

10. RAZORNI PROJEKTILI

10.1 Namena razornih projektila

Neuporedivo najbrojniju vrstu predstavljaju svakako razorni projektili, kod kojih je metalna košuljica (najčešće od čelika) ispunjena jednim od brizantnih eksploziva (trotilom, mešavinom trotil-heksogen, flegmatizovanim heksogenom, amatolom i dr.) i snabdevena mehanizmom koji u željenom trenutku ili pri susretu sa ciljem izaziva eksploziju projektila. U opštem slučaju razorni projektil se može koristiti za rešavanje vrlo raznovrsnih borbenih zadataka. Međutim, zavisno od vrste cilja, konstruktivnih karakteristika razornih projektila i drugih taktičkih uslova primene dolazi do lošijeg ili boljeg iskorišćenja mogućnosti projektila. Glavni ciljevi razornih projektila su:

- otkriveno ili lako zaštićeno ljudstvo ("živa sila") na koje projektil dejstvuje parčadima svoje košuljice, udarnim talasom prouzrokovanim širenjem produkata eksplozije i tzv. moralnim dejstvom izazvanim zvučnim efektom koji prati eksploziju,
- ratni materijal na koji projektil dejstvuje parčadima i udarnim talasom (ako je u pitanju materijal male izdržljivosti),
- zemljana, drveno-zemljana i slična utvrđenja (utvrđene vatrene tačke) i razni građevinski i komunikacijski objekti na koje projektil deluje snagom detonacije eksplozivnog punjenja i parčadima košuljice.

Konstruktivni parametri razornog projektila zavise od toga protiv koje grupe ciljeva se zahteva najbolje iskorišćenje projektila, odnosno od toga da li se želi primarno dejstvo parčadima, snagom eksplozije ili istovremeno dejstvo parčadima i snagom eksplozije. Otuda i podela grupe razornih projektila na projektile parčadnog, parčadno-rušećeg i rušećeg dejstva.

Navedene tri podgrupe međusobno se razlikuju po izvesnim konstruktivnim parametrima i po karakteristikama upaljača - mehanizma za iniciranje eksplozije projektila. Uobičajeno je da se o načinu dejstva projektila sudi na osnovu vrednosti karakterističnih konstruktivnih parametara:

- debljine zida košuljice δ (najčešće date u kalibrima),
- koeficijenta punjenja datog odnosom $\alpha = (m_e/m_p) \cdot 100$ [%]
(m_e - masa eksplozivnog punjenja; m_p - masa projektila)
- relativne mase eksplozivnog punjenja date odnosom $C_e = m_e/d^3$

U tabeli 10.1 date su vrednosti navedenih parametara za sve tri podgrupe razornih projektila.

Tabela 10.1

Karakteristika	Razorni projektili		
	Parčadno dejstvo	Parčadno-rušeće dejstvo	Rušeće dejstvo
δ [kal.]	0.15 ÷ 0.20	0.11 ÷ 0.17	0.06 ÷ 0.15
α [%]	4 ÷ 14	10 ÷ 17	10 ÷ 25
C_e [kg/dm ³]	1.00 ÷ 1.65	1.15 ÷ 2.2	2.0 ÷ 3.0

Podaci u tabeli pokazuju da projektili parčadnog dejstva imaju deblje zidove košuljice, manju relativnu masu i koeficijent punjenja u odnosu na projektile parčadno-rušećeg i rušećeg dejstva.

U tabeli 10.2 date su karakteristike spoljne trase artiljerijskih razornih projektila, a u tabeli 10.3 karakteristike spoljne trase nerotirajućih bacačkih projektila.

Tabela 10.2

$\frac{V_0}{a}$	$\frac{L}{d}$	$\frac{H}{d}$	$\frac{R}{d}$	$\frac{l_c}{d}$	$\frac{h_z}{d}$	$\frac{l_p}{d}$	α [°]
do 1	do 4	1 ÷ 2	do 3	2 ÷ 2.5	0 ili 0.7 ÷ 1.0	0.8 ÷ 1.2	0 ili 9 ÷ 10
1 ÷ 2	4 ÷ 4.5	2 ÷ 2.4	3 ÷ 6	do 2	0.5 ÷ 0.7	0.6 ÷ 0.8	9 ÷ 10
2 ÷ 3	4.5 ÷ 5	2.2 ÷ 2.6	8 ÷ 10	1.8 ÷ 2	do 0.5	0.5 ÷ 0.7	7 ÷ 9

Napomena:

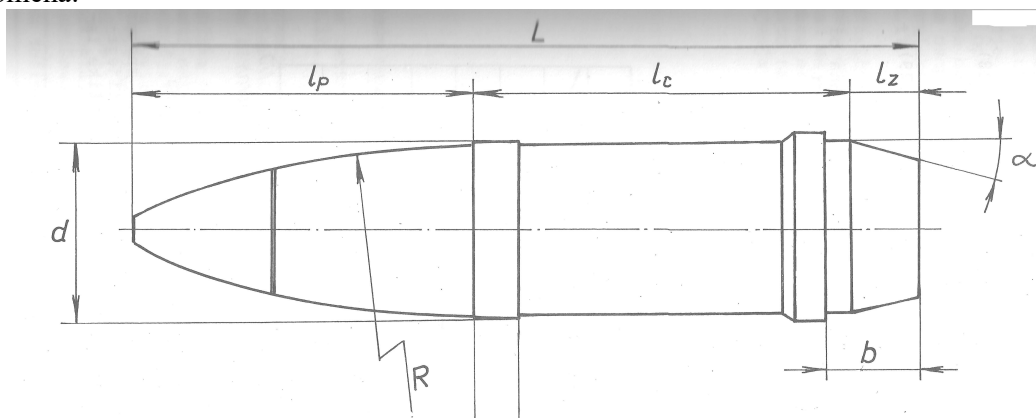
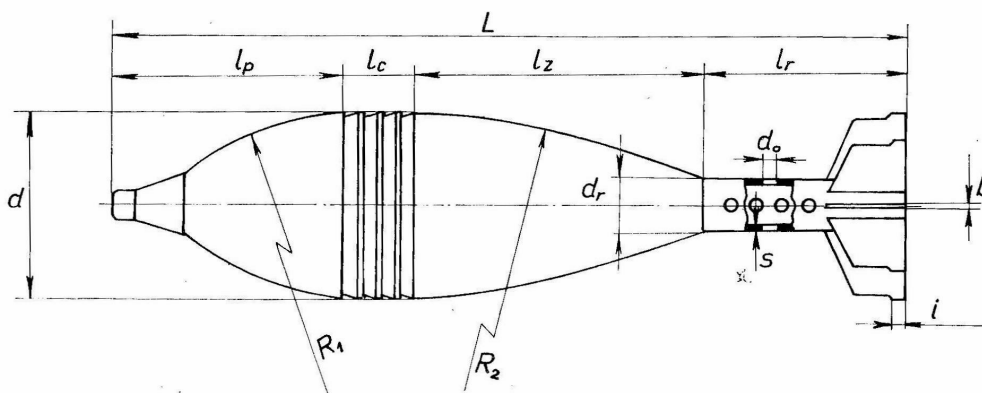


Tabela 10.3

$\frac{L}{d}$	$\frac{H}{d}$	$\frac{R}{d}$	$\frac{l_c}{d}$	$\frac{h_z}{d}$	$\frac{R_z}{d}$	$\frac{l_s}{d}$	$\frac{h}{d}$
4 ÷ 5.8	1.3	0.85 ÷ 1.40	0.37 ÷ 0.39	1.2 ÷ 2.8	7.5 ÷ 15.0	1.0 ÷ 1.8	0.4 ÷ 0.8

Napomena:



Projektili parčadnog dejstva snabdeveni su udarnim upaljačima trenutnog, trenutno-inercionog dejstva ili tempirnim upaljačima. Projektili rušecćeg dejstva snabdeveni su udarnim upaljačima sa usporenim dejstvom, a projektili parčadno-rušecćeg dejstva udarnim upaljačima trenutnog i usporenog dejstva ili tempirnim, odnosno blizinskim upaljačima.

Treba reći da je u grupi razornih projektila danas najbrojnija podgrupa projektila parčadno-rušecćeg dejstva. Projektili ove podgrupe imaju nesumnjive prednosti:

- zahvaljujući savremenim rešenjima upaljača (imaju dva ili tri dejstva: trenutno i usporeno ili trenutno, inerciono i usporeno) uspešno dejstvo je parčadima i snagom eksplozije, zavisno od podešenosti upaljača, pa im je taktička primena u borbenim dejstvima znatno šira,

- znatno pojednostavljaju službu snabdevanja jako pokretnih jedinica u ratnim uslovima,
- pojednostavljaju i pružaju mogućnost šire upotrebe artiljerijskih oruđa.

Po pravilu danas se usvaja rešenje projektila isključivo parčadnog, odnosno rušecog dejstva samo u izuzetnim slučajevima. Razorni projektili automatskih protivavionskih oruđa (za protivavionsku odbranu na malim i srednjim visinama) su isključivo parčadnog dejstva, zatim bojeve glave nekih vrsta raketnih projektila obično su samo parčadnog ili samo rušecog dejstva i konačno nerotirajući projektili bacačkih oruđa, kalibra do 82 mm su samo parčadnog dejstva.

Efikasnost razornih projektila, kao i drugih vrsta projektila predstavlja meru učinka na cilju, pa je s obzirom na ogromne količine koje se utroše u toku borbenih operacija, pitanje efikasnosti od izuzetnog taktičko-strateškog i ekonomskog značaja. Razmatranje efikasnosti razornih projektila mora poći od analize svih faktora od kojih može zavisiti učinak projektila na unapred definisanom cilju, da bi se utvrdile metode određivanja ili procenile mere efikasnosti.

10.2. Parčadno dejstvo

Parčadno dejstvo razornog projektila zavisi od:

- broja, pojedinačne mase i oblika padčadi
- izgleda i pravca snopa parčadi
- ubitačnog dometa parčadi

10.2.1. Broj, pojedinačna masa i oblik parčadi

Broj parčadi koja nastaju rasprskavanjem košuljice projektila zavisi u prvom redu od kalibra i već navedenih karakteristika δ , α i C_e . Sa povećanjem kalibra uz iste ili povećane vrednosti δ , α i C_e povećava se i broj parčadi. Ako se, pak, pri jednom istom kalibru menjaju karakteristike δ , α i C_e utvrdiće se da postoje optimalne vrednosti ovih karakteristika pri kojima se dobija najveći broj parčadi tzv. ubitačnog dometa.

Pojedinačna masa parčadi zavisi u prvom redu od vrednosti koeficijenta punjenja α , odnosno od relativne mase eksplozivnog punjenja C_e . Ukoliko su α i C_e veći za projektil datog kalibra, treba očekivati sitniju parčad, male pojedinačne mase. U pogledu pojedinačne mase parčadi postoje ograničenja koja potiču iz zahteva za minimalno potrebnom kinetičkom energijom svakog pojedinačnog komada košuljice projektila na određenom rastojanju od mesta eksplozije. Ovaj zahtev za minimalno potrebnom ubitačnom energijom dovodi do tzv. minimalne mase efikasnog parčeta. Naravno, optimalan slučaj bi bio ako bi se košuljica projektila rasprskavala na parčad ove i neznatno veće mase, jer bi se u tom slučaju dobio najveći broj efikasne parčadi. Praksa međutim pokazuje da se košuljica razornog projektila parčadnog i parčadno-rušecog dejstva rasprskava u parčad vrlo različite mase, pri čemu se najviše do 40% od ukupnog broja parčadi može smatrati ubitačnim. Veći deo predstavljaju parčad male mase koja zbog naglog gubitka brzine ne mogu da obezbede traženi ubitačni domet i parčad velike mase, znatno veće od minimalne mase efikasnog parčeta. Ova krupna parčad, iako imaju veći ubitačni domet od traženog, ne mogu se smatrati ekonomičnim sa gledišta efikasnosti protiv živih ciljeva, jer znatno umanjuju broj parčadi optimalne mase.

Kako zahtevani minimalni ubitačni domet parčadi zavisi od kalibra, vrste i bliže namene projektila, a polazeći od činjenice da je praktično nemoguće ostvariti rasprskavanje u parčad podjednake mase, usvajaju se granice mase pojedinačnih parčadi u kojima se ona smatraju ekonomičnim:

- za nerotirajuće bacačke projekte kalibra do 60 mm 1.5 do 15 g
- za nerotirajuće bacačke projekte kalibra od 60 do 120 mm 3 do 100 g
- za rotirajuće artiljerijske projekte 5 do 100 g

U slučaju razornih protivavionskih projektila donja granica mase ekonomične (i efikasne) parčadi je znatno iznad navedenih (30 g do 50 g) s obzirom na karakteristike savremenih borbenih letilica.

Parčad košuljice razornih projektila je nepravilnog oblika i oštih ivica. Ovakav oblik je povoljan sa stanovišta efekta na pogođenom cilju, ali je nepovoljan sa stanovišta balistike, jer zbog povećanog otpora vazduha dolazi do naglog pada brzine parčadi. Oblik parčadi zavisi od vrste i mehaničkih karakteristika materijala košuljice. Npr. parčad košuljice izrađene od čeličnog liva ima prizmatični oblik, manje oštih ivica, za razliku od košuljice izrađene od valjanog čelika čija su parčad oštih ivica, pljosnata i izdužena.

Broj i pojedinačna masa parčadi zavisi još i od:

- hemijskih i mehaničkih karakteristika materijala košuljice projektila,
- vrste eksploziva i načina iniciranja.

Kada se radi o projektilu datog kalibra i datih konstruktivnih karakteristika (određene spoljne i unutrašnje trase, određene mase) vrsta materijala, hemijske i mehaničke karakteristike materijala košuljice do te mere utiču na broj ekonomičnih parčadi da optimalno rešenje može imati i do 50% veći broj ekonomičnih parčadi od lošeg rešenja.

Košuljice razornih projektila izrađuju se od čeličnog liva ili valjanog čelika. Zbog manje žilavosti i razlike u strukturi metala, košuljice od čeličnog liva rasprskavaju se uglavnom u veliki broj sitnih parčadi prizmatičnog oblika. Broj sitnih parčadi (mase do 5 g) je i do deset puta veći od odgovarajućeg broja parčadi košuljice izrađene od tzv. granatnog čelika. Razlika u broju ekonomične parčadi postoji ne samo između čelika i čeličnog liva, već i između raznih vrsta čelika pri istim ili sličnim mehaničkim karakteristikama. Ova razlika može da iznosi i do 30% (npr. izvestan procenat bakra u granatnom čeliku, do 1.3%, znatno povećava sposobnost rasprskavanja).

Na broj parčadi može se uticati termičkom obradom košuljice. Potrebno je sprovesti opsežna eksperimentalna ispitivanja radi određivanja najpovoljnije termičke obrade koja omogućava dobijanje najvećeg broja ekonomične parčadi.

Broj parčadi je direktno srazmeran brzini detonacije eksploziva koji se koristi kao eksplozivno punjenje razornog projektila. Ovo znači da se u izvesnoj meri može smanjiti ili povećati broj parčadi primenom manje ili više brizantnih eksploziva. Međutim, danas se u većini slučajeva koristi trinitrotoluol (TNT) kao eksplozivno punjenje razornih projektila, a samo u izuzetnim slučajevima amatol i tzv. kompozicija B (50% heksogena i 50% TNT). Amatol se predviđa kao alternativa (zamena TNT-a) za proizvodnju razornih projektila u ratnim uslovima, a kompozicija B kod projektila kod kojih je zahtev za brojem ekonomičnih parčadi izuzetno visok (za protivavionske razorne projekte i artiljerijske projekte). Amatol 50/50 kod razornih projektila srednjeg kalibra daje za oko 20% manji broj ekonomičnih parčadi od TNT-a. Kompozicija B daje nešto veći broj ekonomičnih parčadi, ali je značajnija činjenica što je efikasna daljina parčadi u ovom slučaju veća od efikasne daljine u slučaju primene TNT-a.

Razorni projektil, kod koga je postignut optimalan odnos između mase metala i eksploziva sa stanovišta broja ekonomične parčadi, može ostvariti puni učinak samo pri maksimalno mogućem iskorišćenju eksploziva, odnosno pri detonacionom obliku eksplozivne reakcije. Otpočinjanje eksplozivne reakcije eksplozivnog punjenja vrši se početnim impulsom izazvanim detonacijom detonatora koji je u ovom slučaju transmisija i pojačavač početnog impulsa inicijalne, odnosno detonatorske kapsle. Za svako eksplozivno punjenje postoji jedan optimalan detonator koji daje dovoljni početni impuls za trenutno postizanje pune detonacione brzine. Kod razornih projektila gde detonator upotrebljenog upaljača nije dovoljan da obezbedi trenutno

ostvarenje pune detonacione brzine upotrebljavaju se tzv. detonatorski pojačnici. Veličina i oblik detonatorskih pojačnika određuje se za svaki konkretan slučaj isključivo eksperimentalnim putem.

Do sada je bilo više pokušaja iznalaženja jedne, sa praktičnog stanovišta, zadovoljavajuće metode proračuna broja ekonomične parčadi. Međutim, kada se imaju u vidu izloženi faktori od kojih zavisi broj parčadi, sasvim je razumljivo što ovi pokušaji nisu doveli do rezultata koji se može smatrati prihvatljivim. Za preliminarne proračune koristi se formula Justrova (Justrow) za izračunavanje broja parčadi:

$$N = k_p \frac{M}{d} \frac{\sigma_e}{\sigma_m \delta} \frac{K^2 + 0.5}{K^2 - 1} \quad (10.1)$$

gde je:

k_p - koeficijent koji zavisi od vrste eksploziva

M - masa eksplozivnog punjenja (g)

d - kalibar projektila (cm)

σ_m - zatezna čvrstoća materijala košuljice

σ_e - granica razvlačenja materijala košuljice

δ - relativno izduženje materijala košuljice (%)

$\kappa = \frac{D_s}{D_u} = \frac{R_s}{R_u}$ gde su

$D_s = 2R_s$ - spoljni prečnik šupljeg valjka ravnomerne debljine zidova čija je masa jednaka masi košuljice (cm)

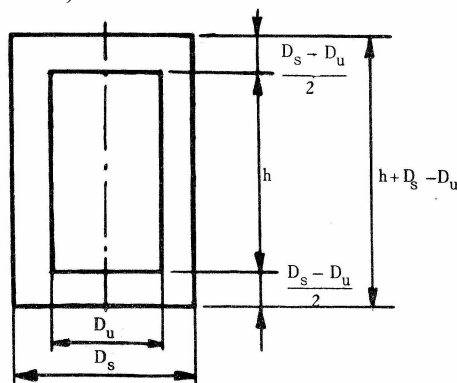
$D_u = 2R_u$ - unutrašnji prečnik valjka prema gornjoj definiciji (cm)

Koeficijent k_p je određen eksperimentalno i njegove vrednosti su u tabeli 10.4.

Tabela 10.4

Vrsta eksploziva	k_p
Nitroglicerina	54
Pikrinska kiselina	50
Trinitrotoluol	46
Visokonitrovana celuloza	40
Amatol	30
Crni barut	3

Pri primeni Justrovove formule čini se često greška, pa se veličine D_s i D_u usvajaju kako su date u crtežu košuljice, a ne prema prethodnoj definiciji. Ustvari, košuljicu je potrebno zameniti šupljim cilindrom (slika 10.1).



Slika 10.1. Zamenja košuljice cilindrom prema Justrovu

Potrebno je izračunati zapreminu valjka od metala gustine ρ_k , čija će masa biti jednaka masi realne košuljice. Ako je masa košuljice M_k biće:

$$\frac{\pi(D_s^2 - D_u^2)h}{4} + 2\frac{\pi D_s^2 D_s - D_u}{2} = \frac{M_k}{\rho_k} \quad (10.2)$$

Da bi šupljina cilindra odgovarala zapremini eksploziva gustine ρ_e treba da bude:

$$\frac{\pi D_u^2 h}{4} = \frac{m_e}{\rho_e} \quad (10.3)$$

gde je:

m_e - masa eksploziva

Kada se ove jednačine reše po h dobija se:

$$\left(\frac{\pi D_s^3}{4} - \frac{M_k}{\rho_k} - \frac{m_e}{\rho_k} \right) \frac{D_s}{D_u} + \frac{D_s^3 m_e}{D_u^3 \rho_e} - \frac{\pi D_s^3}{4} = 0 \quad (10.4)$$

Ako se uvrsti $K = D_s/D_u$ dobija se jednačina oblika:

$$aK^3 + bK - c = 0 \quad (10.5)$$

sa koeficijentima: $a = \frac{m_e}{\rho_e}$, $b = \frac{\pi D_s^3}{4} - \frac{M_k}{\rho_k} - \frac{m_e}{\rho_k}$, $c = \frac{\pi D_s^3}{4}$.

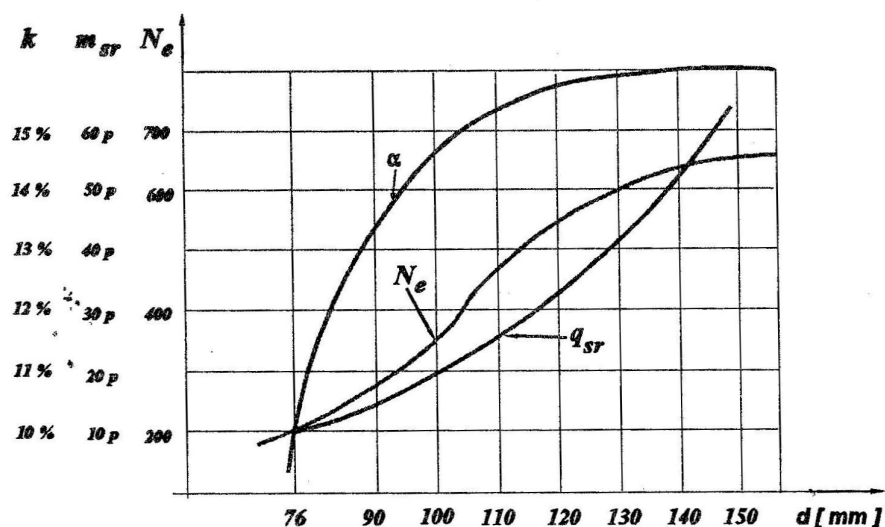
Rešavanjem jednačine (10.5) dobija se K . Za brze proračune može poslužiti dijagram koji daje zavisnosti odnosa K od koeficijenta punjenja projektila α [%]. Dijagram se može konstruisati iz poznatih vrednosti koje su:

- za $\alpha = 7\%$ $K = 1.80$
- za $\alpha = 10\%$ $K = 1.50$
- za $\alpha = 15\%$ $K = 1.40$

Vrednosti između ovih mogu se sa dovoljno tačnosti odrediti interpolacijom. Ako je poznat broj parčadi i masa metalnih delova može se izračunati srednja masa parčeta:

$$m_{sr} = \frac{M_k}{N} \quad (10.6)$$

Eksperimentalni rezultati pokazuju u većini slučajeva značajno odstupanje od vrednosti koje daje navedena formula Justrova (10.1). Na slici 10.2 predstavljeni su koeficijent $\alpha = (m_e/m) \cdot 100$, broj ekonomičnih parčadi N i srednja masa pojedinačnog ekonomičnog parčeta $m_{sr} = M_N/N$ (M_N - ukupna masa ekonomičnih parčadi) u funkciji kalibra projektila parčadno-rušecog dejstva (krive $N(d)$, $\alpha(d)$ i $m_{sr}(d)$ nastale su na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih sa savremenim artiljerijskim projektilima).

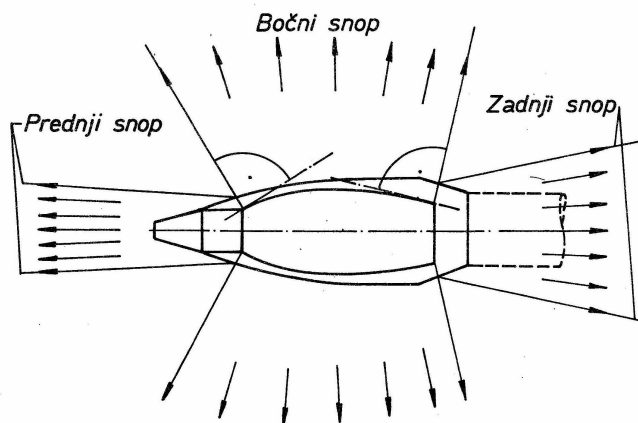


Slika 10.2. Broj parčadi, srednja masa ekonomičnog parčeta i koeficijent α u funkciji kalibra

Krive na slici 10.2 jasno pokazuju da su artiljerijski projektili parčadno-rušecog dejstva kalibra iznad 150 mm vrlo neekonomični za gađanje živih ciljeva, jer se broj ekonomičnih parčadi neznatno povećava uz istovremeni nagli porast srednje mase parčeta.

10.2.2. Izgled i pravac snopa parčadi

Kod realnog projektila klasičnog oblika sa cilindričnim delom i oživalom mogu se primetiti tri dosta jasno izražene zone u koje eksplozija usmerava najveći broj parčadi. To su (slika 10.3):



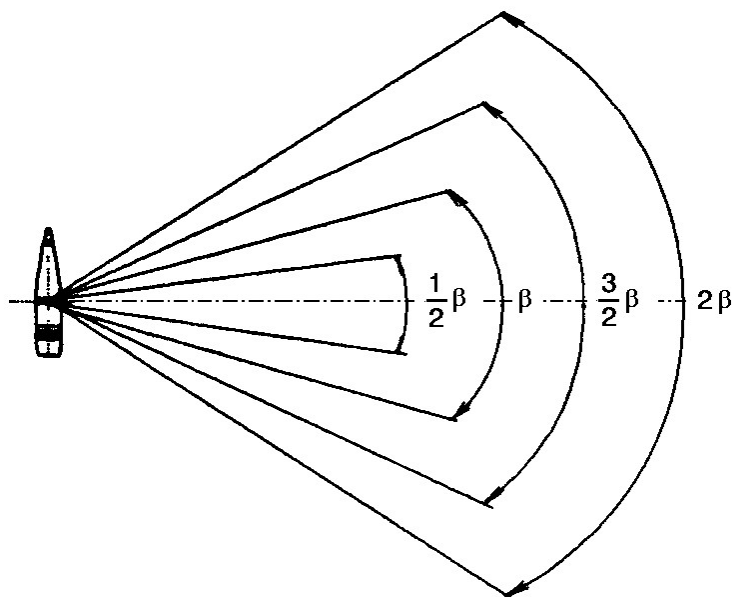
Slika 10.3. Pravci razletanja parčadi

1. **Prednji snop** u koji se usmeravaju parčad oživalnog vrha. Ova parčad su obično dosta velika, jer grlo košuljice (ispunjeno najčešće telom upaljača) praktično ne sadrži eksploziv, tj. odnos mase zida i eksploziva je vrlo nepovoljan. Osim toga, kod projektila parčadnog dejstva koji deluju na površini zemlje ova parčad obično ostaju u tlu na mestu pada projektila kod normalnih padnih uglova.

2. **Bočni snop** u koji se usmerava najveći broj parčadi projektila (70÷80)% različitih dimenzija. Ovaj snop je od najvećeg interesa za proučavanje efikasnosti.

3. **Zadnji snop** u koji se kod artiljerijskih granata usmeravaju obično loše fragmentisani delovi masivno dimenzionisanog danceta košuljice, zbog čega je i tu odnos mase eksploziva i zida nepovoljan. Kod minobacačkih projektila zadnji snop sadrži delove stabilizatora (takođe velike mase), što kvari opštu karakteristiku fragmentacije u ovom snopu, mada je ona inače povoljnija nego kod artiljerijskih projektila, zbog toga što su zidovi mine na zadnjem delu obično tanji, pa je odnos mase eksploziva i mase košuljice bolji.

Vidi se da je bočni snop od najvećeg značaja kada se procenjuje efikasnost parčadnog dejstva projektila. Budući da je deo košuljice projektila koji stvara bočni snop samo izuzetno pravilnog cilindričnog oblika i jednake debljine zida, bočni snop ima redovno izvestan ugao 2β . Ovaj ugao kod artiljerijskih projektila iznosi oko 40° . Eksperimentalno je utvrđeno da se raspored parčadi u bočnom snopu pokorava zakonu raspodele koji približno odgovara normalnoj raspodeli. Na osnovu toga izlazi da bočni snop sadrži (slika 10.4):



Slika 10.4. Raspored parčadi u bočnom snopu

- 50% parčadi unutar ugla $\beta/2$
- 82% parčadi unutar ugla β
- 96% parčadi unutar ugla $3\beta/2$
- 100% parčadi unutar ugla 2β

Fragmentacija je od primarnog značaja kod projektila čija je glavna namena uništavanje živih ciljeva na zemlji (artiljerijske granate parčadnog i parčadno-rušecog dejstva, minobacački projektili parčadnog dejstva, nevođeni raketni projektili parčadnog dejstva). Projektili parčadnog dejstva imaju veliku primenu i u gađanju vazdušnih ciljeva.

10.2.3. Ubitačan domet parčadi

Eksperimentalnim ispitivanjima je utvrđeno da je parče ubitačno ako raspolaže kinetičkom energijom od 150 J po 1 cm^2 poprečnog preseka. Pri ovoj kinetičkoj energiji parče probija zdravu i suhu topolovu dasku debljine 41 mm (ovaj podatak se koristi kod eksperimentalnog određivanja efikasnosti). Ako je poznata minimalna potrebna energija, za određivanje ubitačnog

dometa treba poznavati početnu brzinu parčadi (brzinu razletanja). Kao i broj parčadi, i početna brzina zavisi od karakteristika δ , α , C_e , zatim od vrste i mehaničkih karakteristika metala košuljice, a naročito od vrste eksplozivnog punjenja.

Brzina razletanja parčadi kao osnovni faktor efikasnosti projektila parčadnog dejstva, uvek je pobuđivala interes za teorijsku interpretaciju, tim pre što je ova brzina u najvećoj meri izraz razorne sposobnosti primenjenog eksploziva. Najveća brzina razletanja parčadi - početna brzina razletanja V određena je sledećom jednačinom:

$$\frac{MV^2}{2} + E_o + E_k + E_p + E_d = m_e Q \quad (10.7)$$

Ovde je:

- M - masa košuljice projektila
- E_o - energija koja se prenosi na okolnu sredinu (vazduh, voda, zemlja)
- E_k - kinetička energija produkata detonacije (preostala nakon ubrzavanja parčadi do brzine V)
- E_p - unutrašnja potencijalna energija produkata detonacije (preostala nakon ubrzavanja parčadi do brzine V)
- E_d - energija utrošena na plastičnu deformaciju košuljice projektila
- m_e - masa eksploziva
- Q - toplota eksplozije po jedinici mase eksploziva.

Stanjuković daje teorijski maksimalnu vrednost za brzinu V u obliku:

$$V = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{m_e}{2M}} \quad (10.8)$$

Gabeaud je pošao pri proračunu od diferencijalne jednačine kretanja jednog parčeta:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{p}{\rho_k e} \quad (10.9)$$

Ovde je:

- p - pritisak produkata detonacije u trenutku t
- ρ_k - gustina materijala košuljice projektila
- e - debljina zida košuljice, odnosno parčeta čije se kretanje razmatra

Gabeaud dakle razmatra već formirano parče, zanemarujući rad produkata detonacije utrošen na razaranje košuljice projektila, kao i druge energije. Na kraju proračuna, dolazi do sledećeg izraza za početnu brzinu razletanja:

$$V = \sqrt{\frac{2\bar{p}_0}{\rho_k} \left(1 - \frac{\delta}{100}\right) \left(1 + \frac{0.5\frac{\delta}{100}}{\frac{e}{d}}\right) \left(1 - \frac{2}{1 - \frac{\delta}{100}} \frac{e}{d}\right)} \quad (10.10)$$

Ovde je:

- \bar{p}_0 - početni pritisak u produktima trenutne detonacije
- δ - procentualno izduženje materijala košuljice koje odgovara naponu tečenja (smatra se da je faza razaranja košuljice završena upravo pri ovoj vrednosti izduženja)
- d - kalibar projektila

Ispravljaјуći određena uprošćenja koja su učinjena pri izvođenju formule Gabeauda (npr. činjenicu da se e/R_0 može zameniti odnosom e/d i razvoj izraza $(1+\delta+e/R_0)^{-2(k-1)}$ u Njutnov binom zadržavajući samo prva tri člana) dobija se konačno:

$$V = 0.224D \left(\frac{\rho_e R_0}{\rho_k e} \right)^{1/2} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\delta}{100} + \frac{e}{R_0} \right)^5} \right]^{1/2} \quad (10.11)$$

Ovde je R_0 - unutrašnji poluprečnik košuljice projektila u početnom stanju.

Lukanov i Molitz određuju brzinu razletanja parčadi iz energetskog bilansa datog u sledećem obliku:

$$\eta Q m_e = e_1 M + \frac{1}{2} (M + \varepsilon m_e) V^2 \quad (10.12)$$

Ovde je:

- η - koeficijent iskorišćenja energije eksplozivnog punjenja
- e_1 - deformaciona energija po jedinici mase košuljice
- ε - faktor kompenzacije

Iz prethodne jednačine dobija se:

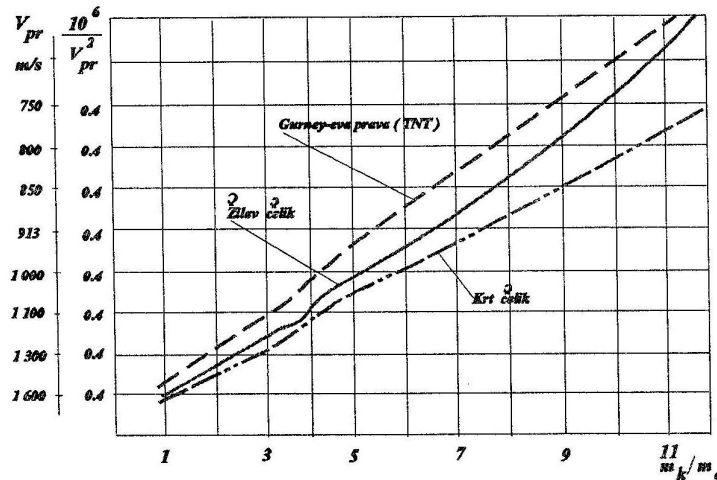
$$\frac{1}{V^2} = \frac{\frac{M}{m_e} + \varepsilon}{2\eta Q - 2e_1 \frac{M}{m_e}} = f\left(\frac{M}{m_e}\right) \quad (10.13)$$

Funkcija $f(M/m_e)$ predstavljena je na slici 10.5 za krti i žilavi čelik kada se koristi brzantni eksploziv čija je brzina detonacije 7600 m/s.

Gurney (Garni) je takođe polazeći od jednačine energetskog bilansa, ali zanemarujući energiju utrošenu na deformaciju košuljice projektila došao do jednostavnog izraza za funkciju $V=f(M/m_e)$ za slučaj cilindrične košuljice:

$$\frac{1}{V^2} = \frac{1}{2\eta Q} \left(\frac{1}{2} + \frac{M}{m_e} \right) \quad (10.14)$$

Gurney-jeva prava linija za trotil predstavljena je na slici 10.5



Slika 10.5. Promena brzine razletanja parčadi u funkciji odnosa M/m_e prema Lukanov-Molitz i Gurney-u

U tabeli 10.5 navedeni su parametri realnog haubičkog projektila 122 mm i početne brzine razletanja proračunate pomoću navedenih izraza, pri čemu je košuljica projektila zamenjena ekvivalentnom cilindričnom cevi sa srednjom debljinom zida $e=1.5$ cm. Pri izračunavanju srednje debljine zida od mase košuljice projektila oduzeta je masa dna projektila. Sa ovako redukovanom masom proračunate su brzine razletanja.

Tabela 10.5

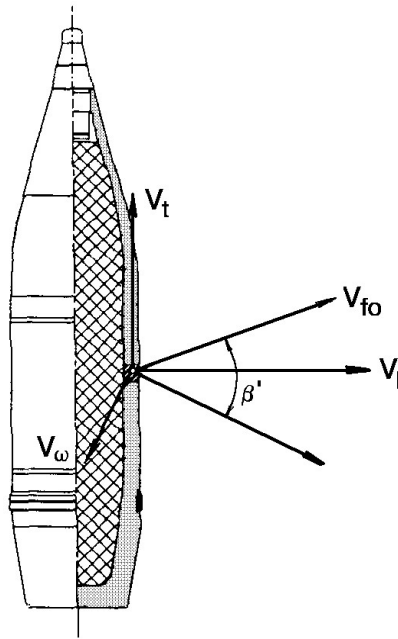
Parametri projektila 122 mm		Početna brzina razletanja parčadi [m/s]
Ukupna masa košuljice	17.9 kg	Stanjukovič (10.7) 1145
Masa košuljice bez dna	$M = 15.5$ kg	
Masa eksplozivnog punjenja TNT	$m_e = 3.5$ kg	Gabeaud (10.9) 1462
Srednja debljina zida košuljice	$e = 1.5$ cm	Modifikovani Gabeaud (10.10) $\delta = 10\%$ 1086 $\delta = 15\%$ 1104
Srednji unutrašnji poluprečnik košuljice	$R_o = 4.6$ cm	
Dužina eksplozivnog punjenja	$2 \cdot l = 39$ cm	Lukanov - Molitz (10.12), sl. 10.5 1070
Gustina eksplozivnog punjenja	$\rho_e = 1.56$ g/cm ³	Gurney (10.13), sl. 10.5 990
Brzina detonacije	$D = 6816$ m/s	
Pritisak detonacije $p_d = \rho_e D^2 / 8$	90590 bar	

Najtačnije rezultate daje izraz (10.10), koji ukazuje i na glavne faktore od kojih zavisi početna brzina razletanja parčadi razornog projektila, odnosno razorne bojeve glave raketnog projektila.

Sve navedene formule daju početnu brzinu parčadi u uslovima mirovanja projektila. Međutim, u realnim uslovima na cilju, stvarna brzina pojedinačne parčadi predstavlja rezultantu početne brzine V , translatorne brzine projektila u trenutku eksplozije V_c i obimne brzine projektila V_r (ako projektil rotira), tj. za rotirajuće projekte imamo:

$$V_p = \sqrt{V^2 + V_c^2 + V_r^2} \quad (10.15)$$

U proračunima efikasnog dometa parčadi potrebno je, prema tome, računati ne sa brzinom parčadi V već sa stvarnom početnom brzinom parčadi na cilju V_p .



Slika 10.6. Realna brzina parčadi V_p

Sa slike 10.6 je očigledno da se pravac rezultujuće brzine više ne poklapa sa normalom na unutrašnju površinu košuljice. Ugao skretanja β' pravca rezultujuće brzine prema uzdužnoj osi projektila dat je odnosom:

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{V_c}{\sqrt{V^2 + V_r^2}} \quad (10.16)$$

Usled ovog ugla β' dolazi u realnim uslovima do deformacije bočnog snopa parčadi, što ima za posledicu smanjenje efikasnosti bočnog snopa u odnosu na njegovu efikasnost za slučaj eksplozije u miru.

Za svako parče fragmentisane košuljice deluje u letu otpor vazduha koji se može izraziti jednačinom:

$$F = \frac{C_x}{2} A \rho_v V^2 \quad (10.17)$$

gde su:

- C_x - koeficijent aerodinamičkog otpora parčeta
- A - najveći poprečni presek parčeta normalno na pravac leta
- ρ_v - gustina vazduha

Jednačina kretanja parčeta je:

$$m \frac{dV}{dt} = mV \frac{dV}{dx} = -\frac{C_x}{2} A \rho_v V^2 \quad (10.18)$$

Odatle je:

$$dV = -\frac{C_x}{2} \frac{A}{m} \rho_v V dx \quad (10.19)$$

Usvajajući $C_x = \text{const.}$ (što nije tačno za podzvučnu i transsoničnu oblast leta, a za nadzvučne se može usvojiti samo približno), sledi integraljenjem od 0 do x , pri čemu je za $x=0$ $V=V_p$:

$$V = V_p \exp\left(-\frac{C_x A}{2 m} \rho_v x\right) \quad (10.20)$$

U slučaju cilindričnog fragmenta stabilizovanog rotacijom je:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (10.21)$$

gde je d - prečnik parčeta.

Međutim, za nestabilni fragment rasprsnute košuljice, najveći poprečni presek određuje se prema formuli (američka metoda):

$$A_s = \frac{1}{4} A_p \quad (10.22)$$

gde je A_p - ukupna spoljna površina fragmenta.

Za kocku dužine stranice a je:

$$A_s = \frac{1}{4} 6 a^2 = \frac{3}{2} a^2 \Rightarrow \frac{m}{A_s} = \frac{a^3 \rho}{\frac{3}{2} a^2} = \frac{2}{3} a \rho \quad (10.23)$$

Za loptu prečnika a je:

$$A_s = \frac{1}{4} 4 \pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \pi a^2 \Rightarrow \frac{m}{A_s} = \frac{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3 \rho}{\frac{1}{4} \pi a^2} = \frac{2}{3} a \rho \quad (10.24)$$

Za cilindar čija je visina h jednaka prečniku baze a:

$$A_s = \frac{1}{4} \left(2 \frac{\pi a^2}{4} + \pi a^2 \right) = \frac{3}{8} \pi a^2 \Rightarrow \frac{m}{A_s} = \frac{\pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 a \rho}{\frac{3}{8} \pi a^2} = \frac{2}{3} a \rho \quad (10.25)$$

Za jednu datu vrednost a odnos m/A_s je isti za sve tri osnovne geometrijske forme fragmenata.

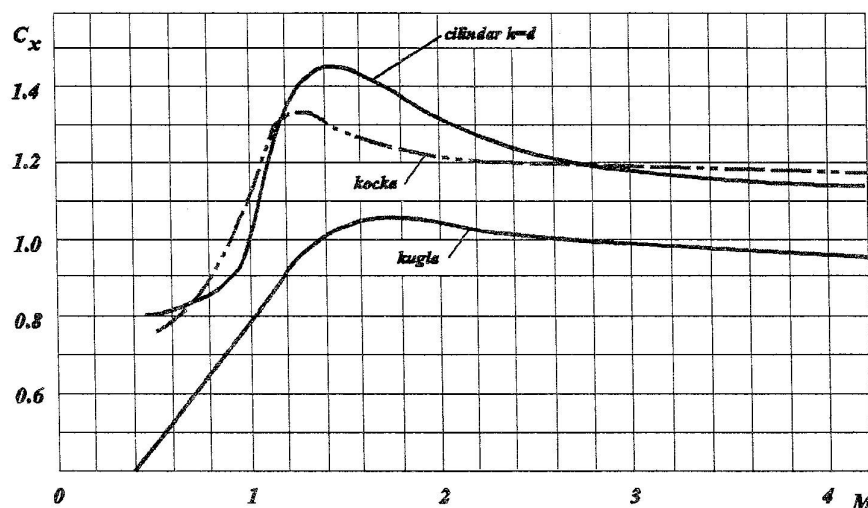
Na slici 10.7 date su zavisnosti C_x=C_x(M) za kocku, cilindar i loptu. Koeficijenti otpora parčadi oblika kocke i cilindra (h=d) se bitno ne razlikuju. Parčad oblika lopte dala su, međutim, nešto niže vrednosti C_x. Iz ovoga se može zaključiti da nema velike razlike ni u kretanju ovakvih parčadi kroz sredinu koja pruža otpor, bar što se tiče uticaja balističkog koeficijenta na to kretanje.

Što se tiče parčadi drugog oblika, za pljosnati paralelopiped dimenzija a x 2a x 2a imamo:

$$A_s = \frac{1}{4} (2a \cdot 2a + 2 \cdot 2a \cdot 2a + 2a \cdot 2a) = 4a^2 \Rightarrow \frac{m}{A_s} = \frac{a \cdot 2a \cdot 2a}{4a^2} \rho = a \rho \quad (10.26)$$

Za izduženi paralelopiped dimenzija a x a x 2a je:

$$A_s = \frac{1}{4} (2 \cdot a \cdot a + 2 \cdot a \cdot 2a + 2 \cdot a \cdot 2a) = \frac{5}{2} a^2 \Rightarrow \frac{m}{A_s} = \frac{a \cdot a \cdot 2a}{\frac{5}{2} a^2} \rho = \frac{4}{5} a \rho \quad (10.27)$$



Slika 10.7. Koeficijent otpora u funkciji Mahovog broja za nestabilisanu parčad pravilnog oblika

Gađanjima je provereno da parče izduženog oblika teži da se postavi u takav položaj gde je površina preseka normalnog na pravac kretanja najveća. Za jedan izduženi paralelopiped dobila bi se manja vrednost odnosa A/m , dok bi za pljosnati paralelopiped račun bio korektan.

Parčad slična po obliku pljosnatom paralelopipedu dobijaju se kod fragmentacije košuljica od granatnog čelika. Parčad oblika izduženog paralelopipeda mogu se ostvariti prefragmentacijom.

Ako se želi uvođenje zakona sličnosti, za parčad datog oblika, treba uvesti odnos:

$$K = \frac{m}{A_s^{3/2}}$$

i tada je:

- za loptu $K = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \rho \approx 0.78\rho$

- za cilindar $K = \frac{4\sqrt{2}}{3\pi} \rho \approx 0.60\rho$

- za kocku $K = \left(\frac{3}{2}\right)^{-3/2} \rho \approx 0.55\rho$

- za pljosnati paralelopiped ($a \times 2a \times 2a$) $K = 0.50 \rho$

- za izduženi paralelopiped ($a \times a \times 2a$) $K = 0.50 \rho$

- za veoma izduženi paralelopiped ($a \times a \times 3a$) $K = 0.46 \rho$

U SAD su izvršena ispitivanja u cilju određivanja koeficijenata otpora parčadi dobijenih fragmentacijom različitih projektila i za supersonične brzine dobijeno je:

- za parčad od čelika $C_x = 1.30$

- za parčad od livenog gvožđa $C_x = 1.25$

Jednovremeno su vršena merenja K na izvesnom broju parčadi (određivanje mase i spoljne površine svakog parčeta), što je potvrdilo postojanje zakonitosti oblika:

$$K = \frac{m}{A_s^{3/2}} \quad (10.28)$$

Za parčad od čelika ($\rho=7.8 \text{ g/cm}^3$) $K=2.61$, a za parčad od livenog gvožđa $K=3.67$. Za parčad od livenog gvožđa takođe je dobijeno: $K=2.4$ za kocku; $K=3.94$ za izduženi paralelopiped ($a \times a \times 2a$) i $K=3.57$ za veoma izduženi paralelopiped ($a \times a \times 3a$).

Ovo potvrđuje da je oblik parčadi od livenog gvožđa veoma blizak obliku kocke, dok su parčad od čelika mnogo više izdužena.

U stvarnosti, oblik parčadi nikad nije ni približno pravilan kao što je to slučaj sa parčadima na kojima su vršeni opiti pa je, kada se uzme u obzir i deformacija kao i dalje raspadanje parčadi u letu, koeficijent otpora paralelopipednog oblika je bliži vrednosti $C_X=1.6$ nego vrednostima 1.10...1.20 koje su dobijene ispitivanjem parčadi pravilnog oblika. Zbog toga je predloženo da se za praktične proračune teorijski dobijene vrednosti C_X množe sa faktorom $4/3$ i tako dovedu bliže realnosti.

Iz istih razloga za kocku ili paralelopiped pljosnatog oblika ($2a \times 2a \times a$) usvaja se:

$$K_1 = \frac{3}{4} K = 0.41\rho \quad (10.29)$$

K_1 je "faktor realnog oblika" koji pored nepravilnosti forme obuhvata i deformacije i ljušpanje slojeva ili okrnjenost uglova i ivica parčeta.

Da bi se dobio domet parčeta koji je ujedno i efikasan domet, u jednačinu (10.20) treba uvrstiti onu brzinu V pri kojoj posmatrano parče još uvek poseduje dovoljnu kinetičku energiju da izazove željeni efekat zavisno od vrste cilja. Na ovaj način može se za svako parče izračunati efikasni domet, a poznavajući broj, masu, oblik i pravce rasprostiranja parčadi može se odrediti i površina efikasnog dejstva parčadnog projektila. Ovaj vrlo složeni postupak počiva, međutim, na mnogim uopštavanjima i pretpostavkama pa se eksperimentalno utvrđena efikasnost može znatno razlikovati od one utvrđene na ovaj način. Ovim se, međutim, ne želi osporiti svaka vrednost ovakvih proračuna koji imaju svoje mesto i veoma su korisni u mnogim teorijskim razmatranjima, preliminarim proračunima i kod teorijskog upoređivanja različitih projektila.

10.3. Efikasnost i specifična efikasnost projektila parčadnog dejstva

Jedan razorni projektil je utoliko efikasniji, ukoliko je veći broj nezaštićenih ljudi onespособljen njegovim parčadima. Kada se ima u vidu izgled i pravac snopa parčadi, jasno je da efikasnost projektila zavisi od položaja i rasporeda ciljeva na tlu u odnosu na projektil u trenutku eksplozije, od padnog ugla i padne brzine projektila u trenutku eksplozije (kod razornih projektila sa udarnim upaljačem još i od dubine prodiranja u tlo pre nego što dođe do eksplozije). Zbog nemogućnosti obuhvatanja jednim opštim izrazom svih faktora od kojih zavisi stvarna efikasnost projektila u realnim uslovima primene, teorijsko razmatranje efikasnosti polazi od unapred usvojenih idealiziranih uslova iz kojih rezultira sledeća definicija:

Efikasnost projektila parčadnog dejstva predstavlja broj ciljeva pogođenih najmanje jednim ubitačnim parčetom pri eksploziji projektila postavljenog vertikalno na visini od 1 m iznad horizontalnog tla na kome su ljudi u stojećem stavu raspoređeni tako da na svakih 100 m^2 površine tla dolazi po jedan čovek licem okrenut prema projektilu.

Specifična efikasnost projektila je količnik efikasnosti i mase projektila.

Ako se sa p_x označi verovatnoća pogađanja cilja na rastojanju x , efikasnost je data izrazom:

$$E = \int_0^{\infty} \frac{2\pi p_x x dx}{100} \quad (10.30)$$

Određivanje efikasnosti, kako pokazuje izraz (10.30) predstavlja poznavanje promene verovatnoće pogađanja p_x u funkciji rastojanja x . Tačno utvrđivanje ove promene moguće je samo eksperimentalnim putem.

10.4. Mere za povećanje parčadnog efekta projektila

Na osnovu svega što je rečeno o parčadnom dejstvu očigledno je da su putevi za povećanje parčadnog dejstva sledeći:

1. povećanje početne brzine i efikasnog dometa parčadi,
2. poboljšanje fragmentacije, tj. optimalno iskorišćenje materijala košuljice na taj način da se pri rasprskavanju dobije parčad najpovoljnije veličine i oblika,
3. smanjenje gubitaka, tj. smanjenje procenta pulverizovanog materijala i nefragmentisanih delova košuljice projektila
4. kod raketnih projektila iskorišćenje u smislu parčadnog dejstva i drugih delova projektila koji stižu na cilj zajedno sa bojevom glavom.

Ako je kod neke konstrukcije nađeno optimalno rešenje za većinu opštih faktora koji utiču na fragmentaciju i parčadni efekt projektila kao što su izbor vrste eksploziva i materijala košuljice, izbor i smeštaj upaljača i rešenje procesa inicijacije eksplozivnog punjenja, mere koje se još mogu preduzeti za poboljšanje parčadnog dejstva su čisto konstruktivne prirode i odnose se podjednako na sve četiri gore navedene tačke. Te mere su:

1. prefragmentacija,
2. povećanje efektivne fragmentisane mase.

Prefragmentacija. Cilj prefragmentacije košuljice je da se pomoću posebnih konstruktivno-tehnoloških rešenja unapred odredi broj ekonomičnih parčadi, praktično podjednake mase i oblika. To se može postići na više načina, od kojih su najpoznatiji:

- spoljno ili unutrašnje narezivanje košuljice,
- izrada košuljice od prstenova ili namotavanjem čelične šipke,
- ugradnja čeličnih kuglica.

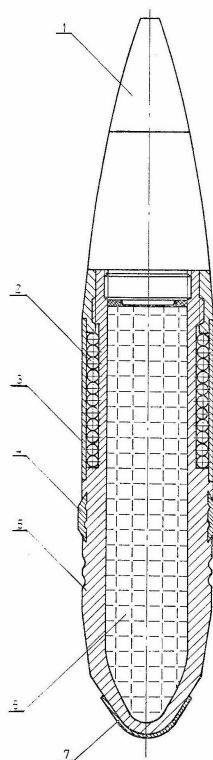
Spoljno ili unutrašnje narezivanje košuljice uzdužnim i poprečnim kanalima primenjuje se najčešće kod projektila koji u cevi i u letu ne trpe velika opterećenja (minobacački, tromblonski i neki raketni projektili parčadnog dejstva), ili kod ubojnih sredstava koja uopšte nisu izložena opterećenjima te vrste (npr. kod ručnih bombi i protivpešadijskih mina). Da bi narezivanje bilo efikasno, mora se izvesti dubokim kanalima (dubina kanala dostiže čak i preko polovine debljine košuljice). Ustanovljeno je, naime, da plitki kanali nemaju efekta zbog izvanredno velike brzine kojom se obavlja proces rasprskavanja košuljice, tako da se fragmentacija odvija kao da nema kanala. Prefragmentacija ove vrste, pored pozitivnih strana ima i izvesne nedostatke koji ograničavaju njenu primenu na mali broj razornih projektila i protivpešadijskih mina. Prefragmentacija narezivanjem povećava cenu izrade, a smanjuje otpornost košuljice projektila. Spoljno narezivanje znatno povećava aerodinamički otpor pri letu projektila, a unutrašnje narezivanje je tehnološki teško izvodljivo i skupo.

Prefragmentacija izradom košuljice od prstenova ili namotavanjem profilisane čelične šipke primenjuje se kod projektila koji nisu izloženi velikim opterećenjima, kao što su raketni projektili ili avionske bombe parčadnog dejstva. Prva metoda je vrlo efikasna, ali i skupa, i isplati se samo kod onih projektila koji su već sami po sebi skupi i zato treba da budu i izuzetno efikasni, tj. kod vođenih raketnih projektila. Izrada košuljice namotavanjem profilisane šipke je

jeftinija, ali i manje efikasna metoda. Na ovaj način su izrađena tela (košuljice) američkih avio-bombi parčadnog dejstva.

Najefikasnija metoda prefragmentacije postiže se ugradnjom čeličnih kuglica određene mase u zidove košuljice. Ova metoda je primenjena kod najnovijih projektila namenjenih za dejstvo protiv živih ciljeva na zemlji (ručne bombe, minobacački i raketni projektili parčadnog dejstva) i za dejstvo protiv ciljeva u vazduhu. Na slici 10.13 je prikazana savremena konstrukcija jednog razornog projektila sa prefragmentisanom košuljicom i blizinskim upaljačem za dejstvo protiv ciljeva u vazduhu, kod koga je parčadno dejstvo višestruko uvećano u odnosu na klasičnu konstrukciju.

- 1 - blizinski upaljač
- 2 - čelične kuglice
- 3 - obloga
- 4 - vodeći prsten
- 5 - košuljica projektila
- 6 - eksplozivno punjenje
- 7 - zaštitna pločica

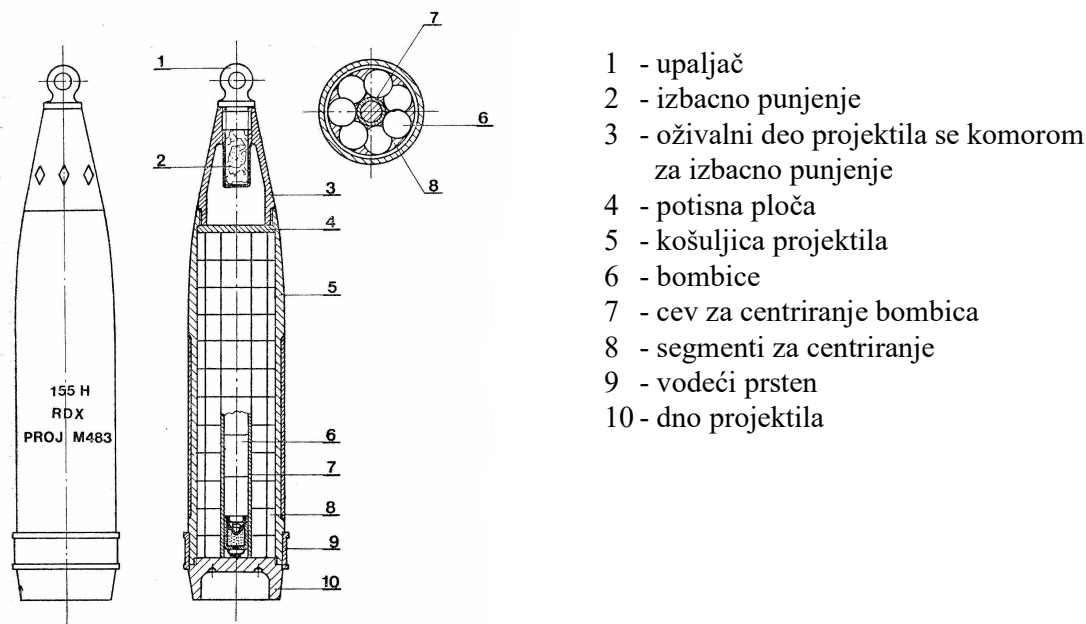


Slika 10.13. Protivavionski razorni projektil sa kuglicama

Povećanje efektivne fragmentisane mase. Ako postoji takva mogućnost, a ona se često pojavljuje kod raketnih projektila, onda je pri konstrukciji bojeve glave potrebno težiti da se što više delova projektila koji stižu na cilj iskoristi za povećanje parčadnog efekta. Kod raketnih projektila motor je jedan od elemenata koji zbog svog oblika, dimenzija i materijala pruža posebne mogućnosti u ovom pogledu. Jedna od mogućnosti da se prilikom eksplozije bojeve glave i raketni motor fragmentiše u efikasnu parčad jeste produženje eksplozivnog punjenja bojeve glave u unutrašnjost motora pomoću produžne cevi. Naravno da takvo rešenje zahteva preduzimanje mera da se produženo punjenje zaštiti od visoke temperature i pritiska u raketnom motoru.

Posebne mogućnosti za povećavanje fragmentisane mase pružaju se kod municije sa kasetnim projektilima, kod kojih se osnovni projektil ("nosač") razdvaja na optimalnoj visini iznad cilja i izbacuje subprojektile (bombice) koji padaju na zemlju, pokrivajući veliku površinu cilja, i nakon udara u zemlju rasprskavaju se i dejstvuju parčadno protiv žive sile i vatrenih sredstava. Zona dejstva takvih projektila je znatno veća u odnosu na klasični rasprskavajući projektil. Na slici 10.14 šematski je prikazan kasetni projektil 155 mm, čija je osnovna namena

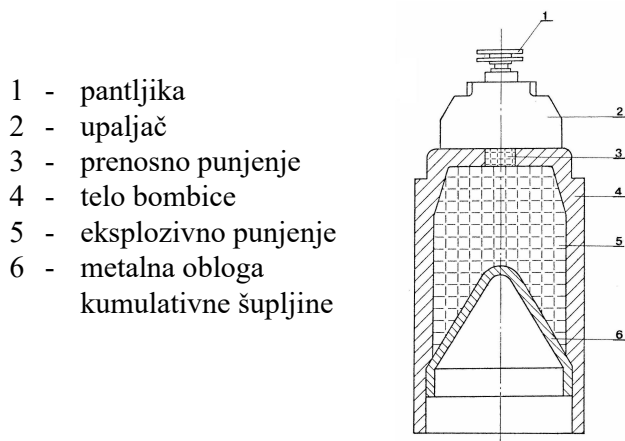
borba protiv žive sile i oklopnih sredstava. U cilindrični deo košuljice projektila simetrično je smešteno 88 bombica parčadno-kumulativnog dejstva. Projektil je snabdeven tempirnim upaljačem bez detonatora, a sa donje strane košuljica projektila je zatvorena dancetom.



Slika 10.14. Artiljerijski kasetni projektil 155 mm

Pri aktiviranju upaljača pripaljuje se izbacno punjenje koje preko potisne ploče izbacuje bombice iz košuljice projektila uz prethodno smicanje danceta. Usled rotacije projektila bombice se rasturaju i aktiviraju pri udaru u cilj.

Parčadno-kumulativne bombice (sl. 10.15) se sastoje od: udarnog upaljača, tela (košuljice) bombice, eksplozivnog punjenja i kumulativnog levka. Telo bombice je najčešće ožlebljeno sa unutrašnje strane radi programiranog parčadnog dejstva. Upaljač je osiguranog tipa. Osiguran je dok se bombice nalaze u projektilu i neposredno posle izbacivanja iz projektila (dok se pantljika ne odmota). Kod izbačenih bombica u vrtložnoj struji vazduha odvija se držač pantljike na upaljaču.



Slika 10.15. Parčadno-kumulativna bombica

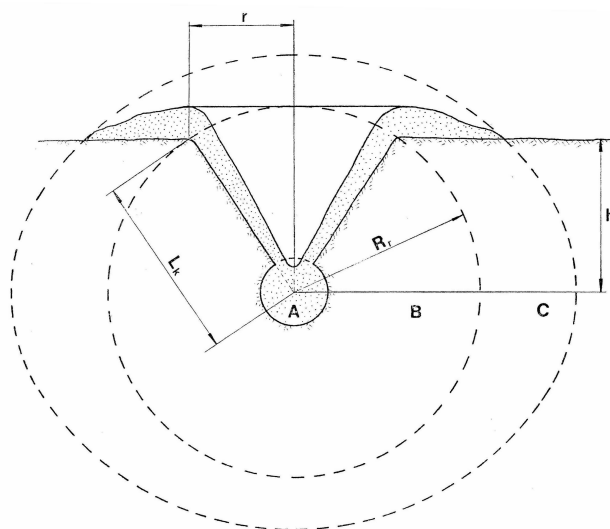
U toku daljeg pada bombica rotira, a pantljika usled otpora zaostaje u rotaciji i odvrće udarnu iglu. Odvrtanjem udarne igle oslobađa se nosač kapisle koji usled centrifugalne sile dovodi kapslu u pravac udarne igle.

10.5. Rušeće dejstvo

Rušeće dejstvo razornih eksploziva proističe iz rušecćeg dejstva eksplozivnog punjenja smeštenog u košuljici projektila. Zahvaljujući izuzetno visokom pritisku gasovitih produkata eksplozivne reakcije dolazi do njihovog naglog širenja koje je praćeno rušenjem okolne sredine.

Sa praktičnog stanovišta najveći značaj ima rušeće dejstvo projektila posle udara i prodiranja u prepreku - odbrambeno utvrđenje. Osnovna pretpostavka efikasnog rušecćeg dejstva je optimalna dubina prodiranja u prepreku koju treba razrušiti. Vreme koje protekne od momenta susreta sa ciljem do eksplozije projektila zavisi od karakteristika upaljača. Ako se želi rušeće dejstvo, razorni projektil mora biti snabdeven upaljačem udarnog ili udarno-inercionog tipa sa usporenjem. Podešavanjem upaljača reguliše se vreme njegovog reagovanja: podešen na inerciono dejstvo upaljač aktivira eksplozivno punjenje nekoliko milisekundi nakon udara u cilj; upaljač podešen na usporeno dejstvo aktivira eksplozivno punjenje nakon isteka vremena koje diktira usporač.

Pri eksploziji projektila u tlu, nakon izvesnog prodiranja, rušeće dejstvo se manifestuje izbacivanjem materijala tla u pravcu najmanjeg otpora, pri čemu na mestu eksplozije ostaje krater (levak) šematski predstavljen na slici 10.16. Kvantitativna ocena rušecćeg dejstva donosi se na osnovu dimenzija kratera.



Slika 10.16. Krater na tlu kao posledica rušecćeg dejstva projektila
A - zona sabijanja, B - zona rušenja, C - zona rastresanja

Kako su projektili rušecćeg dejstva namenjeni za dejstvo protiv utvrđenih ciljeva vrlo različite prirode i otpornosti, to se na osnovu dimenzija i izgleda kratera na horizontalnom tlu donosi sud o efikasnosti rušecćeg dejstva projektila, nezavisno od prirode i izdržljivosti stvarnog mogućeg cilja. Na ovaj način se znatno uprošćava analiza rušecćeg dejstva i sistematizacija eksperimentalnih rezultata.

U sredini u kojoj dejstvuje razorni projektil gasovitim produktima eksplozije razlikuju se tri zone: zona sabijanja, zona rušenja i zona rastresanja. Sredina u zoni sabijanja je razbijena i

njene su čestice istisnute van zone. Zonu rušenja karakteriše kidanje veze između čestica sredine. U zoni rastresanja udarni talas izaziva samo talasno (oscilatorno) kretanje sredine, bez narušavanja veze između čestica sredine.

Zona sabijanja obuhvata malu zapreminu neposredno oko projektila koji eksplodira i zbog toga nema poseban praktičan značaj. Sa praktičnog stanovišta najveći značaj ima zona rušenja čiji se radijus može približno odrediti pomoću formule:

$$R_r = k_r \sqrt[3]{m_e} \quad [m] \quad (10.36)$$

Ovde je:

- k_r - koeficijent koji karakteriše sredinu (vrednosti date u tabeli 10.7)
- m_e - masa eksplozivnog punjenja [kg]

Tabela 10.7

Sredina	k_r
rastresita zemlja	1.40
ledina	1.07
pesak	1.0 ÷ 1.04
glina sa peskom	0.96
krečnjak i pešćanik	0.92

Zona rastresanja nema praktičnog uticaja kod rušenja odbrambenih utvrđenja zbog njihove velike izdržljivosti. Ova zona igra značajnu ulogu u rušenju gradskih postrojenja pri upotrebi projektila velikog kalibra.