sredine

i jednačinu izentropske promene stanja produkata detonacije (daje zadovoljavajuće rezultate za slučaj detonacije čvrstih eksploziva gustine veće od 1 g/cm³)

$$p = A \rho^3 \quad (6.5)$$

gde je $A=2.04 \cdot 10^9$ za pritisak dat u Pa i gustinu u g/cm³, dobijamo analitički izraz koji predstavlja zavisnost pritiska na graničnoj (kontaktnoj) površini od vremena t u obliku:

$$\frac{p}{p_D} = \frac{64}{27} \left(\frac{l}{Dt} \right)^3 \frac{(1 - \omega_{t_0})^3}{\left\{ 1 - \omega_{t_0} \left[1 - \left(\frac{l}{Dt} \right)^{\beta-1} \right] \right\}^{\frac{3\beta}{\beta-1}}} \quad (6.6)$$

Pri izvođenju ovog izraza uvedena je bezdimenzionalna promenljiva:

$$\omega = \frac{u_{gp}}{D} \quad (6.7)$$

gde je:

u_{gp} - brzina kontaktne (granične) površine, odnosno brzina mase iza čela udarnog talasa u prepreci.

Proračuni izvršeni za veći broj različitih kombinacija eksploziv-prepreka pokazuju da se bezdimenzionalna promenljiva ω može dobro aproksimirati funkcijom:

$$\omega = \omega_{t_0} \left(\frac{X}{Dt} \right)^\beta \quad (6.8)$$

Ovde je:

$$\omega_{t_0} = \frac{(u_{gp})_o}{D} \quad (6.9)$$

$(u_{gp})_o$ - početna brzina kontaktne površine

$$\beta = 1 + 0.02(\rho_{op} C_{op})^{0.24} \quad (6.10)$$

β_{0p}, C_{0p} - početna gustina i brzina zvuka u materijalu pregrade.

Izraz (6.6) važi sve dok talas razređenja sa suprotne strane prepreke ne dođe do granične (kontaktne) površine. Za slučaj $t=t_0=l/D$ ova zavisnost se svodi na:

$$\frac{p}{p_D} = \frac{64}{27} (1 - \omega_{t_0})^3 \quad (6.11)$$

Za slučaj nedeformabilne prepreke ($\omega_{t0}=0$, jer je $u_{gp}=0$) izraz (6.6) se svodi na izraz (6.1).

Specifični impuls koji se pri kontaktnoj detonaciji saopštava prepri dat je izrazom:

$$i = \int_{l/D}^t p dt = \frac{64}{27} p_D \int_{l/D}^t \left(\frac{l}{Dt} \right)^3 \frac{(1 - \omega_{t0})^3}{\left\{ 1 - \omega_{t0} \left[1 - \left(\frac{l}{Dt} \right)^{\beta-1} \right] \right\}^{\frac{3\beta}{\beta-1}}} dt \quad (6.12)$$

Određivanje promene pritiska na kontaktnoj površini svodi se na određivanje bezdimenzionalnih veličina ω_{t0} i β .

Za slučaj čelične prepreke ($\beta=2.34$ i $C_{Op}=5230$ m/s) i opseg detonacionih brzina od 6000 do 8500 m/s ω_{t0} je:

$$\omega_{t0} = K D - 0.03 \quad (6.13)$$

gde je $K=2 \cdot 10^{-5}$ s/m za D izraženo u m/s

Za čeličnu prepreku izraz (6.6) se svodi na izraz:

$$\frac{p}{p_D} = \frac{64}{27} \left(\frac{l}{Dt} \right)^3 \frac{(1 - \omega_{t0})^3}{\left\{ 1 - \omega_{t0} \left[1 - \left(\frac{l}{Dt} \right)^{1.34} \right] \right\}^{5.24}} \quad (6.14)$$

Razmatranja vezana za kontaktnu detonaciju značajna su za razvoj protivoklopne municije čije je dejstvo zasnovano na principu Hopkinsonovog efekta, koji kaže: kao posledica talasnih pojava koje prate detonaciju visokobrizantnog eksplozivnog punjenja na površini oklopa dolazi do odvajanja materijala na strani suprotnoj od mesta udara projektila u oklop.

Razaranje pri impulsnom opterećenju u opštem slučaju zavisi od niza pojava i okolnosti vezanih za intenzitet, oblik i prostiranje talasa naprezanja, geometriju i ponašanje opterećenog tela:

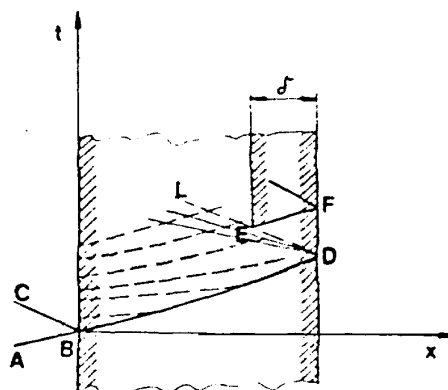
- pri impulsnom opterećenju mogu postojati lokalna prolazna naponska stanja i deformacije, pa razaranje u tom slučaju nastaje u jednom delu napadnutog tela, potpuno nezavisno od stanja u drugim delovima; naponska stanja u telu izloženom impulsnom opterećenju mogu se tako brzo menjati da razaranja ne uspevaju da prate promenu naponskog stanja (brzina prostiranja talasa naprezanja u čvrstim telima iznosi oko 6000 m/s, a brzina razaranja oko 1500 m/s),

- u velikom broju slučajeva razaranje je u neposrednoj vezi sa nejednorodnošću naprezanja koja nastaju interferencijom dva ili većeg broja talasa naprezanja, a slika i karakter talasnih pojava u velikoj meri zavise od geometrije opterećenog tela (pobuđivanje dopunskih talasa naprezanja odbijanjem od slobodnih površina opterećenog tela igra važnu ulogu u pojavi i karakteru procesa razaranja),

- impulsno opterećenje sa izuzetno velikim amplitudama i brzinama porasta opterećenja u mnogim slučajevima značajno menjaju mehanička svojstva opterećenog materijala, što pokazuje suštinski uticaj na oblik i prirodu razaranja.

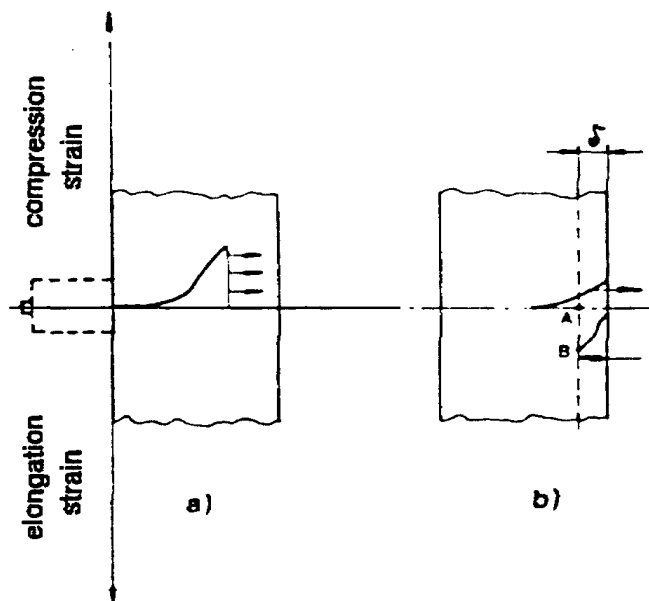
Razaranje prepreke pri kontaktnoj detonaciji koje se manifestuje odvaljivanjem sloja materijala na strani prepreke suprotnoj od kontaktne površine, nastaje u osnovi kao posledica interferencije kompresionog talasa pobuđenog detonacijom i talasa istežanja nastalog odbijanjem kompresionog talasa od slobodne površine prepreke (šematski prikaz kretanja talasa u ploči pri pojavi odvaljivanja dat je na slici 6.3).

- t - vreme
- x - debljina ploče
- AB - detonacioni talas u eksplozivnom punje
- BC - udarni talas u produktima detonacije
- BD - udarni (kompresioni) talas u ploči
- DL - krajnja karakteristika talasa razređenja
- EF - kompresioni talas u odvaljenom sloju
- δ - debljina odvaljenog sloja



Slika 6.3. Kretanje talasa u ploči pri pojavi odvaljivanja

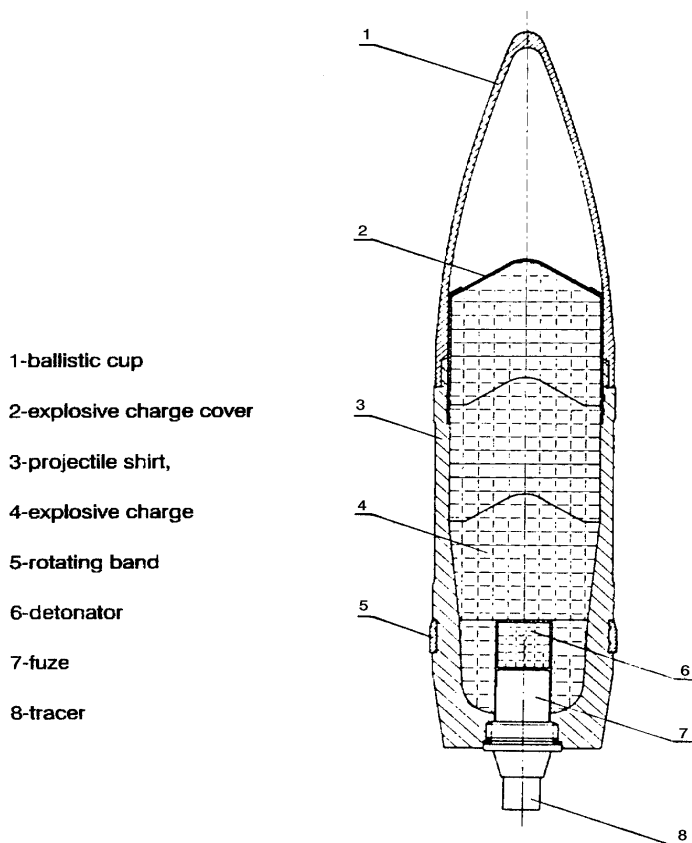
Mehanizam ovog razaranja kvalitativno se može objasniti na vrlo jednostavan način. Ako je elastična ploča, beskonačnih transverzalnih dimenzija i konačne debljine, izložena dejstvu kontaktne detonacije cilindričnog punjenja visokobrizantnog eksploziva konačnih dimenzija, kompresioni talas koji se prenosi kroz ploču, predstavljen na slici 6.4-a, odbija se od slobodne površine ploče u vidu talasa istežanja (slobodna površina ploče predstavlja granicu između dve sredine različitih gustina).



Slika 6.4. Talasi napreznja u elastičnoj ploči izazvani kontaktnom detonacijom:
a) kompresioni talas pre susreta sa slobodnom površinom ploče
b) naponsko stanje neposredno nakon odbijanja kompresionog talasa od slobodne površine ploče

Interferencijom kompresionog i odbijenog talasa istezanja dobija se rezultujuće naponsko stanje u sloju ploče bliskom slobodnoj površini (slika 6.4-b) Sa povećanjem rastojanja čela odbijenog talasa od slobodne površine ploče raste vrednost naprezanja na istezanje AB . Ako vrednost ovog istezanja u ravni MN na nekom rastojanju δ od slobodne površine dostigne vrednost koju materijal ploče ne može da podnese, dolazi do razaranja - odvaljivanja sloja materijala ploče. Do odvaljivanja dolazi onog trenutka kada naprezanje AB dostigne vrednost tzv. "kritičnog rušeceg normalnog naprezanja" materijala. Za legirani američki čelik 4130 (0.32% C; 0.60% Mn; 0.29% Si; 0.93% Cr; 0.23% Mo; termički obrađen) ovo naprezanje iznosi $30.3 \cdot 10^8$ Pa.

Hopkinsonov efekat je iskorišćen za razvoj posebne vrste projektila za razaranja čvrstih prepreka kontaktnom detonacijom. Efekat se ispoljava samo ako je prepreka od čelika, betona ili armiranog betona, a u svim ostalim slučajevima projektil dejstvuje kao razorni projektil parčadno-rušeceg dejstva. Projektili koji koriste Hopkinsonov efekat nose naziv POZ (protivoklopni obeležavajući projektil; strana oznaka HESH - High Explosive Squash Head). Na slici 6.5 prikazana je organizacija projektila sa dejstvom na principu Hopkinsonovog efekta. Eksplozivno punjenje je izrađeno od flegmatizovanog heksogena.



Slika 6.5. Projektil sa dejstvom na principu Hopkinsonovog efekta

1-balistička kapa, 2-poklopac eksplozivnog punjenja, 3-košuljica projektila, 4-eksplozivno punjenje, 5-vodeći prsten, 6-detonator, 7-upaljač, 8-traser

Laboracija eksplozivnog punjenja se vrši presovanjem direktno u čeličnu košuljicu projektila. Vrh eksplozivnog punjenja može biti ravan ili u obliku konusa, odnosno

zarubljenog konusa. Odvaljivanje detonacijom može biti efikasno samo ako je prečnik kontaktne površine između eksplozivnog punjenja i ploče jednak ili veći od debljine ploče, a detonaciona brzina eksploziva ne sme biti manja od 8000 m/s. Ako je napadnuti cilj oklop tenka odvaljeni komad je tanjirastog oblika. Uz ovaj komad prati i više manjih parčadi nepravilnog oblika. Približna vrednost prečnika tanjirastog dela odvaljenog materijala (prepreka od pancirnog čelika) može se odrediti izrazom:

$$D_{om} = 1.17 d_e - 0.012 \quad (6.15)$$

gde je d_e -prečnik eksplozivnog punjenja.