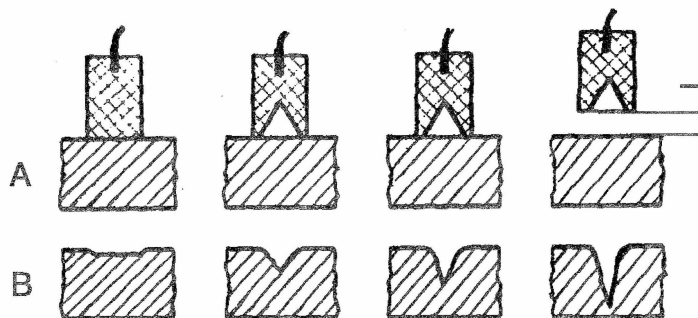


11. PROJEKTILI SA KUMULATIVNIM EKSPLOZIVNIM PUNJENJEM

11.1. Princip dejstva i opšta organizacija projektila

Pojava značajnog, specifičnog lokalnog dejstva detonacije realnog eksplozivnog punjenja naziva se kumulativnim efektom: zahvaljujući izvesnim konstrukcionim karakteristikama eksplozivnog punjenja i načinu iniciranja, dejstvo detonacije, odnosno njeno razorno dejstvo, u prostoru je orijentisano (usmereno) u unapred izabranom pravcu.

Ako se na jednu čeličnu ploču postavi cilindrično eksplozivno punjenje, a zatim dovede do detonacije iniciranjem sa gornje slobodne strane, na ploči posle detonacije ostaje neznatno udubljenje, čija površina odgovara površini naleganja eksplozivnog punjenja (slika 11.1).



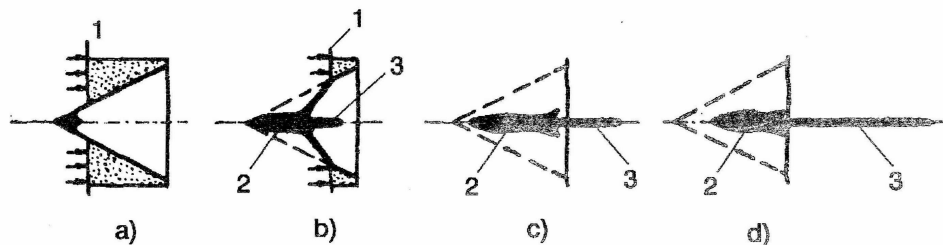
Slika 11.1. Zavisnost dejstva od oblika i položaja eksplozivnog punjenja:

A - pre eksplozije, B - posle eksplozije

Međutim, ako na čonoj strani kojom naleže na čeonu ploču, eksplozivno punjenje ima konusnu šupljinu, posle detonacije na ploči ostaje udubljenje, koje je po obliku slično udubljenju u eksplozivnom punjenju. Ovo udubljenje u ploči biće veće, ukoliko je konusna šupljina eksplozivnog punjenja obložena metalnom oblogom.

Najveći efekat u čeličnoj ploči postiže se ako je eksplozivno punjenje, sa konusnom šupljinom obloženom metalnom oblogom, postavljeno na izvesnom rastojanju od ploče. Eksplozivno punjenje sa konusnim ili drugim oblikom šupljine, obložene metalnom oblogom, naziva se kumulativnim eksplozivnim punjenjem.

Princip dejstva kumulativnog eksplozivnog punjenja sa metalnom oblogom šupljine je u osnovi sledeći. Detonacioni talas, iniciran u eksplozivnom punjenju na strani suprotnoj od kumulativne šupljine, kreće se prema šupljini i zahvata metalnu oblogu šupljine. Pod dejstvom pritiska u detonacionom talasu dolazi do razaranja obloge i do potiskivanja delova obloge prema osi kumulativne šupljine. Posle spajanja (sudara) na osi kumulativne šupljine delovi obloge se dele na dva dela (slika 11.2).



Slika 11.2. Formiranje kumulativnog mlaza: 1 - položaj detonacionog talasa,

2 - sekundarni deo mlaza (čep), 3 - primarni deo mlaza

Levo od tačke spajanja formira se od spoljnih slojeva metalne obloge sekundarni deo mlaza (tzv. čep). Ovaj deo mlaza praktično ne igra nikakvu ulogu u probijanju. Desno od tačke spajanja formira se od unutrašnjih slojeva metalne obloge primarni deo kumulativnog mlaza, koji se kreće udesno vrlo velikom brzinom. Upravo ovaj deo kumulativnog mlaza, iako je njegova masa znatno manja od mase sekundarnog mlaza, zahvaljujući velikoj brzini vrši probijanje prepreke velike debljine.

Na slici 11.2 šematski je prikazano formiranje kumulativnog mlaza u zavisnosti od položaja detonacionog talasa. Na skici a - detonacioni talas počinje razaranje metalne obloge; na skici c - detonacioni talas je prošao duž celog eksplozivnog punjenja; na skici d - prikazano je dalje odvijanje pojave izvesno vreme nakon što je detonacioni talas dostigao osnovu kumulativne šupljine, odnosno osnovu metalne obloge.

Na osnovu rezultata eksperimentalnih i teorijskih istraživanja utvrđeno je da je intenziviranje kumulativnog efekta pri postojanju obloge vezano za veoma snažnu i karakterističnu preraspodelu energije između produkata eksplozije i materijala obloge i za prelazak dela materijala obloge u kumulativni mlaz. Najveći deo energije aktivnog dela kumulativnog punjenja prenosi se na materijal obloge, koncentrišući se na tankom sloju obloge, koji upravo obrazuje kumulativni mlaz. Na ovaj način postiže se znatno veća "gustina" energije u mlazu, nego u slučaju eksplozije kumulativnog punjenja bez obloge.

U procesu formiranja i kretanja kumulativnog mlaza zapažaju se dve faze na koje bitan uticaj imaju fizičke i mehaničke osobine metala obloge kumulativne šupljine.

Prva faza odgovara nastajanju mlaza u toku procesa sabijanja i deformacije metalne obloge. U toku ove faze primarni i sekundarni deo mlaza predstavljaju celinu, iako se ova dva dela mlaza kreću različitim brzinama. Sekundarni deo mlaza kreće se relativno sporo (blizu 500 do 1000 m/s). Primarni deo mlaza kreće se znatno većom brzinom: čelo mlaza ima najveću brzinu, a zadnji deo brzinu blisku brzini sekundarnog dela. U zavisnosti od oblika i osobina metala obloge, svojstva eksploziva i drugih faktora, brzina čela primarnog dela mlaza menja se u širokim granicama.

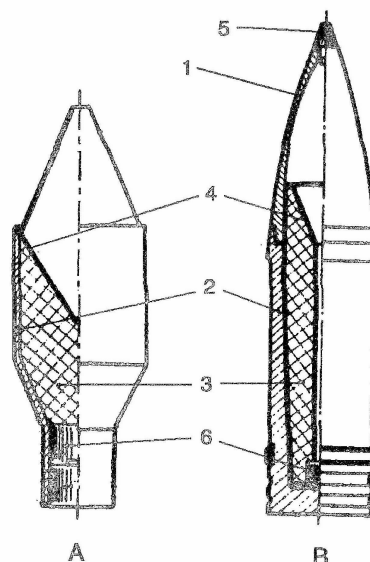
Druga faza nastupa kratko vreme posle sabijanja, deformisanja i potiskivanja obloge: zbog razlike u brzinama sekundarnog i primarnog dela, dolazi do odvajanja primarnog dela mlaza. Može se smatrati da se najveća efikasnost kumulativnog punjenja sa metalnom oblogom postiže u slučaju, ako do razdvajanja primarnog i sekundarnog dela dođe kada prestane oticanje metala iz sekundarnog u primarni deo mlaza (sekundarni deo mlaza predstavlja neku vrstu rezervoara koji podržava kretanje primarnog mlaza). Oticanje metala iz sekundarnog u primarni deo mlaza traje sve dok se inercijalne sile, pod čijim dejstvom metal otiče, ne uravnoteže sa kohezionim silama između čestica metala. Sa ove tačke gledišta, visoka plastičnost metala je veoma povoljna, naročito u toku sabijanja, deformisanja i potiskivanja obloge. U toku deformisanja obloge ne sme doći do neelastičnog razaranja, jer bi se značajno smanjio koeficijent prelaska metala u primarni deo mlaza, a time i sposobnost probijanja napadnute prepreke. U primarni deo mlaza prelazi 6 do 11 % ukupne mase obloge.

Očigledno je da uslove razdvajanja primarnog i sekundarnog kumulativnog mlaza određuju gradijent brzine i fizičko-mehanička svojstva metala obloge, od kojih zbog toga, zavisi i maksimalna dužina primarnog mlaza. Optimalno dejstvo kumulativnog mlaza može se obezbediti samo pri određenim fizičkim i mehaničkim svojstvima metala obloge. Pri ovome ne treba gubiti iz vida da se svojstva metala u uslovima brzih deformacija mogu značajno razlikovati od svojstava određenih pri uobičajenim brzinama deformacije (u uslovima statičkog opterećenja). Npr. liveno gvožđe se kao obloga kumulativnog eksplozivnog punjenja ponaša pri detonaciji kao metal sa relativno visokom plastičnošću.

Metalografskom analizom metala kumulativnog mlaza, uhvaćenog u sredini relativno male gustine (naprimer u bazenu sa vodom), utvrđeno je da u procesu formiranja mlaza ne dolazi do topljenja metala. Ipak, temperatura mlaza u formiranju može dostići 900 do 1000 °C.

Kumulativni mlaz ostaje kompaktan samo na vrlo kratkom putu, približno jednakom polovini dužine primarnog mlaza, a zatim nastaje njegova disperzija, zbog različitih brzina elementarnih masa duž mlaza.

Projektil sa kumulativnim eksplozivnim punjenjem, kao i razorni projektil, ima metalnu košuljicu u kojoj je smešteno eksplozivno punjenje. U punjenju postoji šupljina (konusna, paraboloidna, polusferna, hiperboloidna) u prednjem delu projektila, obložena metalnom oblogom. Iniciranje punjenja ostvaruje se putem upaljača u vrhu projektila ili pri dnu eksplozivnog punjenja. Šema organizacije projektila sa kumulativnim eksplozivnim punjenjem predstavljena je na slici 11.3.



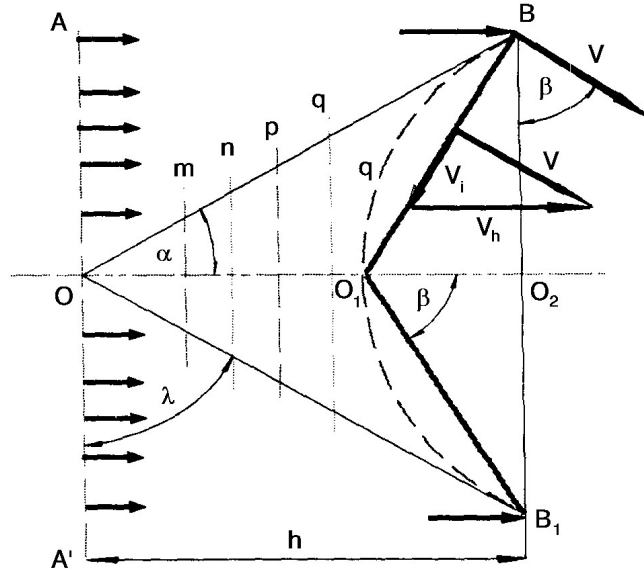
Slika 11.3. Projektili sa kumulativnim eksplozivnim punjenjem (A – nerotirajući, B – rotirajući):
1 - balistička kapa, 2 - košuljica, 3 - eksplozivno punjenje, 4 - obloga šupljine, 5 - upaljač, 6 - detonator

11.2. Teorijske osnove kumulativnog efekta

Postoji više teorija koje nastoje da daju egzaktno tumačenje mehanizama i pojava koje prate kumulativni efekat. Smatra se, međutim, da hidrodinamička teorija koja polazi od pretpostavke da se metal obloge šupljine u procesu detonacije može smatrati fluidom, najbolje prikazuje mehanizam formiranja kumulativnog mlaza i kumulativni efekat u celini. Izložićemo osnove uprošćene hidrodinamičke teorije i način proračuna dubine prodiranja kumulativnog mlaza u prepreku.

11.2.1. Uprošćena hidrodinamička teorija

Neka je BO'B' (sl. 11.4) meridijalni presek metalne obloge konusne šupljine eksplozivnog punjenja, a AOA' projekcija detonacionog talasa u trenutku dodira sa vrhom konusa. Pretpostavlja se da je detonacioni talas ravan i upravan na uzdužnu osu simetrije punjenja u trenutku dodira sa vrhom konusa. Detonacioni talas AOA' napreduje brzinom V_D u pravcu osnove konusne šupljine i posle isteka vremena t_t dolazi u položaj BO''B''.



Slika 11.4. Konusna obloga u mehanizmu kumulativnog efekta

Na svom putu detonacioni talas potiskuje elemente obloge m, n, p, q,... izvesnom brzinom V , za koju se pretpostavlja da je konstantna i nezavisna od položaja potisnutog elementa na izvodnici konusa. Nakon isteka vremena t_t elementi m, n, p, q,... obrazuju jednu novu konusnu površinu $BO'B'$ sa poluuglom konusa β (u stvarnosti ova površina nije konusna, već kriva konveksna prema vrhu O konusne površine - njena projekcija predstavljena je isprekidanom linijom na slici 11.4). Pretpostavlja se takođe, da je brzina \vec{V} , proizvoljno izabranog elementa q na konusnoj površini $BO'B'$, upravna na elementarnu površinu. Vektor brzine \vec{V} može se razložiti na dve komponente vektora \vec{V}_s i \vec{V}_t , čije su skalarne vrednosti:

$$V_s = \frac{V}{\tan \beta} \quad (11.1)$$

$$V_t = \frac{V}{\sin \beta} \quad (11.2)$$

Očigledno je da će se element obloge u tački O kretati brzinom V_t i da će u toku vremena t_t preći put:

$$\overline{OO'} = V_t t_t = \frac{V t_t}{\sin \beta} \quad (11.3)$$

Iz trouglova BOO'' i $BO'O''$ se dobija:

$$\overline{O'O''} = \overline{BO''} \cot \beta = \overline{OO''} \tan \alpha \cot \beta \quad (11.4)$$

Dužina $\overline{OO''}$ predstavlja put detonacionog talasa u toku vremena t_t :

$$\overline{OO''} = h = V_D t_t = \overline{OO'} + \overline{O'O''} \quad (11.5)$$

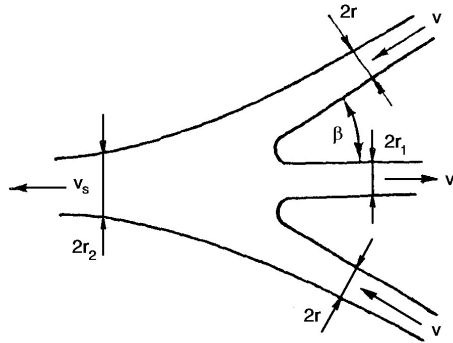
Iz izraza (11.3), (11.4) i (11.5) dobija se izraz za translatornu (horizontalnu) brzinu elementa obloge:

$$V_D t_t = \frac{V}{\sin \beta} t_t + V_D t_t \operatorname{tg} \alpha \operatorname{ctg} \beta \quad (11.6)$$

$$V_t = \frac{V}{\sin \beta} = V_D (1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{ctg} \beta) \quad (11.7)$$

Kako je $(1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{ctg} \beta) < 1$, iz izraza (11.7) je očigledno da je $V < V_D \sin \beta$, što predstavlja važan zaključak u razmatranju kumulativnog efekta: kretanje obloge šupljine kumulativnog punjenja pod dejstvom produkata detonacije odvija se brzinom manjom od brzine detonacije. Uobičajeno je da se ova brzina (V) naziva brzinom urušavanja obloge.

Komponenta V_t brzine V predstavlja brzinu translacije, kolinearne sa uzdužnom osom simetrije eksplozivnog punjenja. Ova brzina ne prouzrokuje deformaciju konusne obloge. Komponenta V_s prouzrokuje kretanje elemenata duž izvodnice obloge prema vrhu konusa kao konvergentnoj tački. Polazeći od osnovne pretpostavke hidrodinamičke teorije po kojoj se metal obloge, zahvaćen detonacionim talasom, smatra fluidom, kretanje elemenata duž izvodnice obloge kumulativne šupljine brzinom V_s može se predstaviti kretanjem fluida u dva simetrična mlaza BO' i $B'O'$ prečnika $2r$ (slika 11.5). Na osnovu analogije sa hidrodinamičkim pojavama može se zaključiti da će iz sudara ova dva mlaza u tački O' proisteći druga dva mlaza: jedan desno od tačke sudara prečnika $2r_1$ i drugi levo od tačke sudara prečnika $2r_2$. Brzina fluida u ova dva mlaza biće jednaka sa brzinom fluida u ulivnim mlazevima.



Slika 11.5. Tečenje materijala obloge pod dejstvom detonacionog talasa

Količina fluida koja u toku vremena t protekne kroz ulivne i horizontalne mlazeve biće: $2\rho V_s t r^2 \pi$, $\rho V_s t r_1^2 \pi$ i $\rho V_s t r_2^2 \pi$. Kako je količina kretanja fluida projektovana na uzdužnu osu simetrije horizontalnih mlazeva jednaka nuli i pretpostavljajući da u mlazevima ne dolazi do gubitka fluida, mogu se uspostaviti sledeći odnosi:

$$2\rho V_s^2 t r^2 \pi \cos \beta = (r_2^2 - r_1^2) \pi \rho V_s^2 t \quad (11.8)$$

$$2\rho V_s t r^2 \pi = \rho V_s t r_1^2 \pi + \rho V_s t r_2^2 \pi \quad (11.9)$$

Iz jednačina (11.8) i (11.9) dobija se:

$$2r^2 \cos \beta = r_2^2 - r_1^2 \quad (11.10)$$

$$2r^2 = r_2^2 + r_1^2 \quad (11.11)$$

Iz odnosa (11.10) i (11.11) dobija se:

$$r_1^2 = 2r^2 \frac{(1 - \cos \beta)}{2} = 2r^2 \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (11.12)$$

$$r_2^2 = 2r^2 \frac{(1 + \cos \beta)}{2} = 2r^2 \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (11.13)$$

Kako je ugao β uvek manji od $\pi/2$, odnosi (11.12) i (11.13) pokazuju da je poprečni presek mlaza desno od tačke sudara O' manji od preseka mlaza levo od ove tačke ($r_1 < r_2$). Konačno, ako se ovom zaključku doda konstatacija da se ceo sistem, prikazan na slici 11.5, kreće translatornom brzinom V_t , očigledno je da metal obloge pod dejstvom detonacionog talasa obrazuje dva horizontalna mlaza koji se kreću u istom smeru, i to prvi, primarni mlaz brzinom:

$$V_{pm} = V_t + V_s = \frac{V}{\sin \beta} + \frac{V}{\tan \beta} = V \left(\frac{1}{\sin \beta} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (11.14)$$

i drugi, sekundarni mlaz, znatno manjom brzinom:

$$V_{sm} = V_t - V_s = \frac{V}{\sin \beta} - \frac{V}{\tan \beta} = V \left(\frac{1}{\sin \beta} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (11.15)$$

Ako se ima u vidu izraz (11.7), izrazi (11.14) i (11.15) pokazuju da brzine primarnog (V_{pm}) i sekundarnog (V_{sm}) mlaza zavise od brzine detonacije (V_D), ugla konusa obloge kumulativne šupljine (α) i ugla konusa deformisane obloge (β): sa povećavanjem V_D i ugla β rastu brzine V_{pm} i V_{sm} , a sa povećanjem ugla α ove brzine opadaju. Ove zaključke potvrđuju i eksperimentalni rezultati.

U vezi sa uglom β treba reći da teorijsko-eksperimentalni ukazuju na veliki interes da se ovaj ugao predstavi odgovarajućom analitičkom formom. Međutim, svako od poznatih rešenja oslanja se bar na jednu eksperimentalno određenu veličinu. Sa stanovišta prakse bitno je da eksperimentalni rezultati pokazuju da ugao β zavisi od:

- oblika kumulativne šupljine, odnosno obloge,
- brzine detonacije,
- brzine elementarne mase obloge duž izvodnice obloge.

Iz navedene zavisnosti proističe i činjenica da pojedinim tačkama (elementarnim masama) na izvodnici metalne obloge, odgovaraju različite vrednosti ugla β . Takođe, eksperimentalni rezultati pokazuju da se ugao β smanjuje od vrha prema osnovi konusne šupljine (ovu konstataciju potvrđuje i projekcija stvarne površine obloge u trenutku kada je detonacioni talas stigao do osnove šupljine, predstavljena isprekidanom linijom na slici 11.4)

11.2.2. Dubina prodiranja kumulativnog mlaza u prepreku

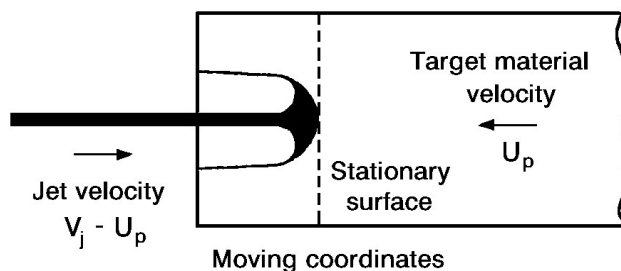
Radi sticanja predstave o principima teorijskog razmatranja dubine prodiranja kumulativnog mlaza u metalnu prepreku, izložićemo jedan jednostavan postupak određivanja sposobnosti prodiranja.

Nakon sudara sa preprekom kumulativni mlaz će, zahvaljujući svojoj velikoj brzini i kinetičkoj energiji, prodirati u prepreku potiskujući radijalno materijal prepreke, a međusobno dejstvo mlaza i prepreke može se razmatrati kao dejstvo idealne tečnosti, primenjujući zakone hidromehanike.

Posmatraće se kumulativni mlaz gustine ρ_m i dužine l_{pm} , koji se kreće brzinom V_{pm} i prodire u metalnu prepreku (slika 11.6). Tačka A na kontaktnoj površini kreće se u prepreci

brzinom V_p , sve do dostizanja brzine $(V_{pm})_{kr}$. Ako se uvede pokretni koordinatni sistem koji se kreće zajedno sa tačkom A, materijal prepreke će se kretati ulevo brzinom V_p , a mlaz udesno brzinom $(V_{pm} - V_p)$. Primenom Bernulijeve jednačine ($p + \rho V^2/2 = \text{const}$) i korišćenjem jednakosti dinamičkog pritiska sa obe strane kontaktne površine mlaza i prepreke, dobija se:

$$\rho_m (V_{pm} - V_p)^2 = \rho_p V_p^2 \quad (11.19)$$



Slika 11.6. Šema prodiranja kumulativnog mlaza u prepreku

Sada je:

$$\frac{V_p}{V_{pm} - V_p} = \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_p}} \quad (11.20)$$

Kako je vreme prodiranja mlaza:

$$t = \frac{l_{pm}}{V_{pm} - V_p} \quad (11.21)$$

dubina prodiranja mlaza biće:

$$L_{pr} = V_p t = \frac{V_p}{V_{pm} - V_p} l_{pm} = l_{pm} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_p}} \quad (11.22)$$

Izraz za L_{pr} odgovara idealizovanim uslovima i nema značajniju praktičnu vrednost. Međutim, ako se proces prodiranja razmatra u realnijim uslovima, očigledno je da intenzitet prodiranja ne zavisi samo od dužine mlaza i gustine, već i od drugih, u prvom redu mehaničkih karakteristika prepreke.

Uslov za praktično korišćenje kumulativnog efekta u vojnoj tehnici svodi se na konstataciju: kumulativni mlaz treba da probije pancirnu (po pravilu čeličnu) prepreku određene debljine i kvaliteta, i da nakon probijanja raspolaže energijom dovoljnom za onеспособljavanje cilja koji se nalazi iza prepreke. Praktično iskustvo pokazuje da kumulativni mlaz, čija je sposobnost prodiranja veća za oko 20% od debljine napadnute prepreke, raspolaže nakon probijanja energijom dovoljnom za izbacivanje iz stroja cilja zaštićenog probijenom preprekom.

11.3. Uticajni faktori na kumulativni efekat

Izložene teorijske osnove kumulativnog efekta daju mogućnost analize uticaja nekih osnovnih faktora na kumulativni efekat, odnosno na sposobnost prodiranja kumulativnog mlaza u prepreku poznatih karakteristika. Kako je osnovna namena projektila sa kumulativnim eksplozivnim punjenjem dejstvo protiv oklopljenih ciljeva, sasvim je prirodno da glavnu meru

efikasnosti ovih projektila predstavlja nominalna debljina čelične prepreke, određenih fizičko-hemijskih i mehaničkih osobina, koju projektil može da probije. Sa stanovišta efikasnosti projektila od interesa je poznavati faktore koji utiču na probojnost čelične prepreke i uslove pod kojima se u svakom konkretnom slučaju može postići maksimalna nominalna probojnost.

Eksperimentalno iskustvo pokazuje da kumulativni efekat zavisi od velikog broja faktora, od kojih su samo neki, najvažniji, obuhvaćeni teorijskim razmatranjima, čije su osnove izložene. Treba takođe imati u vidu da se još uvek najnoviji teorijski i eksperimentalni rezultati, posebno oni vezani za specifična tehnološka rešenja kojima se obezbeđuje značajno povećanje kumulativnog efekta, smatraju strogom vojnom tajnom strateškog značaja, pa se ne objavljuju u otvorenoj stručnoj literaturi.

11.3.1. Eksploziv

Eksploziv je jedan od odlučujućih faktora kumulativnog efekta. Uz prirodu eksploziva, značaj ima tehnologija izrade kumulativnog eksplozivnog punjenja.

U savremene kumulativne projektele ugrađuju se skoro isključivo dvokomponentni jaki eksplozivi (naprimer, mešavina trotila i heksogena, trotila i oktogena i druge) ili flegmatizovani eksplozivi visoke razorne sposobnosti (npr. flegmatizovani heksogen i flegmatizovani oktogen). Izbor vrste eksploziva zavisi pre svega od tehnologije njegove ugradnje u košuljicu projektila, ali nezavisno od izabrane tehnologije cilj je ostvarivanje što je moguće homogenijeg punjenja i što veće brzine detonacije, uz razume se, tehničko-tehnološki prihvatljive uslove iniciranja stabilne detonacije eksplozivnog punjenja.

Za izradu eksplozivnih kumulativnih punjenja koriste se dve tehnologije: livenje i presovanje. U oba slučaja je najvažnije da se pouzdano reprodukuje hemijski i fizički homogeno eksplozivno punjenje. Pod fizički homogenim eksplozivnim punjenjem podrazumeva se punjenje bez unutrašnjih šupljina i gasnih mehurića, koji nastaju kod livenih punjenja kao posledica zaostalog vazduha i jake kontrakcije pri očvršćavanju punjenja (npr. pri očvršćavanju trotila kontrakcija iznosi oko 12%).

Tehnologija livenja može se realizovati u nekoliko varijanti:

- taložno (sedimentaciono) livenje,
- centrifugalno livenje,
- livenje pod pritiskom,
- vibraciono livenje.

Klasični postupak livenja ne daje eksplozivno punjenje potrebnog kvaliteta (npr. u uzdužnom preseku punjenja dobijenog klasičnim livenjem, brzina detonacije varira oko 150 m/s, a u slučaju vibracionog livenja samo 10 do 20 m/s).

Sa tehnološkog stanovišta najsloženije je livenje pod pritiskom, ali ono omogućuje značajno ubrzavanje procesa livenja i potreban kvalitet eksplozivnog punjenja.

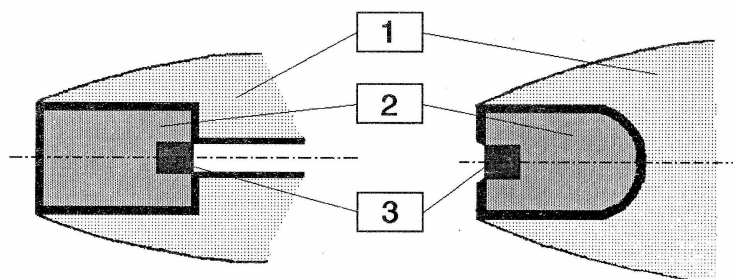
Sedimentaciono i centrifugalno livenje daju eksplozivna punjenja potrebne homogenosti, ali se ovim postupcima ne mogu postići gustine eksploziva kao u slučaju vibracionog livenja. Otuda od svih navedenih varijanti vibraciono livenje daje najbolje rezultate.

Pri primeni tehnologije presovanja u nekim slučajevima, zbog veličine punjenja, vrši se višefazno presovanje da bi se dobila potrebna ujednačenost gustine po uzdužnom preseku punjenja. Tehnologijom presovanja ostvaruju se visoke gustine i potpuno homogeno eksplozivno punjenje (u nekim slučajevima mogu se postići gustine koje su od kristalne gustine manje samo za 1 do 2%).

11.3.2. Detonator

Detonator obezbeđuje početni impuls u mehanizmu pobuđivanja stabilne detonacije kumulativnog eksplozivnog punjenja i nalazi se u punjenju suprotno od kumulativne šupljine. Otuda je uz konstrukciju detonatora veoma važan pravilan izbor eksploziva i njegove gustine, odnosno kapisle kojom se pobuđuje detonator.

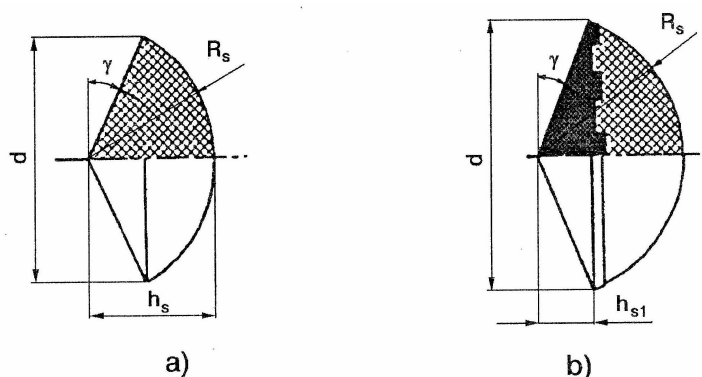
U zavisnosti od načina iniciranja kumulativnog eksplozivnog punjenja, koristi se ravan detonator za prednju inicijaciju (upaljač u vrhu projektila) i polusferni detonator za zadnju inicijaciju (upaljač u dnu eksplozivnog punjenja). Na slici 11.7 šematski su prikazani ravan i polusferni detonator (ovaj poslednji se skoro isključivo koristi u savremenim rešenjima).



Slika 11.7. Detonator: A - ravan, B - sferni
1 - eksplozivno punjenje, 2 - detonator, 3 - detonatorska kapisla, 4 - sprovodna cevčica

Polusferni detonator je povoljniji, jer ima veću površinu naleganja na eksplozivno punjenje, a pobuđeni detonacioni talas ima manju krivinu. Detonatorska punjenja izrađuju se najčešće presovanjem tetrila (gustina 1.65 do 1.70 g/cm³), ređe od flegmatizovanog heksogena (iako ima nešto manju brzinu detonacije, tetril je povoljniji od heksogena zbog veće sigurnosti pri radu - manje je osetljiv od heksogena). Oblik detonatora diktira oblik detonacionog talasa. U slučaju polusfernog detonatora detonacioni talas ima oblik sfernog segmenta čija krivina opada od tačke inicijacije prema vrhu kumulativne šupljine; pri dovoljnoj dužini eksplozivnog punjenja, detonacioni talas je praktično ravan u momentu kada dostigne vrh konusne šupljine. Međutim, zahtevi koje treba da ispune savremeni kumulativni projektili insistiraju na što je moguće manjoj masi projektila, a to je u suprotnosti sa uslovima koji obezbeđuju ravan detonacioni talas. Zbog toga se nastoji da se uz minimalnu masu eksplozivnog punjenja, bliskoj aktivnoj masi, ostvari ravan detonacioni talas primenom detonatora odgovarajuće konstrukcije (generator ravnog detonacionog talasa) ili ugradnjom, na izvesnom rastojanju od detonatora, devijatora detonacionog talasa. Savremena rešenja kumulativnih eksplozivnih punjenja su minimalne mase zahvaljujući devijatorima. Sem toga, devijator omogućuje generisanje detonacionog talasa tako da tangenta na profil talasa u svakoj tački izvodnice obloge gradi željeni ugao.

U savremena rešenja kumulativnih punjenja ugrađuju se dva tipa devijatora: pasivni (izrađen od inertnog materijala) i aktivni (predstavlja kombinaciju inertnog materijala i eksploziva manje gustine i manje razorne moći u odnosu na eksploziv kumulativnog punjenja). Na sl. 11.8 prikazani su optimizirani polusferni devijatori (pasivni i aktivni) za jedno savremeno kumulativno punjenje prečnika oko 120 mm.

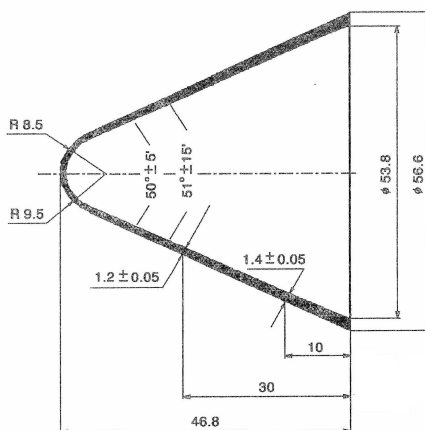


Slika 11.8. Optimalni oblici devijatora: a) pasivni devijator, b) aktivni devijator

Da bi se obezbedilo zahtevano prigušenje udarnog talasa u devijatoru na što kraćem putu, materijal za izradu devijatora se bira tako da poseduje što je moguće veću akustičku impedansu i dinamičku čvrstoću. Zahtev za što manjom masom devijatora sužava izbor na materijale relativno male gustine: teflon, fenolformaldehid (FFA), stiropor visoke gustine i druge slične materijale.

11.3.3. Metalna obloga

Oblik i materijal obloge ispoljavaju najveći uticaj. U vojnoj tehnici koriste se isključivo obloge konusnog i hiperboličnog oblika (nekada je korišćena i polusferna obloga za kumulativna punjenja rotirajućih projektila). Zbog velike plastičnosti i gustine bakar se skoro isključivo koristi za izradu obloga kumulativnih šupljina. Na slici 11.9 dat je konstrukcioni crtež bakarne obloge kumulativnog punjenja protivoklopnog raketnog projektila "Zolja", kalibra 64 mm. U vreme uvođenja u operativnu upotrebu (početkom osamdesetih godina), sistem "Zolja" je spadao među najuspešnija rešenja kategorije ručnih sredstava za protivoklopnu borbu na bliskim rastojanjima (do 200 m).



Slika 11.9. Bakarna obloga kumulativne šupljine punjenja projektila "Zolja"

Obloge hiperboloidnog oblika u odnosu na konusne daju nešto veće dužine proboja sa manjim izlaznim otvorom na napadnutoj prepreci (primarni kumulativni mlaz je duži i raspolaže većom brzinom). Međutim, obloga hiperboloidnog oblika je još uvek u praksi retka, zbog komplikovanije izrade, nego što je slučaj sa konusnom oblogom.

Teorijski i eksperimentalni rezultati pokazuju da sa stanovišta realne efikasnosti kumulativnog efekta optimalne rezultate daju uglavnom konusne obloge sa uglom vrha konusa od $2\alpha = 38^\circ \div 50^\circ$.

Apsolutna vrednost debljine obloge kod savremenih rešenja ne prelazi 2 mm. Veoma je važno da obloga bude maksimalno simetrična u odnosu na uzdužnu osu, koja mora potpuno da se poklapa sa uzdužnom osom simetrije eksplozivnog punjenja. Otuda tolerancija debljine zida ne sme prelaziti 0.05 mm, a između obloge i eksplozivnog punjenja mora biti ostvaren potpun i dovoljno čvrst kontakt.

Kod savremenih kumulativnih punjenja za vojne potrebe ugrađuju se obloge od elektrolitičkog bakra koji mora odgovarati visokim zahtevima čvrstoće i kristalne strukture (npr. zatezna čvrstoća min. 230 N/mm^2 i min. 3000 kristalnih zrna po mm^2). Proces izrade obloga vrši se po dve tehnologije: izvlačenje sa velikim brojem operacija (10 do 15) i hladno istiskivanje (fleur-tournage). U poslednje vreme je preovlađujuća tehnologija istiskivanja, koja uz veću ekonomičnost, omogućuje bolji kvalitet obloge (dobija se takva orijentacija kristala koja doprinosi efikasnosti kumulativnog mlaza).

11.3.4. Stabilnost primarnog mlaza

Prema eksperimentalnim rezultatima stabilnost primarnog mlaza zavisi od dva osnovna faktora:

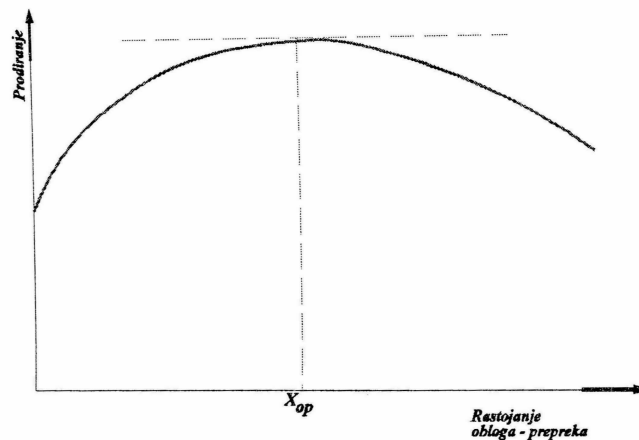
1. Kompaktnost primarnog mlaza narušava se usled promenljivosti brzine duž mlaza: dolazi do disperzije na veći ili manji broj pojedinačnih elemenata. Ako je promenljivost brzine velika, može doći do snažnog rasipanja mlaza i prelaska u tok sitnih čestica metala. Pad probojnosti sa povećanjem rastojanja osnove obloge od napadnute prepreke u momentu formiranja kumulativnog mlaza posledica je radijalnog rasturanja mlaza zbog otpora vazduha.

2. Asimetričnost impulsa produkata detonacije i asimetričnost kumulativne šupljine i metalne obloge prouzrokuju odstupanje elemenata mlaza od normalne trajektorije, kolinearne sa uzdužnom osom simetrije eksplozivnog punjenja. Identičan efekat ima i neujednačenost debljine obloge u poprečnom preseku. Nestabilnost mlaza izazvana navedenim nepravilnostima u odgovarajućim uslovima može da izazove stvaranje dva ili više kratera na napadnutoj prepreci.

11.3.5. Rastojanje između osnovice obloge i prepreke

Primarni kumulativni mlaz raspolaže najvećom energijom u momentu odvajanja od sekundarnog mlaza, pa je optimalno rastojanje obloge i napadnute prepreke (X_{op}) ono rastojanje koje omogućava potpuno formiranje kumulativnog mlaza. Vreme potrebno za formiranje primarnog mlaza zavisi u najvećoj meri od brzine čela mlaza. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da kod kumulativnih eksplozivnih punjenja sa konusnom oblogom rastojanje od osnove obloge do prepreke, potrebno za formiranje primarnog mlaza, iznosi oko 2.5 kalibra za punjenja kalibra do 60 mm i oko 2 kalibra za punjenja većeg kalibra.

Na slici 11.10 dat je karakter promene dubine prodiranja u čeličnu prepreku u funkciji rastojanja obloge i prepreke. Očigledno je da bi optimalno rešenje bilo ako bi kriva promene probojnosti oko apscise X_{op} imala zanemarljivu krivinu u što većem opsegu.



Slika 11.10. Probojnost u funkciji rastojanja obloga - prepreka

11.3.6. Mehanizam za aktiviranje (upaljač)

Upaljač kumulativnog eksplozivnog punjenja treba da ispunjava dva osnovna zahteva:

- što kraće vreme funkcionisanja (maksimalna moguća trenutnost),
- funkcionisanje pri vrlo malim uglovima susreta projektila sa ciljem.

Za ugradnju u kumulativne projektele mogu se koristiti mehanički i električni mehanizmi za aktiviranje, ali značajnu prednost imaju električni mehanizmi zbog znatno veće trenutnosti i mogućnosti funkcionisanja pri vrlo malim udarnim uglovima (mehanički mehanizmi koriste se samo u nekim specijalnim slučajevima, npr. kod kumulativnih ručnih bombi i kumulativnih bombica kasetnih projektila). Vreme funkcionisanja savremenih električnih mehanizama za aktiviranje iznosi 20 do 40 μ s, a dobro rešenog mehaničkog mehanizma 250 μ s. Električni mehanizmi funkcionišu pri udarnim uglovima do 5° , a mehanički do 15° .

11.3.7. Rotacija projektila

Rotacija projektila značajno degradira kumulativni efekat. Zbog toga su savremeni protivoklopni projektili sa kumulativnim punjenjem isključivo nerotirajući ili sa minimalnom rotacijom koja ne prelazi 50 o/s. Naime, u slučaju obrtnog kretanja kumulativnog punjenja, na čestice koje se nalaze u kumulativnom mlazu van ose obrtanja deluje centrifugalna sila, proporcionalna rastojanju čestica od ose obrtanja. Dejstvo ove sile izaziva povećanje poprečnog preseka mlaza, što smanjuje koncentraciju energije u mlazu, a time i njegovu moć probijanja.

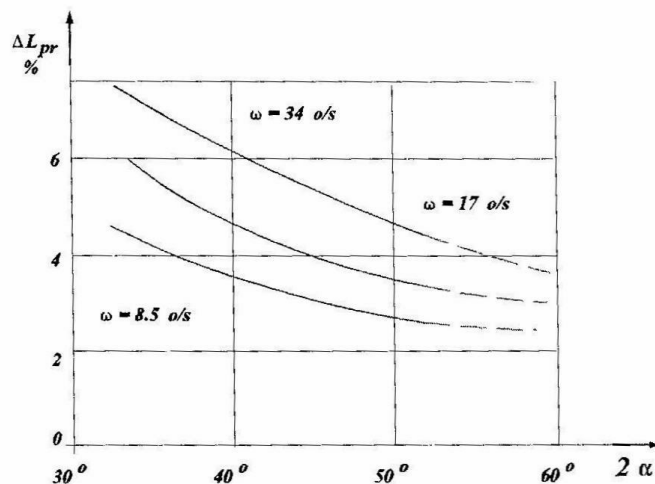
Uticaj ugaone brzine kumulativnog punjenja na probojnost zavisi od prečnika punjenja i oblika kumulativne šupljine. Sa povećavanjem prečnika punjenja povećava se i negativan uticaj rotacije, zbog povećanja centrifugalne sile koja deluje na čestice u mlazu. Takođe, eksperimentalnim putem je utvrđeno da uticaj ugaone brzine zavisi od ugla 2α pri vrhu konusne šupljine. Ovaj uticaj se vidi iz narednog izraza za određivanje smanjenja moći probijanja blagorotirajućih kumulativnih projektila sa konusnom šupljinom u funkciji rotacije i ugla 2α :

$$\Delta L_{pr} = 24.4 \omega_u^{0.379} / (2\alpha)^{1.625} \quad [\%] \quad (11.27)$$

gde je:

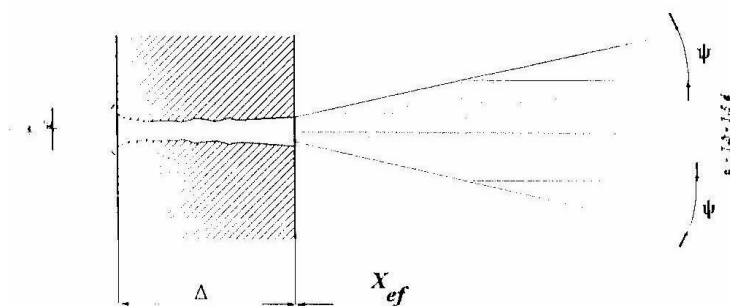
ω_u - ugaona brzina kumulativnog punjenja u momentu sudara sa preprekom.

Navedena zavisnost, predstavljena na slici 11.11 za nekoliko vrednosti ugaone brzine, važi za kumulativna punjenja prečnika do 80 mm.



Slika 11.11. Zavisnost moći prodiranja od ugaone brzine i ugla konusa šupljine

Realna efikasnost kumulativnog efekta zavisi od stanja i energije primarnog mlaza nakon probijanja napadnute prepreke debljine Δ . Eksperimentalni rezultati dobijeni sa savremenim kumulativnim projektilima (uključujući i blagorotirajuće) pokazuju da se čestice mlaza nakon probijanja čelične prepreke kreću u okviru konusa sa uglom $2\psi = 20^\circ$ do 30° , u kome se zapažaju dve zone (slika 11.12): zona cilindričnog oblika visoke efikasnosti i pored nje zona smanjene efikasnosti.

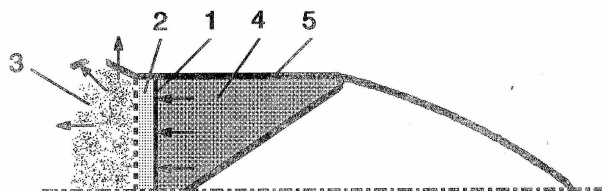


Slika 11.12. Zona dejstva nakon probijanja pancirne prepreke kumulativnim projektilom:
1 - zona visoke efikasnosti, 2 - zona smanjene efikasnosti

U prvoj zoni čestice mlaza raspolažu relativno velikom energijom koja je dovoljna za probijanje objekata i predmeta na koje nailaze, ili njihovo paljenje ako su zapaljivi (npr. radio uređaji će biti razoreni ili onеспособljeni, municija zapaljena). U zoni smanjene efikasnosti, gustina brzih čestica metala obloge i otknutih čestica metala napadnute prepreke ima mnogo manju vrednost, pa je i verovatnoća pogađanja i oštećenja objekata i predmeta iza prepreke znatno manja. Efikasan domet čestica (X_{ef}) u obe zone zavisi od brzine sa kojom se napušta probijena obloga, pa je proporcionalan odnosu L_{pr}/Δ . Gustina čestica u obe zone zavisi, takođe od ovog odnosa, ali i od konstrukcionih parametara kumulativnog punjenja (prirodno je da većem prečniku eksplozivnog punjenja i osnove obloge šupljine odgovara veća gustina čestica).

11.3.8. Košuljica projektila

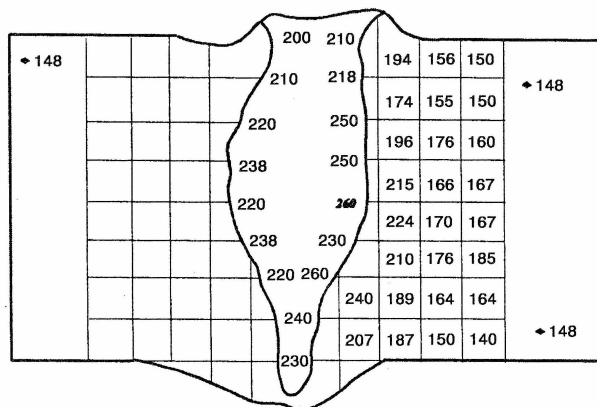
Osnovni zadatak košuljice projektila je da eksplozivno punjenje sačuva od prevremenog dejstva u fazi kretanja projektila u cevi oruđa, odnosno na aktivnom delu putanje. Međutim, košuljica nema bitan uticaj na kumulativni efekat, iako ona može da ograniči ili čak potpuno onemogući bočno širenje gasovitih produkata detonacije u zoni hemijske reakcije, pa se ne umanjuje energija detonacionog talasa (slika 11.13). Kod savremenih kumulativnih punjenja sa velikom brzinom detonacije i relativno velikim prečnikom ($d_c \geq 90$ mm), uticaj košuljice je praktično zanemarljiv.



Slika 11.13. Detonacija kumulativnog punjenja sa metalnom košuljicom: 1 - detonacioni talas, 2 - zona hemijske reakcije, 3 – produkti detonacije, 4 - eksplozivno punjenje, 5 - košuljica projektila

11.3.9. Karakteristike prepreke

Mehanizam prodiranja primarnog mlaza u prepreku, odnosno probijanje prepreke ima skoro isključivo karakteristike mehaničke pojave. Do probijanja i stvaranja otvora u prepreci dolazi usled radijalnog sabijanja materijala prepreke pod dejstvom primarnog mlaza. Najbolja potvrda navedenog tvrđenja je činjenica da u metalu prepreke u blizini šupljine, stvorene prolaskom primarnog mlaza, dolazi do promene mehaničkih osobina: tvrdoća metala prepreke na samoj ivici šupljine je najveća, a zatim opada sa udaljavanjem od ivice do vrednosti koju je metal imao pre probijanja. Ova razlika u tvrdoći može da iznosi i do 130 Brinelovih jedinica, ako je materijal prepreke standardni pancirni čelik. Na slici 11.14 predstavljena je raspodela tvrdoće u čeličnoj prepreci oko šupljine stvorene dejstvom primarnog kumulativnog mlaza.



Slika 11.14. Promena tvrdoće prepreke u blizini šupljine stvorene prolaskom kumulativnog mlaza

Ako se imaju u vidu brzina primarnog mlaza i vrednost pritiska koji se javlja pri sudaru mlaza sa čeličnom preprekom (reda 10^{11} Pa), dolazi se do zaključka da se metal prepreke u

procesu kretanja primarnog mlaza nalazi u posebnom, kvazitečnom stanju, pri čemu uslovi prelaska u ovakvo stanje zavise i od mehaničkih osobina metala prepreke.

Uticaj mehaničkih osobina i vrste materijala napadnute prepreke na moć probijanja kumulativnog mlaza pokazuju podaci navedeni u tabeli 11.2, dobijeni ispitivanjem kumulativnog punjenja od heksotola (50% TNT / 50% heksogen), prečnika 42 mm, visine 84 mm, sa hiperboloidnom oblogom kumulativne šupljine (obloga od aluminijumske legure, debljine 2 mm).

Tabela 11.2

Materijal prepreke	Tvrdoća H_b	Dubina prodiranja (mm)
Čelik	100	111
Čelik	350	80
Aluminijumska legura	50	327
Aluminijumska legura	200	256