

**UNIVERZITET U SARAJEVU
MAŠINSKI FAKULTET U SARAJEVU
Katedra za odbrambene tehnologije**

***BOJEVE GLAVE SA KUMULATIVNIM EFEKTOM
(HEAT)***

- Diplomski rad -

**Kandidat:
Ćatović Alan**

Sarajevo, april, 2003. godine

SADRŽAJ

I POGLAVLJE – Uvodna razmatranja

Uvod	1
Historijski prikaz razvoja kumulativnih bojevih glava (HEAT)	3

II POGLAVLJE – Problem istraživanja i savremene tehnologije

Problem istraživanja	8
Vrste oklopnih čelika	9
Savremeni kumulativni projektili	13

III POGLAVLJE - Fizikalni i matematički modeli

Uvod	17
Teorija Birkhofa.....	18
PER teorija.....	22
Generalizacija modela formiranja kumulativnog mlaza	31

IV POGLAVLJE – Model prekida mlaza

Uvod	34
Chou – Carleone model	34

V POGLAVLJE - Modeli penetracije kumulativnog mlaza

Uvod	37
Probojnost kumulativnog mlaza	37
Model penetracije kumulativnog mlaza sa promjenljivom brzinom	41

VI POGLAVLJE – Parametri kumulativnog punjenja

Kumulativni lijevak	45
Eksplozivno punjenje.....	48
Detonator	51
Mehanizam za aktiviranje.....	53
Košuljica projektila.....	54
Standoff distanca	54
Rotacija projektila.....	55
Karakteristike prepreke	55
Temperatura kumulativnog mlaza	56

VII POGLAVLJE - Metode ispitivanja kumulativnih bojevih glava

Homogena meta	58
Jednostruka NATO meta	58
Dvostruka NATO meta	59
Trostruka NATO meta	59

ZAKLJUČAK

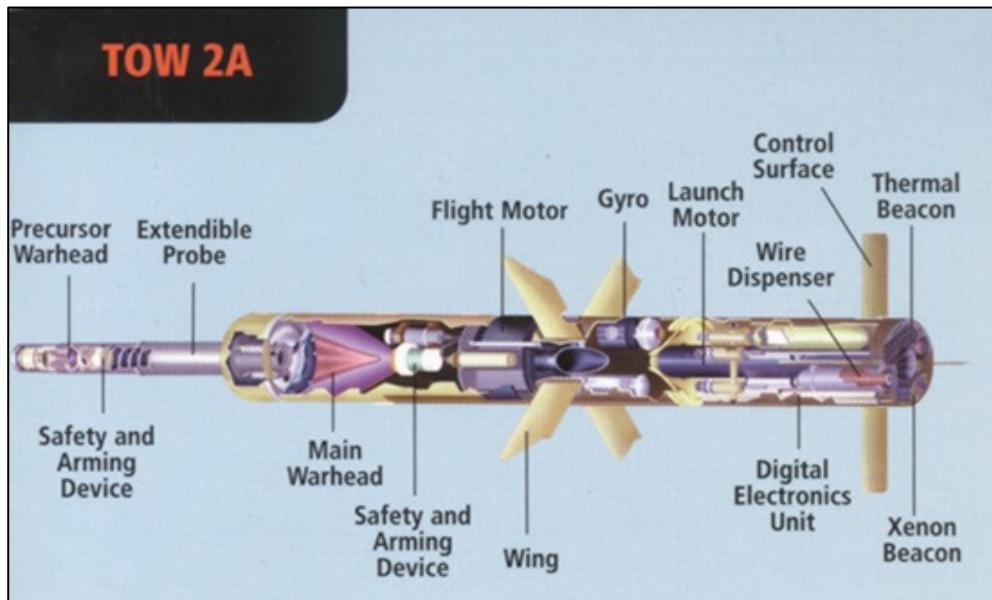
REFERENCE

I POGLAVLJE

1) Uvod

Bojeva glava je opšte prihvaćen termin koji uključuje sve tipove projektila, kao što su: parčadni, rušeći, zapaljivi, dimni, svjetleći, fugasni, biološki, nuklearni. Kumulativne (lat. cumulus-gomila, hrpa, gomilanje) bojeve glave, zahvaljujući izvjesnim konstrukcionim karakteristikama, predstavljaju poseban oblik bojevih glava. Dejstvo eksplozije ovog punjenja je u prostoru orijentisano u unaprijed izabranom pravcu. U pitanju je, dakle, dirigovana i usmjerena eksplozija. Detonacija eksplozivnog punjenja koje čini osnovni dio kumulativne bojeve glave se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili hemijske pretvorbe sistema, uz prelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. [4]

Rad koji izvrši eksplozija rezultat je naglog širenja plinova ili gasova, neovisno o tome jesu li oni postojali prije ili su nastali tijekom eksplozije. Najvažnije obilježje eksplozije jest nagli skok pritiska u sredini koja neposredno okružuje mjesto eksplozije. To je ujedno i uzrok snažnog razornog djelovanja eksplozije. Engleski akronim za ovaj tip streljiva je HEAT, što je skraćenica od High Explosive Anti Tank. [1]



Sl. 1. Osnovne komponente moderne (tandem) kumulativne bojeve glave

Ako se na jednu čeličnu ploču postavi cilindrično eksplozivno punjenje, a zatim dovede do detonacije iniciranjem sa gornje slobodne strane, na ploči poslije dejstva detonacije ostaje neznatno udubljenje čija površina odgovara površini nalijeganja eksplozivnog punjenja. Ako, međutim, na čeonoj strani kojom naliježe na čeličnu ploču, eksplozivno punjenje ima konusnu šupljinu, poslije 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 metalom.

Najveći efekat u čeličnoj ploči postiže se ako je eksplozivno punjenje sa konusnom šupljinom obloženom metalnom oblogom postavljeno na izvjesnom rastojanju od ploče. Ovaj fenomen poznat je još kao Monroeov efekat (SAD i Velika Britanija), ili kao von Foersterov ili Neumannov efekat (Evropa), u spomen na njegove pronalazače. [5]

Šupljina u eksplozivnom punjenju, obložena metalnim lijevkom, može biti oblika polulopte, konusa, elipsoida, parabole. Ona omogućava fokusiranje energije detonacionog procesa nastalog iniciranjem eksplozivnog punjenja na suprotnoj strani. Fokusiranje detonacionih produkata stvara snažnu lokalizovanu silu. Ako je usmjerena prema metalnoj ploči, ova koncentrisana sila sposobna je napraviti krater veće dubine nego u slučaju sa cilindričnim eksplozivnim punjenjem.

Kada je šupljina eksplozivnog punjenja obložena tankom metalnom oblogom, tzv. kumulativnim lijevkom, tada se, uz uvjet da su ispunjeni određeni uvjeti vezani za geometriju, svojstva eksplozivnog punjenja i kumulativnog lijevka, pri detonaciji eksplozivnog punjenja od metalne obloge može stvoriti tzv. kumulativni mlaz. Naime, nakon inicijacije eksplozivnog punjenja, kroz eksploziv počinje prostiranje detonacijskog talasa brzinom detonacije dotičnog eksploziva.

Najlaskom fronte detonacionog talasa na kumulativni lijevak, materijal lijevka biva podvrgnut snažnom pritisku (10-40 GPa) i počinje se kretati – urušavati prema osi simetrije lijevka, sudarajući se na njoj. Taj sudar, zbog golemog pritiska, rezultira kretanjem materijala lijevka duž ose simetrije u kumulativni mlaz. Kako vrijednost detonacionog pritiska znatno premašuje graničnu čvrstoću materijala lijevka, on se ponaša poput tečnog, nestišljivog fluida. Materijal lijevka se urušava postupno, od vrha prema bazi. Pri tome se od jednog dijela materijala lijevka formira primarni kumulativni mlaz (čija brzina može premašivati 10 km/s), a od drgog dijela kompaktan masivni i sporiji dio – sekundarni mlaz koji prati i predstavlja neku vrstu rezervoara za primarni mlaz.

Mehanizam stvaranja kumulativnog mlaza ovisi o geometriji i vrsti materijala kumulativnog lijevka, vrsti i osobinama vanjske košuljice eksplozivnog punjenja, vrsti eksploziva, načinu iniciranja kumulativnog punjenja, rotaciji projektila. Isto tako, za reproducibilnost i postizanje optimalnih performansi nužna je velika aksijalna preciznost u izradi lijevka [4].

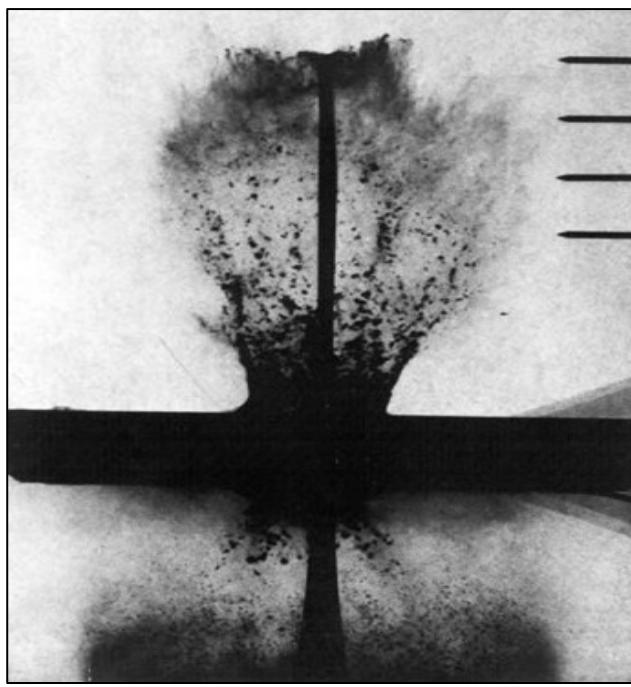
Osnovne praktične odnose vezane za parametre kumulativnog mlaza utvrdio Evans još 1959. Prema njemu, brzina primarnog mlaza je reda veličine brzine detonacije upotrijebljenog eksploziva. Distribucija brzine pojedinih dijelova mlaza skoro je linearna funkcija – najviša je na čelu mlaza, a potom opada prema kraju mlaza do vrijednosti od oko 1/4 brzine detonacije. Brzina sekundarnog dijela mlaza je 1/10 vrijednosti brzine primarnog mlaza. Probijajuće dejstvo bojevih glava s kumulativnim efektom povećava se ako postoji određena udaljenost (tzv. standoff distanca) između osnove lijevka bojeve glave i mete prilikom iniciranja eksplozivnog punjenja. Optimalna udaljenost iznosi 2 – 5 kalibara projektila. Ovi odnosi samo su načelni i vrijede za kumulativni lijevak konusne geometrije, srednjih vrijednosti ugla konusa. [3]

Hidrodinamička teorija stvaranja kumulativnog mlaza pojavila se već 1943. godine (Birkhoff, Taylor, Scardin, Schumann i dr.). Prema njima, probojna sposobnost kumulativnog mlaza je rezultat ili fokusiranja produkata detonacije, ili stvaranja mnoštva udarnih valova koji se međusobno superponiraju, ili raspada materijala lijevka, ili neka kombinacija svih navedenih djelovanja, uključujući i teoriju po kojoj mlazovi plina (detonacijskih produkata) prodire kroz metalni lijevak odnoseći dijelove koji nastaju trganjem i erozijom materijala lijevka. Primjenom radiografske tehnike u ovom području omogućena je i eksperimentalna provjera mehanizma nastajanja kumulativnog mlaza. Pri tome su prvi eksperimenti pokazali neutemeljenost dotadašnjih teorija stvaranja kumulativnog mlaza. [4]

2) Historijski prikaz razvoja kumulativnih bojevih glava (HEAT)

Uz historiju kumulativnog efekta vezano je dosta kontroverzi. Inžinjer rударства, Franz von Baader (1792) navodno je napisao da se može fokusirati velika energija eksploziva na malo područje oblikujući šupljine određenih oblika u eksplozivnom punjenju. Lenz [20] je naveo da Baader spominje da ako se izbuše udubljenja u eksplozivu, i okrenu prema čeličnoj ploči, detonacija eksploziva uzrokuje pojavu sličnih udubljenja na ploči. Ova pojava poznata je kao graviranje eksplozivom. Kennedy [21] prezentira dodatne informacije o životu Baadera i njegovoj verziji historije kumulativnog efekta. Originalni Baaderov rad međutim, prvenstveno obrađuje bušenje rupa i različite uticajne oblike eksplozivnih punjenja, pozicioniranje malih zračnih udubljenja između punjenja i stijena, kao i fragmentaciju stijena. Njegov originalni rad nije sadržavao diskusije o eksplozivnom graviranju ili kumulativnom efektu. Von Baader je koristio crni barut koji ne može detonirati i razviti udarni talas u svojim eksperimentima. Kumulativna punjenja bilo je moguće proučavati tek nakon što je Alfred Nobel patentirao detonatorsku kapisu, 1867. godine. Eksplozivni impuls nastao u kapislama mogao se sada prenositi neometano kroz eksplozivnu materiju. Ovaj proces dobio je naziv detonacija brizantnih eksploziva. [3]

Smatra se da je prvi eksperiment sa kumulativnim efektom, koristeći brizantne eksplozivne materije, izveo Max Foerster, 1883. godine. On je govorio nešto više o eksplozivnom graviranju, pa ga zato neki autori ne smatraju kao pronalazača kumulativnog efekta. Međutim, Kennedy [21] i Freiwald [22] dajući detaljniju analizu njegovih dostignuća zaključuju da je on istinski pronalazač modernog kumulativnog efekta. [3]



Sl. 2. Probijanje prepreke kumulativnim mlazom

Kumulativni efekat, tačnije uticaj šupljine u eksplozivnom punjenju na probognost, detaljnije je proučavao Charles E. Munroe, 1888. godine, u bazi Naval Torpedo Station (Newport, Rhode Island). On je detonirao blokove eksploziva koji su bili kontaktu sa čeličnim pločama. Eksplozivno punjenje imalo je inicijale U.S.N. (United States Navy), ispisane na punjenju, suprotno od tačke inicijacije. Munroe je primjetio da

kada se formira odubljenje u bloku eksploziva, suprotno od tačke inicijacije, penetracija, ili dubina kratera u meti se povećava. Drugim riječima, dublji krateri mogu biti formirani u čeličnom bloku koristeći manju masu eksploziva. Jedan od prvih kumulativnih punjenja (ili možda čak i prvo kumulativno punjenje) napravio je upravo Munroe. Punjenje se sastojalo od tanke limenke sa štapićima dinamita spojenih oko limenke, sa otvorenim donjim krajem limenke. To je punjenje korišteno za probijanje čeličnog sefa. [3]

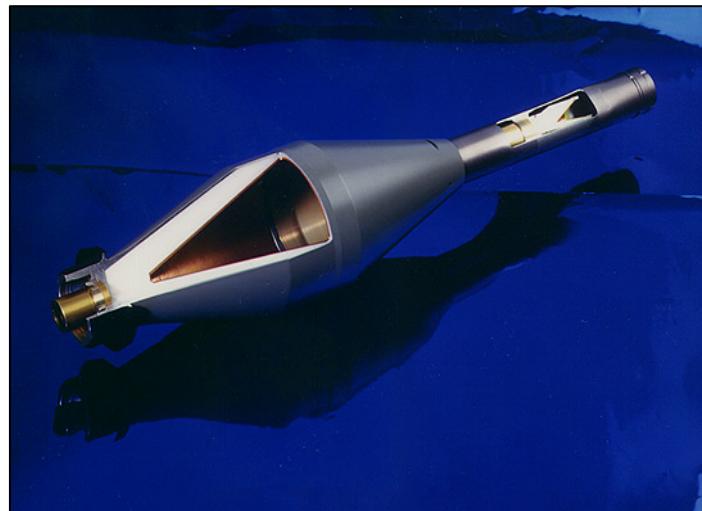
Prva Njemačka istraživanja kumulativnog efekta su počela 1911. godine u istraživačkom centru WASAG (Westfälische Analitische Sprengstoff Aktien Gesellschaft). M. Neumann 1911. godine pokazuje veću penetraciju u čeličnu ploču sa cilindričnim komadom eksploziva koji je imao šuplje konusno udubljenje sa jedne strane (247g TNT) nego sa eksplozivnim punjenjem u obliku punog cilindra (310g TNT). Ovo jasno ilustruje ono što je u Americi i Velikoj Britaniji poznato kao Monroeov efekat, a u Njemačkoj kao Neumannov efekat. Dubina kratera u meti može se povećati obezbjeđujući optimalnu distancu eksplozivnog punjenja od mete, tzv. standoff distancu.

Ovaj efekat je 1941. godine, takođe, istraživan u Njemačkoj gdje su vršene usporedbe kumulativnog efekta sa i bez kumulativnog lijevka. Punjenja su detonirana na određenoj udaljenosti iznad oklopne ploče. Meta je bila od oklopног čelika koji se upotrebljavao za brodove, a eksploziv mješavina TNT-Cyclonit (50:50). Udubljenje u punjenju bilo je oblika polulopte sa cilindričnim završetkom na dnu jednakom jednoj polovini prečnika udubljenja (D). Kumulativni lijevak bio je od željeza. Konture eksploziva bile su iste geometrije kao i udubljenje, a debљina eksploziva bila je $0,15D$. Za punjenja bez lijevka (obloge) probognost prepreke iznosila je $P = 0,4D$, na nultom standoff rastojanju. Za punjenja sa lijevkom penetracija je bila $P = 0,7D$ na nultom standoff rastojanju i $P = 1,2D$ za standoff rastojanja između $0,5D$ i $1,5D$. Za punjenja sa lijevkom od željeza, D predstavlja unutrašnji prečnik lijevka. Ovi rezultati jasno pokazuju relativno povećanje performansi punjenja uz primjenu lijevka i standoff distance [3]. Kennedy [21] opisuje slične studije koje datiraju iz 1913., pa do ranih 1930-tih, vezane za kumulativni efekat u miniranju i detonatorskim sistemima.

Drugi, prije svega Baum [23] i Rollings [21] navode da je veoma veliki doprinos razvoju kumulativnog efekta dao Sukharevskii. Zaista, Sukharevskii je bio prvi Rus koji je istraživao ovaj efekat. Prve italijanske rade o kumulativnom efektu objavio je Lodati. Navodno je Schardin [25] razmatrao njegove rade i zaključio da Lodati nije pronašao ništa novo vezano za kumulativni efekat što prije nije bilo poznato. Razvoj ove oblasti u Velikoj Britaniji započeo je Kline [26]. Eather i Griffits [27] pišu o historiji zasluga Velike Britanije na polju kumulativnog efekta koja uključuje dostignuća Evansa, Ubbelohda, Taylora, Tucka, Motta, Hilla, Packa i ostalih. Marshall [28] sugestira da je Munroe pronalazač kumulativnog efekta. U SAD-u velike su bile zasluge Watsona [29]. On je pročavao udarne upaljače, a Wood fragmentaciona svojstva hemisferičnih diskova (tzv. balistički diskovi). Između 1935. i 1950. godine dolazi do naglog razvoja na polju proučavanja kumulativnog efekta, naročito tokom II svjetskog rata (kumulativni sistemi kao što su Bazooka, Panzerfaust i drugi).

Smatra se da su pronalazači modernog kumulativnog efekta Franz Rudolf Thomanek za Njemačku i Henry Hans Mohaupt za Veliku Britaniju i SAD. Thomanek i Mohapt su, neovisno jedan o drugom, razvili moderan kumulativni sistem i napravili prvi učinkoviti penetrator na bazi šupljeg eksplozivnog punjenja sa lijevkom. Thomanekovi rade dati rade iz 1935-1939. Thomanek i von Hutter [30] patentirali su aplikacije koje se odnose na mješavine raznih eksploziva u kumulativnom sistemu, aditive, tehnike livenja brizantnih eksploziva, dizajn prednjeg dijela projektila, oruđa koja se ispaljuju sa ramena, itd. Mohaupt [31], neovisno od Thomaneka, razvija i predstavlja koncept kumulativnog efekta. On je, koristeći eksplozivna punjenja sa metalnom oblogom, dizajnirao sisteme puščanih projektila, minobacača,

kao i artiljerijskih projektila od 100mm. Ovi sistemi testirani su u Swiss Army Proving Ground, u Thunu, gdje je bila njegova laboratorijska instalacija, i u French Naval Artilery Proving Ground, u Gavru. Rezultati su takođe retestirani u Velikoj Britaniji koja je nakon toga započela ubrzani razvoj ove vrste naoružanja. Početkom II svjetskog rata francuska vlada odobrila je SAD-u da preuzme radove od Mohaupta i 1940. godine sprovedeni su testovi u APG-u (Aberden Proving Ground). SAD se prihvatile program, klasifikovale ga, i počeli su sa proizvodnjom HEAT (High Explosive Anti Tank) projektila od 60mm, a kasnije i HEAT artiljerijskih projektila od 75mm i 105mm. Kasnije je projektil od 60mm modifikovan ugradnjom raketnog motora i lansera koji se ispaljivao sa ramena, i tako je nastao sistem Bazooka. Bazooka je prvi put upotrijebila Velika Britanija 1941. u Sjevernoj Africi. Drugi HEAT projektili su ispaljivani iz haubica koje su bile montirane na tenkove. Projektil Bazooka dobio je ime po vrsti trombona, muzičkog instrumenta, popularnog u to vrijeme. [3]



Sl. 3. Savremena bojeva glava (Panzerfaust)

Njemački razvoj bojevih glava sa kumulativnim efektom (HEAT) nastavlja se tokom II svjetskog rata. Simon je došao u Njemačku pred kraj II svjetskog rata da bi proučavao njihovu tehnologiju. On izvještava o studijama sa X-zracima koje uključuju eksperimente o kolapsu kumulativnog lijevka i poluloptastim lijevcima. Proučavani su i drugi oblici lijevaka, prije svega oni u obliku šljema, u obliku boce i elipsoidalni. Simon navodi, takođe, da su varirani različiti uglovi za konusne lijevke, različite debljine zidova i različite standoff distance. Nijemci su zaključili da je mješavina heksogena (RDX) i trinitrotoluena (TNT) nazvana cyclotol, u omjeru 60:40, optimalno eksplozivno punjenje za kumulativne projektile, i da aluminizirani eksplozivi ne pružaju nikakve dodatne prednosti, kako se do tada mislilo. Materijali obloge (lijevka) koji su proučavani bili su čelik, sinterovano željezo, bakar, aluminijum i cink. Zaključeno je da bakar predstavlja optimalan materijal za obloge, međutim, zbog nedostatka bakra u Njemačkoj, upotrebljavani je cink. Ove studije u velikoj mjeri doprinijele su kasnijem razvoju kumulativnih projektila [3].

Schumann [32], takođe u Njemačkoj, proučava efekte standoff distance, eksplozivna sočiva, oblikovanje talasa i hemisferične lijevke. On zaključuje da je hemisfera (polulopta) učinkovit geometrijski oblik lijevka (tačnije, polulopta sa cilindričnim završetkom na dnu). Wagner diskutuje o SHL-u (Schwere Hohlladung ili teško kumulativno punjenje). SHL 500 je kumulativno punjenje sa prečnikom od 500 mm koje se upotrebljavalo protiv lakih brodova. SHL 1000 je poboljšani sistem SHL 500. Najveće SHL punjenje nazvano je Beethoven i prečnik mu je bio 1800 mm, a u njega je bilo smješteno 500 kg

eksploziva. Beethoven je bio dizajniran za upotrebu protiv brodova i kopnenih utvrđenja. Tokom invazije na Normandiju, Beethoven je uništoio dva borbena i četiri velika transportna broda. Upravo Beethoven je prethodnik modernih projektila Mistel I i Mistel II.

Nijemci do 1942. nisu razmijenjivali svoje studije i proučavanja o kumulativnom efektu sa Japanom, no u maju, 1942., dva njemačka oficira Paul Niemueller i Walter Merkel susreli su se sa japanskim časnicima Yoshitakom i Kobayashijem. Tom prilikom Nijemci su prenijeli Japancima svoja iskustva i znanja iz oblasti kumulativnog efekta. Kumulativna punjenja su prezentirana kao vojna tajna i važan projekat, a Nijemci i Japanci su nastavili sa razmijenom informacija o ovoj oblasti sve do njihove kapitulacije 1945. Nakon tog susreta Japanci su nastavili sopstveni razvoj kumulativnih projektila. Nijemci su dostavili Japancima dva kumulativna projektila, Panzerfaust i Mistel. Iz Mistela su Japanci razvili vlastite projektile Sakura I i II, koji su osobito korišteni za avione – kamikaze, tokom njihovih napada na američke brodove. Zahvaljujući municiji koju su zarobili od saveznika (SAD i Velika Britanija prvenstveno), kao i projektilima koje su dobili od Nijemaca, Japanci su postigli značajan napredak u razvoju kumulativnih bojevih glava. Njihova istraživanja uključivala su proučavanja brzine kumulativnog mlaza kod punjenja sa oblogom, studije zavisnosti penetracije od standoff distance, različite geometrije obloge, razne vrste materijala za kumulativne lijevke (meki čelik, bakar, aluminijum, cink, azbest, kalaj, i papir), ponašanje mlaza u pijesku, kao i dinamičke efekte. [3]

Japanci su preferirali laminarne lijevke (tri do sedam slojeva), preko jednog homogenog, iste debljine. Takođe su zaključili da je poželjno napraviti loptasti završetak na vrhu konusnog lijevka, a koristili su i poluloptaste lijevke. Optimalan ugao konusnog vrha za Japance bio je između 35° i 50° . Oni su razvili i torpeda, od 460mm i 530mm, u kojima je bilo kumulativno punjenje sa konusnom oblogom čiji je ugao vrha iznosio 45° . Futagami je testirao dvodimenzionalna punjenja, tj. ravna punjenja, u obliku diska, smještena između dvije olovne ploče. Ovakvi testovi vršeni su da bi se procjenio uticaj različitih geometrija obloge na ugao vrha konusa. Futagami je, takođe, proučavao bimetalne obloge od mekog željeza i bakra (željezo je u kontaktu sa brizantnim eksplozivom). [3]

Velika Britanija, takođe, tokom II svjetskog rata vrši eksperimente na ovom polju. Evans, Ubbeholde, Lennard-Jones, Devonshire i Andrew proučavaju bojeve glave sa kumulativnim efektom. Oni najviše rade na metalnim oblogama od kadmijuma i čelika. U SAD-u je zanimljiva historija kumulativnih sistema tokom II svjetskog rata. Najzanimljivija inovacija je Bangalor torpedo. Bangalor je duga cijev od čelika, ispunjena eksplozivom. To je, ustvari, cijev-bomba. Ovaj sistem napravljen je blizu mjesta Bangalore, u Indiji, po čemu je dobio i ime, a bangalor torpeda su korištena kod uklanjanja žičanih prepreka, čišćenja minskih polja i ubacivanje kumulativnih punjenja u otvore i utvrđenja. [3]

Princip kumulativnog efekta objašnjen je detaljnije tek nakon pojave pionirskih radova sa X-zracima u SAD-u [33]. Schardin i Thomer [35] objavili su odlične rentgenske slike kolapsa kumulativnih punjenja sa hemisferičnim lijevkom.

Linschitz i Paul [36] eksperimentalno proučavaju konusne obloge na kumulativnom punjenju u različitim fazama kolapsa. Nitrogvanidin različitih gustina korišten je kao eksplozivno punjenje da bi se postigao parcijalni kolaps lijevka. Rezultati su pokazali odlično slaganje sa rezultatima dobijenim snimanjem X-zracima. Birkhof je 1943. godine, zahvaljujući analizi X-zrakama i studijama o parcijalnom urušavanju lijevka, napravio analitičke modele za kolaps. [3]

Teorija kumulativnog efekta nastavila se razvijati tokom 1950-tih, naročito zahvaljujući ratu u Koreji. Tokom ovog perioda došlo je do velikog napretka u razumijevanju fenomena kumulativnog mlaza.

Poboljšane tehnologije snimanja X-zracima doprinijele se razvoju tačnijih analitičkih modela. Uloženi su napor i u poboljšanje već postojećih lijevaka, u korištenje manjih devijatora detonacije, kompenzaciju rotacije projektila, i ukupno poboljšanje komponenti kumulativnih sistema.

Tokom 1960-tih dolazi do modernizacije eksperimentalnih tehnika (ultrabrze kamere, savremeni rentgenski aparati) što dovodi do osjetnijeg poboljšanja razumijevanja sistema kumulativnih projektila. Zamjena TNT-a sa B kompozicijom (TNT-RDX), Oktolom i LX-14 eksplozivom dovodi do povećanja probojnosti kumulativnih projektila. [3]



Sl. 4. Kumulativni projektili TOW

Intenzivna eksperimentalna istraživanja kumulativnog efekta obavljena tokom II svjetskog rata još sistematičnije su nastavljena u poslijeratnom periodu. Teorijska obrada kumulativnog efekta postaje sve šira, dublja i pouzdanija, što omogućava stalni, vrlo uočljiv napredak u povećanju efikasnosti tehničkih rješenja. Na primjer, protiv-oklopni projektili sa kumulativnim punjenjem na kraju II svjetskog rata imali su probojnost koja nije prelazila vrijednost 1.2 kalibra eksplozivnog punjenja; krajem 50-tih godina rješenja u operativnoj upotrebni imaju probojnost od 3 kalibra eksplozivnog punjenja, početkom 80-tih 5 kalibara, a početkom devedesetih čak do 8 kalibara. Prema najnovijim podacima, ostvarena je probojnost od 10 kalibara, u laboratorijskim uslovima [5]. Zahvaljujući numeričkim metodama koje se neprestano razvijaju sada smo u stanju simulirati i analitički opisati sve procese koje se dešavaju, od trenutka inicijacije, preko kolapsa metalnih lijevaka, do procesa formiranja kumulativnog mlaza i probijanja prepreke (mete). [3]

II POGLAVLJE

1) Problem istraživanja

Kumulativne bojeve glave koriste se za probijanje prepreke. Vojne prepreke mogu biti oklopna vozila, bunkeri, betonska utvrđenja. Moguća je i primjena protiv aviona i helikoptera. Primjena ovih bojevih glava u vodenim sredinama ograničena je potrebom za dobrom zaptivenošću projektila. Naime, ne smije doći do kontakta vode i kumulativnog punjenja. Bojeve glave moraju obezbjediti odgovarajuću efikasnost na cilju, uništiti ga ili onesposobiti. Konstantna istraživanja i razvoj bojevih glava uslovio je njihov optimalan dizajn i performanse. Izbor bojeve glave za neku metu zavisi od tipa oklopa, potrebne penetracije, brzine projektila. [1]



Sl. 5. Tenk sa savremenim oklopom (Merkava)

Razvoj kumulativnih bojevih glava pretio je zahtjeve za efikasnije probijanje oklopnih vozila (posebno tenkova). Sa druge strane, proizvođači oklopnih vozila nastojali su posade svojih tenkova zaštititi što je bolje moguće. Oduvijek je postojala borba između dizajnera kumulativnih projektila i proizvođača oklopnih sredstava.

Oklop kao sastavni dio opreme za vanjsku zaštitu štiti posadu i vitalne dijelove tenka od pogodaka, te direktno povećava vjerovatnoću preživljavanja na bojištu. Svi tenkovi imaju posebno ojačane oklope na prednjem dijelu oklopnog tijela i kupole, kao kompromis između potrebnog nivoa zaštite i enormnog povećanja ukupne mase tenka [6]. U odnosu na tenkove prve generacije koji su koristili homogene čelične materijale, poslije II svjetskog rata u novijim generacijama pojavljuju se oklopi koje proizvođači deklarišu kao kompozitni, laminarni, specijalni, aktivni, sendvič oklopi, itd. Svi naporci usmjereni na poboljšanje tenka, u suštini, svode se na komponente koje osiguravaju dobru pokretljivost, preciznost na što većim udaljenostima, uz tendenciju pogotka prvim projektilom, i što veću mogućnost preživljavanja posade na bojištu.

Danas su, više nego ikada ranije, ukupne mase tenkova ograničavajući faktor daljeg razvoja. Ukupna masa oklopnog tijela i kupole iznosi 40% do 55% ukupne mase tenka, ali i pored činjenice da čini približno polovinu ukupne mase tenka, ona ne osigurava dovoljnu zaštitu od savremenih protiv-tenkosvkih sredstava. Po podacima nekih stručnjaka, 70% mase tenka je u funkciji oklopne zaštite tenka. Paralelno sa razvojem oklopa razvija se i municija, čiji se efekti zasnivaju na različitim fizičkim principima. Zbog toga je postojao sve uži prostor da se oblikom i, prije svega, vrstom materijala riješi pitanje zaštite. [6]

2) Vrste oklopnih čelika

Homogeni oklopni pancirni čelik (RHA-rolled homogeneous armour), kao polufabrikat, dobija se valjanjem ili kovanjem, zavisno od namjene. Ne ulazeći u sve uobičajene postupke pri razvoju pancirnog čelika u različitim etapama, treba reći da su uticaji legirajućih elemenata na osnovna svojstva pancirnog čelika šire poznata i da su karakteristike tih homogenih oklopa u svim zemljama standardizovane u pogledu osnovnih elemenata i karakteristika, kao i da se po najbitnijim parametrima zaštite vrlo malo razlikuju.

vrsta materijala	specifična gustina (kg/m^3)	koeficijent
RHA	7.830	1.00
meki čelik	7.800	0.82
čelik visoke čvrstoće	7.850	1.19
specijalni čelici	7.750	1.41
aluminijum (Tip 5083)	2.660	1.44
aluminijum (Tip 7039)	2.780	1.72
aluminijum (Tip 2024)	2.800	1.95
fiberglas	1.500	2.13
staklo	2.450	2.32
alumina	3.600	2.97

Tabela 1. Tipični materijali oklopa sa faktorom zaštite u odnosu na RHA oklope [6]

Više zemalja u svijetu proizvodi homogeni pancirni čelik, pa je sasvim izvjesno da su obavljena istraživanja u više pravaca kako bi se dobole poboljšane karakteristike, i na taj način, ne povećavajući masu tenka, osigurao veći stepen zaštite. Određen broj publikacija ukazuje na to da se posebnim postupcima prečišćavanja čelika pod troskom ili pretapanja pod uticajem mlaza elektrona ili plazma-snopa, može bitnije uticati na povećanje oklopne zaštite.

Danas se NATO homogeni valjani čelični (RHA) oklop izrađuje po standardu MIL-S-1256B. U okviru tog standarda predviđene su dvije klase:

- Klasa 1 – osigurava maksimalan otpor prodiranju
- Klasa 2 – osigurava maksimalan otpor udaru

Valjani čelični oklop, izrađen prema tom standardu, koristi se kao etalon za uspoređenje sa novim vrstama čeličnog oklopa. Zbog određenih razlika u mehaničkim i metalurškim osobinama liveni čelici su manje balistički otporni, ali se livenjem mogu dobiti veoma povoljni oblici i nagibi (oklopno tijelo, kupola, poklopci), tako da se može postići dobra balistička zaštita. Proizvode se po standardu MIL-S-11356. [6]

<i>Oklopni čelik</i>	$\sigma_{0.2}$, (MPa)	σ_m , (MPa)	<i>elongacija (%)</i>	<i>udarna otpornost(J)</i>	<i>tvrdoća, (HB)</i>
Hardox 500	1300	1550	8	25	450÷560
S960E/XSABO960	min 960	1050	14	31	-
Weldox 900E	min 960	1000÷1060	14÷16	30÷54	-
Armax 46100	-	-	-	14	477÷534
Armax 500S	1400	1600	10	16	440÷540

Tabela 2. Mehanički parametri oklopnih čelika [7]

U toku istraživačkih aktivnosti na razvoju pancirnih čelika došlo se do zaključka da se preko određene granice tvrdoće ne smije ići jer se u protivnom stvaraju pukotine izazvane krutošću materijala. Iz tih razloga postoje dvije mogućnosti: proizvodnja dvoslojnog oklopa i poboljšanja postojećih tehnika livenja. S obzirom da se razvoj dvoslojnog oklopa pokazao kao realnije rješenje, na njemu se znatno više radilo. Kupole prvih tenkova T-72 bile su zaštićene oklopom od livenog čelika, debljine 280mm, a kosi dio kućišta imao je slojeviti oklop debljine 200mm. [6]

Aluminijski oklop razmatran je kao zaštita na tenkovima iz 40-tih godina, ali je intenzivniji rad počeo tek 60-tih. Legure aluminijuma imaju određene prednosti u odnosu na pancirni čelik:

- smanjena masa konstrukcije
- povoljne karakteristike i pri niskim temperaturama
- pri manjoj masi oklopnog tijela osigurana je veća krutost konstrukcije
- ostaju ozračene kraće vrijeme od ostalih metala
- povoljnije za preradu u plastičnom stanju

Na određenom broju savremenih gusjeničnih vozila legure se već koriste za oklop, posebno legure na bazi aluminijuma 5083 i 5456, navedene u specifikaciji standarda MIL-A-46027C. Legura 5083 sadrži 5% Mg i 1% Mn, dobro se obrađuje u hladnom i topлом stanju. Znatno bolja zaštita postignuta je legurom 7039, razvijenoj na bazi elemenata AL-Zn-Mg, koja je takođe korištena na određenom broju gusjeničnih vozila, ali problem zavarljivosti te legure veći je nego kod prethodne dvije. [6]

Oklop od titanijuma nešto je specifičniji. Istraživanja na ovoj vrsti oklopa otpočela su ranih 50-tih, da bi se već 1955. godine raspolagalo legurom Ti-6Al-4V koja je imala zadovoljavajuća balistička svojstva. Konačna varijanta legure oklopa na bazi titanijuma ima znatno povoljnije osobine od pancirnog čelika za zaštitu od lakog naoružanja i parčadi, pa se uglavnom koristi u zrakoplovstvu. Da bi taj materijal našao širu primjenu na tenkovima neophodno je u daljim istraživanjima osigurati proizvodnju po prihvatljivim cijenama, i još više poboljšati balističku zaštitu, posebno za područje niskih temperatura. Pored homogenog oklopa na bazi legure titanijuma, obavljuju se istraživanja da se dobije višeslojni oklop u kome bi spoljni sloj bio od čelika visoke tvrdoće, a unutrašnji od legure Ti-Al-V. Postoje određeni problemi u spajanju titanijuma i čelika, pa se obavljuju i istraživanja sa slojem od čelika i vanadijuma. Početkom šezdesetih godina, efekti postignuti projektilima kumulativnog dejstva bili su u stanju efikasno probiti oklope tenkova iz tog perioda, pa se kao normalna reakcija na takvo stanje, u pogledu oklopne zaštite, započelo sa radom na posebnim vrstama oklopa koji bi trebalo da neutrališu prateću opasnost

kumulativnog dejstva. Prvo su proučavana rješenja u kojima se između dvije ploče od pancirnog čelika postavlja poliuretan i više drugih materijala na bazi plastike ("penoplast"). Mehanizam probijanja odvija se tako da prednja ploča aktivira projektil, i biva probijena, ali najveći dio topotne energije apsorbuje se prilikomtopljenja plastike, tako da unutrašnja pancirna ploča ostaje neoštećena. Krajem 60-tih britanskim naučnicima pošlo je za rukom da razviju višelojni ("sendvič") oklop koji je do kraja 1973. godine držan u tajnosti, a zatim saopšten Amerikancima i Nijemcima, s obzirom na neke zajedničke aktivnosti na razvoju tenkova 80-tih godina. Oklop je dobio ime po istoimenom mjestu u Engleskoj (Chobham); prvo je primjenjen za tenk naručen za potrebe Irana (Shir 2), a zatim za tenk koji je nastao kao varijanta tog tenka, Challenger. Efikasna zaštita višeslojnog oklopa ne može se dovoditi u pitanje, jer praktično svi savremeni tenkovi danas koriste višeslojne oklope, bilo za osnovni oklop (Challenger), ili kao dodatni oklop (Leopard 2). Višelojni oklop je u biti oklop koji se sastoji od metalnih komponenata (specijalni čelici, titanijum, aluminijum) i nemetalnih (keramičkih i sintetičkih) i koji je u stanju štititi posadu i tenk od svih dosada poznatih projektila. [6]

Kombinovani oklop sastavljen je od pancirnog čelika, ultra-tvrde topotno-otporne keramike, vazdušnog prostora i sloja plastike. Kako se kumulativni mlaz ponaša kao fluid, to se može lako deformisati, prekinuti ili čak primorati da pravi vrtloge, pa je zbog toga kombinovani oklop znatno efikasniji protiv kumulativnih projektila nego protiv KE projektila. Treba napomenuti da ovaj oklop ima tendenciju povećanja anvelope tenka zbog vazdušnog prostora koji je potreban unutar metalnih struktura. [6]

Modularni oklop se može uočiti u modernim tenkovima. On se postavlja sa strane kupole i tijela tenka u obliku kutija. Takav pristup koristi sistem Leclerc. Francuski modularni oklop tenkova kombinacija je varenog i kompozitnog materijala. Nivo zaštite u odgovarajućoj debljini materijala poslovna je tajna, no činjenica je da nova ideja modularnog oklopa u obliku kutija osigurava da se jedinice (moduli) u slučaju pogotka zamjene. Još je zanimljivija činjenica da se Leclerc-ov oklop može, ako se već dijelovi mogu mijenjati kod pogotka, zamjeniti nekim usavršenijim oblikom oklopa, kad se takav razvije. [6]

Oklop od osiromašenog uranijuma još je kontraverzni vrsta poboljšanog oklopa. Ovaj materijal ima gustoću 2.5 puta veću od čelika, a minimalno je radioaktiv. No, kod njega je značajan problem otrovnosti, kako za vrijeme proizvodnje, tako i u slučaju oštećenja oklopa tokom bitke. Oklop tenka M1A1 Abrams predstavljen 1988. godine, ima čelične kutije ispunjene osiromašenim uranijumom. [6]

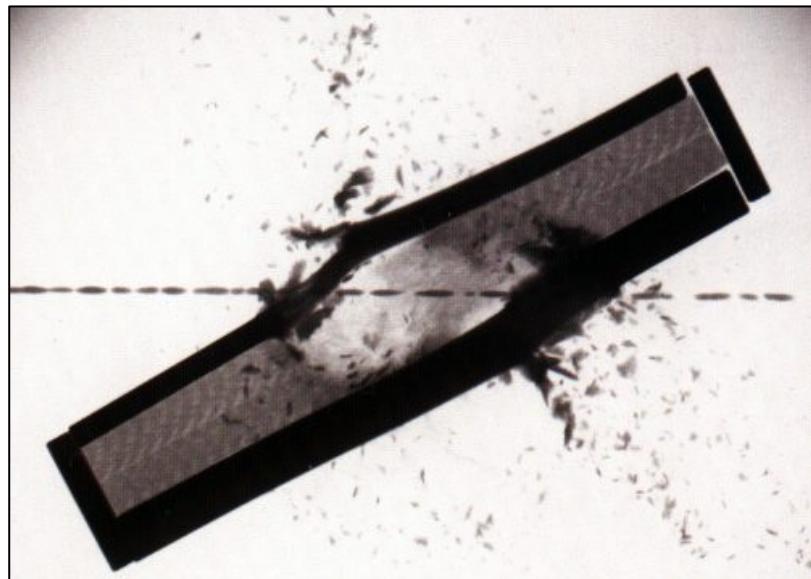
Eksplozivno-reaktivni oklop (ERA), otkako je otkriven još 1970. godine, postao je najefikasniji od svih oklopnih koncepata po pitanju mase i zapremine. Cilj proučavanja oklopa ove vrste bio je da se upotrijebi kontrolisano oslobođanje energije kako bi se neutralisao kumulativni mlaz protiv-tenkovskih projektila. Logično, većina ideja zasnivala se na korištenju hemijske energije pohranjene u eksplozivnim materijama smještenim u neku vrstu metalnog oklopa koji bi smanjivao brzinu mlaza. [9]

Kada užareni mlaz kumulativnog punjenja pogodi ovaj "sendvič" oklop, on aktivira eksplozivni sloj u sredini, uzrokujući da se dvije metalne ploče koje okružuju eksploziv razdvoje. Ove ploče erodiraju i destabiliziraju mlaz koji prolazi kroz njih, tako smanjujući njegovu sposobnost penetracije oklopa. Prvi patent koji spominje reaktivni oklop registrovan je u Njemačkoj 1970. godine, od strane Norvežana, Manfreda Helda, koji je kasnije radio za kompaniju Rafael Armament Development Authority, i to na razvijanju "Blazer" dizajna reaktivnog oklopa za izraelske tenkove koji su prvi put upotrijeljeni u borbi 1982. Sovjeti su radili na njihovom vlastitom ERA oklopu i napravili prvi prototip godinu dana kasnije. Rusi su razvili vlastiti oklop, uključujući sistem Kontakt-5, koji je bio efikasan i protiv projektila sa osiromašenim uranijumom. Amerikanci su nakon toga užurbano počeli raditi na ovom tipu oklopa, i 1980.

godine razvili ERA oklop za M-60 tenkove, koji su korišteni tokom operacije Pustinjska Oluja, 1991. godine, u perzijskom zaljevu [18]. Ovaj oklop uspješno je upotrebljen kod oklopnih vozila, ali mu je raspon primjene daleko širi od toga.

Zavisno od vozila koje ga nosi i prijetnje koju treba zaustaviti, postoji značajna raznovrsnost tipova ERA oklopa. Stoga, bili su razvijeni moduli za tenkove, samohodnu artiljeriju i oklopne transportere. Kod ispravnog nacrta oklopa može doći do zaustavljanja ne samo kumulativnih punjenja male i srednje veličine, nego i kumulativnih punjenja velikih kalibara, kao i KE projektila.

Ako je zakošenost oklopa 0° (tj. penetrator udara okomito na elementa ERA oklopa), penetrator će biti podvrgnut pritisku i donekle neregularnom toku produkata detonacije, ali će metalne ploče na njega djelovati samo dok ne budu potpuno probijene. Međutim, ako je zakošenost veća od 0° , nevezane ploče će stalno putanju penetratora hraniti novim materijalom oklopa. Stoga će penetrator morati da probije dodatni materijal cilja, što uzrokuje povećanje potrošnje – erozije. Tipično je da se sve navedene ploče izrađuju od čelika. Eksploziv je često C4 (ili PETN), iako se koriste i ostale vrste.



Sl. 6. Proboj ERA oklopa

Specifični mehanizam ERA oklopa počinje da djeluje nakon određenog vremenskog perioda kašnjenja pošto se vrh primarnog kumulativnog mlaza sudario sa oklopnim modulom. Tokom ovoga intervala, primarni mlaz prodire do eksplozivnog sloja, inicira ga, te dolazi do ubrzavanja ploča. Sve do ove tačke procesom prodiranja upravlja zakon hidrodinamike. Oklop zaista postiže efikasnost tek iznad uobičajenog hidrodinamičkog režima samo kada su metalne ploče ubrzane do tačke da stalno zatvaraju narednim djelićima slobodnu putanju primarnog mlaza. Očito je da će do te mjere iskrivljen primarni kumulativni mlaz moći postići vrlo malo prodiranje. Iznos distorzije mnogo zavisi od zakošenosti oklopa. Uslijed zakašnjenja reakcije cilja pri udaru primarnog mlaza, određeni dio tog mlaza koji ima veliku brzinu proći će kroz eksplozivni naboj pretrpivši samo manja ometanja. Ova sekcija primarnog mlaza uvijek će postojati kao naknadna prijetnja osnovnome oklopu, bez obzira kako je efikasan element ERA oklopa. Bilo kakvo naknadno prodiranje uslijed djelića repa primarnog mlaza koji slijede, često je slučajno i široko se rasipa. Provedeni su mnogi testovi sa ispitivanjem različitih kumulativnih punjenja na mnoštvo

različitih tipova ERA oklopa, pri širokom rasponu zakošenja oklopa. Izmjereno naknadno prodiranje značajno varira zavisno od tipa kumulativne bojeve glave i tipa oklopa.

Dodatni oklop na tenku obično ne mora biti neka visoka tehnologija. Na tenkovima Merkava MK2 i MK3, kratki komadi lanca vise sa kupole i čine neku vrstu zavjese kojoj je svrha da detonira visoko-eksplozivne projektili (HE) koji bi inače mogli udariti u spoj kupole i kućišta tenka. Švedski konstruktori dizajnirali su dodatni oklop za švedski S-tenk. Radi se o mreži posebno učvršćenih metalnih šipki koje su pričršćene na prednji dio kućišta kako bi se zaštitile kose površine tenka. [6]

Sistem aktivne zaštite (APS) predstavlja sistem koji ima zadatak da smanji mogućnost pogađanja tenka od strane sofisticiranih vojnih sredstava kao što su: protiv-tenkovski vođeni projektili (sa kumulativnim ili kinetičkim dejstvom), upozorenjem, zasljepljivanjem, kao i aktivnim dejstvom protiv dolazećih projektila ispaljivanjem projektila prije udara projektila u tenk. [6]

Zahtjevi za modernizaciju tehnologija kumulativnih bojevih glava, kao i oklopa, neprestano rastu. Bojeve glave, iste ili manje veličine i težine, moraju biti u stanju da probiju sve složenije konfiguracije oklopa. Da bi ovo postigli, potrebna je veća penetracija oklopa, čak i na većem standoff rastojanju. Takvi ambiciozni ciljevi mogu se postići samo sa optimalnim dizajnom kumulativnog punjenja, kao i poboljšanjima u procesu livenja i presovanja eksploziva.



Sl. 7. Savremena tandem bojeva glava

U ovom pogledu, neke moderne kompanije razvile su industrijsku zrelost u metodama presovanja, zajedno sa smanjenjem obima cijelokupnog postupka. Cijelokupni proces zadovoljava sve zahtjeve moderne kumulativne bojeve glave. U osnovi, proces automatski osigurava maksimalne tehničke mogućnosti geometrijske preciznosti kumulativnih punjenja, i sprečava pojavu pukotina i lunkera na punjenju, na temperaturama koje premašuju 200°C.

Moderni reaktivni oklopi smanjuju probajnost kumulativnog primarnog mlaza. Ovo se može prevazići primjenom dvostrukе (tandem) kumulativne bojeve glave. Prednje kumulativno punjenje (prekurzor), obično manjeg kalibra, svojim kumulativnim mlazom aktivira reaktivni oklop (ERA), a kašnjenje u vremenu aktiviranja glavnog punjenja korespondira sa vremenom reakcije eksplozivnog sloja u oklopu.

Glavno punjenje tandem bojeve glave formira drugi detonacioni talas koji prolazi kroz produkte kolizije prvog mlaza i eksplozivne materije u reaktivnom oklopu, i svojim mlazom koji je još snažniji od prvog, u stanju je da probije oklop tenka. Za aktiviranja prednjih punjenja koriste se aktivni laserski upaljači koji obezbeđuju detonaciju na optimalnom standoff rastojanju. [19]

3) Savremeni kumulativni projektili

SWISS Dragon 90 i 98 bojeve glave sastavni su dio protiv-tenkovskih projektila za pješadijsku upotrebu, i u stanju su probiti sve moderne vrste oklopa. Kao dobro rješenje za povećanje borbene efiksanosti kumulativnih bojevih glava pokazale su se i **SWISS TOW 96** kumulativne bojeve glave koje probijaju savremene oklope tenkova i posljednje generacije ERA oklopa. Njihov novi sistem upaljača ispunjava sve sigurnosne zahtjeve, u skladu sa standardom US-MIL-STD-1316.

SWISS Panzerfaust 95 kumulativna je bojeva glava najmodernijeg lakog nevođenog protiv-tenkovskog oružja, za uništavanje kompozitnog, kao i ERA oklopa. Sistem može biti ispaljivan i iz zatvorenih soba i rovova, što omogućuje veliku taktičku fleksibilnost. [11]



Sl. 8. SWISS Dragon 98 kumulativna bojeva glava

BILL 2 (Bofors) je višenamjenski vođeni projektil, i predstavlja nastavak uspješnog BILL I (RBS56) projektila, koji je bio u službi Švedske armije od 1988. godine, kao i u službi Austrijske i Brazilske vojske. BILL 2 proizvodi Saab Bofors Dynamics, sa sjedištem u Karlskoga, Švedska. Zbog tehnoloških prednosti u borbi sa oklopnim vozilima, uključujući ERA oklop, Bofors je poboljšao Overfly Tok Attack (OTA) tehnologiju za Bill 2, i uveo novu tandem bojevu glavu. Primarni zadatak ove bojeve glave je da napada oklopno vozilo na najslabijim tačkama. Bill 2, zahvaljujući tome što ima tri načina ispaljivanja, može biti korišten i u borbi protiv helikoptera, mitraljeskih gnijezda i utvrđenja. Bojeva glava, pored tandem kumulativnog punjenja, sadrži optičke i magnetne senzore. Optički (laser) senzor funkcioniše kao nišanska sprava, magnetni prepoznaje metalne strukture oklopnih, a algoritam računara prepoznaje kupolu ili centar mete, određujući optimalnu poziciju za detonaciju bojeve glave. Bojeva glava ima inercijalni udarni upaljač za direktni napad, kao i blizinski upaljač. Dva mlaza kumulativnog punjenja usmjeravaju sve fragmente mlaza prema jednoj tački na površini mete. Prvo, prednje kumulativno punjenje uništava reaktivni oklop, a zadnje punjenje zatim ima slobodan put za probijanje tijela tenka. Sistem je efikasan protiv statičkih i pokretnih meta sa dometom do 2 km. [10]

ERYX je savremeno francusko protiv-oklopno oružje manjeg dometa (do 600m). Prenosivi sistem ovog oružja uključuje kumulativni projektil, kontrolnu stanicu, tronožac, Mirabel termalni nišan, i lansirnu cijev. Ispaljeno sa ramena ili sa tronošca, Eryx može uništiti sve moderne, pokretne i nepokretne oklopne mete. Sa svojom tandem HE bojevom glavom, kalibra 137 mm, sposobnom da probije ERA oklop debljine do 900mm, djelotvoran je i protiv utvrđenih bunkera, i okopljenih meta. Eryx može funkcionisati u svim vremenskim uslovima, danju ili noću. Njegova visoka fleksibilnost dozvoljava mu da funkcioniše na otvorenom prostoru, u šumi, ili u zatvorenom prostoru. [11]

HOT 3 je polu-automatski, žicom vođeni projektil. Razvijen je od strane evropskog konzorcija Euromissile za potrebe francuske i njemačke armije. Infracrveni lokalizator sistema mjeru uglovnu devijaciju između projektila i linije nišanjenja. Hot 3 sistem ima novi bispektralni lokalizator, koji

funkcioniše na talasnim dužinama od 1 – 10 mikrona. Ovaj projektil ima tandem kumulativno punjenje, težine 6.5 kg, koje probija ERA oklop debljine i do 1300mm. HOT 3 je opremljen i novim laserskim blizinskim upaljačem. Krajni domet projektila je 4000m. [12]

JAVELIN je kumulativni protiv-tenkovski projektil, proizведен udruživanjem kompanija Raytheon i Lockheed Martin. Ispaljuje se sa ramena, ali može biti lansiran i sa raznih oklopnih vozila. Američka vojska je 1989. godine zamijenila protiv-tenkovski projektil M47-Dragon sa Javelin sistemom. Raytheon kompanija odgovorna je za komandnu jedinicu lansiranja, elektroniku vođenja projektila, sistemske inžinjerije i software, dok je Lockheed Martin odgovoran za tragač projektila i mehaničke podsklopove. Javelin sistem sastoji se od komandne lansirne jedinice (CLU) i zrna (projektila). CLU, sa težinom od 6,5kg, sadrži pasivnu akviziciju mete i kontrolnu jedinicu ispaljivanja sa integriranim dnevним i termalnim nišanjenjem.

Nišan koristi termalnu tehnologiju druge generacije, baziranu na tehnologiji Standard Advanced Dewar Assembly (SADA IIIA). Sistem sadrži, takođe, tiši, dualni hladnjak za nišan. Kontrole nišandžije su na CLU. Sistem za ispaljivanje se sastoji od Javelin kumulativne bojeve glave i ATK (Alliant Techsystems) sklopa lansirne cijevi. Domet projektila je 2500m. Javelin je "ispali i zaboravi" vođeni projektil sa automatskim samonavođenjem. Projektil je opremljen i sa infracrvenim tragačem koji je baziran na kadmijum živinom teluridu (CdHgTe). I ovdje se, kao i na svim savremenim kumulativnim bojevim glavama, nalazi tandem kumulativno punjenje. Prednje punjenje inicira eksplozivno reaktivni oklop (ERA), a glavno probija osnovni oklop tenka. Pogonsko gorivo projektila je čvrsto raketno gorivo dizajnirano da dim prilikom lansiranja bude minimalan. [13]

MBT LAW sistem, razvijen u Saab Bofors Dynamics, uz saradnju s engleskim kompanijama, izabran je u maju, 2002. godine, za oružje nove generacije lakog protiv-tenkovskog naoružanja u Velikoj Britaniji. Projektil ima aktivne magnetne i optičke senzore, kao i blizinski upaljač. Senzorski podaci se analiziraju i računarski uspoređuju sa već određenim karakteristikama mete prije detonacije kumulativnog punjenja. Kumulativna bojeva glava ovog sistema može se primjenjivati protiv ERA, ali i u borbi protiv aluminijskih oklopa. MBT LAW bojeva glava, slična je sistemu BILL 2, i sadrži dinamički izbalansirano kumulativno punjenje i bakreni kumulativni lijevak koji poboljšava probajne karakteristike. Promjer kumulativnog punjenja je 102mm. [14]

KHRIZANTEMA-S je projektil treće generacije višenamjenskih vođenih projektila dizajniranih u Rusiji. Ovo efikasno oružje namjenjeno je za uništavanje različitih meta kao što su moderni tenkovi opremljeni sa ERA, oklopna vozila, utvrđene strukture, mali brodovi, kao i nisko leteći helikopteri i avioni, na dometu do 6000m, po danu ili noći, u svim vremenskim uslovima i u bilo kojem okruženju. Sistem se sastoji od opreme za navođenje i vođenih projektila sa različitim tipovima bojevih glava, kao i stacionarnom i mobilnom opremom za testiranje. Supersonični, vođeni projektili mogu nositi ili tandem kumulativnu bojevu glavu (HEAT) ili HE bojeve glave [15]. Jedinstvena osobina sistema su dva načina vođenja. Kod prvog načina projektil je vođen automatski na metu putem milimetarskog radara, danju ili noću, i u bilo kojim vremenskim uslovima (gusti dim, prašina, vatra, magla, dim, kiša, snijeg, itd), bez da nišandžija mora održavati vizuelan kontakt sa metom. Drugi način je uz pomoć polu-automatske laserske zrake gdje se mora održavati stalni vizuelni kontakt sa metom. Sistem upravljanja vatrom dozvoljava da se gađaju dvije mete istovremeno, koristeći različite načine vođenja.

VIKHR je jedan od novijih ruskih protiv-oklopnih projektila je za Ka-50 helikoptere i Su-25T avione. Projektil se ispaljuje sa lansera koji sadrže 6-8 projektila. Njegov sistem vođenja sastoji se od kombinovanog radio vođenja tokom početne faze leta i vođenja laserskom zrakom nakon toga. Projektil je

supersoničan, sa dometom od 8-10 km, kalibra 125mm, ukupne težine sa lanserom 60 kg. Tandem bojeva glava sposobna je probiti oklop debljine do 900mm. [16]

MILAN je prenosni protiv-tenkovski sistem srednjeg dometa, slično kao i HOT sistem, proizveden od strane konzorcija Euromissile, u Francuskoj. Preko 350,000 projektila i 10,000 lansera za ovaj sistem proizvedeno je od 1972. godine, i u službi je 40 zemalja. MILAN 3, opremljen tandem kumulativnom bojevom glavom, sa poboljšanom jednicom za ispaljivanje i infracrvenim sistemom vođenja, u proizvodnji je od 1996., i naručen je za Francusku i Kipar. Lansirna cijev je vodootporna i poboljšanih mehaničkih karakteristika. MILAN 2, sa jednim (glavnim) kumulativnim punjenjem efikasan je protiv tanjih i kompozitnih oklopa. MILAN 2T i MILAN 3 projektili opremljeni su tandem bojevim glavama koje se koriste za moderne ERA oklope. Detonacija kumulativnog punjenja dešava se u trenutku udara projektila u metu, čak i pri manjim uglovima udara.[17]

TOW sistem predstavlja protiv-tenkovske projektile proizvedene u kompaniji Raytheon Systems. Ovaj projektil upotrebljava se za penetraciju oklopa, bunkera, utvrđenja, amfibija, pa čak i manjih brodova. TOW je u službi 45 armija i sastavni je dio 15,000 kopnenih, oklopnih i letećih (helikopterskih) platformi širom svijeta. Od 1970. godine, kada se počeo prizvoditi, u svijetu je napravljeno preko 650,000 komada TOW projektila. Za probijanje tenkova, opremljenih sa ERA oklopima, TOW 2A projektil opremljen je tandem bojevom glavom. Manje, prednje, tzv. ometajuće punjenje detonira reaktivni oklop i omogućuje glavnom kumulativnom punjenju da probije oklop tenka. [18]

HELLFIRE, američki projektil zrak-zemlja, vođeni je projektil namjenjen za uništavanje oklopnih sredstava svih vrsta. Ispaljuje se sa helikopterskih platformi protiv oklopnih sredstava na većoj udaljenosti nego bilo koji drugi projektil na svijetu (do 8km), što ga čini iznimno popularnim. HELLFIRE II projektil, koji predstavlja nadogradnju svog renomiranog prethodnika, je 1993. godine opremljen sa tandem bojevom glavom i u stanju je probiti sve poznate oklope današnjice.

HELLFIRE, koji je, inače, vođeni projektil treće generacije, tipa zrak – zemlja, brži je, učinkovitiji, precizniji, a time i mnogo kompleksniji čak i od druge generacije vođenih protiv-tenkovskih projektila. Vođenje ovog projektila omogućeno je automatskim terminalnim laserskim signalom koji se reflektuje od mete označene laserskim snopom. Projektil ima četiri glavna dijela: tragač, bojevu glavu, propulziju (pogon) i kontrolu. Dužina mu je 1625 mm, promjer 178 mm, a težina 45 kg. HELLFIRE je protiv-tenkovski vođeni projektil sa punjenjem bojeve glave oblikovanim tako da pogađa neprijateljsko okloplno vozilo sa minimalnim rizikom ekspozicije helikoptera sa kojeg je lansiran. Mete se mogu gađati danju i noću, i to na tri načina lansiranja. Što se lansera tiče, samo on ima mnogo više komponenti nego, recimo, projektili prve generacije. Lanser može imati 2 ili 4 šine sa kojih se ispaljuje projektil. Od komponenti lansera možemo izdvojiti slijedeće: mikroprekidači, lansirne šine od visoko-kvalitetnih metalnih legura, konektori, sigurnosni prekidači i regulatori, sistem za hlađenje, opruge, dovod struje, multiplikatore, itd. Laserski tragač (vođenje) HELLFIRE projektila je smješten u dvije odvojene jedinice: sklop glave tragača i električne prekidače. Sastavljen je od dvo-osne žiro-stabilisane platforme, detektora/pojačivača, kupole, procesirajuće elektronike i udarnih senzora.

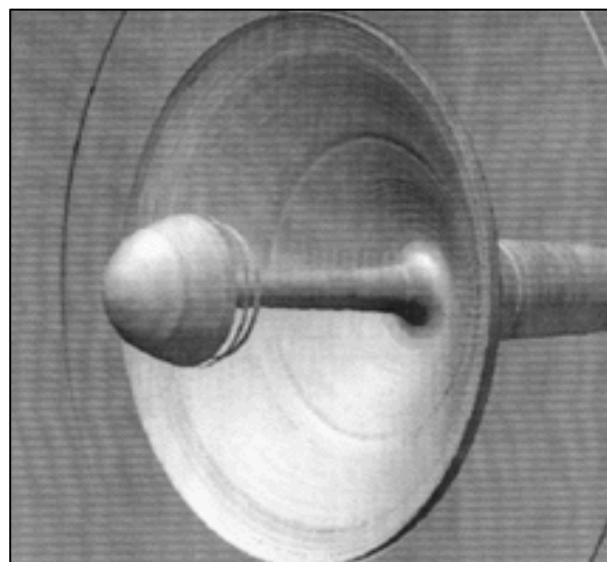
IV POGLAVLJE

Fizikalni i matematički modeli formiranja kumulativnog mlaza

1) Uvod

Birkhoff je 1948. godine napisao prvu revolucionarnu teoriju o formiranju kumulativnog mlaza, prepostavljajući da detonacijski val, nastao iniciranjem eksplozivnog punjenja, proizvodi tako veliki pritisak tokom procesa kolapsa kumulativnog lijevka da se čvrstoća materijala lijevka može zanemariti. U osnovi, lijevak se u tom procesu tretira kao neviskozan i nestišljiv fluid, a elementi lijevka trenutačno su ubrzani do njihovog kolapsa. Ovaj model naziva se i stacionarni model formiranja kumulativnog mlaza. Stacionarni model predviđa kum. mlaz sa vremenski nepromjenljivim tokom, i konstantnom dužinom, jednakoj dužini ivice konusa. Uočeno je, međutim, da kumulativni mlazovi imaju gradijent brzine; primarni mlaz se kreće većom brzinom nego zadnji dio mlaza – sekundarni mlaz, uzrokujući razdvajanje i istezanje mlaza. [3]

Ovu teoriju kasnije je modifikovao Pugh, 1952. godine, i u nju uključio gradijent brzine. Ta modificirana teorija bazirana je na istim principima kao i originalna (Birkoff), osim što brzina pri kojoj različiti elementi lijevka kolapsiraju nije konstantna nego zavisi od početnog položaja elemenata lijevka. Godunov [42] je razradio visko-plastičnu teoriju, modifikujući stacionarnu teoriju i uključujući viskozitet materijala lijevka kao važan faktor u procesu formiranja mlaza. [3]



Sl. 9. Proces formiranja kumulativnog mlaza

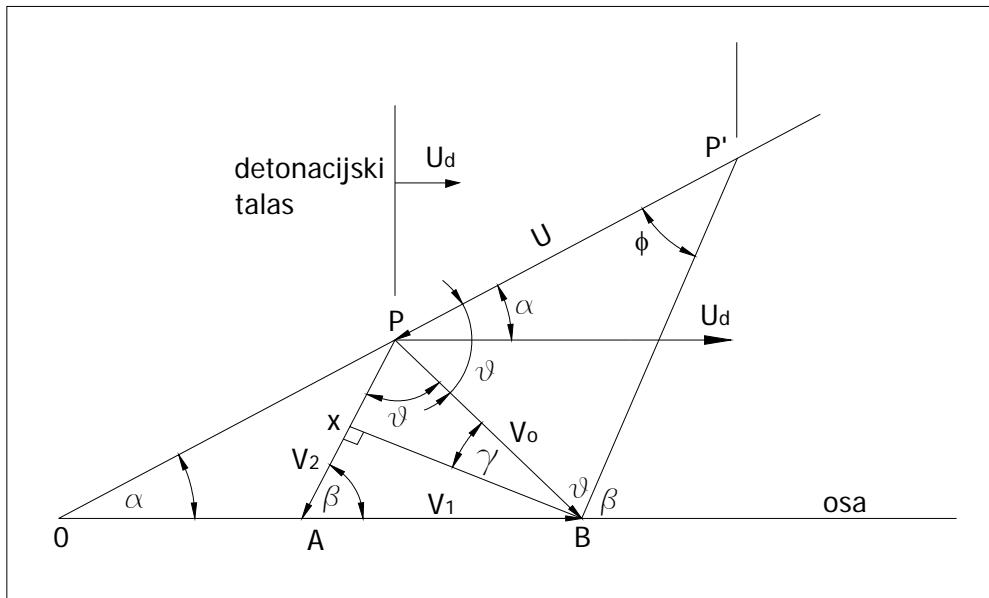
Odlučujući uticaj na parametre kumulativnog mlaza ima uravnoteženost odnosa između mase eksploziva i mase kumulativnog lijevka (jedinična masa, masa po jedinici površine poprečnog presjeka). Rješavanje tih i sličnih zadaća zahtijeva primjenu računarskih programa koji omogućavaju izračunavanje parametara mlaza, tj. parametarsku analizu. U novije vrijeme, posebno nakon održavanja prvog međunarodnog simpozija iz područja balistike (1974), učinjeni su veliki napor u cilju razvijanja analitičkog modela koji mogu opisati svaki stadij funkcioniranja kumulativnog punjenja, uključujući stvaranje kumulativnog mlaza, geometriju mlaza i kratera, fragmentaciju mlaza, itd. Ti modeli, objedinjeni u jedinstven, analitički kod, najčešće su jednodimenzionalni. Istodobno, primjenom metode konačnih elemenata i metode

konačnih razlika, te razvojem snažnijih računara razvijeni su i višedimenzionalni hidrokodovi koji opisuju mehanizam stvaranja i djelovanja kumulativnog mlaza. Ta dva pristupa nisu u suprotnosti. Upravo suprotno, oni se dopunjavaju tako što se višedimenzionalni kodovi primjenjuju za proučavanje fenomena hidrodinamičkog tečenja materijala, prostiranja složenih talasa i opterećenja materijala, dok s druge strane jednodimenzionalni kodovi omogućuju brzu i ekonomičnu parametarsku analizu nužnu kod projektovanja kumulativnog punjenja. Jednodimenzionalni analitički kodovi temelje se na primjeni teorije Pugha, Eichelbergera i Rostokera (PER teorija).

U posljednje vrijeme pojavljuje se veći broj kodova (numeričkih simulacija), a poznatiji su AUTODYN, CSQ, BASC, DEFEL, DYNA2D, DYNA3D, DYSMAS, EPIC-2, EPIC-3, HELP, HEMP, HULL, METRIC, PISCES2DELK, SOIL i TOODY. [3]

2) Teorija Birkhoffa

Kada detonacijski talas, nakon iniciranja eksplozivnog punjenja, udari u konusni lijevak, pririsak na obje strane lijevka je, pretpostavlja se, jednak, i zidovi lijevka se kreću naprijed konstantom brzinom V_0 . Ugao 2β između urušavajućih zidova lijevka je veći od ugla apexa (vrha konusa) 2α , zbog konačnog vremena potrebnog detonacijskom talasu da prođe kroz lijevak, od vrha do njegove osnove. Konusni lijevak je simetričan, tako da ugao α predstavlja polovinu ugla vrha konusa, a β ugao urušavanja lijevka. Lijevak se kreće brzinom V_0 koja polovi ugao APP'.



Sl. 10. Geometrija procesa kolapsa lijevka. [40]

Uzmimo koordinatni sistem koji ima konstantnu brzinu. U ovom koordinatnom sistemu lijevak se kreće ka unutrašnjosti duž pravca $\overline{P'P}$, a zatim prema osi kumulativnog punjenja pravcem \overline{PA} . $\overline{P'P}$ i $\overline{P'B}$ predstavljaju ulaznu i izlaznu brzinu lijevka, respektivno, u pokretnom koordinatnom sistemu. $\overline{P'B}$ je paralelna \overline{PA} , a $\overline{P'P}$ i $\overline{P'B}$ su jednake po veličini. Kako je brzina u pokretnom koordinatnom sistemu $\overline{PP'}$, brzina kolapsirajućeg lijevka u stacionarnom koordinatnom sistemu je:

$$\overline{PP'} + \overline{P'B} = \overline{PB} = V_0$$

Kako je $\overline{P'P} = \overline{P'B}$, trougao BPP' je jednakostraničan, i kako je $\overline{P'B}$ paralelna sa \overline{PA} , $\angle BPP' = \angle PBP' = \angle BPA$.

Zidovi urušavajućeg lijevka se kreću naprijed. Njihov spoj kreće se od A do B brzinom V_1 :

$$V_1 = \frac{V_0 \cdot \cos[(\beta - \alpha)/2]}{\sin \beta} \quad (1)$$

Sa slike možemo uočiti $\angle OPA = \phi$, i $\alpha + \phi + 180 - \beta = 180$ ili $\phi = \beta - \alpha$, suma uglova u trouglu je 180° . Linijski segment \overline{XB} je okomit na \overline{PA} . Ugao γ je definisan kao ugao trougla XBP. Dalje, razmatrajući trougao PXB gdje važi odnos $9 + \gamma + 90 = 180$ ili $\gamma = 90 - 9$. U trouglu XAB, $\beta + 90 + \angle ABX = 180$ ili $\angle ABX = 90 - \beta$. Zatim, duž linije $\overline{OPP'}$

$$2\vartheta + \phi = 180 \text{ ili } \vartheta = 90 - \phi/2 = 90 - (\beta - \alpha)/2,$$

iz odnosa $\gamma + \vartheta = 90$ slijedi

$$\gamma + 90 - (\beta - \alpha)/2 = 90 \text{ ili } \gamma = (\beta - \alpha)/2$$

Ugao PP'B = ϕ jer u PP'B imamo $2\vartheta + \angle PP'B = 180$ ili $180 - \phi + \angle PP'B = 180$ pa je tako $\angle PP'B = \phi$.

U trouglu APB po sinusnom zakonu $V_1/\sin \vartheta = V_0/\sin \beta$, pa je sada $V_1 = V_0 \sin \vartheta / \sin \beta$,

$$\begin{aligned} \sin \vartheta &= \sin \left[90 - \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right) \right] = \cos \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right) \\ V_1 &= \frac{V_0 \cos[(\beta - \alpha)/2]}{\sin \beta} = \frac{V_0 \cos[\phi/2]}{\sin \beta} \end{aligned} \quad (2)$$

Posmatrač u tački A mogao bi primjetiti tačku P u gornjoj ravni kako mu prilazi brzinom $V_1 \cos \beta + V_0 \cos \vartheta$. Ova brzina V_2 postaje:

$$V_2 = V_1 \cos \beta + V_0 \cos \left[90 - \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right) \right] = V_1 \cos \beta + V_0 \sin \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right)$$

Koristeći jednačinu (2) možemo pisati

$$V_2 = \left[\frac{\cos[(\beta - \alpha)/2]}{\sin \beta} + \sin \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right) \right] \quad (3)$$

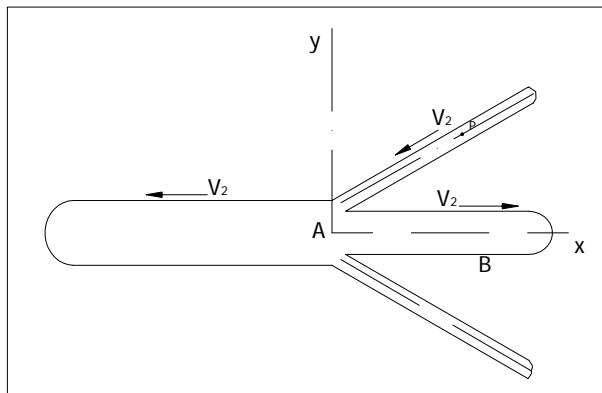
Takođe $U_d = U \cos \alpha$, gdje je U komponenta brzine kolapsa duž pravca $\overline{PP'}$ (brzina tečenja materijala lijevka) i korištenjem sinusnog zakona iz trigonometrije za trougao PBP'

$$U = \frac{V_0}{\sin(\beta - \alpha)} \sin \left[90 - \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right) \right] = \frac{V_0 \cos[(\beta - \alpha)/2]}{\sin(\beta - \alpha)}$$

Zatim možemo pisati

$$\frac{U_d}{\cos \alpha} = \frac{V_0 \cos[(\beta - \alpha)/2]}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (4)$$

Ako se vratimo na V_2 iz jednačine (3), posmatrač vidi primarni mlaz koji se relativno kreće desno od njega i sekundarni mlaz koji se relativno kreće lijevo od njega, kao što je to prikazano na slici 11. Komponenta V_2 prouzrokuje kretanje elemenata duž izvodnice lijevka prema vrhu konusa kao konvergentnoj tački.



Sl. 11. Formiranje primarnog i sekundarnog mlaza [40]

Polazeći od pretpostavke da je lijevak neviskozan i nestišljiv fluid, kretanje elemenata duž izvodnice može se predstaviti kretanjem fluida u dva simetrična mlaza, istom brzinom. Takođe, cijeli proces je stacionaran, nepromjenljiv tokom vremena.

Ova pretpostavka, uz ranije dvije, da je materijal lijevka u ovom stanju neviskozan i nestišljiv fluid, tj. da ne postoji unutrašnjo trenje između čestica materijala i da se njegova gustina ne mijenja u samom procesu, kao i jednodimanzionalan tok omogućavaju upotrebu Bernulijeve jednačine

$$P + \frac{\rho_0 \cdot U^2}{2} = \text{const}$$

Bernulijeva jednačina povezuje pritisak sa brzinom. Pritisak u bilo kojoj tački kumulativnog lijevka određuje brzinu u toj tački. Pretpostavka je da se lijevak kreće od detonacije veoma brzo i da pritisak na površini raste rapidno, kao i da je pritisak na svim površinama kolapsirajućeg lijevka konstantan. Ako se vratimo na stacionarni koordinatni sistem, pokazuje se da primarni mlaz ima brzinu

$$V_p = V_1 + V_2$$

dok sekundarni mlaz, koji se u pokretnom koordinatnom sistemu kreće nalijevo ima brzinu

$$V_s = V_1 - V_2$$

Da bi se vizualizirao ovaj proces uzmimo da tačka P (fiksirana na gornjoj ravni) putuje do tačke B (fiksna u prostoru) u jedinici vremena. Materijal iz unutrašnje površine gornje ravni (između \overline{PA} i \overline{AB}) pretvara se u primarni mlaz i kreće se nadesno brzinom

$$V_p = V_0 \left[\frac{\cos[(\beta - \alpha)/2]}{\sin \beta} + \frac{\cos[(\beta - \alpha)/2]}{\tan \beta} + \sin\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \right] \quad (6)$$

Takođe, vanjska površina obadvije ravni formira drugi dio kumulativnog mlaza – sekundarni mlaz koji se kreće manjom brzinom od primarnog

$$V_s = V_0 \left[\frac{\cos[(\beta - \alpha)/2]}{\sin \beta} - \frac{\cos[(\beta - \alpha)/2]}{\tan \beta} - \sin\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \right] \quad (7)$$

Jednačina kontinuiteta diktira podjelu materije na primarni i sekundarni mlaz. Neka je m ukupna jedinična masa lijevka, i neka m_p predstavlja dio ukupne mase koja ulazi u sastav primarnog mlaza, a m_s dio mase koja čini sekundarni dio mlaza. Tada je

$$m = m_p + m_s \quad (8)$$

Projiciranjem jednačine kontinuiteta na ose pokretnog koordinatnog sistema dobivamo

$$m \cdot V_2 \cdot \cos \beta = m_s \cdot V_2 - m_p \cdot V_2 \quad (9)$$

rješavanjem sistema jednačina (8) i (9)

$$m_p = \frac{m}{2}(1 - \cos \beta) \quad m_s = \frac{m}{2}(1 + \cos \beta) \quad (10)$$

Prema ovom modelu, brzine primarnog i sekundarnog mlaza su konstantne. Uvodeći brzinu detonacijskog talasa U_d , imamo

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{U_d}{\cos \alpha} \sin(\beta - \alpha) \left[c \sec \beta + \operatorname{ctg} \beta + \tan\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \right] \\ V_s &= \frac{U_d}{\cos \alpha} \sin(\beta - \alpha) \left[c \sec \beta - \operatorname{ctg} \beta - \tan\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Brzina primarnog mlaza raste sa smanjenjem ugla α , kao i ugla β . Ova brzina dostiže maksimum kada $\alpha \rightarrow 0$, ili $V = U_d(1 + \cos \beta + \tan \frac{\beta}{2})$.

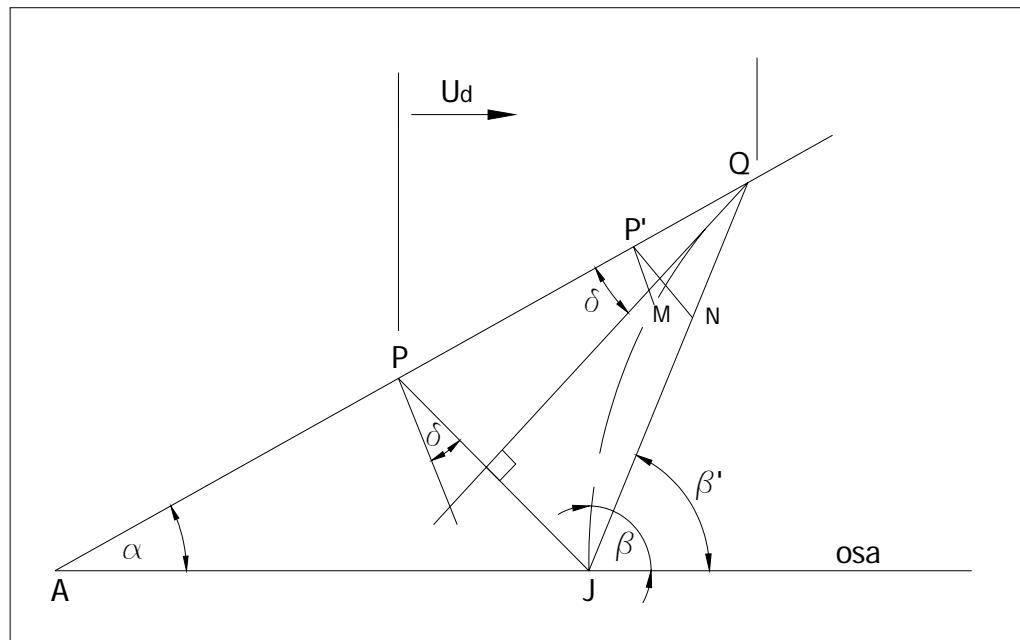
Takođe, kada $\alpha \rightarrow 0$ i $\beta \rightarrow 0$ tada i $V_s \rightarrow 0$. Kada se ugao α približava nuli, konusni lijevak postaje cilindar, a cilindrične obloge su sposobne ostvariti primarne kumulativne mlazeve male mase i velike brzine.

Birkhoff-ov stacionarni model nam pruža dobra kvantitativna slaganja sa savremenim eksperimentalnim ispitivanjima. Ovaj model, ipak, ima tendenciju da daje nešto veće vrijednosti primarnog mlaza nego one koje daju eksperimentalna istraživanja. On ne uzima u obzir izduženje i prekid kumulativnog mlaza koje uzrokuju promjene brzina primarnog i sekundarnog mlaza u procesu. Kada bi materijal lijevka bio od nekog krtog materijala čestice mlaza bi se odmah nakon nailaska detonacionog talasa razdvojile, dok se upotreboom plastičnih materijala kao što je bakar postiže bolja izdržljivost materijala u pogledu prekida mlaza.

Važne modifikacije ovog modela napravili su Pugh, Eichelberger i Rostoker [40], kao i Godunov [42]. Pugh et al. su razvili nestacionarnu teoriju, poznatu pod imenom PER teorija. Ona se bazira na istim konceptima kao i stacionarna teorija (Birkhoff) osim što brzine kolapsa pojedinih elemenata lijevka nisu iste za sve elemente već variraju u zavisnosti od početnog položaja tog elementa. Tako, brzina urušavanja opada kontinualno od vrha lijevka da njegove baze, praveći značajno izduženje mlaza.

3) PER teorija

PER teorija prepostavlja promjenljivu, umjesto konstantne brzine urušavanja lijevka, pri procesu detonacije kumulativnog punjenja. Ovakvo stanje poboljšava rezultate stacionarne teorije. Brzina urušavanja materijala lijevka (kolapsa) smanjuje se idući od vrha lijevka prema osnovi. Slika 12. prikazuje efekte ovih promjena.



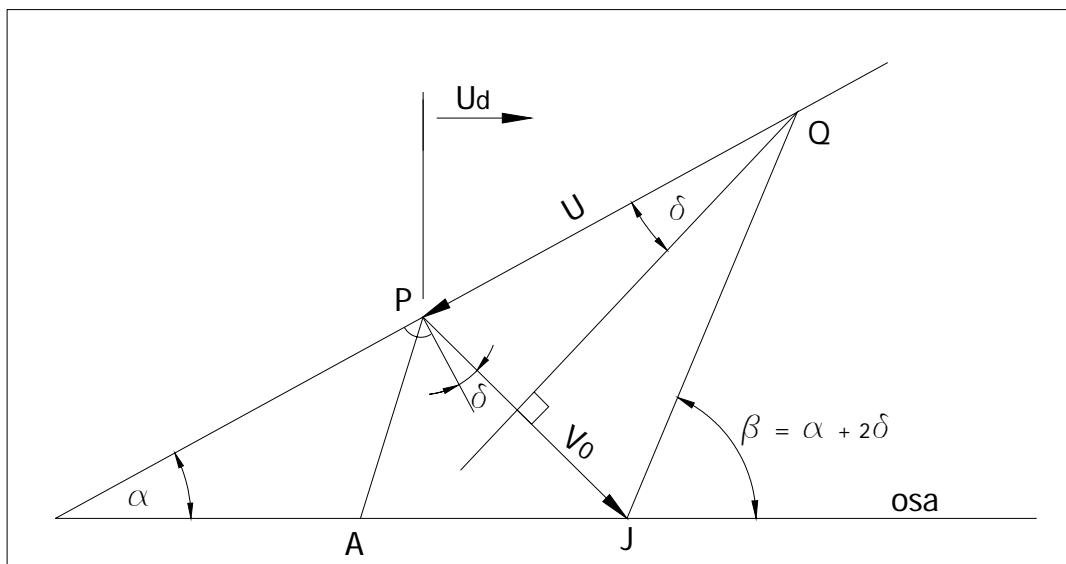
Sl. 12. Proces kolapsa za kumulativni lijevak sa promjenljivom brzinom urušavanja [40]

Treba primjetiti da, kako se povećava ugao urušavanja β , tako se smanjuje brzina primarnog mlaza, ali se udio lijevka koji ulazi u sastav mlaza povećava. Kako detonacijski talas putuje od P do Q duž konusne površine APQ, element lijevka prvobitno u tački P kolapsira u tačku J. Element lijevka koji je u početnom stanju u tački P' kasnije počinje s urušavanjem i kolapsira sporije nego element u tački P, a dolazi do tačke M u isto vrijeme kada element u P stiže do tačke J. Element P' bi stigao do tačke N kada P stigne do tačke J da su im brzine urušavanja iste.

Zato, sa konstantnim brzinama kolapsiranja lijevka, površina bi ostala konusna, i \overline{QN} bi bila prava linija. Međutim, budući da P' ima sporiju brzinu urušavanja nego posmatrani element u tački P, urušavajući kumulativni lijevak ima zakrivljenu konturu \overline{QM} , kao što je prikazano na slici 12.

Ugao β je veći od ugla β' , spomenutog u stacionarnoj teoriji Birkhoffa. Ovo implicira da je svaki element lijevka, ma koliko bio malen, posebna cijelina i nije pod uticajem susjednih tačaka, u skladu sa hidrodinamičkom prepostavkom.

Na slici 13. ilustriran je tok tečenja materijala lijevka. \overline{QJ} je paralelan \overline{AP} i jednak dužini \overline{PQ} . Ako su \overline{QP} i \overline{QJ} jednake U, one predstavljaju brzine elemenata lijevka koje ulaze i izlaze iz tačke P u pokretnom koordinatnom sistemu. Vektor $\overline{PJ} = V_0$ je brzina urušavanja elemenata lijevka u stacionarnom koordinatnom sistemu.



Sl. 13. Tok tečenja materijala lijevka [40]

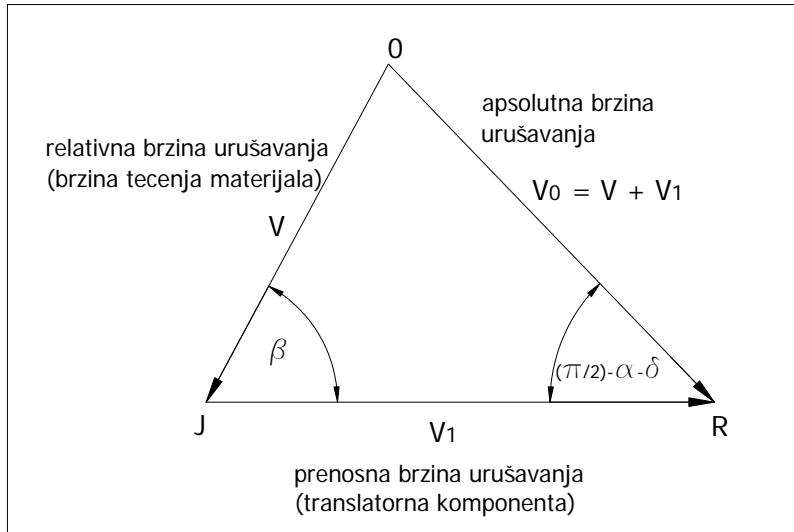
Elementi kumulativnog lijevka ne kreću se okomito na svoju početnu površinu nego duž linije koja čini ugao δ sa normalom. Ovaj ugao (slika 13.) je

$$\sin \delta = \frac{V_0}{2U} \quad (12)$$

Ako je V_0 konstantna, $\beta = \beta'$ i $\delta = (\beta - \alpha)/2$, i svi rezultati PER teorije identični su rezultatima stacionarne teorije Birkhoffa.

Pravilnim izborom koordinatnog sistema, geometrijski odnosi u pokretnom spoju (J) su prikazani na slici 14. Osa konusa je duž \overline{JR} , a \overline{OJ} je element lijevka koji se kreće prema osi. Ovaj element ima brzinu $\overline{OJ} = V$ koja predstavlja relativnu brzinu kretanja mlaza, tj. brzinu tečenja materijala lijevka. Brzina $\overline{JR} = V_1$ je prenosna brzina kumulativnog mlaza i paralelna je sa osom kumulativnog punjenja. Koristeći sinusni zakon

$$V_1 = \frac{V_0 \cos(\beta - \alpha - \delta)}{\sin \beta} \quad V = \frac{V_0 \cos(\alpha + \beta)}{\sin \beta} \quad (13)$$



Slika 14. Vektori brzina urušavajućeg kumulativnog ljevka

U fiksnom koordinatnom sistemu, brzine primarnog i sekundarnog mlaza su $V_p = V_1 + V$ i $V_s = V_1$ i V , respektivno. Koristeći jednačine (13), zajedno sa trigonometrijskim teoremmama, brzine primarnog i sekundarnog mlaza postaju

$$V_p = V_0 \csc \frac{\beta}{2} \cos(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2})$$

$$V_s = V_0 \sec \frac{\beta}{2} \sin(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}) \quad (14)$$

Treba primjetiti da za uslov $\beta = \beta' = \alpha + 2\delta$ prethodne jednačine postaju jednake onima korištenim u Birkhoff-ovoј teoriji (11).

Eliminacijom δ iz jednačina (14), i koristeći (12) imamo

$$V_p = V_0 \csc \frac{\beta}{2} \cos(\alpha - \frac{\beta}{2} + \sin^{-1} \frac{V_0}{2U})$$

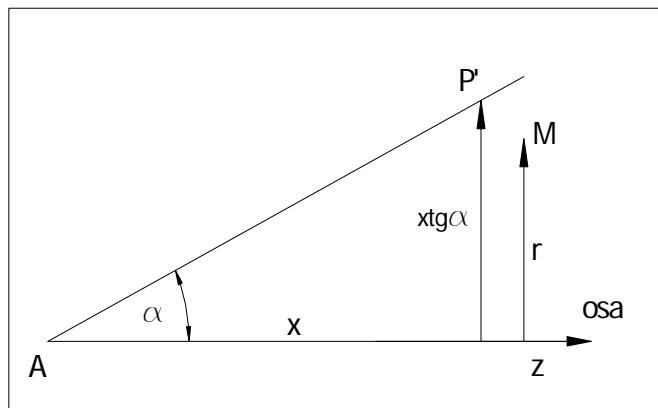
$$V_s = V_0 \sec \frac{\beta}{2} \sin(\alpha - \frac{\beta}{2} + \sin^{-1} \frac{V_0}{2U}) \quad (15)$$

Ove jednačine su važeće i u slučaju stacionarnog modela kada je V_0 konstantna ili u nestacionarnom slučaju gdje V_0 predstavlja promjenljivu veličinu. U prvom slučaju, međutim, β se može izraziti preko α , U i V_0 , i ne mora se pojavljivati u gornjim jednačinama. Budući da imamo četiri nepoznate V_p , V_s , m_p i m_s , potrebne su nam dodatne jednačine za m_s i m_p .

Ove dodatne jednačine dobijamo iz jednačine kontinuiteta i korištenjem jednačina (9) i (10)

$$\begin{aligned} dm &= dm_p + dm_s \\ \frac{dm_p}{dm} &= \sin^2 \frac{\beta}{2} \\ \frac{dm_s}{dm} &= \cos^2 \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

Jednačine (16) opisuju odvajanje masa i brzine svakog elementa kumulativnog lijevka. One zavise od ugla konusa 2α , detonacione brzine $U_d = U \cos \alpha$ i od ugla urušavanja lijevka β .



Sl. 15. Smjerovi koordinata [3]

Kontura kumulativnog lijevka nakon detonacije nije prava već kriva linija (\overline{QMJ} na slici 12.). Koristeći sliku 12., uzmimo da cilindrične koordinate tačke M budu (r, Z) , a koordinate tačke P' $(Xtga, X)$. Pravci ovih koordinata prikazani su na slici 15. Tada je

$$Z = X + V_0 \cdot (t - T) \cdot \sin A$$

$$r = X \cdot \operatorname{tg} \alpha - V_0 \cdot (t - T) \cdot \cos A \quad (17)$$

Gdje je t vrijeme koje je proteklo od prolaska detonacijskog talasa od vrha konusa, $T = X/U_d = X/(ucos\alpha)$, a ugao $A = \alpha + \delta$. Nagib konture urušavajućeg lijevka u bilo kojem vremenu može se dobiti iz izraza $\partial r/\partial Z$ koristeći jednačine (17), kao i vrijeme potrebno posmatranom elementu da stigne do ose lijevka

$$t - T = \frac{X \cdot \operatorname{tg} \alpha}{V_0 \cdot \cos A}$$

Ugao urušavanja β izračunava se uz pomoć Taylorove formule (12), te sada on postaje

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \alpha + 2 \sin \delta \cdot \cos A - X \cdot \sin \alpha \cdot (1 - \operatorname{tg} A \cdot \operatorname{tg} \delta) \cdot V_0'/V_0}{\cos \alpha - 2 \sin \delta \cdot \sin A + X \cdot \sin \alpha \cdot (\operatorname{tg} A + \operatorname{tg} \delta) \cdot V_0'/V_0} \quad (18)$$

Kako je $2\delta = \beta' - \alpha$ i $2A = \beta' + \alpha$, prethodna jednačina se može pojednostaviti

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\sin \beta - X \cdot \sin \alpha \cdot (1 - \operatorname{tg}A \cdot \operatorname{tg}\delta) \cdot V_0' / V_0}{\cos \beta + X \sin \alpha \cdot (\operatorname{tg}A + \operatorname{tg}\delta) \cdot V_0' / V_0} \quad (19)$$

Veličina V_0' predstavlja parcijalnu derivaciju brzine V_0 po promjenljivoj X . Ugao $\beta > \beta'$ jer je $V_0' < 0$, to jest, brzina urušavanja se smanjuje od vrha lijevka prema njegovoj osnovi, i za uglove konusa (2α) koji nisu ekstremno veliki. Dodatni matematički obrasci i kompletan diskusija može se naći u radovima Pugha [40] i doktorskoj disertaciji Echelbergera. [43]

Posebna pažnja treba se posvetiti položaju uglova u trigonometrijskoj kružnici, tj, kvadrantima u kojima se nalaze uglovi iz jednačina (18) i (19). Za uglove u drugom kvadrantu potrebne su manje modifikacije jednačina. Numerički algoritmi izračunavaju trigonometrijske funkcije koje se provjeravaju za svaki kvadrant posebice. PER teorija daje izraze za m_p , m_s , V_p , V_s , δ i β , i broj nepoznatih premašuje broj nezavisnih jednačina.

Eksperimentalni dokazi koji potvrđuju model i prepostavke PER teorije dati su Eichelberger i Pugh [40]. Allison i Vitali [44] u svojim izvrsnim radovima, koristili su tehniku radioaktivnog trasera i dobili eksperimentalne rezultate koji se izvrsno slažu sa PER teorijom.

Bryan et al. [102] dovodi u vezu brzinu mlaza sa njegovim položajem u odnosu na lijevak. Eksperimentalna tehnika koju je koristio sastojala se od rotirajuće kamere s ogledalom koja je određivala brzinu dolazećeg kumulativnog mlaza kao funkciju debljine ploče (mete). Konusni čelični kumulativni lijevc (M9A1) su prevučeni uskim trakama radioaktivnog materijala. Obloženi konusi su zatim ispaljivani u čelične mete. Analiza mete dala je dubinu na kojoj se zadržavao označeni element. Rezultirajuće korelacije između dubine svakog elementa i njegove pozicije u konusu su kombinovane sa korelacijama između dubine svakog elementa i njegove brzine da bi dobili tražene krive na kojima je prikazana zavisnost brzine od pređenog puta. Kao radioaktivni materijal korišteno je željezo (Fe^{59}). Ovaj izotop izabran je na osnovu njegovog vremena raspadanja i jakog gama zračenja, koje je potrebno zbog što bolje detekcije trasera smještenog unutar mete.

Slična mjerjenja mogu se obaviti indirektnom metodom koja uključuje skupljanje, mjerjenje i vaganje dijelova primarnog i sekundarnog mlaza za koje su brzine već izmjerene. Dvije metode određivanja zavisnosti brzine primarnog mlaza od njegovog položaja pokazuju generalno kvalitativna slaganja. Međutim, najveće neslaganje postoji u blizini osnove konusa. Bryan nam daje dalje detalje o tome, ali i o izvorima grešaka u obadva mjerjenja.

Gainer [103] koristi radioaktivne trasere pri proučavanju različitih segmenata na 105mm bakrenom konusnom lijevknu i njihovog uticaja na probojnost čeličnih meta. Rađeno je na kumulativnim punjenjima sa košuljicom (tanki čelik) i bez nje. Gainer je poboljšao eksperimentalni postupak koji je razvio Bryan [102] koristeći srebro (Ag^{110}) kao traser, čime je znatno povećao rezoluciju snimaka. Nije detektovana radioaktivnost u sekundarnom mlazu, što implicira da je skoro cijela unutrašnja površina lijevka postala primarni mlaz. Takođe, velike razlike su primjećene u gradijentima brzina kod punjenja sa košuljicom i onima bez košuljice.

Gainer je otkrio da u punjenju sa košuljicom, područje lijevka oko osnove utiče značajno na probojnost, dok kod punjenja bez košuljice ovo područje ne utiče mnogo na penetraciju. Mjerenja koja pokazuju zavisnost probojnosti od vremena probijanja govore da su brzina primarnog mlaza, na maksimalnoj dubini penetracije kod kumulativnih punjenja s košuljicom ili bez nje, skoro identične.

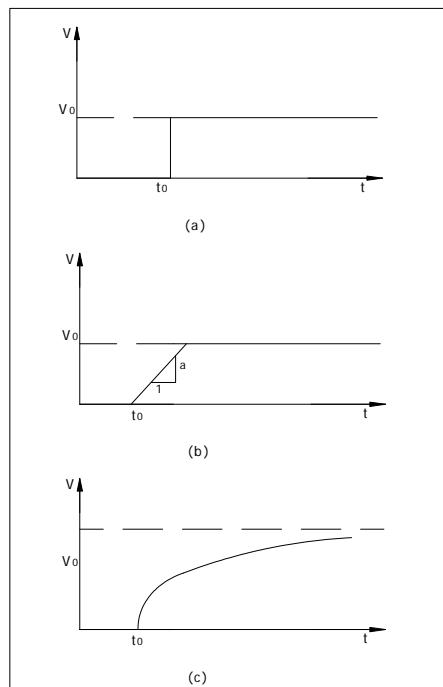
Prema tome, PER teorija je potvrđena eksperimentalno i ona predstavlja osnovni analitički model formiranja kumulativnog mlaza. Dosta autora proširilo je ovaj model uvodeći dodatne jednačine, na taj način približavajući analitička rješenja sa rješenjima dobijenim numeričkim ili eksperimentalnim putem.

Taylorov ugao δ može se odrediti formulom koju su predložili Richter [104] i Defourneaux [105]

$$\frac{1}{2\delta} = \frac{1}{\phi_0} + \frac{\rho \cdot \varepsilon \cdot K}{e} \quad (20)$$

Gdje su ρ i ε gustina i debljina lijevka, respektivno, a e debljina eksplozivnog punjenja. K i ϕ_0 su konstante koje se određuju na osnovu vrste korištenog eksploziva i ugla i , kojeg detonacioni talas zaklapa sa kumulativnim lijevkom. Jednačina (20) upotrebljava se, zajedno sa PER teorijom, u analitičkim kodovima formiranja mlaza kao što su BASC [106] i DESC [89]. Defourneaux 1979. godine, takođe, objavljuje dobru diskusiju o urušavanju lijevka i formiranju mlaza što predstavlja odličan dodatak PER teoriji.

PER teorija prepostavlja da su elementi lijevka trenutačno ubrzani do ose simetrije, kao na slici 7a. Korekciju prvog reda donosi prepostavka da je ubrzanje kumulativnog konusnog lijevka konstantno određeni period vremena, kao što je prvo bitno predložio Eichelberger [43], a kasnije koristio Carleone [48]. Brzina se tada povećava linearno kratak period vremena, kao na slici 16b, dok ne dostigne svoju konačnu brzinu ili kolapsira na osu.

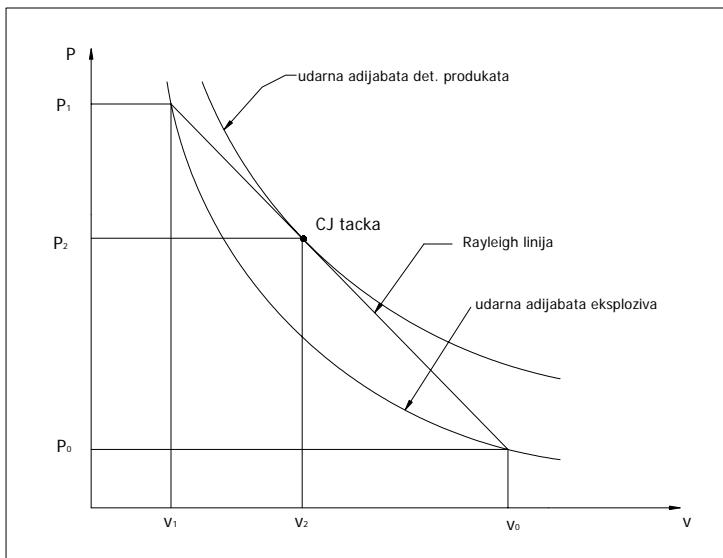


Sl. 16. Različiti načini izračunavanja brzine:
 (a) trenutačno ubrzanje; (b) konstantno ubrzanje;
 (c) eksponencijalno ubrzanje [6]

Carleone ubrzanje predstavlja izrazom:

$$a = c \frac{P_{CJ}}{\rho \epsilon}$$

Gdje je P_{CJ} pritisak eksploziva u Chapman-Jouget tački, ρ i ϵ gustina i debljina lijevka, a c empirijska konstanta. Pod djelovanjem udarnog talasa koji je nastao iniciranjem eksplozivnog punjenja dolazi do udarne kompresije uskog sloja eksplozivne tvari (jer pri djelovanju udarnog opterećenja materijal zbog inercijskih sila ne reaguje kao cjelina) od početnog volumena V_0 ($V_0 = 1/\rho_0$ – gdje je ρ_0 gustoća polazne eksplozivne tvari) do volumena V_1 (slika 17.), u skladu s udarnom (ili Hugoniot-ovom) adijabatom za dotičnu eksplozivnu tvar.



Sl. 17. Chapman-Jouget tačka [19]

Zbog toga pritisak unutar komprimiranog sloja raste od početne vrijednosti P_0 do vrijednosti P_1 , a temperatura od početne vrijednosti T_0 do T_1 . Zbog naglog (skokovitog) rasta temperature (do 3000 K) dolazi do iniciranja hemijskih reakcija u komprimiranom sloju eksplozivne tvari. Po završetku kemijskih reakcija specifični volumen i pritisak nastalih plinovitih produkata imaju vrijednosti V_2 i P_2 . To stanje odgovara točki koja leži na krivulji udarne adijabate detonacijskih produkata. Nakon toga slijedi izentropska ekspanzija detonacijskih produkata na okružujuću sredinu. Prema ZND (Zeljđović – von Neuman – Doering) modelu stacionarne detonacije točke (V_0, P_0) , (V_1, P_1) i (V_2, P_2) leže na jednom pravcu. Taj se pravac naziva Rayleightov ili Mihelsonov pravac [108]. Nagib Rayleightovog pravca određen je brzinom detonacije dotičnog eksploziva.

Prema Chapman-Jouguetovoј hipotezi, Rayleightov pravac je tangenta na udarnu adijabatu detonacijskih produkata u točki (V_2, p_2) , koja odgovara završetku kemijskih reakcija. Ta se točka naziva Chapman-Jouguetova točka (CJ točka). [108]

Zadovoljavajuće rješenje za brzinu lijevka dali su Randers-Pehrson [110] izrazom:

$$V(t) = V_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right]$$

Ovaj izraz zahtjeva poznавање vremenske konstante τ , za коју Chou [109] предлаže slijedećу formulaciju

$$\tau = c_1 \frac{M \cdot V_0}{P_{CJ}} + c_2$$

Ovdje je M почетна маса по једињачкој површини лјевка, а c_1 и c_2 empirijsке константе.

Razmatraјући раније споменуте ефекте, Chou дaje још тачнији израз за Taylorов угao (δ):

$$\delta = \frac{V_0}{2U} - \frac{\tau V'_0}{2} + \frac{\tau' V_0}{4}$$

Hirsch et al. [111] formulira опште једначине кретања танког кумулативног млаза. Узета је у обзир кривина лјевка и једначине кретања решене су у затвореној форми за одређене slučajeve. Приближна решења су задржана за Taylorов угao и relativno izduženje mlaza - dL/dL_0 где је L_0 почетна дужина mlaza, а L дужина mlaza u trenutku t . Анализа је примјенјена на konusne, cilindričне и hemisferične лјевке, a добро слaganje postignuto je i na dvodimenzionalnim kompjuterskim simulacijama.

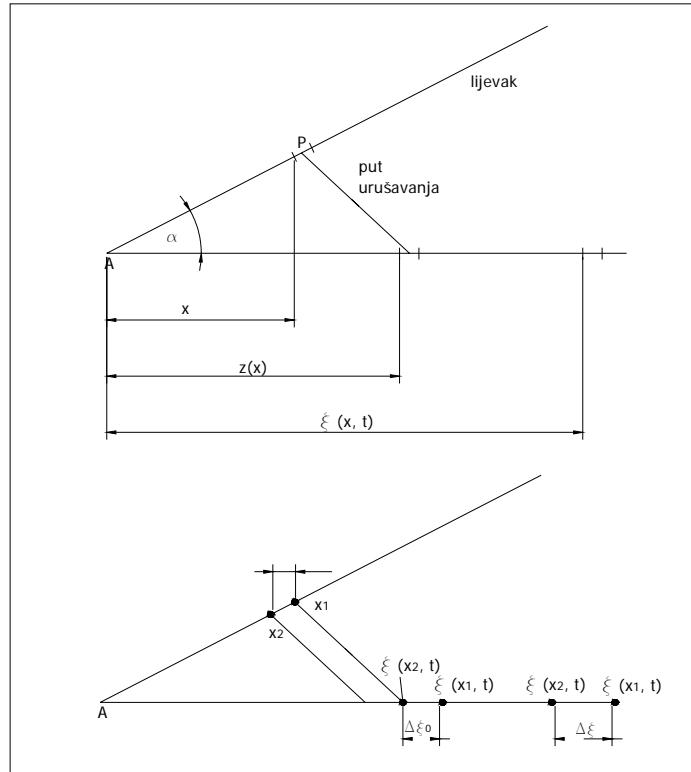
Modeli ovog типа, који прoučавају процес уруšавања кумулативног лјевка, представљају модерну надоградњу PER теорије. Ови једнодимензионални програми користе аналитичке теоријске обрасце да би на брз и ефикасан начин израчунали Taylorов угao δ , брзину tečenja материјала V , брзину уруšавања V_0 , translatornu брзину mlaza V_I , градијент брзине уруšавања V'_0 , брзину primarnog mlaza V_p , брзину sekundarnog mlaza V_s , угao уруšавања лјевка β , масу primarnog mlaza m_p , као и масу sekundarnog mlaza m_s .

Наčin иiniciranja punjenja и tip brizantnog eksploziva moraju бити познати да би се одредила gustoća eksploziva и detonaciona brzina. Proces detonacije представља процес slojevitog prostiranja hemijskih reakcija po eksplozivnoj tvari nadzvučnom brzinom. Pri detonaciji se hemijske reakcije u neizreagiranom sloju eksplozivne tvari иiniciraju djelovanjem udarnog talasa. Udarni talas svojim udarnim djelovanjem (tj. udarnом компресијом) изазива adijabatsko zagrijavanje uskog sloja eksplozivne tvari, što rezultira иiniciranjem skoro trenutnih hemijskih reakcija u komprimiranom sloju. Potom se hemijske reakcije odvijaju tako brzo (u vremenu reda величине mikrosekunda) да се сва toplinska energija oslobođi прије značajnijeg širenja nastalih plinovitih produkata. U trenutku završetka hemijskih reakcija gustoća nastalih plinovitih produkata u зони reakcija veća је за око 30 % od gustoće same eksplozivne tvari. Zbog tako visoke gustoće и visoke temperature на коју су загријани, nastali se plinoviti detonacijski производи налазе под огромним tlakom – reda величине 10^6 bara. Kod процеса detonacije bitno је и то да се, за razliku od sagorijevanja, nastali plinoviti производи kreću u правцу prostiranja detonacije. Наčin иiniciranja одређује облик detonacionog talasa (ravan ili sferičan), као и угao između лјевка и detonacionog talasa. Detonacijski talas чине front udarnog vala и zona hemijskih reakcija.

Relativna distribucija kinetičке energije која се налази у primarnom и sekundarnom mlazu може се представити изразима

$$\begin{aligned} \frac{dE_p}{dE} &= \cos^2(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}) \\ \frac{dE_s}{dE} &= \sin^2(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}) \end{aligned} \quad (21)$$

Materijal u blizini vrha konusa nema dovoljno vremena da dostigne svoju teoretsku brzinu urušavanja, i zbog toga najranije formirani dijelovi mlaza imaju manje brzine nego materijal mlaza formiran iza njih. Sve ove efekte uzima u obzir većina kodova za izračunavanje parametara mlaza, kao što je npr. BASC [106]. Moguće je računati i neke druge parametre, impuls, istezanje mlaza, itd. Da bi proračunavali izduženje, dužinu i radius mlaza, neophodno je da se poveže položaj određenog elementa lijevka sa njegovim početnim položajem. To su prvi učinili Carleone i Chou, koristeći Lagranžove koordinate. Koordinata x je korištena za aksijalnu poziciju lijevka, a koordinata ξ za položaj mlaza, kao na slici 18.



Sl. 18. Odnosi između koordinate lijevka x i koordinate mlaza ξ [39]

Položaj mlaza opisan je izrazom

$$\xi(x, t) = Z(x) + (t - t_0)V_p(x) \quad (23)$$

gdje t_0 predstavlja vrijeme potrebno da element lijevka stigne do ose, $Z(x)$ je položaj formacije mlaza, a V_p je brzina primarnog mlaza. Treba primjetiti da je V_p funkcija položaja lijevka, a ξ funkcija i položaja lijevka i vremena.

Istezanje mlaza može se izračunati obrascem

$$\eta = \lim_{x_2 \rightarrow x_1} \frac{\Delta \xi - \Delta \xi_0}{\Delta \xi} = \frac{(\partial \xi / \partial x)_t}{(\partial \xi / \partial x)_{t_0}} - 1 \quad (24)$$

U području vrha lijevka, svaki element mlaza ima veću brzinu nego oni ispred njega, uzrokujući nagomilavanje mase mlaza. Nagomilana masa mlaza formira vrh mlaza što potvrđuju i eksperimenti.

Brzina vrha mlaza [3], koja se računa se uz pomoć jednačine kontinuiteta, iznosi

$$V_{j0} = V_{vrh} = \frac{\int_0^{X_{vrh}} V_p \cdot (dm_p / dX) dX}{\int_0^{X_{vrh}} (dm_p / dX) dX} \quad (25)$$

Hirsch [111] proširuje PER model i uvodi nestacionarne efekte u tački sudara (tačka formacije) pretpostavljajući da, relativno u odnosu na ovu tačku, brzine primarnog i sekundarnog mlaza nisu jednake dolazećim brzinama elemenata lijevaka kako pretpostavlja PER teorija na osnovu Bernulijeve jednačine.

Druge studije uključuju modifikacije ili dodatke PER teoriji, kao što je učinio Perez [112], koji je modifikovao PER teoriju i uzeo u obzir dvodimenzionalne efekte toka u blizini ose urušavanja. Leidel [113] daje prikaz PER modela i analizira razne vrste punjenja.

Harrison i Karpp [114] upoređuju jednostavne jednodimenzionalne modele sa hidrokodovima i eksperimentalnim podacima. Vigil i Robinson [115] daju trodimenzionalan model radi analiziranja trodimenzionalnog kolapsa, stvaranja mlaza i penetracije linearног kumulativnog punjenja. Rezultati su u skladu sa eksperimentalnim istraživanjima.

4) Generalizacija modela formiranja kumulativnog mlaza

PER teoriju modifikovao je Behrmann [116], a kasnije i Carleone [48] zbog devijacija od geometrije konusnog lijevka i varijacija u načinima iniciranja eksplozivnih punjenja. Ove modifikacije omogućavaju proučavanje svih kumulativnih lijevaka, na primjer konfiguracije nalik na trubu, ili drugih oblika koji su slični konusu. Takođe, mogu se proučavati i sferični detonacijski talasi (kao i ravan detonacioni talas).

Jednačina (15) iz PER modela glasi:

$$V_p = \frac{V_0}{\sin \frac{\beta}{2}} \cos(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}) \quad (26)$$

Generališući izraze možemo uzeti da je vrijednost detonacione brzine eksploziva U duž površine kumulativnog lijevka sada $U = U_d / \cos(\epsilon(x))$, gdje U_d predstavlja detonacionu brzinu eksploziva (datu u tablicama), a $\epsilon(x)$ ugao između normale detonacionog fronta i površine lijevka. Taylorov ugao generalizovan je formulom

$$\sin \delta = \frac{V \cdot \cos \epsilon_0}{2U_d} \quad (27)$$

PER teorija pretpostavlja konstantan ugao vrha lijevka, konstantnu debljinu lijevka, i ravan talas detonacije. Slika 19. grafički prikazuje fizikalno stanje procesa. Ugao α je ugao između tangente na lijevak u tački x i ose kumulativnog lijevka. Ugao između urušavajućeg zida lijevka i njegove ose je ugao β . Ugao između vektora detonacione brzine eksploziva i tangente na lijevak je ugao ϵ . Posmatrajući sliku 19., možemo uočiti slijedeće trigonometrijske zavisnosti:

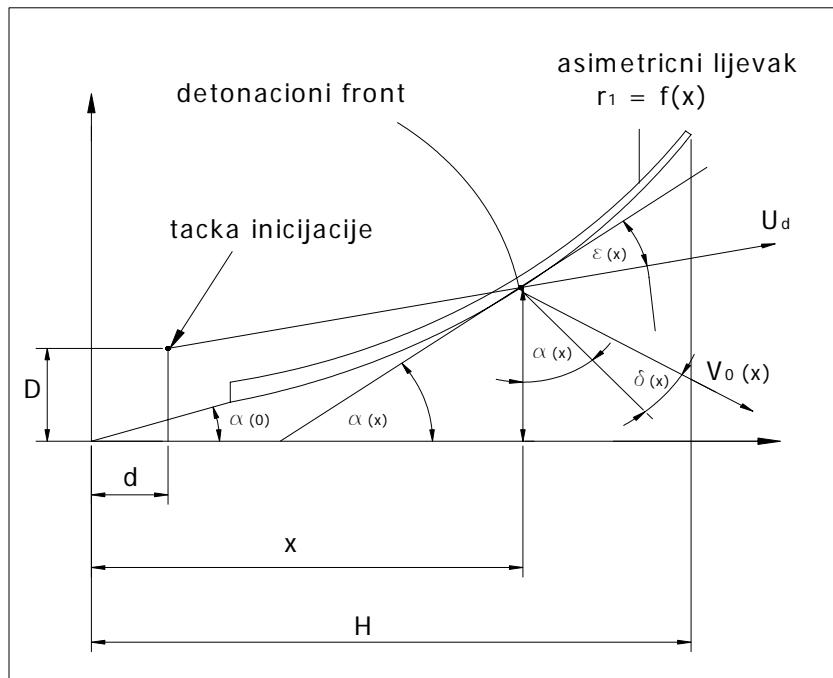
$$\operatorname{tg}(\alpha - \varepsilon) = \frac{r_i - D}{x - d} \quad (28)$$

$$T(x) = \frac{1}{U_d} [(x - d)^2 + (r_i - D)^2] \quad (29)$$

$$r(x) = r_i(x) - V_0(x) \cdot [t(x) - T(x)] \cdot \cos[\alpha(x) + \delta(x)] \quad (30)$$

$$Z(x) = x + V_0(x) \cdot [t(x) - T(x)] \cdot \sin[\alpha(x) + \delta(x)] \quad (31)$$

gdje je r_i radijus lijevka u tački x , T je vrijeme koje protekne dok detonacioni front stigne do tačke x , t je vrijeme koje je potrebno da tačka x na lijevku dostigne radijus r , i Z je korespondirajuća x koordinata. Tangenta urušavajućeg ugla β u bilo kom trenutku je, po definiciji, parcijalna derivacija varijable r po nepoznatoj Z , pri konstantnom vremenu t .



Sl. 19. Generalizovana asimetrična konfiguracija kumulativnog punjenja [3]

Matematički gledano, za slučaj kada je $r = 0$, tj. kada element lijevka stigne do ose, možemo na osnovu jednačine (31) konstatovati

$$t - T = \frac{r_i}{V_0 \cos A} \quad (32)$$

gdje je ugao $A = \alpha + \delta$. Ugao urušavanja, uz pomoć prethodnih jednačina, može se izračunati izrazom:

$$\operatorname{tg} \beta_{r=0} = \frac{\operatorname{tg} \alpha + r_i \cdot [(\alpha' + \delta') \cdot \operatorname{tg} A - V_0' / V_0] + V_0 \cdot T \cdot \cos A}{1 + r_i \cdot [(\alpha' + \delta') + V_0' / V_0 \cdot \operatorname{tg} A] - V_0 \cdot T \cdot \sin A} \quad (33)$$

gdje važe odnosi

$$\delta' = \operatorname{tg} \delta \cdot \left(\frac{V_0'}{V_0} - \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \right) \quad (34)$$

$$\varepsilon' = \alpha' + \frac{\cos^2(\alpha - \varepsilon)}{x - d} \cdot [\operatorname{tg}(\alpha - \varepsilon) - \operatorname{tg} \alpha] \quad (35)$$

$$T' = \frac{(x-d)}{U_d^2 \cdot T} \cdot [1 + \operatorname{tg}(\alpha + \varepsilon) - \operatorname{tg} \alpha] \quad (36)$$

Jednačine (26), (27), kao i (33)-(36), zajedno sa diferencijalnim jednačinama (16) iz PER teorije, čine dovoljan broj jednačina da se izračunaju svi važniji parametri kumulativnog mlaza generalizovanog asimetričnog punjenja, onda kada su poznati geometrija lijevka, način iniciranja, vrsta eksploziva, i brzina urušavanja kumulativnog lijevka. [3]

V POGLAVLJE

Model prekida kumulativnog mlaza

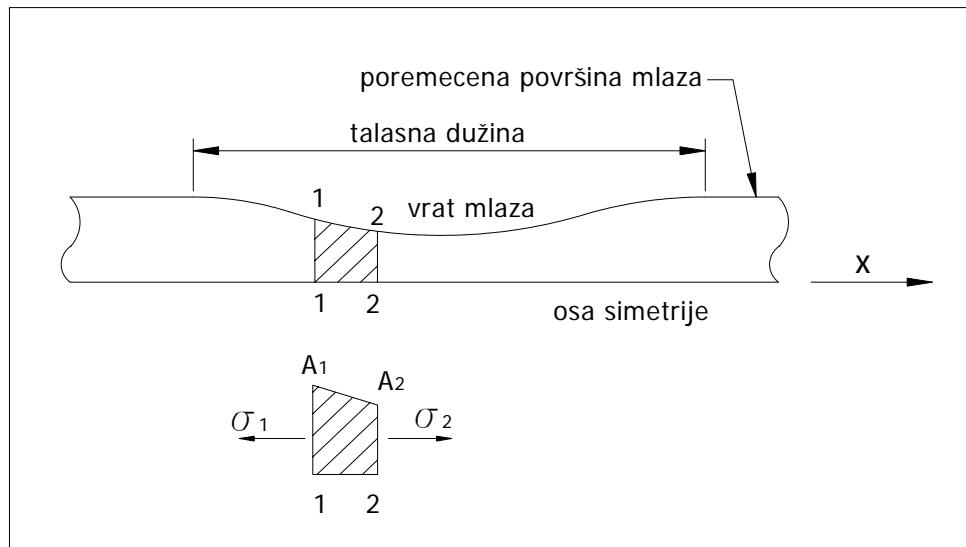
1. Uvod

Tipičan kumulativni mlaz, sastavljen od primarnog i sekundarnog dijela, ima relativno veliku brzinu vrha mlaza, a nešto manju brzinu zadnjeg dijela. Ovaj gradijent brzine mlaza često uzrokuje njegovo istezanje. Kada se mlaz prekine, ukupna probojnost značajno se smanjuje. Razumijevanje fenomena prekida mlaza je od velike važnosti za konstruktore kumulativnih bojevih glava. Posljednjih godina, mnogi istraživači proučavali su ovaj problem, Chou, Carleone, Walsh, Hirsch, Pfeffer, Haugstad, Miller. Generalno, koriste se tri pristupa, hidrodinamičke simulacije, jednodimenzionalni analitički modeli i empirijske formule. [3]

2. Chou – Carleone model

Upoređivanje svih dosada poznatih modela upućuje na zaključak da su Corleone i Chou dali, svojim analitičko-empirijskim modelom, najbolju korelaciju širokog spektra eksperimentalnih podataka sa analitičkim rezultatima. Ovi podaci uključuju nekoliko različitih geometrija lijevaka i materijala kumulativnih lijevaka. Slika 20. shematski prikazuje istezanje mlaza koji ima valovitu površinu nastalu zbog određenih poremećaja. U početku, amplituda talasa je veoma mala (slika je uvećana).

Uzmimo mali element ograničen površima 1 i 2. Dio 2 je u blizini tzv. vrata kumulativnog mlaza, tako da je prosječan aksijalni napon ovdje veći nego u površini 1.



Slika 20. Shematski dijagram koji pokazuje nestabilnost kumulativnog mlaza [3]

Ukupna površinska sila koja djeluje na ovaj element je

$$F = \sigma_2 \cdot A_2 - \sigma_1 \cdot A_1 \quad (37)$$

Ako je ova sila pozitivna, ona pokreće dati element prema vratu mlaza, stabilizirajući time cijelokupni mlaz. Ako je negativna, element se kreće prema zadnjem dijelu mlaza, amplituda poremećaja se povećava,

tako da mlaz postaje nestabilan. U stvarnom slučaju, postoji kritična talasna dužina pri kojoj je mlaz najnestabilniji. Za poremećaje slučajnih talasnih dužina, ona kritična raste najbrže i formira velike vratove u mlazu koji određuju dužinu fragmenata kod prekinutog kumulativnog mlaza.

Proces prekida mlaza može se podijeliti u dvije faze. Prva je povećanje amplitude talasaste površine i formiranje vratova zbog nestabilnosti mlaza. Druga faza je prekid mlaza, ili separacija, na vratovima mlaza. Dok poremećaj sa kritičnom talasnom dužinom počinje rasti i formirati vratove, mlaz se još uvijek isteže i radijus vrata postaje manji. Iznos istezanja, na kojem mlaz se prekida je druga osobina materijala. Koristimo veličinu f da predstavimo stepen istezanja mlaza

$$f = \frac{A_{sr} - A_{min}}{A_{sr}} \quad (38)$$

gdje je A_{sr} trenutna površina poprečnog presjeka mlaza, a A_{min} trenutna minimalna površina (na vratu mlaza). Veličina f_s je dinamičko izduženje, i definisano je kao vrijednost f pri kojoj dolazi do prekida mlaza. Generalno, f_s je karakteristika materijala kumulativnog lijevka.

Koristeći dimenzionu analizu i jednodimenzionalne proračune [3], vrijeme prekida mlaza, u bezdimenzionalnom obliku je

$$t_b' = 3.75 - 0.125 \cdot \eta_0' + \frac{1}{\eta_0'} \quad (39)$$

gdje su: t_b' = bezdimenzionalno vrijeme prekida mlaza = $C_p t_b / r_0$

$$C_p = \sqrt{\sigma_m / \rho_0}$$

σ_m = čvrstoća materijala

ρ_0 = početna gustina kumulativnog mlaza

t_b = vrijeme prekida mlaza

r_0 = početni radijus mlaza

η_0' = bezdimenzionalna vrijednost napona = $\eta_0 \cdot r_0 / C_p$

η_0 = početni iznos napona $\Delta V / \Delta X$

Ovdje ΔV označava promjenu brzine na dužini ΔX . Jednakost (39) dobija se uzimanjem vrijednosti dinamičkog izduženja $f_s = 0.3$, koje se slaže sa većinom eksperimentalnih podataka.

Izraz (39) pokazuje da je, u bezdimenzionalnom obliku, vrijeme prekida mlaza funkcija samo početnog iznosa napona istezanja (η_0'). Ovaj zaključak je u skladu sa rezultatima Walsha [45], jer ako se njegova formula za dužinu mlaza prilikom prekida transformira u pogodan oblik, dobit ćemo zavisnost vremena prekida mlaza samo od veličine η_0' . Iznos napona može se dobiti primjenom jednodimenzionalne teorije formiranja kumulativnog mlaza.

Ako, međutim, izabaremo vrijednost f_s veću od 0.3, konstante u izrazu (39) će se promijeniti. Jednačina (39) sadrži tri izraza na desnoj strani; prva dva predstavljaju ravnu liniju sa nagibom -0.125, dok treći izraz ima značajan udio jedino u slučaju manjih vrijednosti η_0' .

U dimenzionalnoj formi, izraz (3) postaje

$$t_b = \frac{r_0}{C_p} \left(3.75 - 0.125 \frac{\eta_0 \cdot r_0}{C_p} + \frac{C_p}{\eta_0 \cdot r_0} \right) \quad (40)$$

Iz ovog izraza može se primjetiti da se vrijeme prekida mlaza povećava kako se smanjuje vrijednost η_0' . Zavisnost veličine t_b o veličini C_p na prvi pogled nije očigledna, jer prva dva izraza u jednakosti (40) imaju suprotne predznake. Lako se, međutim, može pokazati da je za η_0' manje od 15, što odgovara većini praktičnih kumulativnih punjenja, derivacija $\partial t_b / \partial C_p$ negativna, te je zato vrijeme prekida mlaza obrnuto proporcionalno sa veličinom C_p . Vrijeme prekida će se povećavati sa smanjenjem čvrstoće σ_m , i povećanjem gustine mlaza ρ_0 . [3]

Chou i Carleone su procijenili vrijednost maksimalne brzine koju može postići kumulativno punjenje. Za ovu formulu koriste se: standardna teorija formiranja kumulativnog mlaza i izrazi za sudar mlaza i mete pri supersoničnim brzinama mlaza [46].

$$V_p \leq 2.41C$$

Ovaj izraz pokazuje da je maksimalna brzina primarnog kumulativnog mlaza direktno proporcionalna lokalnoj brzini zvuka materijala lijevka.

Carleone [47] nam daje i dodatne matematičke izraze, kao i rezultate simulacija hidrokodova za Chou-Carleone model predviđanja vremena prekida kumulativnog mlaza. Ovaj model u stanju je izračunati parametre velikog broja segmenata koji nastaju nakon raspada kumulativnog mlaza. Carleone je ukazao na jedan važan trend; naime, broj segmenata mlaza opada sa povećanjem ugla vrha konusa kumulativnog lijevka ili povećanjem debljina zida lijevka.

Chou-Carleone model, takođe, pokazuje da se mlaz ne prekida trenutačno, navodeći da se to dešava određenom vremenskom intervalu. Na kraju, model pokazuje i to da se vrijeme prekida mlaza može povećati na slijedeće načine:

- povećanjem poluprečnika kumulativnog mlaza
- smanjenjem vrijednosti istezanja mlaza
- smanjenjem čvrstoće mlaza
- povećanjem gustine mlaza i
- povećanjem dinamičkog izduženja mlaza

Uopšteno govoreći, ako svi ostali parametri ostaju nepromijenjeni, povećanje vremena prekida mlaza utiče na povećanje probojnosti primarnog kumulativnog mlaza, posebno na optimalnom standoff rastojanju. [3]

VI POGLAVLJE

Modeli penetracije kumulativnog mlaza

1) Uvod

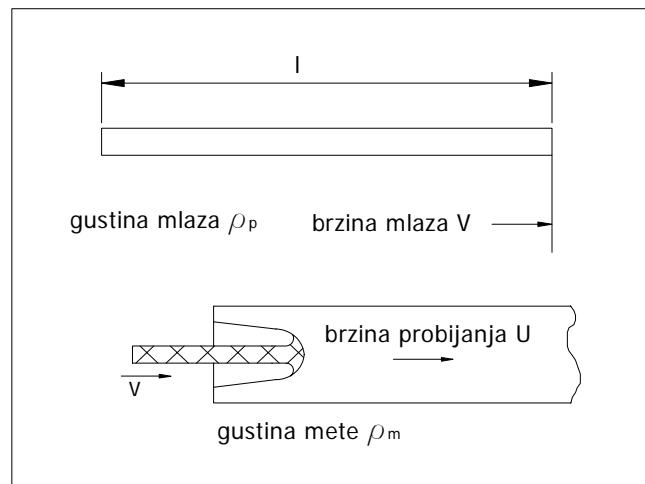
Analitički modeli koji su sposobni da predvide probojnost kumulativnih mlazeva u različite vrste materijala veoma su vrijedni za terminalne balističare. Mnoge naučne discipline uključene su u ove modele jer se kumulativni mlaz koristi za penetraciju metalnih oklopa, kao i stijena, tla, drveta, leda i drugih nemetalnih struktura. Ovi modeli obezbeđuju brza analitička predviđanja tamo gdje vrijeme i sredstva ne dozvoljavaju obimne računarske simulacije. Takođe, meta može biti homogena ili se sastojati od nekoliko slojeva različitih materijala, uključujući zrak i tečnosti. Zato, analitički izrazi za probojnost obično prepostavljaju jednodimenzionalan tok i druge pojednostavljajuće pretpostavke.

Rani analitički modeli probojnosti bazirani su na Bernulijevoj jednačini. Kasnije se uvode i empirijski faktori zbog razdvajanja mlaza, kao i neuniformna brzina mlaza. Neki autori uključuju i izraze koji uzimaju u obzir efekte stišljivosti, efekte skretanja mlaza, disperziju čestica, kao i turbulentnost toka čestica kumulativnog mlaza. Drugi modeli uključuju kratkotrajne efekte bazirane na jednodimenzionalnoj analizi jednačine kontinuiteta, bez posebnog oslanjanja na Bernulijevu jednačinu [3]. Carleone je 1982. godine razvio jednodimenzionalni kod koji opisuje proces formiranja mlaza, predviđaja parametara vezanih za prekid mlaza i uvodi aproksimativne metode za određivanje probojnosti u zavisnosti od standoff udaljenosti. [17]

2) Probojnost kumulativnog mlaza

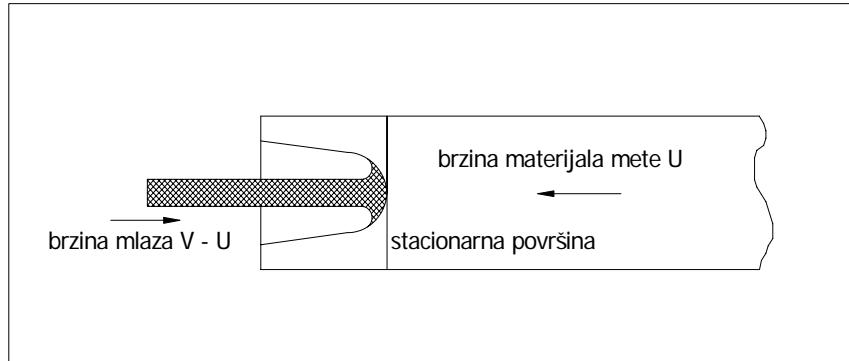
Birkhoff et al. [88] i Hill et al. [90] razvili su jednostavnu teoriju probojnosti na osnovu hidrodinamičke teorije mlaza. Zbog supersoničnih brzina kumulativnog mlaza, pritisak proizveden tokom udara kumulativnog mlaza u metu daleko premašuje čvrstoću većine materijala. Zato, kao prvu aproksimaciju, uzimamo da se čvrstoća i viskozitet materijala mete može zanemariti, što nam omogućava upotrebu poznatih hidrodinamičkih pretpostavki za nestišljiv i neviskozan tok fluida.

Razmotrimo kumulativni mlaz dužine l , gustine ρ_p , i brzine V koji probija homogenu metu gustine ρ_m . Brzina penetracije je U , kao na slici 21.



Sl. 21. Proces probijanja prepreke

Jednostavnije je probojnost posmatrati u pokretnom koordinatnom sistemu koji se kreće brzinom U , kao što se vidi na slici 22.



Sl. 22. Probojnost prikazana u pokretnom koordinatnom sistemu

U ovom koordinatnom sistemu profil otvora je fiksan, mlaz se kreće udesno brzinom $V - U$, a meta ulijevo brzinom U . Pritisak na obje strane spoja između mlaza i mete mora biti jednak. Sada se, zbog stacionarnosti fenomena, duž aksijalne ose može primjeniti Bernulijeva jednakost:

$$\frac{1}{2} \rho_p \cdot (V - U)^2 = \frac{1}{2} \rho_m \cdot U^2 \quad (41)$$

Slika 22. pokazuje da prilikom probijanja mete dolazi do erozije mlaza. Pretpostavljajući da je stacionarno stanje postignuto trenutačno i da penetracija prestaje kada zadnji dio primarnog mlaza udari u metu, tada je ukupna penetracija proizvod brzine penetracije i penetracionog vremena:

$$P = U \frac{l}{V - U} \quad \text{ili} \quad P = l \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

Ova jednostavna jednačina govori nam da je probojnost neovisna od brzine kumulativnog mlaza. Međutim, erozija mlaza i konačna dužina istezanja mlaza zavise od brzine mlaza, posredno preko veličine l . Za realne mlazeve, l je funkcija vremena. [3]

Postoji nekoliko ograničenja za ovu jednostavnu teoriju. Nakon što posljednji dio mlaza udari u metu, preostala inercija penetratora može izrokovati da otvor u meti nastavi rasti u dubinu (i širinu). Dodatna dubina nazvana je sekundarna penetracija [32], ili naknadni tok. Dubina kratera kada mlaz nestane naziva se primarna penetracija. Čak i primarna penetracija ne može se tačno predvidjeti, jer su u igri neki drugi faktori. Na primjer, veća penetracija zabilježena je kod mekih čelika nego u pancirnim čelicima, iako obje vrste imaju istu gustinu. Ovi rezultati nedvojbeno se pojavljuju zbog uticaja čvrstoće materijala, napona, kao i drugih osobina materijala koje nisu uključene u ovaj model probojnosti kumulativnog mlaza. Ovi efekti naročito su važni pri manjim brzinama mlaza, a manje važni pri supersoničnim brzinama. Ukratko, gustina (pa čak i čvrstoća) nisu uvijek dovoljne da karakteriziraju materijal mete u svrhu određivanja probojnosti mlaza. [3]

Ako je kumulativni mlaz razdvojen tako da čestice mlaza ne interferiraju jedne s drugima, čestice zadržavaju svoje brzine ($V - U$) i površina poprečnog presjeka mlaza ostaje ista sve dok čestice ne udare u metu, pretpostavljajući da one ostaju savršeno izravnate i paralelne osi mlaza, da nemaju turbulenciju toka, i ne divergiraju od ose probijanja.

Prilikom udara, dinamički pritisak proizveden od strane čestica mlaza može biti aproksimiran odnosom ukupne sile sa ukupnom površinom poprečnog presjeka mete koju kumulativni mlaz udara. Prema Evansu [62] ukupna sila bila bi $\rho_p A(V - U)^2$, a prosječni pritisak na udarnoj površini $\rho_p(V - U)^2$. Izjednačavanjem ovog pritiska sa pritiskom u materijalu mete u tački udara, iz Bernulijeve jednakosti, slijedi

$$\rho_p \cdot (V - U)^2 = \frac{1}{2} \rho_m \cdot U^2 \quad (43)$$

Jednačina (43) vodi do izraza

$$\lambda \cdot \rho_p \cdot (V - U)^2 = \rho_m \cdot U^2 \quad (44)$$

gdje je λ konstanta koja ima vrijednost 1 kod neprekidnih mlazeva, a 2 kod prekinutih. Tada je ρ_p srednja gustina mlaza uključujući i praznine između čestica. Za mlazove koji se razdvojeni prije ili tokom procesa probijanja, $1 < \lambda < 2$.

Sada iz jednakosti (42) idealna primarna penetracija postaje

$$P = l \cdot \left(\frac{\lambda \rho_p}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

Ovu kvantitativnu hidrodinamičku teoriju penetracije supersoničnim kumulativnim mlazom razvili su Hill, Mott, i Pack [31], a neovisno od njih i Pugh [34]. Dodatni detalji vezani za razvoj ove teorije dali su Birkhoff et al. [5], Eichelberger [93] i NDRC [32]. Birkhoff povezuje parametar λ sa koeficijentom uzgona mlaza i izračunava probojnost rotirajućeg mlaza.

Ova jednostavna teorija ne uzima u obzir pojavu gradijenta brzine kumulativnog mlaza, interakciju mlaza i mete, centriranje mlaza, fiziku udara, efekte kompresibilnosti, aerodinamički uzgon, kratkotrajne efekte i osobine materijala mlaza i mete. Pack i Evans [36], i Eichelberger [93] daju dodatne informacije vezane za teoriju primarne i sekundarne penetracije.

Druge jednačine korisne u teoriji probojnosti su, po definiciji,

$$P = \int U dt \quad \text{ili} \quad U = \dot{P} \quad (46)$$

gdje je \dot{P} izvod od P po vremenu, i

$$dl = (V - U)dt \quad (47)$$

iz jednačina (46) i (47) slijedi

$$P = \int \frac{U}{V - U} dl \quad (48)$$

Rani modeli pokušavali su poboljšati tačnost jednostavnih teorija boljim razumijevanjem efekata razdvajanja mlaza (i izduženja), kao i standoff efekata. Ovi modeli bili su u osnovi poluempirojski.

Neka je S standoff distanca, a α konstanta koja zavisi od gradijenta brzine kumulativnog mlaza, a β konstanta koja određuje veličinu istezanja mlaza (disperziju). Tada, za neprekidne (ili malo razdvojene mlazove) važi

$$P = \frac{P_0 \cdot (1 + \alpha \cdot S)}{1 + \beta \cdot S} \quad (49)$$

gdje P_0 predstavlja probojnost na nultoj standoff distanci [5]. Za potpuno odvojene mlazove gdje je $\lambda = 2$ penetracija se može dati u slijedećem obliku

$$P = P_0' \cdot \frac{\sqrt{2}(1 + \alpha \cdot S)^{\frac{1}{2}}}{1 + \beta \cdot S} \quad (50)$$

Gdje je sada P_0' vrijednost P iz jednačine (9), pri $S = S_1$, gdje dolazi do prekida mlaza. Konstante α i β moraju se odrediti eksperimentalno.

Pack i Evans [94] istražuju važnost uticaja čvrstoće materijala mete na probojnost kumulativnog mlaza. Da bi uzeli u obzir čvrstoću materijala, oni predlažu poluempiirijski korekcioni faktor

$$P = \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot l \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot Y}{\rho_p \cdot V^2} \right) \quad (51)$$

Oni pokazuju da za čelik, korekcionni izraz $\alpha Y / \rho_p V^2$ ima vrijednost 0.3; to znači da uzimanje u obzir uticaja čvrstoće materijala mete može reducirati penetraciju i do 30%. Za penetraciju meta koje su napravljene od plastičnih materijala, kao što je olovo, Pack i Evans [94] modificiraju jednačinu (51) dodajući izraz za sekundarnu penetraciju, za radijus otvora koji pravi kumulativni mlaz.

Značajan napredak donio je Eichelberger [93] koji je proučavao i vršio mjerjenja zavisnosti probojnosti od vremena. On je potvrdio da hidrodinamička formula (41) ima veoma tačne vrijednosti u ranom stadiju i za kraće standoff distance gdje mlaz ima veliku brzinu i još nije prekinut. Zaključio je da, u slučaju kada je kumulativni mlaz razdvojen, vrijednost λ u jednakosti (44) postaje manja od 1, ako je ρ_p početna gustina lijevka. Nadalje, pri manjim brzinama mlaza, jačina materijala mlaza postaje uticajni faktor. Eichelberger je predložio slijedeću formulu

$$\lambda \cdot \rho_p \cdot (V - U)^2 = \rho_m \cdot U^2 + 2 \cdot \sigma \quad (12)$$

gdje je $\sigma = \sigma_m - \sigma_p$; σ_m i σ_p predstavljaju otpornost materijala mete i mlaza na plastičnu deformaciju, respektivno. Ovi naponi imaju vrijednost od 1 do 3 vrijednosti veće od statičkog napona, sa korekcionim faktorom pridodatim zbog neuniformnosti napona materijala u mjestu udara kumulativnog mlaza u metu. Važnost čvrstoće materijala mete može se uočiti poređenjem penetracije bakrenog kumulativnog lijevka u valjani homogeni čelik (RHA) i meki čelik. RHA čelik ima veću nazivnu čvrstoću i tvrdoću od mekog čelika. Pugh [92] navodi da je dubina penetracije u oklop od RHA čelika za 20% manja nego u mekom čeliku. Takođe, Klamer [51] navodi da je probojnost u RHA čelik manja 10-15% nego u slučaju mekog čelika.

Kvazistacionarna hidrodinamička teorija evoluirala je u dva pravca, proučavanje kumulativnog mlaza sa promjenljivom brzinom, i razmatranje mlaza kao štapa sa kinetičkom energijom i uniformnom početnom

brzinom. Za mlazove koji se istežu, istraživanja su usmjereni prema analitičkim rješenjima i kvantifikaciji degradacije penetracije iza tačke prekida mlaza. Za tijela sa uniformnom brzinom, razvijeni su modeli koji tretiraju usporenje i deformaciju (skraćenje) penetratora; ovi modeli se primjenjuju u slučaju kad su mlazovi razdvojeni ili onda kada imaju relativno kratku dužinu u odnosu na prečnik mlaza.

3) Model penetracije kumulativnog mlaza sa promjenljivom brzinom

Za mlaz sa neuniformnom raspodjelom brzine, kao što je to slučaj sa realnim kumulativnim punjenjem, dužina mlaza nije konstantna već raste sa vremenom. U ovom slučaju, jednačina (42) nije primjenljiva.

Kao prvi korak, Abrahamson i Goodier [95] izvode eksplizite formule za penetraciju neprekidnih, ravnih mlazova, sa neuniformnom brzinom mlaza. Oni izvode formulu za penetraciju idealizovanog kumulativnog mlaza, koja služi kao teoretski maksimum. U njihovoј analizi, oni uzimaju dužinu mlaza kao poznatu veličinu na dатoj udaljenosti od mete, ali nisu uzeli u obzir odnose između dužine mlaza i udaljenosti od punjenja; ova činjenica njihove rezultate čini manje upotrebljivim.

Allison i Vitali [96] dalje proširuju teoriju slijedećim pretpostavkama i zaključcima:

1. Postojanje izvora. Poznato je da brzina svake pojedinačne čestice mlaza ostaje skoro konstantna. U dodatku, ako je prostorna distribucija brzine linearna, kao što je to slučaj sa većinom kumulativnih lijevaka sa konstantnom debljinom, onda se može locirati izvorna tačka mlaza. Ovo je tačka u ravni iz koje potiču sve čestice kumulativnog mlaza.

2. Zanemarljiva čvrstoća materijala. Čvrstoća materijala mlaza i mete mogu se zanemariti. Zatim, da bi se karakterizirao završetak penetracije sporim kretanjem zadnjeg dijela mlaza, definisana je minimalna brzina mlaza za probijanje V_{min} . Ova brzina i procesi probijanja mete pri manjoj brzini, moraju zavisiti o čvrstoći materijala mlaza i mete.

3. Zanemarljiva stišljivost. Allison i Vitali proučavali su efekte uticaja stišljivosti na penetraciju preko termodinamičke jednačine stanja i Bernulijeve jednačine. Zaključili su da stišljivost nema većeg uticaja u slučaju kad je izražena mehanička sličnost materijala mlaza i mete. Za materijale koji nisu slični, efekat kompresibilnosti se treba uzeti u obzir, ali rezultati sa, i bez uzimanja u obzir stišljivosti, ne razlikuju se mnogo (npr., samo 1% razlike u brzinama probijanja između stišljivog i nestišljivog toka mlaza za bakreni lijevak koji prodire u metu od titanijuma). Harlow i Pracht [97] potvrdili su ovaj zaključak u dvodimenzionalnoj simulaciji kumulativnih mlazova od željeza i aluminijuma koji probijaju mete sa sličnim materijalima. Dokazano je da se može zanemariti efekat stišljivosti kod sudara mlaza i mete koji su napravljeni od sličnih materijala; međutim, ako je u pitanju materijal od Plexiglasa ili slično, stišljivost se ne može zanemariti.

4. Simultani prekid. Prema Allisonu i Vitaliju, kumulativni mlaz prekida se trenutačno. Ovu pretpostavku koristili su i drugi istraživači [41]. Za konvencionalna kumulativna punjenja, gdje se čestice mlaza razdvajaju ili prekidaju u jednom vremenskom intervalu od vrha prema zadnjem dijelu, pretpostavka o istovremenom prekidu mlaza je, u najboljem slučaju, aproksimacija prvog reda. No, ipak, ova pretpostavka pruža zadovoljavajuće rezultate za većinu konvencionalnih kumulativnih bojevih glava. Za nekonvencionalne bojeve glave, gdje prekid mlaza ne mora biti od vrha prema kraju mlaza, ova pretpostavka je nevažeća.

5. Svaki prekinuti segment mlaza probija metu ponašajući se kao neprekidni mlaz. Osnovne principe u Echelbergerovoj hidrodinamičkoj teoriji probijanja čine Bernulijeva i jednačina kontinuiteta,

$$\frac{dP}{U} = -\frac{d\xi}{V-U} \quad (53)$$

gdje je $d\xi$ inkrement dužine mlaza. Allison i Vitali [39], u izračunavanju probojnosti pojedinačnih čestica mlaza, pretpostavljaju da su jednačine (41) i (53) primjenljive, takođe, i za kratke, odvojene dijelove kumulativnog mlaza. Ova pretpostavka je upitna zbog toga što na penetraciju konačnih segmenata dosta utiču nestacionarni efekti i češće je ona manja nego penetracija izračunata iz izraza koji sadrže u sebi stacionarne efekte. Pod ovom pretpostavkom, kada se mlaz prekine, penetracija ostaje konstantna sa daljim povećanjem standoff distance. U stvarnosti to nije tako. Eksperimenti koje su izvodili Chou et al [42], i Chou-Toland [100], pokazuju da je probojnost dva segmenta mlaza, između kojih je prazan prostor, manja nego kod dva segmenta između kojih nema većih praznina.

Ovi principi koje su predložili Allison i Vitali [96] i danas su osnova za dalja proučavanja probojne sposobnosti kumulativnog mlaza.

DiPersio i Simon [98] prezentirali su eksplisitne formulacije, bazirane na teoriji Allisona i Vitalija, i to za tri slučaja: (a) probijanje mete prije prekida mlaza ($T < t_b$), (b) kada se kumulativni mlaz prekida tokom probijanja mete ($t_0 < t_b \leq T$), i (c) slučaj kad se mlaz prekida prije nego dostigne metu ($t_b < t_0 \leq T$), gdje T predstavlja vrijeme na kraju procesa probijanja, t_b vrijeme prekida mlaza, a t_0 vrijeme koje je potrebno vrhu maza da dostigne metu.

Za slučaj (a), ukupna dubina penetracije (probojnost) je

$$P = S \cdot \left[\left(\frac{V_0}{V_{\min}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (54)$$

gdje je S udaljenost od, već pomenute, izvorne tačke mlaza do mete, ili efektivna standoff udaljenost. U ovom slučaju vrijednost S je ograničena sa

$$0 \leq S \leq V_{\min} \cdot t_b \cdot \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

i

$$U_{\min} = \frac{V_{\min}}{1 + \gamma} \quad (55)$$

Za slučaj (b), probojnost iznosi

$$P = \frac{(1 + \gamma)(V_0 + t_b)^{\frac{1}{1+\gamma}} \cdot S^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} - V_{\min} \cdot t_b}{\gamma} - S \quad (56)$$

i u ovom slučaju, S se nalazi u slijedećem intervalu

$$V_{\min} \cdot t_b \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} < S < V_0 \cdot t_b$$

Konačno, imamo i slučaj (c), gdje je probojnost

$$P = \frac{(V_0 - V_{min}) - t_b}{\gamma} \quad (57)$$

za standoff udaljenosti ograničene sa

$$V_0 \cdot t_b < S < \infty$$

pri čemu treba uzeti u obzir da je $\gamma = \sqrt{\rho_m / \rho_p}$

Ove formule rezultati su tzv. DSM (DiPersio, Simon i Merendino) teorije. Prethodno napisanim izrazima može se manipulirati i tako da izrazimo brzinu V_p , koja predstavlja brzinu primarnog kumulativnog mlaza koja probija metu na dubini P . Tako možemo izraz za brzinu primarnog mlaza napisati i u slijedećem obliku

$$V_p = V_0 \cdot \left[\frac{S}{P + S} \right]^\gamma$$

Ova jednakost, takođe, predstavlja i izlaznu brzinu neprekinutog kumulativnog mlaza nakon probijanja mete, konačne debljine P .

Na osnovu jednačina (45) – (48), DiPersio i Simon [98] su uporedili izračunatu debljinu penetracije sa eksperimentalnim podacima. Postignuta su veoma dobra slaganja sa kraćim standoff udaljenostima, do oko tri prečnika punjenja. Na većim standoff distancama, izrazi daju veće vrijednosti nego eksperimentalno izmjerene. Oni pripisuju smanjenje performansi realnog kumulativnog mlaza najviše asimetričnosti i talasastim površinama mlaza.

DiPersio et al. [98] izveli su intenzivna eksperimentalna istraživanja da bi odredili uzroke smanjenja probojnosti primarnog kumulativnog mlaza na većim standoff udaljenostima. Došli su do slijedećih zaključaka:

1. Mlazovi koji nastaju detonacijom precizno oblikovanih punjenja kreću se po veoma ravnim linijama; čestice mlaza ne pokazuju veliku turbulenciju, usporenje, ili smanjenje mase zbog otpora vazduha. Za konusne lijevke, raspodjela brzine je približno linearна, i pretpostavka o izvoru mlaza je tačna.
2. Minimalna brzina mlaza za penetraciju nije konstantna za dati kumulativni mlaz, već se povećava sa standoff distancom.

Veličina V_{min} nije konstantna, pa su zato DiPersio i Simon predložili novi kriterij za opisivanje završnog procesa penetracije mlaza baziran na minimalnoj brzini probijanja U_{min} . Za standardna punjenja koja su koristili, vrijednost U_{min} bila je oko 1.0 km/s. Nadalje, DiPersio i Simon su modifikovali izraze za probojnost u sva tri režima, zamjenom kriterija V_{min} sa kriterijem U_{min} . Nove formule daju vrijednosti probojnosti koje pokazuju bolja slaganja s eksperimentalnim podacima. Jednačine (45) – (48) uzete su kao tačne osim izraza za V_{min} . Jednačine za ukupnu penetraciju koriste U_{min} kao kriterij prekidanja mlaza umjesto V_{min} , pa tako za slučaj (a) imamo

$$P = S \cdot \left[\left(\frac{V_0}{(1 + \gamma) \cdot U_{min}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (58)$$

gdje je S ograničena sa

$$0 \leq S < (1 + \gamma) \cdot U_{\min} \cdot t_b \left[\frac{(1 + \gamma) \cdot U_{\min}}{V_0} \right]^{\frac{1}{\gamma}}$$

Za slučaj (b), probojnost je sada

$$P = \frac{(1 + \gamma)(V_0 t_b)^{1/(1+\gamma)} \cdot S^{\gamma/(1+\gamma)} - \sqrt{(1 + \gamma) \cdot U_{\min} \cdot t_b \cdot (V_0 t_b)^{1/(1+\gamma)} \cdot S^{\gamma/(1+\gamma)}}}{\gamma} - S \quad (59)$$

gdje vrijedi

$$(1 + \gamma) \cdot U_{\min} \cdot t_b \cdot \left(\frac{(1 + \gamma) \cdot U_{\min}}{V_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} < S < V_0 \cdot t_b$$

i za slučaj (c), kada se mlaz prekida prije početka procesa probijanja mete,

$$P = \frac{V_0 \cdot t_b - \sqrt{U_{\min} \cdot t_b \cdot (V_0 \cdot t_b + \gamma \cdot S)}}{\gamma} \quad (60)$$

gdje S leži u intervalu

$$V_0 \cdot t_b < S < \frac{V_0 \cdot t_b}{\gamma} \left(\frac{V_0 - U_{\min}}{U_{\min}} \right)$$

DiPersio i Simon izveli su mnogo eksperimenata vezanih za probojnost kumulativnih bojevih glava. Oni izvještavaju o istraživanjima "preostale penetracije" (Residual penetration), penetracije mlaza u glavnu metu nakon perforacije serije zaštitnih ploča. Takođe su izučavali efekte prekida mlaza prilikom penetracije (što raniji prekid, manja probojnost), a diskutovali su i o efektima rotacije kumulativnog mlaza. Eksperimentalno su potvrđili da penetracija primarnog kumulativnog mlaza opada sa povećanjem čvrstoće i tvrdoće materijala mete. Merendino i Vitali [101] potvrđuju ovaj zaključak.

Treba primjetiti da se u svim ovim modelima uvijek pojavljuje osnovna hidrodinamička jednačina (41) kako bi se opisao idealiziran proces probijanja, dok se raznim empirijskim izrazima nastoje postići što tačnije formule za određivanje parametara procesa koji su bliski realnom stanju. Trodimenzionalni modeli su najefikasniji modeli za određivanje parametara procesa probijanja kumulativnog mlaza. Njih je veoma teško napraviti i još uvijek su aktuelna istraživanja u tom pravcu. Zato korištenje brzina V_{\min} i U_{\min} , koje su sastavni dio DSM teorije, predstavlja jednostavan način da se dobije učinkovit jednodimenzionalan model. Ovo nije kritika DSM teorije, budući da svi jednodimenzionalni modeli imaju svojih nedostataka. U osnovi, najveće ograničenje DSM teorije jeste nemogućnost tačnog određivanja veličine U_{\min} , koja često nije konstantna, već varira u zavisnosti od standoff udaljenosti i prečnika punjenja za datu konfiguraciju.

III POGLAVLJE

Parametri kumulativnog punjenja

1) Kumulativni Lijevak

Vjerovatno najvažniji element kumulativnog punjenja je metalni (ili nemetalni) lijevak (obloga). Uticajniji parametri lijevka su materijal lijevka i njegova geometrija. Najčešći oblici lijevka su konus, hiperboloid, polusfera, oblik trube, tulipan oblik, bikonusni lijevak, Misznay-Schardin lijevak (ili balistički disk), i kombinacije pomenutih, kao što je, npr., konus sa polusferom (hemi-cone). [3]

U savremena kumulativna punjenja za vojne upotrebe ugrađuju se lijevcu od elektrolitičkog bakra, koji mora odgovarati visokim zahtjevima u pogledu čvrstoće i kristalne strukture. Proces izrade lijevka mora se sprovoditi strogo kontrolisanom tehnologijom. Najširu primjenu imaju dvije tehnologije: izvlačenje velikim brojem operacija (do 15 operacija) i hladno istiskivanje (tzv. Fluo tournage). U posljednje vrijeme preovladavajuća je tehnologija istiskivanja koja, uz veću ekonomičnost, omogućuje i bolji kvalitet lijevka (dobija se takva orijentacija kristala koja doprinosi većoj efikasnosti kumulativnog mlaza). [2]

Može se sa sigurnošću reći da se karakteristike nekog mlaza mogu staviti u korelaciju sa mikrostrukturom materijala lijevka. Sadašnje eksperimentalno dijagnostičke metode kontrole stanja materijala kumulativnog lijevka obuhvataju difraciju X zrakama, radiografiju (rendgenoskopiju i neutronsku radiografiju), ispitivanje magnetnim česticama, snimanje ultrabrzim kamerama, ultrazvučne metode, kao i vizuelnu kontrolu. Uobičajeno je korištenje nedstruktivnih metoda ispitivanja punjenja, ali neke zemlje koriste i druge vrste testiranja. [3]

Karakteristike potencijalno dobrog materijala lijevka su:

- visoka temperatura topljenja
- velika gustoća
- sitnozrnasta struktura, pravilna orijentacija zrna,
- netoksičnost
- visoka dinamička čvrstoća
- dobra plastičnost
- dostupna i jeftina sirovina

Materijali koji imaju nižu temperaturu topljenja (ollovo i kadmijum) daju nešto slabije karakteristike mlaza nego materijali sa većom temperaturom topljenja (bakar). Druga povoljna osobina materijala lijevka je velika gustina, koja, svakako, povećava probojnost mlaza. Velika lokalna brzina zvuka daje mlazu dobru kohezivnost, a povećana dinamička čvrstoća obezbjeduje sposobnost materijala mlaza da se odupre velikim pritiscima i deformacijama. Materijali sa ovom osobinom ne moraju obavezno imati visoku statičku izdržljivost. Dodatna poželjna karakteristika materijala je sitnozrnasta struktura, sa odgovarajućom orijentacijom zrna, što rezultira dobrim elongacionim osobinama metala. Čvrstoća i tvrdoća materijala se povećavaju sa smanjenjem veličine zrna metala, prema Hall-Petch obrascu

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot D^{-1/2} \quad \text{ili} \quad H = H_0 + K'D^{-1/2}$$

gdje je σ čvrstoća materijala, H tvrdoća materijala, K i K' , σ_0 , H_0 su konstante, a D je srednja veličina zrna, ili prečnik zrna. Prema tome, fina zrnasta struktura materijala može proizvesti veću čvrstoću i tvrdoću materijala, prema Hall-Petch teoriji. [61]

Materijal, osim već pomenutog, treba biti dostupan, jeftin, netoksičan, i ekonomičan za masovnu proizvodnju.



Sl. 23. Različiti oblici kumulativnih lijevaka

Debljina zida kumulativnog lijevka

Druga kritična veličina dizajna lijevka je debljina njegovog zida. Obično, uniformna debljina zida se kreće oko 1% do 4% prečnika punjenja. Međutim, koriste se i debljine do 8% prečnika punjenja [61]. Prečnik punjenja je vanjski prečnik eksploziva i, naravno, uvjek je veći ili jednak prečniku lijevka. Izabrana debljina zida zavisi od geometrije lijevka, materijala lijevka, i traženih osobina mlaza. Ne postoji optimalan dizajn kumulativnog punjenja, metode izrade, ili geometrija. Dizajn je uslovljen aplikacijom i nametnutim ciljevima projektila. Jedinstveno rješenje, dakle, ne postoji.

Lijevak može imati promjenljivu debljinu, idući od dna prema vrhu. Ako je lijevak tanji na vrhu, a zadebljan na bazi, onda takav lijevak zovemo inverznim. Prelazne površine lijevka ne moraju biti potpuno glatke, ali treba voditi računa da ne bude oštih diskontinuiteta i prelaza. U suprotnom, lijevak se može prekinuti u ranoj fazi zbog izraženih diskontinuiteta na svojoj površini. Rezultirajući kumulativni mlaz neće imati efektivnu probajnost. Uopšteno govoreći, lijevci sa tanjim zidovima daju veće brzine nego oni sa debljim zidovima. Tako da, u osnovi, izražena razlika debljine zida kod nekih lijevaka, može biti pogodna za kontrolu gradijenta brzine, dužine mlaza, ali i vremena prekida mlaza [50]. Izvjesno je, dakle, da se bolji rezultati postižu ako se debljina zida lijevka povećava od vrha prema osnovi lijevka. Veoma je važno da obloga bude maksimalno simetrična u odnosu na uzdužnu osu koja se mora potpuno poklapati sa osom simetrije eksplozivnog punjenja. Tolerancija debljine ne smije prelaziti 0.05 mm, a između oblage i eksplozivnog punjenja mora biti ostvaren potpun i dovoljno čvrst kontakt [2]. Stanjuković [59] predlaže izraz za optimalnu debljinu konusne obloge u slijedećem obliku:

$$\delta_{op} = \frac{\xi \cdot r_0^2}{R_{ok} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}$$

Gdje su:

$\xi = l_{pm}/l_0$ - konstanta

l_{pm} – dužina primarnog kumulativnog mlaza

l_0 – dužina izvodnice lijevka

r_0 – srednji poluprečnik primarnog kumulativnog mlaza

R_{ok} – poluprečnik osnove kumulativne šupljine

α – ugao vrha konusa

Ugao vrha lijevka

Veoma važna veličina konusnih lijevaka (i njemu sličnih oblika) je vrijednost ugla vrha konusa, dok se kod drugih geometrijskih oblika ova veličina može predstaviti visinom (ili debljinom) punjenja. Za konus, što je manji ugao vrha konusa, veća je brzina kumulativnog mlaza i manja je masa istog. Lijevci sa većim vrijednostima ovog ugla imaju manju brzinu mlaza i veću masu. Veoma veliki ugao konusa podsjeća na polusferne lijevke ili lijevke sa oblikom sličnim luku. Velika dubina ili visina ovakvih lijevaka implicira više materijala lijevka i veću kontaktnu površinu sa brizantnim eksplozivom. Ovo najčešće rezultira većom dubinom prodiranja [51].

Ako razmotrimo različite visine, prečnike i debljinu zida za razne geometrije lijevaka, primjećujemo da je moguće i kombinirati različite oblike lijevaka. Ipak, različiti geometrijski dizajni imaju različit način urušavanja lijevka i formiranja mlaza, a ovo može bitno da utiče na konačne osobine mlaza [52]. Za manje uglove vrha konusa, brzina primarnog mlaza i istezanje su nešto veći nego kod lijevaka s većim uglom konusa. Varijacije geometrije konusnih lijevaka, uključuju i izmjenu područja vrha konusa. On može biti oštar, zaobljen, ili tup sa skraćenom površinom. Ove varijacije utiču na brzinu primarnog mlaza, na masu mlaza, i gradijent brzine mlaza, kao i masenu raspodjelu unutar samog mlaza. Carleone [54] raspravlja o formiranju mlaza i nastanku primarnog mlaza kod konusnih kumulativnih punjenja.

Geometrijski oblici lijevaka

Geometrijski oblici, tzv. tulipan ili truba, slični su konusnim lijevcima, iako se oblik tulipana, ili eliptični lijevak, mogu ponašati kao polusferni, zavisno od ukupne konfiguracije bojeve glave. Takođe, geometrijski oblici lijevaka koji podsjećaju na trubu, imaju veliku brzinu mlaza i ne posjeduju karakteristike inverznog gradijenta brzine, kao što je to slučaj kod konusnih. Polusferni lijevci imaju manje izduženje mlaza i manje deformacije nego konusni lijevci [55]. Kombinacija sfernih ili polusfernih lijevaka sa konusnim je moguća, čak nekad i veoma poželjna. Takvi lijevci konstruiraju se uklanjanjem područja vrha polusfernog lijevka i zamjenom konusnom površinom, ili sferom, ali i koristeći konusni lijevak sa polusfernim vrhom [56].

Ovakvi lijevci mogu imati konture koje formiraju neprekidan mlaz ili formiraju dva odvojena mlaza. Kumulativna punjenja ovakvog tipa naročito su korisna zbog formiranja tzv. prekurzivnog mlaza koji uklanja elemente koji se nalaze na putu između bojeve glave i mete, kao što su tragač, ili elementi vođenja na projektilu koji nosi kumulativno punjenje [3]. Za kombinovane lijevke, kao što su konusno – sferski, konusno – konusni, i drugi, dva lijevka mogu se pažljivim postupkom spojiti zajedno bez primjetnih oštrih ivica između njih, ali se mogu spojiti i tako da oštar diskontinuitet površine bude primjetan. Ako se lijevci spoje pažljivo, bez oštrih prelaza, oni mogu zajedno formirati neprekidan kumulativni mlaz veoma povoljnih probajnih osobina [56].

Ako se kod konusnih lijevaka ukloni vrh lijevka i zamjeni nekim drugim konusnim lijevkom, konačni lijevak nazivamo dualni ili bikonusni lijevak. U literaturi, nekad se za ovaj oblik susreće i pojma tandem lijevci. Ovo može dovesti do zabune, pogotovo zbog toga što postoji pojma tandem bojeva glava, koja predstavlja dva odvojena kumulativna punjenja (i lijevka) u jednoj konstrukcionaloj cjelini. Ovaj sistem, od više kumulativnih punjenja duž aksijalne ose bojeve glave prvi spominje Tuck [57]. Ostali geometrijski oblici kumulativnih lijevaka manje se primjenjuju. Treba spomenuti tzv. frula oblik lijevka (Fluted liner), koji sadrži ožlijebljene površine u unutrašnjem dijelu lijevka. One uzrokuju rotaciju mlaza u smjeru suprotnom od rotacije projektila. Zamisao je da se ovim oblikom lijevka mlaz suprotstavi rotaciji bojeve glave tokom leta, koje često rotiraju velikim brzinama zbog aerodinamičke stabilizacije [58].

2) Eksplozivno punjenje

Eksplozije uzrokovane hemijskom pretvorbom, tj. brzim hemijskim reakcijama u kojima se oslobađa toplina i stvara velika količina gasovitih produkata, nazivaju se hemijske eksplozije. I dok se brojne fizičke eksplozije u našem okruženju (poput eksplozivne vulkanske erupcije, udara munje itd.), kao i termonuklearne eksplozije u svemiru (npr. u unutrašnjosti Sunca), događaju bez mogućnosti čovjeka da na njih utječe, hemijske su eksplozije uglavnom djelo čovjeka.

U procesu eksplozije, neovisno o tome koje je ona prirode, najčešće dolazi do ekspanzije vrućih plinovitih produkata (ili para), bez obzira na to da li oni nastaju u toku samog procesa (npr. u hemijskim reakcijama, naglim isparavanjem materije i sl.) ili su postojali u sistemu i prije samog procesa eksplozije (npr. kod eksplozije plina u boci zbog zagrijavanja). Sasvim pojednostavljeni, to znači da eksplozivni proces čine dva stadija: (a) pretvaranje nekog oblika energije u energiju kompresovane materije, i (b) naglu ekspanziju kompresovane materije uz obavljanje mehaničkog rada.

Naravno, ova je podjela sasvim uvjetna jer se ta dva stadija najčešće poklapaju. Pri hemijskoj eksploziji dolazi do odvijanja brzih hemijskih reakcija, rezultat kojih je nastajanje plinovitih produkata i oslobađanje toplotne energije. Brzina odvijanja tih reakcija ekstremno je velika, a time i brzina nastajanja plinovitih produkata. Primjera radi, brzina nastajanja plinovitih produkata pri detonaciji toliko je velika da se prije završe reakcije po cijeloj eksplozivnoj tvari nego što nastali produkti uspiju značajnije ekspandirati na okolinu.

Drugim riječima, to znači da nastali gasoviti produkti, po završetku hemijskih reakcija, zauzimaju volumen polazne eksplozivne tvari. Ta činjenica, skupa s činjenicom da temperatura na koju su zagrijani nastali produkti iznosi nekoliko hiljada stepeni, razlog je što se u trenutku završetka hemijskih reakcija nastali plinoviti produkti nalaze pod vrlo visokim pritiskom – do nekoliko stotina hiljada bara. Zbog toga, u narednom trenutku oni naglo i snažno ekspandiraju vršeći udarno djelovanje na okolinu. [60]

Hemijski spojevi kod kojih se pod djelovanjem nekog vanjskog impulsa (npr. topoline, udara, trenja i sl.) može izazvati brza hemijska pretvorba praćena oslobađanjem topoline i nastajanjem vrlo zagrijanih plinovitih produkata, nazivaju se eksplozivnim materijama. Često se koristi i naziv energetske materije, čime se naglašava da su eksplozivne tvari samo izvor specifičnog oblika energije – energije visoke volumne i vremenske koncentracije. Treba naglasiti da u pogledu hemijskog sastava eksplozivne tvari nisu nikakvi spojevi ili smjese čija je formula "tajanstvena". Naprotiv, najčešće su to organski spojevi iz skupine nitrata, nitramina, nitroestera i sl., koji u pogledu brojnih fizičkih i hemijskih svojstava imaju sličnosti s ostalim organskim spojevima. Međutim, ono što ih čini različitim, tj. što ih čini specifičnim, jest njihova eksplozibilnost – sposobnost da se pod utjecajem vanjskog impulsa u njima iniciraju reakcije eksplozivne pretvorbe u plinovite produkte.

Eksplozivne materije doista su specifičan izvor energije – izvor sposoban u vrlo kratkom vremenu stvoriti veliku količinu energije. Međutim, u usporedbi s drugim energetskim tvarima (poput ugljena, nafte i sl.), eksplozivne se materije razlikuju i po tome što one sadrže u svojim molekulama sve elemente potrebne za odvijanje eksplozivnih hemijskih reakcija (a najčešće su to hemijski elementi C, H, N i O), neovisno o tome radi li se o jednokomponentnoj eksplozivnoj materiji ili o eksplozivnoj materiji tipa smjesa.

Drugim riječima, u eksplozivnoj hemijskoj pretvorbi eksplozivnih materija ne sudjeluju (ili sudjeluju sasvim neznatno) hemijski elementi iz njenog okruženja, dok druge energetske tvari za sagorijevanje trebaju kiseonik iz zraka [60]. Osnovna svojstva eksplozivnih tvari u pojedinim skupinama jesu sljedeća:

Inicirajuće eksplozivne tvari izuzetno su osjetljive na vanjske impulse i stoga je rad s njima vrlo opasan i iziskuje veliki oprez. Njihova je osjetljivost na vanjske impulse takva da čak i lagani udar, plamen ili iskra mogu dovesti do njihova iniciranja i potpune detonacije. Međutim, iznenađujuće visok stupanj sigurnosti postiže se kada se inicirajuća eksplozivna tvar presuje u metalnu čašicu (kapislu), kao što je slučaj kod detonatora. No bez obzira na to, grubim rukovanjem ili bilo kakvim ubodom u presovani sloj inicijalne eksplozivne materije može se izazvati detonacija punjenja u detonatoru. Proizvodnja inicirajućih eksplozivnih tvari obavlja se u posebnim uvjetima, uz poduzimanje vrlo strogih mjera za sprečavanje eventualnih neželjenih slučajnih eksplozija.

Da bi se neka eksplozivna tvar mogla svrstati u skupinu inicirajućih eksplozivnih materija, te kao takva mogla koristiti za ugradnju u inicirajuće sredstvo (inicirajući kapislu, detonator i sl.), uvjet je da pri njenom iniciranju (plamenom, udarom, ubodom i sl.) dođe do razvoja potpune detonacije na razmaku od svega nekoliko milimetara duž punjenja. Inicirajuće eksplozivne tvari koje se u praksi najčešće koriste su: živin fulminat, olovov azid, olovov trinitrorezorcinat, tetrazen, itd.

Brizantne eksplozivne tvari, u usporedbi s inicirajućim, teže se dovode u režim detonacije pa je stoga rad s njima manje opasan. No, tu prednost poništava činjenica da se s njima radi obično u velikim količinama. Mnoge brizantne eksplozivne materije mogu se inicirati mehaničkim udarom, npr. ako se nalaze između dviju tvrdih metalnih ploča, a započete reakcije u određenim uvjetima mogu dovesti i do potpune detonacije eksplozivne materije. Međutim, u praksi se one uvjek iniciraju posredstvom inicirajućih eksplozivnih materija (otuda i naziv sekundarni eksplozivi). Brizantne eksplozivne materije koriste se za izradu punjenja za miniranje, kao eksplozivna punjenja u streljivu i eksplozivnim sredstvima (slučaj kod kumulativnih bojevih glava), itd. Poznatiji jednokomponentni brizantni eksplozivni su: trinitrotoluen, pentrit, tetril, heksogen, oktogen, nitroglycerin, nitrogvanidin, itd.

Baruti se odlikuju sagorijevanjem kao osnovnim vidom hemijske pretvorbe u gasovite produkte. S obzirom na hemijski sastav, postoje dvije skupine baruta: a) homogeni baruti, i b) kompozitni baruti. U prvu skupinu spadaju jednobazni baruti (nitroceluloza + stabilizator), dvobazni baruti (nitroceluloza + nitroglycerin + stabilizator) i trobazni baruti (nitroceluloza + nitroglycerin + nitrogvanidin + stabilizator). Baruti se koriste kao pogonska punjenja za raketne motore, izbacna (barutna) punjenja kod streljiva, i sl.

Pirotehničke smjese posebna su skupina eksplozivnih materija, koje se, poput baruta, odlikuju sagorijevanjem kao osnovnim vidom hemijske pretvorbe u konačne produkte. Sagorijevanjem pirotehničke smjese može se stvarati žar, plamen i svjetlo, može se proizvoditi obojeni dim, raspršivati u atmosferu toksične i druge tvari, mogu se stvarati zvučni efekti (prasak), itd. S obzirom na to, pirotehničke se smjese dijele u nekoliko skupina: osvjetljavajuće, signalne, fotoosvjetljavajuće, traserne, dimne, itd. S obzirom na hemijski sastav pirotehničke smjese su mješavina gorive komponente (magnezij, aluminij, bor, cirkonij, sumpor, mlijecni šećer, titan, metalni hidridi i sl.), oksidansa (nitrati, klorati, perklorati, oksidi, peroksidi, kromati i sl.), vezivne komponente (prirodne smole, sintetske smole i sl.) i aditiva (npr. za stvaranje boje, pojačavanja intenziteta boje, tvari koje djeluju kao modifikatori brzine sagorijevanja, veziva). [60]

U moderne kumulativne projektilne ugrađuju se skoro isključivo dvokomponentni brizantni eksplozivi (mješavina trolila i heksogena, trolila i oktogena, i dr.), ili flegmatizovani eksplozivi visoke razorne sposobnosti (flegmatizovani heksogen i flegmatizovani oktogen). Izbor vrste eksploziva zavisi prije svega od tehnologije njegove ugradnje u košuljicu projektila, ali se neovisno od izabrane tehnologije, nastoji ostvariti što je moguće homogenije punjenje i što veća brzina detonacije, uz razumije se, tehnički i tehnološki prihvatljive uslove iniciranja stabilne detonacije eksplozivnog punjenja. [2]

Općenito je prihvaćeno da probojnost i učinkovitost kumulativnog mlaza raste sa povećanjem detonacione brzine eksplozivnog punjenja, kao i povećanjem detonacionog pritiska. Obično vrijedi da eksplozivi veće snage (boljih energetskih karakteristika) daju kumulativne mlazove veće brzine i veće kinetičke energije, kao i veću probojnost. S tim u vezi, slijedeća tabela daje prikaz energetskih karakteristika savremenih eksploziva. [3]

Naziv eksploziva	Struktorna formula	formula i relativna molna masa	Karakteristike
Trinitrotoluen (TNT)		$C_7H_5N_3O_6$ $M_m = 227,1$	$\rho_0 = 1,654 \text{ g/cm}^3$ $D_{(1,64)} = 6950 \text{ m/s}$ $P_{(1,64)} = 190 \text{ kbar}$
Nitroglycerin (NG)		$C_3H_5N_3O_9$ $M_m = 104,1$	$\rho_0 = 1,591 \text{ g/cm}^3$ $D_{(1,59)} = 7650 \text{ m/s}$ $P_{(1,59)} = 252 \text{ kbar}$
Pentrit (Pentaeritritol tetranitrat - PETN)		$C_5H_8N_4O_{12}$ $M_m = 316,1$	$\rho_0 = 1,67 \text{ g/cm}^3$ $D = 7975 \text{ m/s}$ $P = 310 \text{ kbar}$
Heksogen (Cikoltrimetilen trinitramin -RDX)		$C_3H_6N_6O_6$ $M_m = 222,1$	$\rho_0 = 1,82 \text{ g/cm}^3$ $D_{(1,80)} = 8754 \text{ m/s}$ $P_{(1,80)} = 347 \text{ kbar}$
Oktogen (Ciklotetrametilen tetramin - HMX)		$C_4H_8N_8O_8$ $M_m = 296,1$	$\rho_0 = 1,96 \text{ g/cm}^3$ $D_{(1,90)} = 9100 \text{ m/s}$ $P_{(1,90)} = 395 \text{ kbar}$
Heksanitrostilben (HNS)		$C_{15}H_6N_6O_{12}$ $M_m = 250,24$	$\rho_0 = 1,74 \text{ g/cm}^3$ $D_{(1,70)} = 7120 \text{ m/s}$ $P_{(1,70)} = 262 \text{ kbar}$
Heksanitro heksaaza izovurcitan (HNIW, CL-20)		$C_6H_6N_{12}O_{12}$ $M_m = 438,22$	$\rho_0 = 2,10 \text{ g/cm}^3$ $D_{(2,10)} = 9898 \text{ m/s}$ $P_{(2,10)} = 489 \text{ kbar}$
Oktanitrokuban		$C_8N_8O_{16}$ $M_m = 464,14$	$\rho_0 \approx 2.10 \text{ g/cm}^3$ $D_{(2,10)} \approx 10000 \text{ m/s}$ $P_{(2,10)} \approx 500 \text{ kbar}$

Za izradu kumulativnih eksplozivnih punjenja koriste se dvije tehnologije: livenje i presovanje. U oba slučaja najvažnije je da se pouzdano reprodukuje hemijski i fizički homogeno eksplozivno punjenje i da se proces proizvodnje i postupak kontrole kvaliteta odvijaju strogo prema propisanoj tehnologiji.

Fizički homogenim eksplozivnim punjenjem podrazumijeva se punjenje bez unutrašnjih šupljina i gasnih mjeđurića, koji nastaju kod livenih punjenja, kao posljedica zaostalog vazduha i jake kontrakcije pri očvršćavanju punjenja (pri očvršćavanju trolila kontrakcija iznosi oko 12 %). Inače, tehnologija livenja je prikladnija za masovnu proizvodnju (ne zahtjeva velika investiciona ulaganja), ali se ne može primjeniti u svim slučajevima.

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 presjeku punjenja dobijenog klasičnim livenjem, brzina detonacije varira do 150 m/s, a u slučaju vibracionog livenja samo 10 do 20 m/s). Sa tehnološkog stajališta 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 proizilazi da, od svih navedenih varijanti, vibraciono livenje daje najbolje rezultate. [2]

Tehnologija presovanja, uz odgovarajuće mjere bezbjednosti, daje općenito kvalitetna punjenja. Veličina eksplozivnog punjenja u nekim slučajevima zahtjeva višefazno presovanje, da bi se dobila potrebna ujednačenost gustine po uzdužnom presjeku punjenja. Konzistencija upotrebljenog eksploziva zahtjeva u nekim slučajevima presovanje u vakuumu (npr., plastični heksogen). Tehnologijom presovanja ostvaruju se visoke gustine i potpuno homogeno punjenje (u nekim slučajevima mogu se postići gustine koje su manje samo za 1 – 2 % od kristalnih gustina eksploziva) [2].

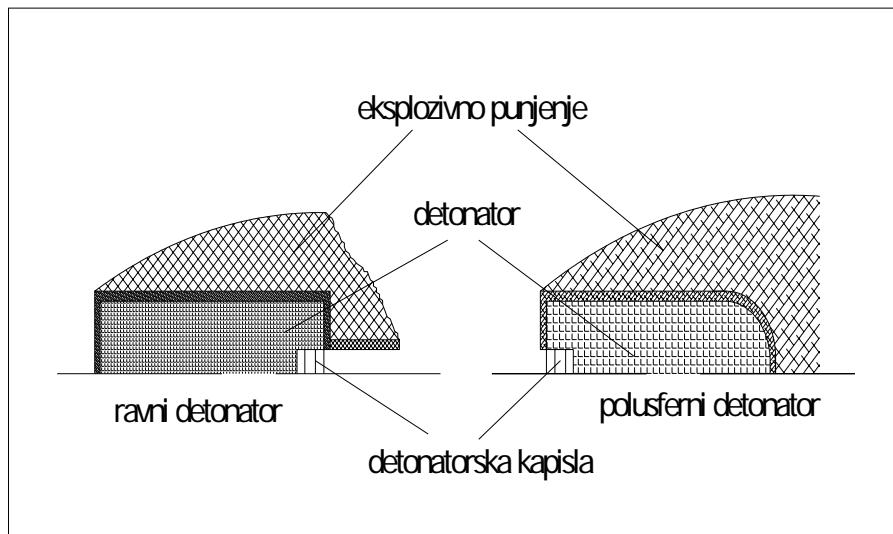
3) Detonator

Detonator igra ulogu početnog impulsa u mehanizmu pobuđivanja stabilne detonacije kumulativnog eksplozivnog punjenja i nalazi se u punjenju, nasuprot kumulativne šupljine. Otuda je, uz konstrukciju detonatora, veoma važan pravilan izbor eksploziva i njegove gustine, odnosno kapsle kojom se pobuđuje detonator.

Mehanizam (upaljač) koji stvara energiju za aktiviranje inicijalnog lanca nalazi se u vrhu projektila, ali u nekim slučajevima sadrži i prvi eksplozivni element u ovom lancu – inicijalnu kapslu. Dakle, aktiviranje detonatorske kapsle može se ostvariti inicijalnom kapslom koja je neposredno uz detonatorsku kapslu ili inicijalnom kapslom koja se nalazi u vrhu projektila, pa se u konstrukcijama kumulativnih punjenja koristi polusfernii ili ravni detonator (sl. 24.). U savremenim rješenjima primjenjuje se isključivo prvi slučaj aktiviranja inicijalnog lanca (upaljači sa inicijalnom kapslom i kumulativna punjenja sa ravnim detonatorom mogu se sresti kod starijih rješenja, iz perioda šezdesetih godina).[2]

Polusfernii detonator je povoljniji, jer ima veću površinu nalijeganja na eksplozivno punjenje, a pobuđeni detonacioni talas manju krivinu (izražena je manja konveksnost prema vrhu konusne površine).

Detonatorska punjenja se izrađuju najčešće presovanjem tetrila, a rijeđe od flegmatizovanog heksogena. Iako ima nešto manju brzinu detonacije i gustinu, tetril je povoljniji od heksogena zbog veće sigurnosti pri radu – manje je osjetljiv od heksogena.



Sl. 24. Oblici detonatora eksplozivnog punjenja [2]

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 dospije do vrha konusne šupljine (optimalan slučaj sa stanovišta kumulativnog efekta, po hidrodinamičkoj teoriji) [2].

Zahtjevi koje treba da ispuni moderni kumulativni projektil insistiraju na što je moguće manjoj masi projektila, a to je u suprotnosti sa uslovima koji obezbjeduju ravan detonacioni talas. Zato se nastoji da se, uz minimalnu masu eksploziva, blisku aktivnoj masi (dio mase koji učestvuje u stvaranju kumulativnog mlaza), ostvari detonacioni talas primjenom detonatora odgovarajuće konstrukcije (generator ravnog detonacionog talasa) ili ugradnjom, na izvjesnom rastojanju od detonatora, devijatora detonacionog talasa.

Sadašnja rješenja kumulativnih bojevih glava su minimalne mase, upravo zahvaljujući devijatorima. Osim toga, devijator omogućuje generiranje detonacionog talasa takvog oblika da tangenta na profil talasa u svakoj tački izvodnice obloge gradi ugao λ_{op} koji je manji od ugla ($\pi/2 - \alpha$) za slučaj ravnog detonacionog talasa. Pri uglu λ_{op} ostvareni su takvi uslovi urušavanja kumulativnog lijevka pri kojima se postižu maksimalne brzine i kinetička energija primarnog kumulativnog mlaza.

Značajno je sa praktičnog stajališta zapaziti slijedeće konstatacije:

- stepen uticaja devijatora zavisi od materijala (gustina ima odlučujući uticaj), oblika i dimenzija devijatora;
- u slučaju male gustine materijala devijatora, udarni talas koji prolazi kroz devijator ne učestvuje u pobuđivanju detonacije eksplozivnog punjenja u kontaktu sa devijatorom;

Materijal i oblik devijatora optimiziraju se za svako konkretno rješenje kumulativnog punjenja kroz sistematska eksperimentalna ispitivanja. Međutim, zahvaljujući mogućnostima računarske tehnike i adekvatne softverske podrške, optimizacija oblika devijatora za datu konfiguraciju kumulativnog punjenja može se izvršiti i metodom numeričke simulacije.

Kod savremenih kumulativnih punjenja ugrađuju se dva tipa devijatora: pasivni (izrađen od inertnog materijala) i aktivni (kombinacija inertnog materijala i eksploziva manje gustine i manje razorne moći u odnosu na eksploziv kumulativnog punjenja). Pasivni devijatori i inertni dio aktivnog devijatora izrađuju se od materijala koji posjeduje što je moguće veću akustičku impedansu (kompleksni količnik akustičkog pritiska i fluksa brzine) i dinamičku čvrstoću. Zahtjev za što manjom masom devijatora sužava izbor na materijale relativno male gustine: teflon, fenolformaldehid, stiropor velike gustine i druge slične materijale. Eksperimentalni rezultati pokazuju da u punjenju sa aktivnim devijatorom nastaje detonacioni talas većeg intenziteta (veća brzina detonacije) i povoljnijeg oblika nego u punjenju sa pasivnim devijatorom. Ovo potvrđuju i rezultati poligonskog ispitivanja dubine prodiranja u pancirnu prepreku velike debljine, gdje su kumulativna punjenja sa aktivnim devijatorom dala za 5-6% veću dubinu prodiranja. [2]

4) Mehanizam za aktiviranje

Sistem, uredaj ili mehanizam čija je namjena da aktivira projektil u željenom trenutku i u uslovima koje diktiraju namjena i vrsta projektila ili mine naziva se upaljač. Mehanizam za aktiviranje kumulativnog punjenja treba da ispunjava dva osnovna zahtjeva: što kraće vrijeme funkcionisanja (maksimalna trenutnost) i funkcionisanje pri vrlo malim uglovima susreta projektila sa ciljem. [3]

Pri sudaru projektila i prepreke, kontakt vrha projektila i prepreke pokreće mehanizam za aktiviranje. Za vrijeme dok mehanizam proizvede potrebnu energiju i dok se ona prenese do inicijalne kapsule (vrijeme funkcionisanja upaljača), projektil nastavlja kretanje uz deformaciju vrha (slika 25.). Razumije se, kretanje projektila nastavlja se sve dok ne detonira eksplozivno punjenje, pa se put projektila može jednostavno izraziti preko formule:

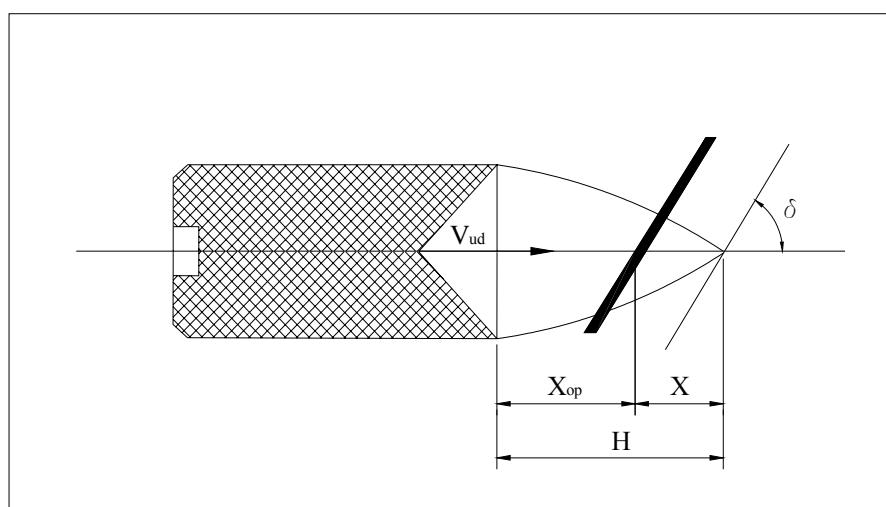
$$X = V_{ud} \cdot (t_{fu} + t_d)$$

Gdje su:

V_{ud} - udarna brzina projektila;

t_{fu} - vrijeme funkcionisanja upaljača;

t_d - vrijeme detonacije eksploziva



Sl. 25. Sudar kumulativnog projektila i prepreke [2]

Kako je vrijeme t_d praktično konstantno pri mogućim promjenama brzine detonacije i dužine eksplozivnog punjenja, to na put X odlučujuće utiče vrijeme t_{fu} . U uslovima ograničene vrijednosti $H = X + X_{op}$ (diktirano aerodinamikom projektila), očigledan je interes da put X bude što manji. [2]

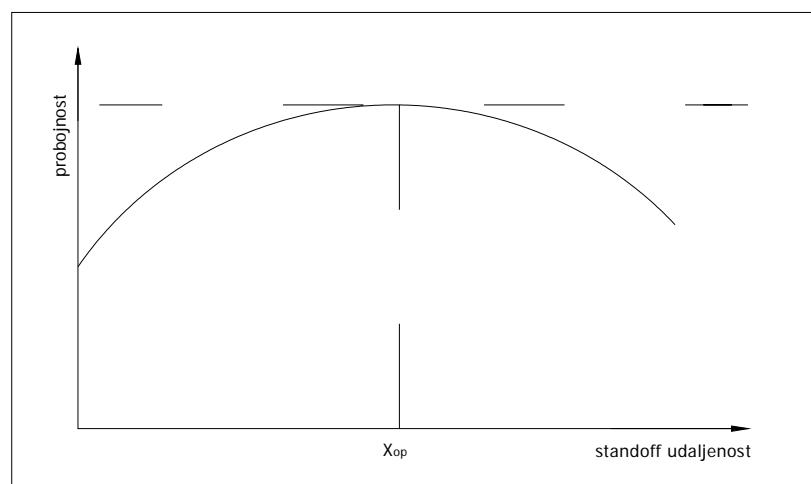
Za ugradnju u kumulativne projektile mogu se koristiti mehanički i električni upaljači, ali značajniju prednost imaju električni, zbog znatno veće trenutnosti i mogućnosti funkcionisanja pri vrlo malim udarnim uglovima (mehanički upaljači se koriste samo u nekim specijalnim slučajevima, npr., kod kumulativnih ručnih bombi i kumulativnih bombica kasetnih projektila). Vrijeme funkcionisanja savremenih električnih upaljača iznosi 20 do 40 μs , a dobro rješenog mehaničkog upaljača oko 250 μs . Električni upaljači funkcionišu pri udarnim uglovima do 5°, a mehanički do 15°. [2]

5) Košuljica projektila

Kao integralni dio kumulativne bojeve glave, košuljica projektila, zajedno sa eksplozivnim punjenjem i kumulativnim lijevkom čini neodvojivu cjelinu. Tijelo košuljice može se izvesti na različite načine. Kod kumulativnih punjenja, geometrija košuljice može bitno uticati na kontrolu gradijenta brzine primarnog kumulativnog mlaza. Za precizno urađena kumulativna punjenja, performanse mlaza su dobre čak i na većim standoff udaljenostima, ali je situacija skoro ista kao i kod punjenja bez košuljice, na kratkim ili srednjim standoff distancama. Ponekad je potrebno ugraditi prstenove na košuljici da se spriječi izlazak detonacionih produkata iz osnove lijevka, jer je održavanje pritiska u lijevku nakon procesa urušavanja od izuzetne važnosti. Zato, dalje povećanje debljine košuljice ne vodi do većeg povećanja performansi kumulativnog mlaza. Za čelik, debljina zida košuljice iznosi maksimalno oko 1/10 prečnika punjenja. [62]

6) Standoff distanca – rastojanje između osnovice lijevka i prepreke

Već pomenuta, standoff distanca, bitno utiče na stepen iskorištenja energije kumulativnog mlaza. Poznato je već da primarni kumulativni mlaz raspolaže najvećom energijom u momentu odvajanja od sekundarnog mlaza, pa je optimalno rastojanje (X_{op}) između osnovice lijevka i napadnute prepreke ono rastojanje koje omogućuje potpuno formiranje primarnog mlaza. Vrijeme potrebno za formiranje primarnog mlaza zavisi u najvećoj mjeri od brzine čela mlaza. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da kod kumulativnih eksplozivnih punjenja sa konusnim lijevkom rastojanje osnovica lijevka-prepreka, potrebno za formiranje primarnog mlaza, iznosi oko 2,5 kalibara za punjenja do 60mm, i oko 2 kalibra za punjenja većeg kalibra.



Sl. 26. Probojnost – Standoff distanca kriva za konusni kumulativni lijevak [3]

Na slici 12. prikazana je funkcionalna zavisnost probajnosti kumulativnog mlaza od standoff udaljenosti. Primjetno je da postoji optimalna standoff udaljenost (X_{op}), na kojoj je dubina prodiranja kumulativnog mlaza najveća. U toj tački dolazi do potpunog formiranja primarnog kumulativnog mlaza. Očigledno je da bi optimalno rješenje bilo ako bi kriva promjene dubine prodiranja oko apscise X_{op} u što većem opsegu imala zanemarljivu krivinu. Savremena kumulativna punjenja bliska su ovom optimumu. [2]

7) Rotacija projektila

Rotacija kumulativnih projektila značajno umanjuje efikasnost kumulativnog mlaza. Zbog toga su savremene kumulativne bojeve glave isključivo nerotirajuće ili sa vrlo malom rotacijom, koja ne prelazi 50 obr/s. U slučaju obrtnog kretanja punjenja, na čestice u kumulativnom mlazu koje se nalaze izvan ose obrtanja djeluje centrifugalna sila, proporcionalna rastojanju čestica od ose obrtanja. Dejstvo ove sile izaziva povećanje poprečnog presjeka mlaza, što smanjuje koncentraciju energije u mlazu, a time i njegovu sposobnost probijanja. [2]

Uticaj obrtne brzine kumulativnog punjenja na probajnost zavisi od prečnika i oblika kumulativne šupljine. Sa povećanjem prečnika punjenja, povećava se i negativan uticaj rotacije, zbog povećanja centrifugalne sile koja djeluje na čestice u mlazu. Npr., pri promjeni prečnika punjenja od 32mm na 76mm, smanjuje se moć prodiranja mlaza za 50% pri rotaciji punjenja od 334 obr/s, u odnosu na moć prodiranja koju ova punjenja imaju bez rotacije. Takođe, eksperimentalnim putem, utvrđeno je da uticaj rotacione brzine zavisi od ugla 2α pri vrhu konusne šupljine. Tako se sposobnost prodiranja kumulativnog punjenja prečnika 56mm pri rotaciji od 334 obr/s smanjuje za 30% u odnosu na moć prodiranja bez rotacije, promjenom ugla 2α sa 60° na 27° . Poznato je istovremeno, da se uticaj rotacije ispoljava u jednom intenzitetu kod punjenja sa konusnim, a u drugom kod hiperboloidnih, ili sfernih kumulativnih lijevaka. [2]

Zbog velikog negativnog uticaja rotacije, ubrzo poslije II svjetskog rata odustaje se od rotirajućih kumulativnih projektila, namjenjenih protiv oklopnih vozila, iako je dejstvo mlaza nakon probijanja napadnute prepreke vrlo snažno (dejstvo ovih projektila karakterisala je vrlo visoka vjerovatnoća uništenja cilja nakon probijanja zaštitne prepreke). Zapravo, napredak u oklopnoj zaštiti borbenih vozila, posebno tenkova (povećanje debljine i materijala oklopa), potpuno je diskvalifikovao ovaj tip kumulativnih projektila. Istovremeno je ostvaren i značajan napredak u konstrukciji kumulativnih projektila, pa je, uz pojavu klasičnih i raketnih projektila bez rotacije, rješen problem korištenja artiljerijskih oruđa sa izolučenom cijevi za lansiranje kumulativnih projektila bez rotacije. Ipak, i kod ovih rješenja, rotacija nije potpuno eliminisana, kod jedne vrste projektila zbog konstrukcionih specifičnosti rješenja sa kojim se eliminiše uticaj izolučenosti cijevi, a kod drugih zbog visokih zahtjeva za preciznost projektila na cilju. Otuda savremeni kumulativni projektili, bez obzira na način lansiranja, blago rotiraju (do 35 obr/s). [2]

8) Karakteristike prepreke

Karakteristike prepreke imaju veliki uticaj na zaštitnu otpornost. Mehanizam prodiranja primarnog mlaza u prepreku, odnosno probijanje prepreke, ima skoro isključivo karakteristike mehaničke pojave. Do probijanja i stvaranja otvora u prepreci dolazi uslijed radikalnog sabijanja materijala prepreke pod dejstvom primarnog mlaza. Najbolja potvrda navedenog jeste činjenica da u metalu prepreke, u blizini šupljine stvorene prolaskom primarnog mlaza, dolazi do promjene mehaničkih osobina materijala prepreke-tvrdoča materijala prepreke na samoj ivici šupljine je najveća, a zatim opada sa udaljavanjem od ivice do vrijednosti koju metal ima u neuznemirenoj masi. [2]

Ako se imaju u vidu brzina primarnog mlaza i vrijednost pritiska koji se javlja pri sudaru mlaza i čelične prepreke (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 materijala prepreke. Uticaj mehaničkih osobina i vrste materijala napadnute prepreke na moć probijanja kumulativnog mlaza pokazuju podaci navedeni u tabeli 5., dobijeni ispitivanjem kumulativnog punjenja od heksolita, prečnika 42mm, sa hiperboloidnim lijevkom (aluminijski lijevak, debljine 2mm).

materijal prepreke	Tvrdoća (HB)	Dubina prodiranja (mm)
Čelik	100	111
Čelik	350	80
Aluminijum legura	50	327
Aluminijum legura	200	256

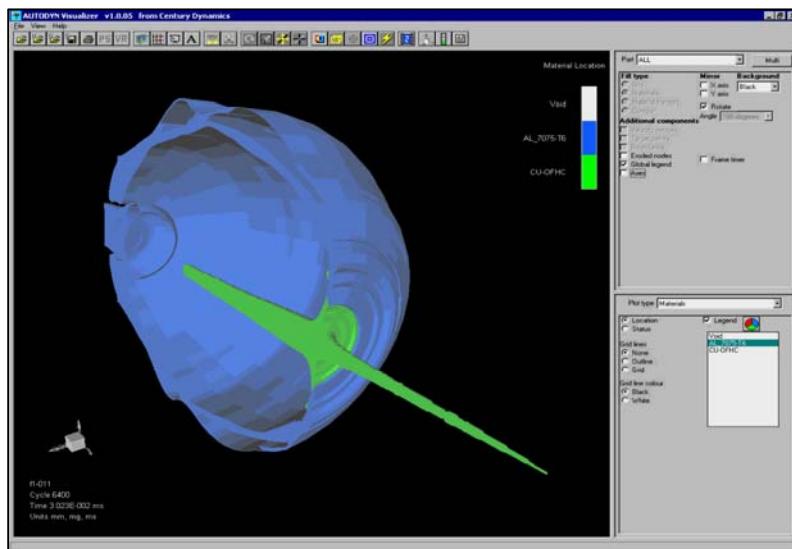
Tabela 3. Uticaj mehaničkih osobina materijala na dubinu prodiranja [2]

Na kraju, još jedan sasvim pragmatičan zaključak - ako bi se oklop borbenih vozila projektovao samo za zaštitu od kumulativnih bojevih glava, insistiralo bi se na što je moguće većoj tvrdoći, na račun žilavosti. Međutim, ovakav pristup ne bi bio opravдан, jer oklop velike tvrdoće i zanemarljive žilavosti ne bi pružao odgovarajuću zaštitu u slučaju dejstva drugih tipova protiv-oklopnih projektila. Pravo rješenje je i u ovom slučaju kompromisno – uz što veću tvrdoću, treba ostvariti i neophodnu žilavost materijala. [2]

9) Temperatura kumulativnog mlaza

U svojim publikacijama, von Holle i Trimble [49] razvili su tehniku mjerjenja temperature metala baziranoj na infracrvenoj radiometriji. Njihov rezultati uključuju i rezultate mjerjenja temperature tankih bakrenih ploča koje su bile pod pritiskom od 30-50 GPa. Prezentovani su i podaci o temperaturnim mjerjenjima kumulativnih mlazeva u toku leta. U njihovim radovima, mjerena je temperatura kod bakrenog konusnog lijevka mlaza (82mm, 42°-ugao vrha konusa). Kao eksplozivno punjenje korištena je kompozicija B (RDX-TNT). Nakon četiri snimka, prosječna temperatura kumulativnog mlaza iznosila je 432°C, sa standardnom devijacijom od 76°C. Mlaz je ispitivan u vakuumu. [3]

Von Holle i Trimble su mjerili temperaturu mlaza sa punjenjima kompozicije B, ali i Octola (HMX-TNT). Izmjerena je temp. mlaza nakon što je vrh mlaza prešao osam prečnika punjenja od osnovice konusa. Osnovni bakreni lijevak modificiran je tako da su testirani i oni sa zašiljenim i zaobljenim vrhovima konusa lijevka. Zašiljeni vrhovi lijevka su korišteni jer, kada se od njih formira kumulativni mlaz, on je primjetno koherentniji nego onaj od zaobljenih lijevaka [49]. Za Octol eksplozivna punjenja, koja su bila sa zaobljenim vrhom lijevka, tri snimka dala su temperaturu mlaza od 537°C, sa standardnom devijacijom temperature od 20°C [3]. Usrednjeno svih podataka njihovih mjerjenja rezultiralo je, iz 12 snimaka, prosječnom temperaturom punjenja sa kompozicijom B od 441°C (sa devijacijom od 80°C), dok je za Octol punjenja, iz 6 snimaka, prosječna temperatura bila 521°C, sa standardnom temperaturnom devijacijom od 40°C [49]. Kod zašiljenih bakrenih kumulativnih lijevaka, izmjerena je zavisnost temperature od udaljenosti od vrha mlaza. Podaci su pokazali da temp. mlaza rasta iza čela mlaza, i onda počinje opadati. Takođe, posmatran je početak formiranja mlaza kod punjenja sa Octolom, da bi se izračunale početne temperature mlaza. Temperatura, čini se, opada nakon početka procesa formiranja kumulativnog mlaza.



Sl. 27. Primjer numeričke simulacije formiranja kumulativnog mlaza (AUTODYN)

Von Holle i Trimble su mjerili i temperaturu olovo-kalaj eutektičkog kumulativnog lijevka (82mm, 60°-ugao vrha lijevka) [63]. Debljina zida lijevka bila je 2.54mm, a eksplozivno punjenje, kompozicija B. Vrh konusa je zaobljen radijusom od 1mm. Nakon četiri opita, izmjerena je temperatura mlaza od 569°C, sa standardnom devijacijom od 34°C. Olovo-kalaj lijevak imao je brzinu čela mlaza od 6.3 km/s, dok je, prethodno spomenuti, bakreni lijevak davao brzinu mlaza i do 8 km/s. Njihovi eksperimenti bili su prvi ove vrste i predstavljaju odličan pristup ovom zahtjevnom problemu. Detaljna objašnjenja eksperimentalnih metoda dali su u svojim radovima. [3]

VII POGLAVLJE

Ispitivanje probajnosti kumulativnih bojevih glava

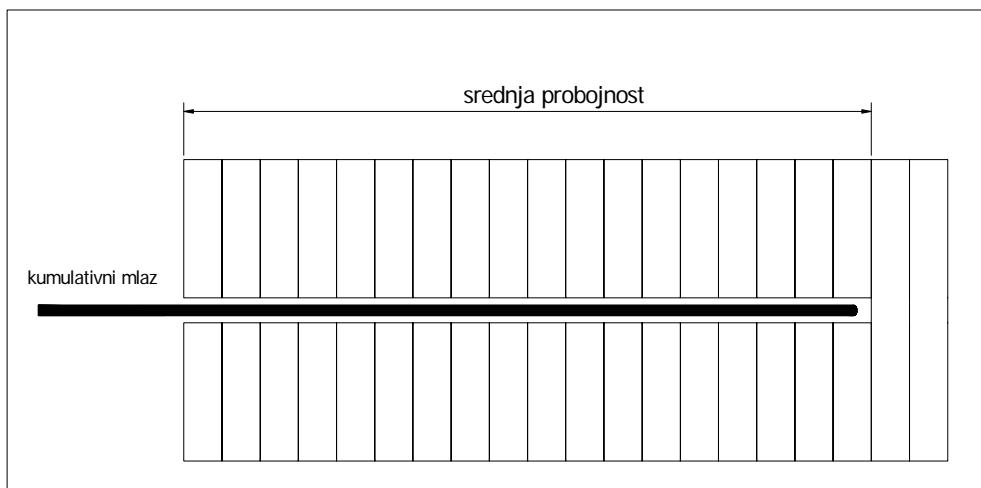
Efekat na oklopu izazvan dejstvom kumulativnih protiv-oklopnih projektila može se podijeliti u dvije kategorije:

- Proboj – podrazumijeva se efekat pri kome je kumulativni mlaz ostavio u oklopu otvor prečnika koji nije manji od najvećeg prečnika projektila
- Zador – efekat koji nastaje u slučaju zaustavljanja mlaza u oklopu, bez potpunog probijanja prepreke. [2]

Vrlo je važno ocjeniti srednju dubinu prodiranja kumulativnog projektila u metu. Postoje različite debljine i vrste oklopa na tenkovima, pa su, u skladu s tim, ustanovljene četiri osnovne metode ispitivanja probajnosti kumulativnih bojevih glava. Metoda homogene mete, metoda NATO jednostrukih meti, metoda NATO dvostrukih meti i metoda NATO trostrukih meti.

1) Homogena meta

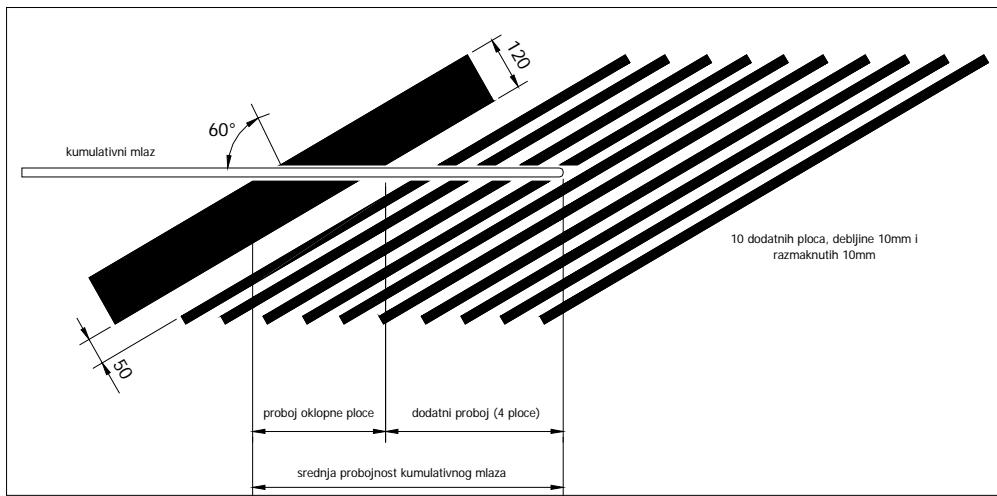
Homogena meta se koristi za ispitivanje stvarne dubine prodiranja kumulativnog mlaza. Sastoji se od odgovarajućeg broja ploča pancirnog čelika, nazivne čvrstoće 900N/mm^2 , debljine 40mm, postavljenih pod uglom od 90° .



Sl. 28. Homogena meta [85]

2) Jednostruka NATO meta

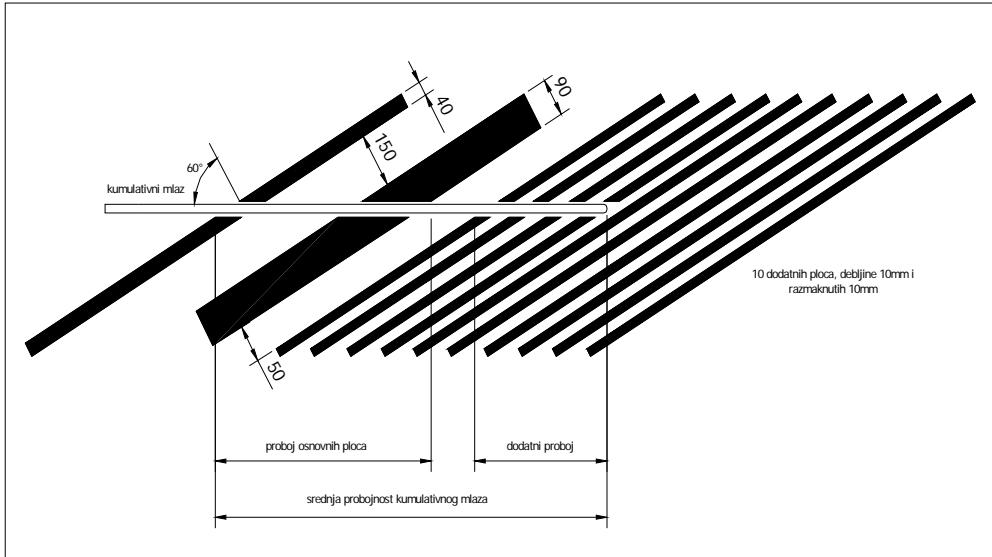
Prilikom ispitivanja probajnosti koristimo i jednostruku metu. Ona se sastoji iz niza ploča sa međuprostorom. Prva ploča, debljine 120mm, nagnuta je pod uglom 30° . Na odstojanju 50mm od nje, postavljen je red ploča, debljine 10mm, i na međusobnom rastojanju od 10mm. Ovaj red ploča pokazuje dodatnu snagu kumulativnog mlaza. Mjeri se ukupna dužina probaja (kroz čelik i vazdušni međuprostor). Na slici 29. prikazan je raspored ploča u jednostrukoj NATO meti.



Sl. 29. Jednostruka (NATO) meta [85]

3) Dvostruka NATO meta

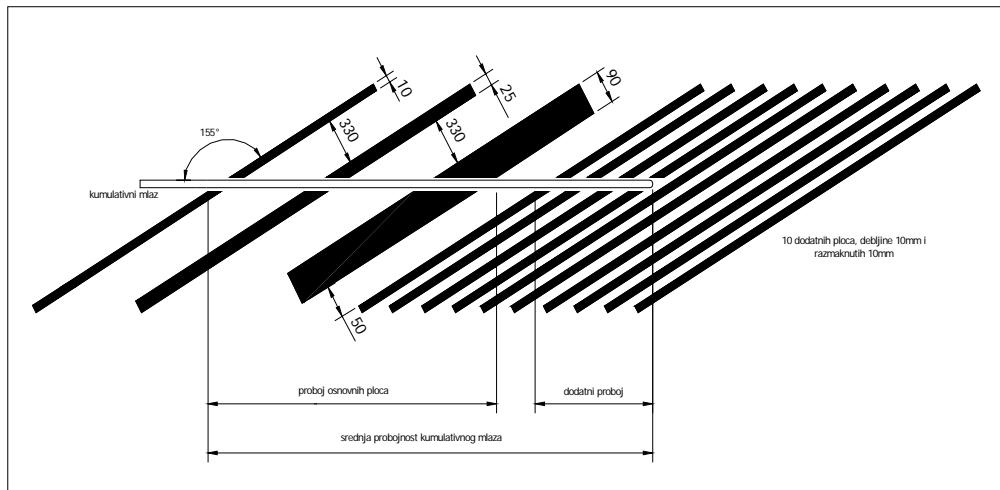
U slučaju dvostrukih mete, ispitivanje se vrši sa dvije osnovne i nekoliko dopunskih ploča. Prva ploča, debljine 40mm, nagnuta je pod uglom od 30° . Na udaljenosti 150mm od nje je druga ploča, čija je debljina 90mm. Iza ove dvije ploče nalazi se deset dopunskih ploča, debljine 10 mm i na međusobnom rastojanju od 10mm.



Sl. 30. Dvostruka NATO meta [85]

4) Trostruka NATO meta

Trostruka meta, kako sam naziv govorim, sastoji se od tri osnovne ploče i deset dodatnih. Prva, debljine 10mm udaljena je 330mm od druge ploče, debljine 25mm. Iza ove ploče nalazi se glavna ploča, debljine 90mm i to na udaljenosti od 330mm. Iza nje su dodatne ploče, udaljene 50mm, a čija je debljina 10mm. One, kao što je rečeno, služe kao pokazatelj dodatne probajne sposobnosti kumulativnog mlaza.



Sl. 31. Trostruka NATO meta [85]

Treba napomenuti da, u sklopu upotrebe protiv-oklopnih projektila, veoma važno je poznavati koliko se mijenja probojna moć projektila, određena za homogenu metu, u odnosu na drugu vrstu prepreke (ERA oklop, kompozitni oklop, aktivni oklop, i dr.). Savremeni kumulativni projektili upotrebљeni za probor prepreke od armiranog betona imaju proborjnu moć do 3 puta veću u odnosu na homogenu metu. Neki empirijski pokazatelji ukazuju da je proborjna moć veća za drvo oko 5 puta, za kamen minimalno 3 puta, za opeku 4, a za glinu preko 5 puta.



Sl. 32. Testiranje proborjnosti

Na slici 32. vidimo tragove tri ispaljena kumulativna projektila. Prvo, standardno kumulativno punjenje od 105mm (desno gore) probilo je homogeni čelični oklop. To isto punjenje (lijevo gore) neutralisano je segmentom reaktivnog oklopa (treba primjetiti kockasti segment ERA oklopa ispod mjesta udara projektila). Na dnu (označeno brojem 3), tandem bojeva glava BILL (Bofors) kumulativnog projektila porazila je ERA oklop [87].

Kod ERA oklopa, kao dodatak zakošenosti, postoji raznovrsnost parametara povezanih sa ovim tipom oklopa koji su kritični za performanse kumulativnih bojevih glava:

- Raspored oklopnih materijala na putanji prodiranja;
- Broj slojeva eksploziva;
- Dimenzije oklopa u ravni međudejstva;
- Pričvršćavanje i podupiranje modula;

Izvršeni su mnogi testovi sa ispaljivanjem različitih kumulativnih punjenja na mnoštvo različitih tipova ERA oklopa, pri širokom rasponu zakošenja, i kao zaključak se može konstatovati da, u opštem slučaju, prodiranje kumulativnog mlaza značajno varira od tipa kumulativne bojeve glave i tipa oklopa.

Tokom 1997. godine, naučni tim iz Lawrence Livermore laboratorija uspješno je testirao najveće ikad napravljeno punjenje, sa molibdenskim kumulativnim lijevkom [86]. Projektil se kretao nekoliko metara kroz zrak, a zatim probio nevjerovatnih 3.4 metra kvalitetnog čeličnog oklopa. Zaključili su da se modificiranjem dizajna i oblika kumulativnog lijevka može postići maksimalna probognost u prepreku. Ali problem, naravno, leži u neprestanim promjenama materijala prepreke, u metodama konstrukcije prepreka, koje se sve teže probijaju, a upravo to je izazov na koji inžinjeri - konstruktori moraju odgovoriti.

ZAKLJUČAK

Kumulativne bojeve glave koriste se u cilju probijanja (prepreke). Primjena ovih bojevih glava odnosi se prvenstveno na vojne ciljeve (torpeda, artiljerijski projektili, protiv-tenkovski projektili, meci, različite vrste bombi). Mete mogu biti oklopna vozila, bunker, betonska utvrđenja. Moguća je i primjena protiv aviona i helikoptera. HEAT Bojeve glave moraju obezbjediti odgovarajuću efikasnost na cilju, uništiti ga ili onesposobiti.

Konstantna istraživanja i razvoj bojevih glava uslovio je njihov optimalan dizajn i performanse. Izbor kumulativne bojeve glave za neku metu zavisi od tipa oklopa, potrebne penetracije, brzine projektila. Poželjne karakteristike bojevih glava uključuju efikasnost, u pogledu troškova i kompleksnosti sistema, kao i maksimalna koncentracija destruktivnih elemenata na područje mete, otpornost na ambijentalne uslove, jednostavnost izrade, niska cijena.

Paralelno sa pojavom kumulativnih bojevih glava pojavio se problem efikasnijeg probijanja oklopnih vozila (posebno tenkova). Sa druge strane, proizvođači oklopnih vozila nastojali su posade svojih tenkova zaštiti što je bolje moguće. Oduvijek je postojala borba između dizajnera kumulativnih projektila i proizvođača oklopnih sredstava. Oklop kao sastavni dio opreme za vanjsku zaštitu štiti posadu i vitalne dijelove tenka od pogodaka, te direktno povećava vjerovatnoću preživljavanja na bojištu. Svi tenkovi imaju posebno ojačane oklope na prednjem dijelu oklopnog tijela i kupole, kao kompromis između potrebnog nivoa zaštite i enormnog povećanja ukupne mase tenka.

Mehanizam stvaranja kumulativnog mlaza ovisi o geometriji i vrsti materijala kumulativnog lijevka, vrsti i osobinama vanjske košljice eksplozivnog punjenja, vrsti eksploziva, načinu iniciranja kumulativnog punjenja, rotaciji projektila. Isto tako, za reproducibilnost i postizanje optimalnih performansi nužna je velika aksijalna preciznost u izradi lijevka.

Birkhoff je 1948. godine napisao prvu revolucionarnu teoriju o formiranju kumulativnog mlaza, prepostavljajući da detonacijski val, nastao iniciranjem eksplozivnog punjenja, proizvodi tako veliki pritisak tokom procesa kolapsa kumulativnog lijevka da se čvrstoća materijala lijevka može zanemariti. U osnovi, lijevak se u tom procesu tretira kao neviskozan i nestišljiv fluid, a elementi lijevka trenutačno su ubrzani do njihovog konačnog kolapsa. Ovaj model se naziva i stacionarni model formiranja kumulativnog mlaza. Stacionarni model predviđa kumulativni mlaz sa vremenski nepromjenljivim tokom, i konstantnom dužinom.

Ovu teoriju je modifikovao Pugh, 1952. godine, i u nju uključio gradijent brzine. Ta modificirana teorija bazirana je na istim principima kao i originalna (Birkhoff) osim što brzina pri kojoj različiti elementi lijevka kolapsiraju nije konstantna nego zavisi od početnog položaja elemenata lijevka. Godunov [42] je razradio visko-plastičnu teoriju, modifikujući stacionarnu teoriju i uključujući viskoznost materijala lijevka kao važan faktor u procesu formiranja mlaza.

Tipičan kumulativni mlaz, sastavljen od primarnog i sekundarnog mlaza, ima relativno visoku brzinu primarnog mlaza, a nešto manju brzinu sekundarnog mlaza. Ovaj gradijent brzine često uzrokuje istezanje mlaza. Dužina istezanja, koja je direktno proporcionalna probajnoj sposobnosti mlaza, ograničena je eventualnim aksijalnim prekidom mlaza na segmente ili čestice. Kada se mlaz razdvoji, ukupna

probojnost značajno se smanjuje. Posljednjih godina mnogi istraživači proučavali su ovaj problem, Chou, Carleone, Walsh, Hirsch, Pfeffer, Haugstad, Miller. Generalno, koriste se tri pristupa, hidrodinamičke simulacije, jednodimenzionalni analitički modeli i poluempijske formule.

Analitički modeli koji su sposobni da predvide probojnost kumulativnog mlaza veoma su vrijedni za terminalnu balistiku. Mnoge naučne discipline uključene su u ove modele jer se kumulativni mlazovi ne koriste se samo za penetraciju metalnih oklopa, već i stijena, tla, drveta, leda i drugih nemetalnih struktura. Takođe, meta može biti homogena ili se sastojati od nekoliko slojeva različitih materijala, uključujući zrak i tečnosti. Zato, analitički izrazi za probojnost obično prepostavljaju jednodimenzionalan tok i druge pojednostavljajuće pretpostavke.

Vjerovatno najvažniji element kumulativnog punjenja je metalni (ili nemetalni) lijevak (obloga). Uticajniji parametri lijevka su materijal lijevka i njegova geometrija. Najčešći oblici lijevka su konus, hiperboloid, polusfera, truba, tulipan, bikonusni lijevak, Misznay-Schardin lijevak (ili balistički disk), i kombinacije pomenutih oblika. Lijevak se najčešće izrađuje od elektrolitičkog bakra koji ima veoma povoljne osobine (velika gustina, dobre plastične osobine,).

Izbor vrste eksploziva zavisi prije svega od tehnologije njegove ugradnje u košuljicu projektila, ali se nezavisno od izabrane tehnologije, nastoji ostvariti što je moguće homogenije punjenje i što veća brzina detonacije, uz razumije se, tehnički i tehnološki prihvatljive uslove iniciranja stabilne detonacije eksplozivnog punjenja. Za izradu kumulativnih eksplozivnih punjenja koriste se dvije tehnologije: livenje i presovanje. U oba slučaja najvažnije je da se pouzdano reprodukuje hemijski i fizički homogeno eksplozivno punjenje i da se proces proizvodnje i postupak kontrole kvaliteta odvijaju strogo prema propisanoj tehnologiji.

Mehanizam za aktiviranje kumulativnog punjenja treba da ispunjava dva osnovna zahtjeva: što kraće vrijeme funkcionalisanja (maksimalna moguća trenutnost) i funkcionalisanje pri vrlo malim uglovima susreta projektila sa ciljem. Pri sudaru projektila i prepreke, kontakt vrha projektila i prepreke pokreće mehanizam za aktiviranje. Karakteristike prepreke imaju veliki uticaj na zaštitnu otpornost. Mehanizam prodiranja primarnog mlaza u prepreku, odnosno probijanje prepreke, ima skoro isključivo karakteristike mehaničke pojave. Do probijanja i stvaranja otvora u prepreci dolazi uslijed radikalnog sabijanja materijala prepreke pod dejstvom primarnog mlaza.

Ispitivanje probojne moći kumulativnih projektila vrše se uz pomoć homogenih, jednostrukih, dvostrukih i trostrukih NATO meta. U novije vrijeme, grupa naučnika uspjela je ostvariti najveću probojnost punjenja do sada (3.4 metra u kvalitetni oklopni čelik). Koristili su lijevak od molibdена.

HULL, AUTODYN, DESC, BASC, HELP i EPIC, savremeni numerički kodovi, koriste se pri proučavanju procesa urušavanja lijevaka, formiranja kum. mlaza, u teoriji probojnosti, itd. Moguće je mjeriti temperature formiranja mlaza i temperature mlaza u toku leta prema meti, kao i ostale važne parametre kumulativnog punjenja.

Među najzaslužnije za teorijsko – eksperimentalni napredak u proučavanju kumulativnog efekta spadaju: Foerster, Munroe, Thomanek, Mohaupt, Lavrentev, Taylor, Baum, Kennedy, Reichelberg, Stanjuković, Sutterlin, Defourneaux, Chou, Carleone i drugi.

Literatura:

- [1] K. J. GOAD, D. H. HALSEY, «Ammunition», Royal Military College of Science, Shrivenham, 1981
- [2] A. STAMATOVIĆ, «Konstruisanje projektila», Beograd, 111995
- [3] W. P. WALTERS, J. A. ZUKAS, «Fundamentals and theory of shaped charges», John Wiley & Sons, New York, 1989
- [4] M. SUČESKA, «Izračunavanje parametara kumulativnog mlaza primjenom jednodimenzionalnog analitičkog modela», Brodarski institut Zagreb, 1996
- [5] A. STAMATOVIĆ, «Fizika eksplozije», Beograd, 1996
- [6] Š. ŽUNIĆ, «Tehnologije za povećanje borbene efikasnosti tenkova za XXI stoljeće», Sarajevo, 2001
- [7] A. WISNIEWSKI, «Armours with sheet metal plates with high hardness», International symposium on Ballistics Orlando, 2002
- [8] C. L. FARRAR, D. W. LEEMING, «Military ballistics», Royal Military College of Science, Shrivenham, 1982
- [9] R. MCLEOD, «Modern Explosive Reactive Armours», 1998
- [10] Army Technology - BILL 2 - Anti-Tank Guided Weapon, www
- [11] Army Technology - ERYX - Heavy Anti-Armour Missile, www
- [12] Army Technology - HOT - Anti-Tank Weapon System, www
- [13] Army Technology - JAVELIN - Anti-Tank Weapon System, www
- [14] Army Technology - MBT LAW - Anti-Tank Weapon System, www
- [15] Army Technology - KHRIZANTHEMA-S - Anti-Tank Weapon System, www
- [16] Army Technology - WIKHR (AT-9) - Anti-Tank Weapon System, www
- [17] Army Technology - MILAN - Anti-Tank Weapon System, www
- [18] Nature and Origins of Reactive Armor, www
- [19] RE ARMOUR, The tandem-charge penetration potential, www
- [20] R. R. LENZ, «Explosives and Bomb Disposal Guide», Springfield, II: Charles C. Thomas
- [21] D. R. KENNEDY, «The History of Shaped Charge Effect, The First 100 Years», presented at MBB Schrobenhausen, West Germany, September, 1983
- [22] H. FREIWALD, «The History of Hollow Charge Effect of High Explosive Charges», forward by Hubert Schardin, for German Academy of Aviation Research, Berlin, September 15, 1941
- [23] F. A. BAUM, R. P. STANYUKOVICH, B. I. SKEKTER, «Physics of an explosion», New York, Research Information Service (AD 400151), 546, 1949
- [24] R. R. ROLINGS, G. B. CLARK, H. N. KALIA, «Penetration in Granite by Shaped Charge Liners of Various Metals», University of Missouri, Rolla, Report RMERC-TR-70-13, April, 1971
- [25] H. SCHARDIN, «Development of the Shaped Charge», Wehrtechnische Hefte, Heft 4, 1954
- [26] H. W. KLINE, «The Cavity Charge, Its Theory and Applications to the Opening of Explosive Filled Ordnance, etc.», U. S. N. R., Ordnance Investigation Laboratory, Naval Powder Factory, Indian Head, Maryland, August, 1945
- [27] R. EATHER, N. GRIFFITHS, «A U.K. Note on the History of Shaped Charges», Royal Armament Research and Development Establishment Report, August 1983, presented at MBB Schrobenhausen, West Germany, September, 1983
- [28] A. MARSHALL, «The Detonation of Hollow Charges», J. Soc. Chem. Ind., 39(3): 35T, 1920
- [29] C. P. WATSON, «Percussion Fuze», U. S. Patents 1,524,011 and 1,534,012, filled September 22, 1921 and August 27, 1923, both issued on April 14, 1925
- [30] F. R. THOMANEK, H. von HUTTERN, «Patent Applications by Franz Rudolf Thomanek and Hellmuth von Hutter», Ordnance technical Intelligence Bulletin 1249-19
- [31] H. H. MOHAUPT, «Projectile», U.S. Patent No. 2,419,414 assigned April 22, 1947, originally filed October 3, 1941
- [32] E. SCHUMANN, «The Scientific Basis of The hollow Charge Effect», Publication BIOS/Gp. 2/HEC 5919, Halstead Exploiting Center, England, ca.1945
- [33] L. B. SEELY, J. C. CLARK, «The High Speed Radiographic Studies of Controlled Fragmentation», BRL Report No. 368, June 16, 1943
- [34] J. L. TUCK, «Note on the Theory of the Munroe Effect», U.K. Report, A.C. 1596 (Phys. Ex. 393-WA-638-24), February 27, 1943
- [35] H. SCHARDIN, G. THOMER, «Untersuchung des Hohlkörperproblems mit Hilfe der Roentgenblitz - Methode», Balistisches Institut der Luftwaffensakademie Gatow, Pruf No. 9, 20 November (Ordnance Technical Bulletin 1628), 1941
- [36] H. LINSCHITZ, M. A. PAUL, «Experimental Studies of Cone Collapse and Jet Formation. Part I: Recovery of Cones from Low-powered Charges», Division 8, National Defense Research Committee of the Office of Scientific Research and Development, Report OSRD No. 2070, November 29, 1943

- [37] H. SCHARDIN, G. THOMER, «Untersuchung des Hohlkörperproblems mit Hilfe der Roentgenblitz- Methode», Balistisches Institut der Luftkriegsakademie Gatow, Pruf No. 9, 20 November (Ordnance Technical Bulletin 1628), 1941
- [38] G. BIRKHOFF, D. MACDOUGALL, E. PUGH, and G. TAYLOR, «Explosives with lined Cavities», J. Appl. Phys., 1948
- [39] P. CHOU P., W. J. FLIS, «Recent developments in Shaped Charge Technology», Propell., Explos., Pyrotech., 11:99-114, 1986
- [40] E. PUGH, R. EICHELBERGER, N. ROSTOKER «Theory of jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities», J. Appl. Phys., 23 (5), 1952
- [41] A. KIWAN, H. WISNIEWSKI «Theory and computations of Collapse and Jet Velocities of Metallic Shaped Charge Liners», BRL Report No. 1620, november, 1972
- [42] S. K. GODUNOV, V. I. MALI, «Influence of Material Viscosity on the Jet Formation Process during Collisions of Metal Plates», translated from Fizika Gorenija i Vzryva, Vol. 11, No. 1, pp. 3-18, January-february, 1975
- [43] R. J. EICHELBERGER, «Re-Examination of the Teories of Jet formation and Target Penetration by Lined Cavity Charges», CEL Report No. 1., June (also Ph. D. Dissertation), 1954
- [44] R. E. ALLISON, R. VITALI, «An Aplication of the Jet Formation Theory to a 105 mm Shaped Charge», BRL Report No. 1165, March, 1962
- [45] J. M. WALSH, «Plastic Instability and Particulation in Streching Metal Jets», Appl. Phys., 56(7): 1997-2006, 1984
- [46] P. C. CHOU, J. CARLEONE, «Breakup of Shaped Charge Jets», Proc. 2nd Int. Symp on Ballistics, Daytona Beach, FL, March 9-11, 1976
- [47] J. CARLEONE, P. C. CHOU, W.P. WALTERS «An Improved Shaped Charge Jet Breakup Calculation and Measurement of Jet properties», US Army Ballistic Research Laboratories (BRL) Contractor Report No. ARBRL-CR-00445, January, 1981
- [48] J. CARLEONE, «Mechanics of Shaped Charges», Section 3, Course Notes, Basic Principles of Hypervelocity Impact and Related Topics, April, Computational Mechanics Associates, Baltimore, MD, 1987
- [49] W. G. HOLLE, J. J. TRIMBLE, «Temperature Measurement of Shocked Copper Plates and Shaped Charge Jets by Two-Color Infrared Radiometry», J. Appl. Phys., 47(6): 2391-2394, 1976
- [50] A. L. ARBUCKLE, W. P. WALTERS, C. L. ASELTINE, «Analysis of Uniform Wall and Tapered Hemisferical Liners with several Explosive Confinement geometries», ARBRL-TR-12222, March, 1980
- [51] O. A. KLAMER, «Shaped Charge Scaling», Ammunition Engineering Directorate, Picatinny Arsenal Technical Memorandum 1383, Dover, NJ, March, 1964
- [52] H. KOLSKY, «A study of the Mechanism of Munroe Charges, Part II - Charges with hemispherical liners», Res. Supp., London, 2-2:89-95, 1949
- [53] H. P. GEORGE, «A Mechanism of Collapse of Conical Hollow Charge Liners», Frankford Arsenal Report R-667, October, 1945
- [54] J. CARLEONE, R. JAMESON, P. C. CHOU, «The Tip Origin of a Shaped Charge Jet», Propell. Explos., 2:126-130, 1977
- [55] A. R. KIWAN, A. L. ARBUCKLE, «Study of Liner Collapse, Jet Formation and Characteristics from Implosive Shaped Charge Systems», BRL-R-2028, November, 1977
- [56] E. M. PUGH, , «Protection against Shaped Charges», Final Report, Carnegie Institute of Technology, NDRC, Report NO. A-384 and OSRD, Report No. 6384, February, 1946
- [57] J. L. TUCK, «Note on teh Theory of the Munroe Effect», U.K. Report, A.C. 1596 (Phys. Ex. 393-WA-638-24), February 27, 1943
- [58] L. H. THOMAS, «A Zero Order Theory of the Initial Motion of Fluted Hollow Charge Liners» in «Transactions of Symposium on Shaped Charges», held at the BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, BRL Report No. 837, November (AD 1531), 1951
- [59] A. STANJUKOVIĆ, «Fizika Vzryva», Moskva, 1975
- [60] M. SUČESKA, «Eksplozije i eksplozivi – njihova mirnodopska primjena», Brodarski Institut Zagreb, 1998
- [61] F. J. ZERILI, R. W. ARMSTRONG, «Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations», J. Appl. Phys., 61(5): 1816-1825, 1987
- [62] W. M. EVANS, «The Hollow Charge effect», Bulletin of the Institution of Mining and Metallurgy, No. 520, March, 1950
- [63] W. G. HOLLE, J. J. TRIMBLE, «Temperature Measurement of Copper and Eutectic Metal Shaped Charge Jets», BRL Report, BRL-R-2004, August, 1977
- [64] MIL-C-5541, «Chemical Film and Chemical Film Material for Aluminium and Aluminium Alloys»
- [65] MIL-I-6866, «Inspection, Penetrant, Method of Inspection Process»
- [66] MIL-I-6868, «Magnetic Particle Finishes and Coatings»
- [67] MIL-F-7179, «General Specification for Protection of Weapon Systems, Structures and Parts»
- [68] MIL-S-7742, «Srew Threads, Standard Optimum Selected Series»

- [69] MIL-I-8500, «General Specification for Interchangeability and Replaceability of Component Parts for Aircraft and Missiles»
- [70] MIL-A-8625, «Anodic Coatings, for Aluminium and Aluminium Alloys»
- [71] MIL-I-8950, «Inspection, Ultrasonic, Wrough Metals, Process for Test Procedures»
- [72] MIL-T-18303, «Preproduction Acceptance and Life for Military Electronic Equipment»
- [73] MIL-A-22771, «Format for Aluminium Alloy Forgings, Heat Treated»
- [74] MIL-STD-130, «Identification Marking of Military Property Specifications and Standards»
- [75] MIL-STD-143, «Order of Precedence for the Selection of Fuze and Fuze Components»
- [76] MIL-STD-331, «Environmental and Performance Tests for Inspection»
- [77] MIL-STD-453, «Radiographic Parts and Equipment»
- [78] MIL-STD-794, «Procedure for Packaging and Packing»
- [79] MIL-STD-810, «Environmental Test Methods»
- [80] MIL-STD-889, «Dissimilar Metals»
- [81] MIL-STD-1166, «Radiographic Testing Requirements for Solid Propellant»
- [82] MIL-STD-1316, «Fuzes, Navy, Design Criteria for Compass, Magnetic, Pilot's Standby»
- [83] NDTA, «Magnetic Particle Inspection», Wellington, New Zealand
- [84] Neutron Radiography Inspection, Ward Center for Nuclear Sciences, Cornell University, www
- [85] LUCHAIRE S. A., «89mm STRIM antitank rocket launcher and its ammunition», Paris
- [86] LAWRENCE LIVEMORE , «Shaped Charge Testing», Nevada Test Site, 1997, www
- [87] EZIO BONSIGNORE, «On Recent Developments in Anti-Tank Warfare», MILITARY TECHNOLOGY, Vol. XIII, Issue 12, 1989
- [88] G. BIRKHOFF, D. MACDOUGALL, E. PUGH, and G. TAYLOR, «Explosives with lined Cavities», J. Appl. Phys., 1948
- [89] J. CARLEONE, P. C. CHOU, C. A. TANZIO, «User's Manual for DESC-1, A One-Dimenional Computer Code to Model Shaped Charge Liner Colapse, Jet Formation and Jet Properties», Dyna East Corporation, Technical Report No. DE-TR-75-4, December, 1975
- [90] R. HILL, N. MOTT, D. PACK, A.R.D. Theoretical Research Report No. 2/44 (January) and 12/44 (March), 1944
- [91] NDRC, «Protection Against Shaped Charges», Carnegie Institute of Technology, NDRC Report No. A-384 i OSRD Report No. 6384, february, 1946
- [92] E. M. PUGH, «A Theory of Target Penetration of Jets», National Defense Research Committee Armour and Ordnance, Report No. A-274 (OSRD No. 3752) Division 2, June, 1944
- [93] R. J. EICHELBERGER, «Experimental Test of the Theory of Penetration by Metallic Jets», J. Appl. Phys., 27(1): 63-68, 1956
- [94] W. M. EVANS, D. C. PACK, «Penetration by High Velocity (Munroe) Jets: 1», Proc. Phys. Soc. (London), B64:298, 1951
- [95] G. R. ABRAHAMSON, J. N. GOODIER, «Penetration by Shaped Charge Jets of Nonuniform Velocity», J. Appl. Phys., 34, 1963
- [96] F. E. ALLISON, R. VITALI, «A New Method of Computing Penetration Variables for Shaped Charge Jets», BRL Report No. 1184, 1963
- [97] F. H. HARLOW, W. E. PRACHT, «Formation and Penetration of High Speed Collapse Jets», Phys. Fluids, 9(10), 1966
- [98] R. DiPERSIO, J. SIMON «The Penetration-Standoff Relation for Idealized Shaped Chare Jets», BRL Memorandum Report 1542, 1964
- [99] P. C. CHOU, M. MINICH, L. GAUSE, «Experimental Study of Multiple Interior Impacts», BRL Contact Report 199, 1975
- [100] P. C. CHOU, R. H. TOLAND, «Experimental Study of Multiple Interior Impacts», Exper. Mech., 17(6): 201-206
- [101] A. B. MERENDINO, R. VITALI, «The Penetration of Shaped Charge Jets into Steel and Aluminium Targets of Various Strength», BRL Memorandum Report No. 1932, 1968
- [102] G. M. BRYAN, R. J. EICHELBERGER, D. MACDONALD, P. E. ZIGMAN, «Aplication of Radioactive tracers to the Study of Shaped Charge Phenomena», J. Appl. Phys., 28 (10): 1152-1155, 1952, 1957
- [103] M. K GAINER, «The Aplication of Radioactive tracers Shaped Charge Liners», BRL Memorandum Report No. 1242, january, 1960
- [104] H. RICHTER, «On the theory of Shaped Charges: Motion of Thin Layers of Plastic Material on the Surface of a Plane Explosive», Note Technique ILS No. 6a/48
- [105] M. DEFOURNEAUX, «Theorie Hydrodinamique des Charges Creuses», Mem. l'artillerie Francaise, 44(2): 293-334, 1970
- [106] J. T. HARRISON, «Improved Analytical Shaped Charge Code: BASC», BRL Technical Report No. ARBRL-TR-02300, March, 1981

-
- [107] R. J. EICHELBERGER, «Re-Examination of the Non-Steady Theory of Formation by Lined Cavity Charges», *J. Appl. Phys.*, 26(4), 1955
 - [108] C. L. MADER, «Numerical modeling of Explosives and Propellants», second edition, CRC Press, Boca Raton, Fl., 1998
 - [109] P. C. CHOU, R. D. CICCARELLI, A. L. ARBUCKLE, W. P. WALTERS, «Jet Formation of an Implosively Loaded Hemispherical Liner», Contract Report AR-BRL-CR-00470, September, 1981
 - [110] G. RANDERS – PEHRSON, «An Improved Equation for Calculating Fragment Projection Angle», Proc. 2nd Int. Symp. on Ballistics, Daytona Beach, Fl, March, 9-11, 1976
 - [111] E. HIRSCH, P. C. CHOU, R. D. CICCARELLI, «General Kinematical Solution to the Motion of an Explosively Driven Liner», *Propell., Explos., Pyrotech.*, 11: 53-64, 1986
 - [112] E. PEREZ, C. FAUQUIGNON, P. CHANTERET, «Fundamental Studies if Shaped Charge Mechanisms», Proc. 2nd Int. Symp. on Ballistics, Daytona Beach, Fl, March, 9-11, 1976
 - [113] D. J. LEIDEL, «A Design Study of an Annular-Jet Charge for Explosive Cutting», Ph. D. Dissertation, Drexel University, Philadelphia, June, 1978
 - [114] J. T. HARRISON, R. R. KARP, «Terminal Ballistic Application of Hydrodynamic Computer Code Calculations», BRL Report, april, 1977
 - [115] M. G. VIRGIL, A. C. ROBINSON, «Analytical-experimental Comparison of 150 and 220 Grain per Foot Linear Shaped Charge Performance Parameters», Proc. 10nd Int. Symp. on Ballistics, Vol. 2, San Diego, Ca, October, 1987
 - [116] L. A. BEHRMANN, «Calculation of Shaped Charge Jets using Engineering Aproximations and Finite Difference Computer Codes», AFATL-TR-72-160, September, 1973