

0. OSNOVI KONSTRUISANJA SISTEMA NAORUŽANJA

0.0 Taktičko-tehnički zahtevi za sisteme naoružanja

Razvoju novog sistema naoružanja prethodi razrada taktičko-tehničkih zahteva koje bi pri projektovanju konstruktori trebalo da ispune. Od mogućnosti ispunjavanja ovih zahteva zavisi da li će osnovne karakteristike projektovanih sistema odgovarati uslovima savremenih dejstava. Taktičko-tehnički zahtevi (TTZ) se koriste i za uporednu ocenu postojećih sistema naoružanja koji se nalaze u upotrebi. U njima su definisani borbeni zahtevi, zahtevi posluživanja i proizvodno-ekonomski zahtevi.

0.1 Borbeni zahtevi

Borbeni zahtevi su najvažniji i oni obuhvataju:

- a) borbenu moć sistema pod kojom se podrazumeva: dejstvo projektila na cilju, maksimalni domet, preciznost i tačnost gađanja, i brzina gađanja;
- b) manevar, pod kojim se podrazumeva pokretljivost sistema, i manevar vatrom i manevar putanjom , i
- c) izdržljivost oruđa.

0.1.1 Dejstvo projektila na cilju

Za dejstvo protiv različitih ciljeva koriste se različite vrste projektila. Dejstvo svih vrsta projektila određuje se parametrima koji karakterišu njegov stvarni učinak na cilju. Na primer, dejstvo projektila na oklop određuje se debljinom probijanja oklopa. Rušeće dejstvo projektila meri se prečnikom kratera, koji se obrazuje u zemlji pri eksploziji projektila. Parčadno dejstvo projektila zavisi od broja ubojne parčadi koja se razleće do određenih udaljenosti od mesta rasprskavanja projektila.

Polazeći od neophodnog dejstva projektila na cilju, određuje se kalibar i vrsta sistema, vrsta i početna brzina projektila.

0.1.2 Maksimalni domet

Maksimalni domet je maksimalna horizontalna daljina gađanja iz datog sistema. Za svaku vrstu sistema zahtev u pogledu maksimalnog dometa određuje se u zavisno od zadatka koje bi dati sistem trebalo da obavi. Kod nekih sistema, kao na primer protivoklopnih sa kinetičkim projektilima, maksimalni domet se ne koristi u punoj meri. Za te sisteme je najvažnije da imaju velike početne brzine projektila kako bi što uspešnije onesposobljavali oklopne ciljeve neposrednim gađanjem.

0.1.3 Preciznost i tačnost gađanja

Preciznost gađanja je osobina sistema da obezbedi grupisanje slike pogodaka na što manjoj površini. Ukoliko je slika pogodaka manja, preciznost sistema je veća, i obrnuto. Sa većom preciznošću se brže i sa manjim utroškom municije izvršava vatreni zadatak.

Pod tačnošću gađanja se podrazumeva udaljenost srednjeg pogotka slike rasturanja od nišanske tačke, odnosno od centra cilja.

0.1.4 Brzina gađanja

Brzina gađanja je jedna od važnih karakteristika na osnovu koje se ocenjuje efikasnost sistema.

Naročitu važnost brzina gađanja ima pri gađanju oklopnih ciljeva. Ukoliko je veća brzina gađanja, utoliko je veća, pri ostalim istim uslovima, verovatnoća pogađanja svih oklopnih ciljeva (tenkova). Velika važnost brzina gađanja ima i pri gađanju ciljeva koji se za vreme gađanja mogu za nrmko vreme skloniti u zaklone (rovove, skloništa, i sl.) ili udaljavati iz zone vatreneog dejstva oruđa.

0.1.5 Pokretljivost

Pokretljivost se određuje srednjom brzinom kretanja sistema po različitim putevima i van puteva, a takođe i vremenom potrebnim da se sistem prevede iz marševskog u borbeni položaj, i obrnuto. Osim toga, pokretljivost sistema određuje se i mogućnošću da se sistem transportuje na veće udaljenosti železnicom, vodenim i vazdušnim putem.

Manevar vatrom je osobina sistema naoružanja da brzo prenosi vatru sa jednog cilja na drugi, odnosno da gađa u različitim pravcima, na različitim daljinama i sa različitim padnim uglovima projektila na cilju. Manevar vatrom zavisi od horizontalnog polja dejstva, maksimalne elevacije cevi, maksimalnog dometa, i dr. Ukoliko je manevar bolji utoliko je lakše susrediti vatru većeg broja sistema na bilo koji cilj i izvršiti vatreni zadatak za kraće vreme.

Manevar putanjama bez promene vatrenog položaja je direktno zavisen od maksimalnog dometa sistema i veoma je važan za maskiranje sistema i iznenađno otvaranje vatre.

0.1.6 Izdržljivost sistema

Izdržljivost sistema je njegova osobina da sačuva što je moguće duže svoje borbene osobine u različitim uslovima njegove eksploatacije u mirnodopskim i ratnim uslovima. Visoka izdržljivost sistema obezbeđuje se otpornošću i kvalitetom izrade njegovih delova i mehanizama, prilagođavanjem uslovima borbene situacije i racionalnom konstrukcijom.

0.2 Zahtevi posluživanja

Zahtevi posluživanja ogledaju se u sledećem: bezotkaznom radu svih mehanizama sistema, bezopasnom rukovanju sistemom i jednostavnom i lakom posluživanju. Ispunjenje ovih zahteva omogućava posluži sistema da bez većih fizičkih napora izvrši borbene zadatke.

0.3 Proizvodno-ekonomski zahtevi

Ovi zahtevi imaju za cilj da obezbede masovnu i brzu proizvodnju, a i brz remont sistema naoružanja. Najvažniji proizvodno-ekonomski zahtevi su:

- jednostavna konstrukcija i visoko produktivna tehnologija proizvodnje,
- uzajamna zamenljivost i standardizacija što većeg broja delova, što omogućava da se u novi sistem ugrađuju već osvojeni delovi, mehanizmi i agregati,
- korišćenje za proizvodnju domaćih materijala.

Za smanjenje troškova oko održavanja i remonta veoma je važno kako radi ljudstvo koje rukuje sistemom. Pažljivim rukovanjem i strogim pridržavanjem propisa o održavanju znatno se produžava vek upotrebe i smanjuju rashodi remonta i tehničkog održavanja sistema naoružanja.

1. UNUTRAŠNJA BALISTIKA

1.1 UVOD U UNUTRAŠNJU BALISTIKU

Unutrašnja balistika je nauka koja se bavi izučavanjem pojava i procesa koji se odigravaju u toku procesa opaljenja u oruđu ili oružju.

Opaljenje iz oruđa je složeni termodinamički i gasodinamički proces brzog, skoro trenutnog, pretvaranja hemijske energije baruta prvo u toplotnu, a zatim u kinetičku energiju barutnih gasova, koji pokreću projektil, cev i lafet oruđa. Opaljenje traje nekoliko milisekundi (ms) do nekoliko desetina ms i pri tome se postižu maksimalni pritisci barutnih gasova od 500 do 5000 bara. U toku procesa opaljenja temperatura barutnih gasova u trenutku njihovog formiranja postiže vrednosti od $2300 \div 3800$ K do $1500 \div 2000$ K u trenutku kada oni napuštaju usta cevi oruđa. Brzina projektila na ustima cevi oruđa iznosi od 70 do 1800 m/s, a ubrzanja su reda i do 60000 g.

Osnovni zadaci unutrašnje balistike kao nauke su:

- izučavanje i analiza uslova i faktora od kojih zavisi proces opaljenja iz oruđa i oružja,
- ustanovljavanje opštih i posebnih teorijskih i eksperimentalnih zavisnosti koje karakterišu opaljenje iz oruđa i oružja,
- razrada metoda rešavanja zadataka koji se javljaju pri izučavanju procesa opaljenja,
- usavršavanje unutrašnje balistike kao nauke koja pruža naučne i tehničke osnove za usavršavanje sistema naoružanja.

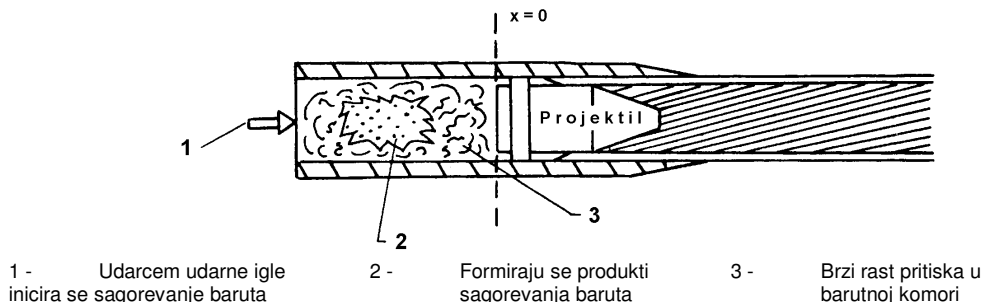
Pri opaljenju se razlikuju sledeći **osnovni procesi**:

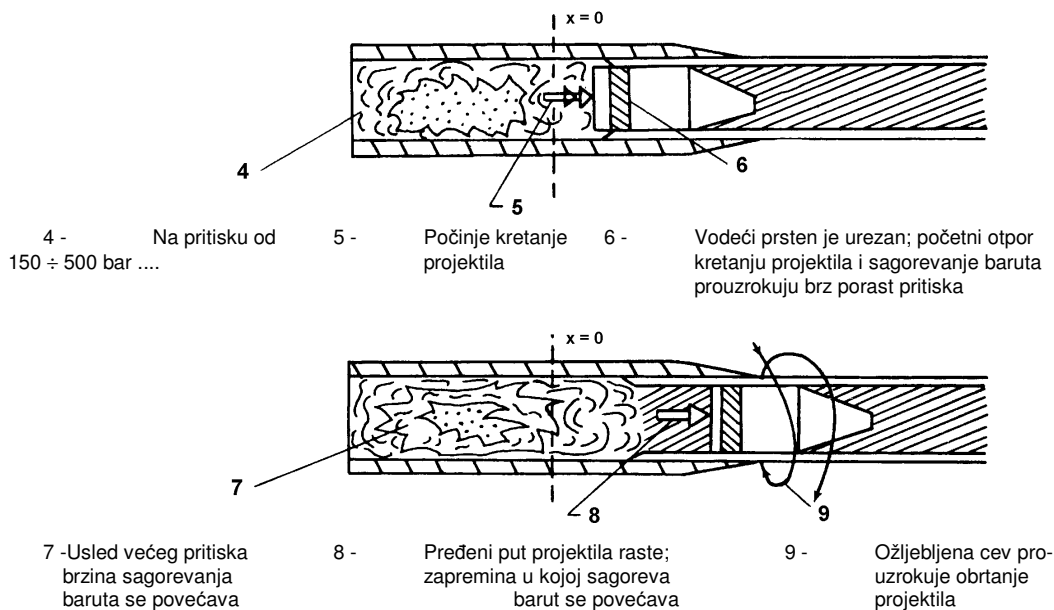
- sagorevanje baruta i formiranje produkata sagorevanja (gasova) zagrejanih do visoke temperature koji sadrže veliku količinu unutrašnje energije; brzina sagorevanja baruta pri tome zavisi od prirode i temperature baruta i od pritiska gasova,
- pretvaranje toplotne energije barutnih gasova u kinetičku energiju kretanja sistema (barutni gasovi - projektil - cev - lafet).

Svi ovi procesi su međusobno povezani i teku istovremeno. Bez obzira na izuzetnu intenzivnost procesa koji se odigravaju pri opaljenju iz cevi oruđa, oni teku po određenim zakonitostima. U određenim granicama se njima može upravljati i pri istim uslovima punjenja održavati na relativno stabilnom nivou od opaljenja do opaljenja. Ta osobina procesa opaljenja neposredno zavisi od svojstva baruta da gore po zakonu paralelnih slojeva sa relativno malim brzinama što omogućava upravljanje procesom opaljenja, tj. Obezbeđenje formiranja gasova pri sagorevanju baruta u kanalu cevi koje omogućava razvijanje potrebnog toka pritiska i brzine projektila na ustima cevi oruđa.

1.2 PROCES OPALJENJA

Proces opaljenja šematski je prikazan na slici 1.1.





Slika 1.1 Šematski prikaz procesa opaljenja

Posle pripaljivanja barutnog punjenja, formiraju se produkti sagorevanja (barutni gasovi) na površini sagorevanja svakog barutnog zrna (ovde je predpostavljeno da su sva zrna pripaljena istovremeno i uniformno; u praksi to se nikad ne realizuje te se intenzivno izučava proces pripaljivanja i prostiranja plamena kroz barutno punjenje). Dolazi do brzog porasta pritiska u barutnoj komori. Početni otpor kretanju projektila je relativno velik (posebno ako se stabilizacija projektila obavlja rotacijom), te se postižu relativno veliki pritisci u komori i cevi oruđa pre nego što projektil pređe znatni deo puta kroz cev oruđa.

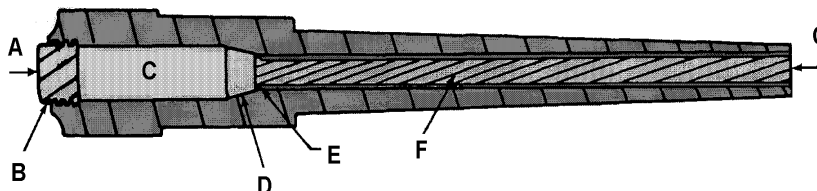
Kretanje projektila kroz cev oruđa prouzrokuje povećanje zapremine u kojoj barut sagoreva. To bi izazivalo pad pritiska barutnih gasova u sistemu. Međutim, s druge strane početni brzi porast pritiska barutnih gasova prouzrokuje brže formiranje barutnih gasova (veća brzina sagorevanja baruta). Rezultat ova dva procesa je brzi porast pritiska barutnih gasova do postizanja maksimalne vrednosti. Maksimalni pritisak se postiže u momentu kada se izjednači brzina obrazovanja gasova usled sagorevanja baruta sa brzinom porasta zapremine, u kojoj se nalaze gasovi, usled kretanja projektila. Posle postizanja maksimalnog pritiska, pritisak počinje da opada tako da je na ustima cevi reda od 10 do 30 % od maksimalnog pritiska. Pritisak na ustima cevi zavisi od konstrukcije sistema oruđa, kao i od tipa i količine baruta u barutnom punjenju. Pošto projektil izađe iz cevi oruđa pritisak barutnih gasova vrši njegovo ubrzavanje na kratkom rastojanju od usta cevi oruđa.

1.3 OSNOVNI UNUTRAŠNJE BALISTIČKI SISTEMI I NJIHOVI ELEMENTI

Osnovna podela klasičnih sistema sa unutrašnjebalističkog stanovišta je:

- sistemi sa zatvorenom cevi,
- bestrzajni sistemi.

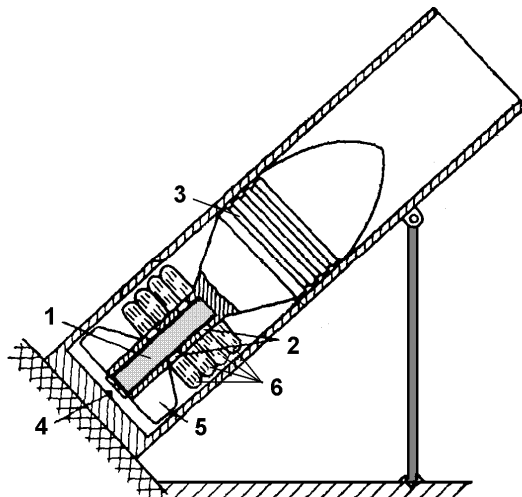
Kod sistema sa zatvorenom cevi kroz unutrašnjebalistički proces se pored pogona projektilu saopštava i određena količina kretanja samom oruđu. Trzanje koje se tom prilikom javlja prigušuje se protivtrzaјуćim sistemom. Cev ovakvog sistema je prikazana na slici 1.2.



Slika 1.2 Cev oruđa i njeni osnovni elementi (A - zadnjak, B - zatvarač, C - barutna komora, D - prelazni konus, E - početak žljebljenja, F - ožljebljena cev, G - usta cevi)

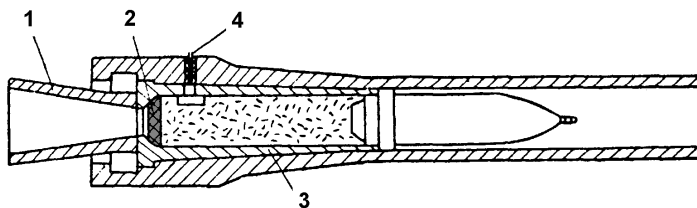
Cev oruđa je cev zatvorena na jednom kraju pre pripaljivanja baruta, a otvara se radi stavljanja projektila i barutnog punjenja. U cevi se obavlja proces opaljenja. Zadnjak služi da se u njega postavi zatvarač sa raznim mehanizmima, da poveže cev sa elementima hidroelastičnog sistema, a vrlo često i da omogući klizanje trzajućeg sklopa po kolevcima, kao i sprečavanje rotacije cevi. Zatvarač predstavlja dno cevi koje je pri punjenju oruđa otvoreno, nakon čega se zatvara. Ispred zatvarača nalazi se barutna komora u koju se smešta barutno punjenje pre opaljenja. Prednji kraj komore se sužava na prečnik cevi preko prelaznog konusa. Kod sistema gde se projektil stabilizuje rotacijom cev je izlježbljena, a izlazni presek cevi se naziva "usta" cevi. Vodište projektila je prednji deo cevi po kojem se kreće projektil.

U sisteme sa zatvorenim dnom cevi spadaju i minobacači (slika 1.3), koji imaju glatku cev, a za stabilisanje minobacačkih projektila koriste se stabilizatori sa krilcima.



Slika 1.3 Minobacač (1 - osnovno barutno punjenje, 2 - otvori na stabilizatoru, 3 - mina, 4 - udarna igla, 5 - krilca, 6 - dopunska barutna punjenja)

Šematski prikaz bestrzajnog sistema dat je na slici 1.4.



Slika 1.4 Bestrzajni sistem sa centralnim mlaznikom (1 - mlaznik, 2 - rasprskavajući disk, 3 - čaura, 4 - pripala)

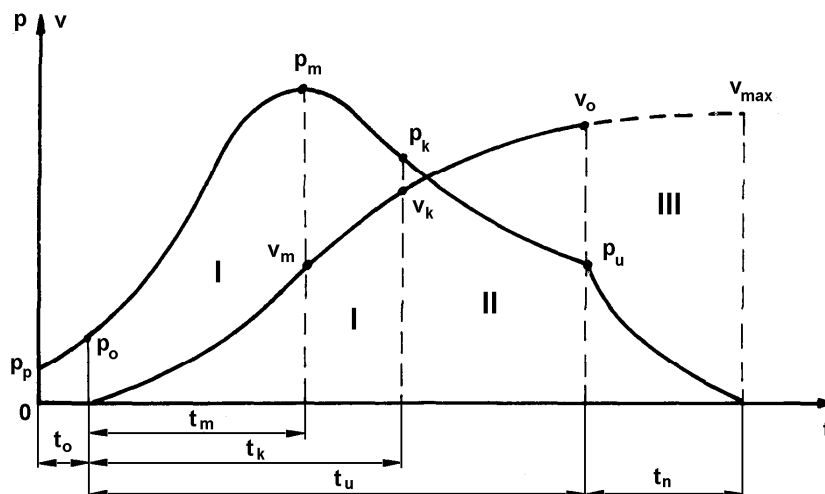
Bestrzajnost ovih sistema se ostvaruje usled reaktivne sile koja nastaje pri isticanju dela barutnih gasova kroz mlaznik u stranu suprotnu kretanju projektila. Time se teži svođenju rezultante spoljnih sila koje deluju na sistem na nulu.

1.4 OSNOVNE OSOBENOSTI PROCESA OPALJENJA

U procesu opaljenja kod sistema sa zatvorenom cevi razlikuju se sledeći periodi:

- prethodni - od početka sagorevanja baruta do početka kretanja projektila,
- prvi ili osnovni - od početka kretanja projektila do završetka sagorevanja barutnog punjenja,
- drugi - od završetka sagorevanja barutnog punjenja do napuštanja projektila cevi oruđa,
- treći - period naknadnog dejstva gasova na projektil posle njegovog napuštanja cevi oruđa.

Razmotrimo detaljnije osnovne periode procesa opaljenja iz sistema sa zatvorenom cevi (slika 1.2). Krive promene pritiska barutnih gasova p i brzine projektila v u funkciji vremena t i pređenog puta projektila l date su na slikama 1.5 i 1.6.

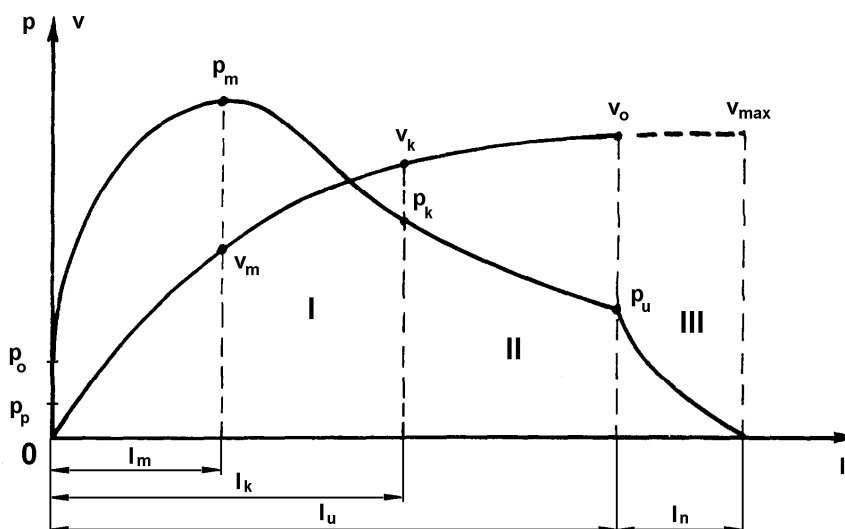


Slika 1.5 Krive promene pritiska barutnih gasova i brzine projektila u funkciji vremena

Udarom igle u dno topovske kapsle pali se inicijalna kapsla koja je laborisana inicijalnom smešom. Ova smeša pripaljuje pripalu od crnog baruta, koji se nalazi u samom telu topovske kapsle ili odvojeno u posebnoj kesici. Sagorevanjem crnog baruta u barutnoj komori stvaraju se topli gasovi, zajedno sa čvrstim užarenim česticama. Gasovi pripale proizvode pritisak u komori reda 20÷50 bar i zagrevaju barut punjenja do temperature pripaljivanja. Taj pritisak se naziva pritisak pripaljivanja (označen je sa p_p).

Pod uticajem gasova pripale dolazi do pripaljivanja baruta u komori i njegovog sagorevanja u stalnoj zapremini do postizanja pritiska p_o koji obezbeđuje urezivanje vodećeg prstena u žljebove kanala oruđa. Pritisak p_o se naziva pritisakom forsiranja. Taj deo procesa opaljenja naziva se prethodni period.

Veličina pritiska p_o je reda od 150 do 500 bara i zavisi od konstrukcije vodećeg prstena i žljebljenja cevi oruđa. Na slici 1.5 prethodnom periodu odgovara deo krive $p_p - p_o$ i vremenski interval t_o , a na slici 1.6 period je predstavljen odsečkom Op_o na ordinatnoj osi.



Slika 1.6 Krive pritiska barutnih gasova i brzine projektila u funkciji pređenog puta projektila

Posle prethodnog perioda sledi prvi ili osnovni period procesa opaljenja, koji se karakteriše sagorevanjem baruta u stalno rastućoj zapremini kanala cevi. Pri tome brzina projektila raste, a barutni gasovi vrše rad i hlade se. U početku prvog perioda, kada je brzina projektila još mala, zapremina formiranih barutnih gasova raste brže od zapremine prostora iza projektila u kome se odvija sagorevanje. Kao rezultat

toga pritisak barutnih gasova brzo raste i dostiže maksimum p_m . Projektil je u tom trenutku prešao put l_m , kome odgovara vreme t_m mereno od početka kretanja projektila. Pritisak p_m je jedna od najvažnijih karakteristika svakog oruđa. Posle dostizanja p_m , pritisak, bez obzira na sagorevanje baruta i formiranje novih produkata sagorevanja, počinje da pada i dostiže veličinu p_k u trenutku potpunog sagorevanja baruta. Tom pritisku odgovara pređeni put projektila l_k , vreme t_k i brzina projektila v_k .

Posle završetka sagorevanja baruta, barutni gasovi raspolažu još uvek velikom količinom energije. Deo te energije oni kroz svoje širenje saopštavaju projektilu i vrše povećavanje njegove brzine. Ovaj period se naziva drugim periodom procesa opaljenja i fizički predstavlja proces širenja određene količine gasova visokog pritiska i temperature. Pošto je u trenutku kraja sagorevanja baruta brzina projektila već velika i dalje se uvećava, to projektil deo puta do usta cevi pređe vrlo brzo i zbog toga se mogu zanemariti gubici toplote kroz zidove cevi i ceo taj period se može smatrati periodom adijabatskog širenja barutnih gasova. Ovaj period se završava u trenutku kada dno projektila prolazi kroz usta cevi oruđa. U drugom periodu procesa opaljenja pritisak barutnih gasova pada od pritiska p_k do pritiska p_u , a brzina projektila raste od v_k do v_u (videti slike 1.5 i 1.6).

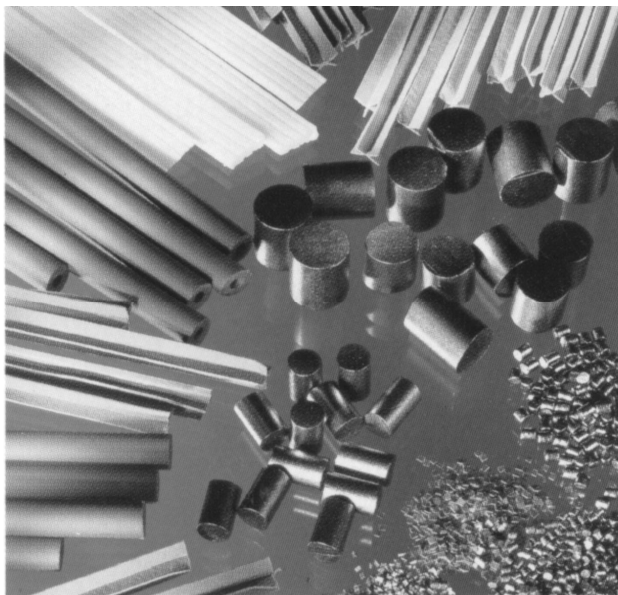
Kada projektil napusti cev oruđa, barutni gasovi koji ističu sa velikom brzinom iz cevi oruđa, produžuju na nekom rastojanju od usta cevi l_n da deluju na dno projektila i ubrzavaju ga. Zbog toga projektil ima maksimalnu brzinu v_{max} ne u trenutku prolaska projektila kroz usta cevi oruđa, već na rastojanju l_n od njih, posle čega usled dejstva sile otpora vazduha brzina projektila počinje da opada. Period procesa opaljenja, u toku koga projektil dobija maksimalnu brzinu v_{max} , naziva se trećim periodom ili periodom naknadnog dejstva barutnih gasova na projektil.

Ovako opisan proces opaljenja odgovara opaljenju iz cevi artiljerijskog i streljačkog oružja. Kod bestrzajnih oruđa (slika 1.4) manji deo barutnih gasova deluje na dno projektila i saopštava mu brzinu, a veći deo gasova ističe velikom brzinom kroz mlaznik u suprotnom smeru od smera kretanja projektila i vrši uravnoteženje cevi bestrzajnog oruđa. Osnovna karakteristika ovih oružja je ta što kod njih za isti kalibar, masu i početnu brzinu projektila, masa barutnog punjenja je veća 2.5 do 3 puta nego kod klasičnog oružja sa zatvorenom cevi.

2. BARUT

2.1 OSNOVNI ZAHTEVI I SASTAV

Baruti (slika 2.1) su eksplozivne materije kod kojih se prostiranje hemijskog razlaganja obezbeđuje na bazi toplotne provodljivosti. Razlaganje baruta tj. sagorevanje se odvija brzinama od nekoliko mm/s do nekoliko desetina cm/s. Pri ovakvim brzinama sagorevanja moguće je iskorišćenje gasovitih produkata sagorevanja za pokretanje projektila u cevi oruđa.



Slika 2.1 Baruti

Osnovni zahtev koji korisnici postavljaju proizvođačima baruta je da se sa što manjom količinom baruta postigne što veća brzina projektila, a da se pri tome ne prekorači maksimalni dozvoljeni pritisak barutnih gasova, koji može da izdrži cev dotičnog oruđa. Osnovni, ne manje važni zahtevi, koji moraju uspešno da se reše pre usvajanja baruta u sistem naoružanja su:

- da produkti sagorevanja baruta imaju što manje erozivno dejstvo na cev oruđa,
- da se barut lako i brzo pripaljuje na svim temperaturama eksploatacije (od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- određene granice osetljivosti na mehaničke i toplotne impulse, što obezbeđuje pouzdanu funkciju i rukovanje sa njima,
- fizička i hemijska stabilnost tj. sposobnost da pri dugotrajnom čuvanju u različitim uslovima ne menja svoja fizičko-hemijska, a time ni balistička svojstva,
- da zadržava mehaničke karakteristike pri svim temperaturama eksploatacije,
- da ima što je moguće manji temperaturni koeficijent, odnosno da pri svim temperaturama eksploatacije ima što manju promenu brzine sagorevanja,
- da pri opaljenju iz oruđa daje što manje plamena i dima na ustima cevi,
- da je što manje higroskopan,
- da se obezbedi široka sirovinaska baza i to što jednostavnija i ekono-mičnija.

Sve barute delimo na:

- homogene - nastale želatinizacijom molekula nitroceluloze dejstvom organskih rastvarača ili želatinizatora,
- kompozitne - nastale mešanjem kristala mineralnih jedinjenja bogatih kiseonikom i veziva koje je organskog porekla, a istovremeno i nosilac gorivih materija.

U zavisnosti od broja osnovnih aktivnih eksplozivnih sastojaka barutne mase (i njihovog učešća preko 10%) uobičajena je podela homogenih baruta na jednobazne, dvobazne i trobazne. Jednobazni baruti

izrađeni su od nitroceluloze ili mešavine visokonitrovane celuloze (sadržaj azota od 13.00 do 13.55%) i niskonitrovane nitroceluloze (sadržaj azota od 12.00 do 12.65%). Dvobazni baruti su izrađeni od nitroceluloze i tečnog organskog nitrata koji istovremeno služi kao želatinizator. Najčešće se koriste nitroglicerini i dinitrodiglikol u količinama od 12 do 45 %. Trobazni baruti u svom sastavu sadrže tri aktivne eksplozivne komponente: nitrocelulozu (16 do 43.5 %), nitroguanidin (30 do 55%) i nitroglicerini, odnosno dinitrodiglikol (16 do 43.5 %).

Pored ovih aktivnih eksplozivnih supstanci u sastav baruta ulaze i druge komponente.

Stabilizatori. Osnovni sastojci baruta, nitroceluloza, nitroglicerini itd. nisu stabilni na običnoj temperaturi, već se polako raspadaju. Njihova reakcija razlaganja je egzotermna. Pri hemijskom razlaganju estara azotne kiseline razvijaju se azotni oksidi, pri čemu azotmonoksid prelazi u azot dioksid u prisustvu vazduha. Stvaranje NO_2 ubrzava proces denitracije, jer je on autokatalizator svoga stvaranja.

Lagana dekompozicija estara azotne kiseline dovodi do toga da barut ima svoj određeni "život", posle koga njegova fizičko-hemijska svojstva i balističke karakteristike nisu identične onima koje je barut imao u momentu izrade. Da bi se ovo sprečilo u sastav barutne mase se dodaju stabilizatori, koji treba da produže vek upotrebe baruta. Stabilizatori apsorbuju nitrozne gasove. Najpoznatiji stabilizatori su: centralit I i difenilamin.

Plastifikatori su hemijska jedinjenja koja prodiru u molekul polimera i smanjuju međusobno trenje makromolekularnih lanaca. Upotreba plastifikatora omogućuje lakšu i bezbedniju izradu baruta i poboljšava njihove mehaničke osobine, jer ih čini plastičnijim i manje krutim. Kao plastifikatori se najčešće upotrebljavaju dibutilftalat, dietilftalat i triacetin.

Flegmatizatori su energetski neaktivne supstance (centralit, kamfor, difenilamin) kojima se na kraju procesa proizvodnje baruta obogaćuje površina barutnih zrnaca (obično sitnih nitroceluloznih), kako bi se smanjila brzina sagorevanja površinskih slojeva i na taj način postigla hemijska progresivnost baruta.

Sredstva za smanjenje temperature sagorevanja. Radi smanjenja erozije cevi oruđa, pored zamene nitroglicerina dinitrodiglikolom, kao i dodatka nitroguanidina, dodaju se dinitrotoluol i centraliti.

Sredstva protiv bljeska. Sredstva za smanjenje bljeska su razne kalijumove soli, koje se dodaju u barutnu masu ili se u posebnim kesicama stavljaju u barutno punjenje.

2.2 BARUTNO PUNJENJE

Barutno punjenje predstavlja tačno određenu količinu baruta, definisanog sastava, fizičko-hemijskih i balističkih osobina, određenog oblika i dimenzija.

Masa barutnog punjenja određenog sastava, oblika i dimenzija baruta određuje se za svaku seriju baruta. Tako se određivanjem mase punjenja za svaku seriju baruta obezbeđuje pri malim promenama fizičko-hemijskih i balističkih karakteristika barut daje tabličnu početnu brzinu projektila, pri čemu maksimalni pritisak barutnih gasova ne prelazi dozvoljenu vrednost.

a) podela barutnih punjenja.

Pod stalnim barutnim punjenjem podrazumeva se određena količina baruta čija se masa u upotrebi pre gađanja ne može menjati. Ova vrsta punjenja se primenjuje kod svih sjedinjenih metaka, a kod polusjedinjenih i dvodelnih samo za neke vrste projektila, kao što su pancirni i kumulativni. Kod većine sjedinjenih metaka barutno punjenje je slobodno nasuto u čauru, a kod sjedinjenih metaka srednjih i većih kalibara barut se stavlja i u svilene kese, ako su zrna oblika kratke cevčice. Da ne bi prilikom transporta municije došlo do pomeranja barutnih zrna, barutna punjenja se fiksiraju pomoću kartonskih elemenata.

Pod promenljivim barutnim punjenjem podrazumeva se određena količina baruta laborisana u više kesa, iste ili različite mase. Ova vrsta punjenja se primenjuje kod polusjedinjenih i dvodelnih metaka. Upotrebom jedne ili više kesa istog barutnog punjenja moguće je, u zavisnosti od broja upotrebljenih kesa, odnosno od količine baruta, dobiti različite početne brzine projektila.

Kod promenljivih punjenja razlikujemo:

- osnovno punjenje, smešteno neposredno do kapsle; osnovno punjenje daje najmanju početnu brzinu,

- delimično punjenje, smešteno iznad osnovnog punjenja; masa baruta delimičnog punjenja može biti ista ili promenljiva; ako je ista ne označava se brojevima, a ako je promenljiva označava se brojevima (delimična punjenja nose brojeve 1,2 i dalje, a osnovno punjenje najveći broj).

Za izradu barutnih punjenja koriste se baruti različitog oblika barutnih zrna. Najčešće su u obliku: pločice, trake, cevčice (sa različitim brojem kanala) i kuglice. Punjenja izrađena od barutnih zrna u obliku trake i dugačke cevčice mogu biti izrađena u obliku snopova, kod kojih su barutna zrna povezana svilenim koncem.

Osim baruta u barutno punjenje spadaju i pripale, sredstva za sprečavanje bljeska, sredstva za debakarisanje cevi, kartonski poklopci i distanceri i flegmatizatori.

b) pripala

Pripala je određena masa obično crnog baruta koja se nalazi između kapsle i barutnog punjenja ili između snopova barutnog punjenja i ima zadatak da obezbedi što jednovremenije pripaljivanje svih barutnih zrna u punjenju. Oblik i veličina pripale zavise od mase baruta i konstrukcije barutnog punjenja. Masa pripale je oko 1 do 3% od mase barutnog punjenja i smeštena je u posebnu kesicu.

c) sredstva za sprečavanje bljeska

Prilikom opaljenja po izlasku projektila iz cevi, topli barutni gasovi izlaze iz cevi velikom brzinom pri čemu dolazi do njihovog mešanja sa vazduhom i dogorevanja. U slučaju kada nastaje samo mešanje toplih barutnih gasova sa vazduhom pojava se manifestuje plamenom svetlocrvenkaste boje, koji traje kratko i vidljiv je na odstojanju 200 do 300 m od oružja. Kada u produktima sagorevanja ima veća količina nepotpuno sagorelih produkata sagorevanja kao što je ugljenmonoksid, pri mešanju sa kiseonikom iz vazduha dolazi do trenutnog sagorevanja praćenog intenzivnom svetlošću i udarnim talasom pritiska. Ova pojava se naziva bljesak.

Sprečavanje pojave bljeska ispred usta cevi može se postići na više načina:

- promenom hemijskog sastava produkata sagorevanja baruta - dodavanjem barutnoj masi pri izradi materija bogatih kiseonikom; ovo ima negativnu posledicu, jer dovodi do povišavanja temperature sagorevanja baruta, što smanjuje "život" cevi,

- snižavanjem temperature produkata sagorevanja baruta na ustima cevi ispod tačke zapaljivosti smeše ovih gasova sa vazduhom; ovo se postiže dodavanjem barutnoj masi raznih organskih materija: vazelina, smola, dibutilftalata i dinitrotoluola,

- povišavanjem tačke zapaljivosti produkata sagorevanja sa vazduhom; ovo se postiže dodavanjem barutnoj masi ili barutnom punjenju soli alkalnih metala, prvenstveno kalijuma; ove soli troše jedan deo toplote za svoje sagorevanje, sagorevaju duže od baruta i u momentu izlaska projektila iz cevi pri svom sagorevanju snižavaju temperaturu produktima sagorevanja baruta; nedostatak ovog načina smanjenja bljeska je povećana pojava dima, koja može dovesti do otkrivanja vatrenih položaja oruđa; najčešće se upotrebljavaju kalijumsulfat i kalijumjodid, i to tako da se u posebnim kesicama dodaju barutnom punjenju. Masa ovih sredstava u jednom barutnom punjenju je od 1 do 3% od ukupne mase baruta.

d) sredstva protiv bakaranja cevi

Bakarisanje cevi je pojava koja nastaje pri kretanju projektila sa vodećim prstenom od bakra kroz cev. Pri ovom kretanju, usled sile trenja između zidova cevi i bakarnog vodećeg prstena, dolazi do skidanja bakra sa vodećeg prstena, topljenja usled visoke temperature produkata sagorevanja i delimičnog nanošenja na zidove cevi. Debljina sloja bakra na zidovima cevi je različita, od 0.2 do 0.4 mm, što zavisi od kalibra oružja i od barutnog punjenja. Kod oruđa sa većim radnim pritiskom barutnih gasova i većom početnom brzinom projektila nanošenje bakra na zidove cevi je veće. Nataloženi bakar smanjuje prečnik cevi, povećava naprezanje cevi i vodećeg prstena i izaziva ubranu koroziju cevi, jer u prisustvu vlage pojavljuje se galvanska struja koja razara površinu cevi.

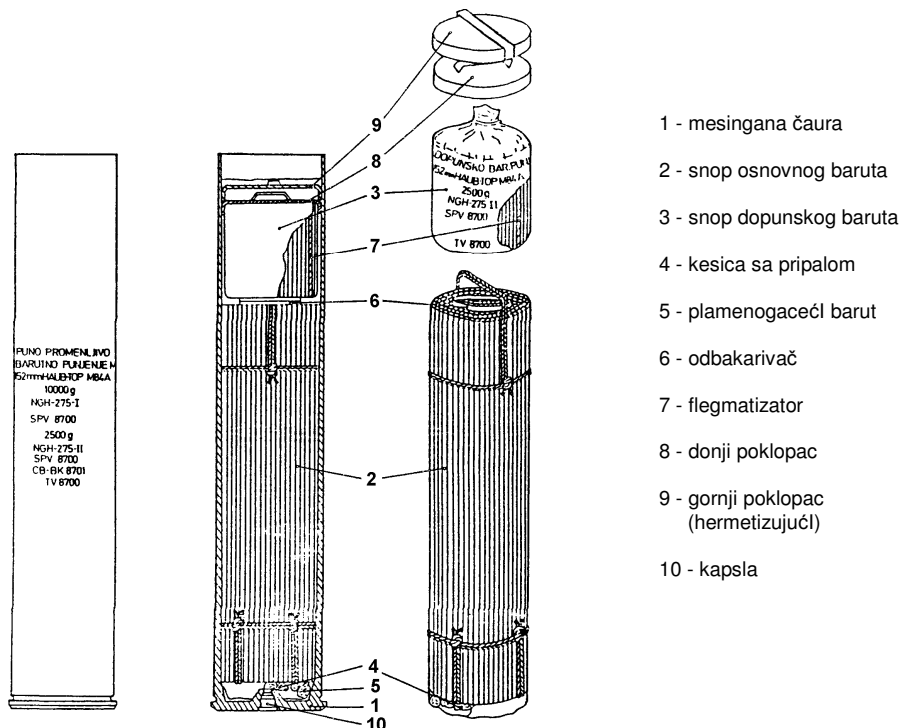
Da bi se sprečilo taloženje bakra na zidove cevi u barutno punjenje se stavlja sredstvo protiv bakaranja tzv. legura za debakarisanje. Za ovo se upotrebljava kalajno-olovna legura od 60% kalaja i 40% olova. Debakarišuće dejstvo ove legure sastoji se u tome što se ona topi na 187 °C i u toku unutrašnjebalističkog procesa obrazuje sa bakrom kalajno-bakarnu i olovno-bakarnu leguru, koja iz cevi oružja izlazi zajedno sa barutnim gasovima.

Sredstva protiv bakaranja cevi se upotrebljavaju u vidu tankih pločica ili u vidu žice debljine oko 2 mm. Masa ovog sredstva iznosi oko 1% od ukupne mase barutnog punjenja.

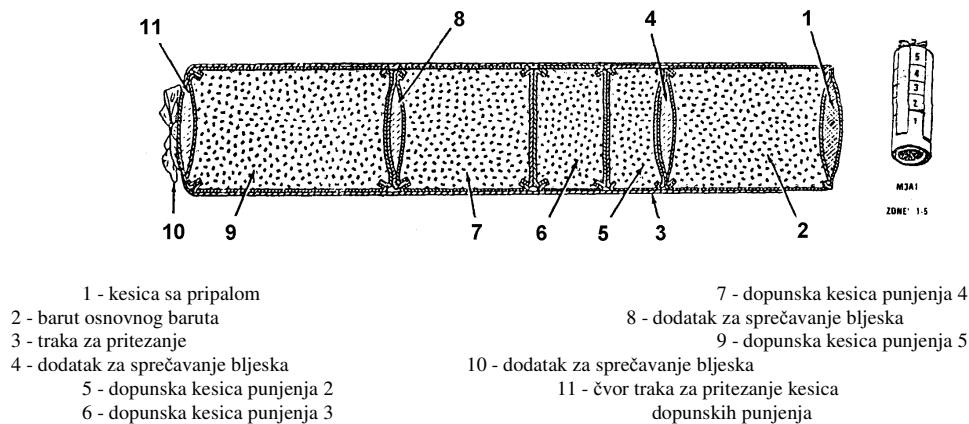
e) flegmatizatori

Kod oruđa sa velikim radnim pritiskom i velikom početnom brzinom, radi smanjenja brzog trošenja cevi, barutnom punjenju se dodaju flegmatizatori. To su lako topljive čvrste masti ili voštane materije, često kombinovane sa metalnim aditivima (titandioksid), koje se pod dejstvom vrelih barutnih gasova naglo tope i u tankom sloju nanose po unutrašnjoj površini cevi. Na taj način sprečavaju neposredno dejstvo barutnih gasova na cev, prvenstveno smanjuju količinu prenete toplote sa barutnih gasova na zidove cevi, a ujedno smanjuju trenje između zidova cevi i vodećeg i centrirajućeg prstena projektila. Ova sredstva se rade od više listova papira natopljenih slojevima flegmatizatora. Stavljaju se na unutrašnje zidove čaure, a kod nekih vrsta municije mogu biti i u kartonskom poklopcu iznad barutnog punjenja.

Na slikama 2.2 i 2.3 data su rešenja barutnih punjenja za sisteme kalibra 152 mm i 155 mm.



Slika 2.2 Puno promenljivo punjenje za sistem kalibra 152 mm



Slika 2.3 Barutno punjenje M3A1 za sistem kalibra 155 mm

Prednosti polusagorljive, odnosno sagorljive čaure, u odnosu na metalnu čauru, proističu iz osobina pogonsko-konstrukcionih materijala (PKM) od kojih su izrađene (slika 2.4). Potpuna sagorljivost PKM-a u cevi oruđa obezbeđuje veću brzinu gađanja artiljerijskih oruđa, dovoljno prostora i podnošljivu atmosferu u tenku za vreme borbenog dejstva, povećanje energije sistema, odnosno uštedu u barutu, kao rezultat oslobađanja energije pri sagorevanju materijala. Mehanička svojstva omogućavaju da polusagorljive i sagorljive čaure dobro podnose gruba rukovanja i potrese pri transportovanju. Relativno mala gustina PKM-a u odnosu na metalne materijale doprinosi smanjivanju ukupne mase municije i olakšava transport i rukovanje. Niža temperatura sagorevanja PKM-a od temperature sagorevanja baruta smanjuje eroziju cevi i doprinosi da je temperatura cevi pri brznoj paljbi daleko ispod one koja omogućuje samozapaljenje čaure.

Veliki broj postupaka i raznolikost sirovina za izradu pogonsko-konstrukcionih materijala govori o naporima da se dobije energetski aktivan materijal dobrih mehaničkih karakteristika koji će odgovarati kompleksnim zahtevima primene, odnosno materijal takvih osobina da potpuno sagori za vreme sagorevanja barutnog punjenja i da pri tome ne razvija korozivne ili toksične gasove, da je kompatibilan u kontaktu sa barutima, stabilan u prisustvu vlage i svetlosti, da ne akumulira statički elektricitet, da ima dobre mehaničke karakteristike kako bi izdržao naprezanja kojima su čaure obično izložene, da se može prilagoditi na različite oblike, odgovoriti različitim balističkim zahtevima variranjem odnosa konstituenata, da bude lak i da se može izrađivati od pristupačnih sirovina relativno jednostavnim tehnološkim postupcima.



Slika 2.4 Sagorljivi elementi barutnih punjenja izrađeni od pogonsko-konstrukcionih materijala

Pogonsko-konstrukcioni materijali su najčešće vlaknasti materijali impregnirani vezivnim sredstvom. Mogu sadržavati i niz aditiva, koji utiču na karakteristike krajnjeg proizvoda ili na proces njegove proizvodnje.

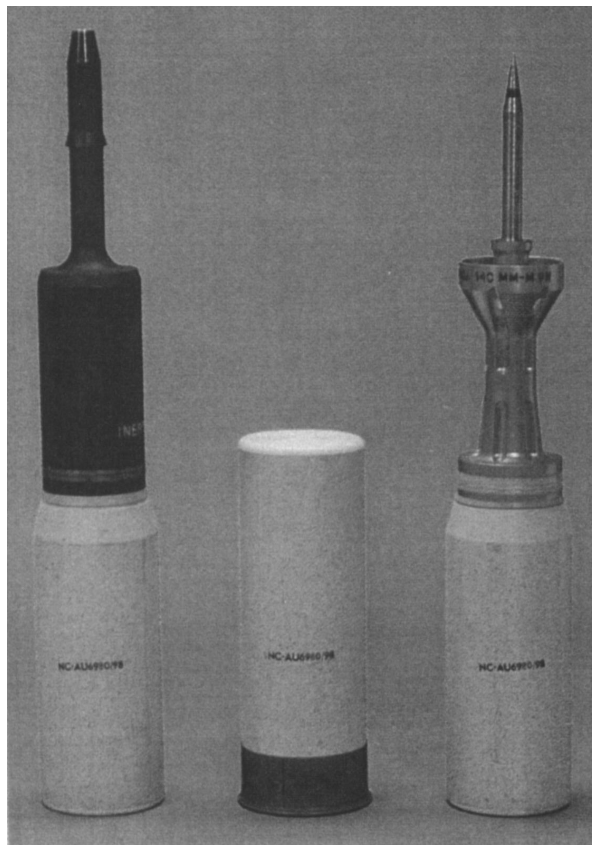
Na slici 2.5 prikazana su osnovna i dodatna punjenja za tenkovsku municiju kalibra 140 mm.

Prethodno formiranje nitrocelulozno-celuloznog (NC-C) lista određenih svojstava, primenom tehnologije proizvodnje papira predstavlja osnovu postupka izrade slojevitih PKM. Slojeviti PKM sa energetski aktivnim vezivom predstavlja vlaknasti materijal koji se dobija impregnacijom i međusobnim spajanjem NC-C listova određenih svojstava pomoću rastopa trinitrotoluen (TNT). Slojeviti PKM sa energetski aktivnim vezivom može se posmatrati kao dvokomponentni sistem, gde je NC-C list osnova laminata, a TNT energetski aktivno vezivo. Na krajnje osobine PKM-a (fizičko-mehaničke i gorivno-energetske) utiču osobine i lista i veziva. Međutim, kako je NC-C list osnova laminata, to je i uloga osobina NC-C lista u ostvarivanju potrebnih fizičko-mehaničkih karakteristika krajnjeg proizvoda dominantna.

2.4 FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE BARUTA

Glavne fizičko-hemijske karakteristike baruta su:

- hemijski sastav,
- sadržaj isparljivih materija,
- stepen nitracije,
- toplotna moć (toplota sagorevanja),
- zapremina barutnih gasova,
- temperatura sagorevanja,
- gustina baruta,
- gravimetrijska gustina baruta.



Slika 2.5 Osnovna i dodatna punjenja za tenkovsku municiju kaibra 140 mm

Hemijski sastav. Fizičko-hemijske karakteristike baruta uslovljene su hemijskim sastavom. O njemu je bilo reči ranije.

Sadržaj isparljivih materija. Isparljive materije u barutnoj masi čini u prvom redu vlaga. Ukoliko se u proizvodnji baruta radi sa isparljivim rastvaračem, onda i sadržaj isparljivog rastvarača spada u sadržaj isparljivih materija. Sadržaj isparljivih materija se kod nitroceluloznih (jednobaznih) baruta kreće od 2 do 7 %, a od toga je vlage oko 1.5 %. Sadržaj isparljivih materija u barutu utiče na brzinu sagorevanja baruta. Ukoliko je sadržaj veći brzina sagorevanja je manja.

Stepen nitracije. Nitroceluloza se može nitrovati u različitom stepenu. Step en nitracije izražava sadržaj azota u nitrocelulozi i pokazuje energetska sposobnost baruta.

Toplotna moć baruta. Količina toplote koja se oslobađa sagorevanjem 1 kg baruta naziva se toplotna moć baruta. Razlikuje se toplota sagorevanja pri stalnoj zapremini (Q_w) i pri stalnom pritisku (Q_p). Unutrašnja balistika radi sa toplotom sagorevanja pri stalnoj zapremini. Međutim, i ovde treba razlikovati dve toplote u zavisnosti od toga u kakvom stanju je voda. Jedna je kada se voda nalazi u parnom stanju, a druga je kada je voda u tečnom stanju. U oruđu pri opaljenju voda je u parnom stanju, a u kalorimetrskim bombama, gde se određuje količina toplote pri sagorevanju

baruta, voda je u tečnom stanju. Pored određivanja toplotne moći u kalorimetru, moguće ju je određivati i iz termohemijskog proračuna ili empirijskim obrascima.

Toplota sagorevanja Q_{wt} nitroceluloznih baruta kreće se od 2500 do 5250 kJ/kg. Odnos Q_{wt}/Q_{wp} je 1.12 (empirijski određeno).

Zapremina barutnih gasova. Zapremina barutnih gasova (ω_1) je ona zapremina koju bi zauzeli barutni gasovi oslobođeni sagorevanjem 1 kg baruta kada bi se ohladili na temperaturu od 0 °C i imali pritisak od 1.033 bar (760 mmHg). Zapremina barutnih gasova iznosi od 800 do 1000 dm³/kg.

Temperatura sagorevanja baruta. Temperatura sagorevanja baruta je temperatura koju gasovi imaju prilikom njihovog obrazovanja. Razlikuju se temperatura sagorevanja pri stalnoj zapremini (T_w) i pri stalnom pritisku (T_p). Temperatura sagorevanja T_w kod baruta se kreće od 2400 do 3800 K, a temperatura T_p od 1900 do 3000 K.

Gustina baruta. Gustina baruta zavisi od njegovog sastava i tehnologije izrade. Za nitrocelulozne barute gustina se kreće u granicama od 1.54 do 1.64 g/cm³. Gustina dvobaznih baruta se kreće oko 1.58 g/cm³. Porozni nitrocelulozni baruti za pištolje odlikuju se znatno manjom gustinom i ona iznosi od 1.3 do 1.4 g/cm³.

Gravimetrijska gustina. Težina jednog litra slobodno nasutih barutnih zrnaca naziva se gravimetrijska gustina ili litarska težina baruta. Ta veličina raste sa povećanjem gustine baruta, a zavisi od oblika i veličine barutnih zrnaca. Važnost ove karakteristike je u tome što daje podatak koliko se može nasuti baruta u neku barutnu komoru ili čauru.

2.5 BALISTIČKE KARAKTERISTIKE BARUTA

Glavne balističke karakteristike baruta su:

- "sila" baruta,
- kovolumen barutnih gasova,
- brzina sagorevanja baruta,
- oblik i dimenzije baruta,
- gustina barutnog punjenja.

"Sila" baruta. "Sila" baruta, f , je rad koji bi mogli izvršiti barutni gasovi pri sagorevanju 1 kg baruta šireći se na atmosferskom pritisku uz njihovo zagrevanje od 273 K do temperature sagorevanja T_w . "Sila" baruta izračunava se iz izraza:

$$f = RT_1 = \frac{p_a \omega_1}{273} T_w \quad (2.1)$$

Ovde je:

- R - gasna konstanta (≈ 340 J/kgK),
 T_w - temperatura sagorevanja pri stalnoj zapremini,
 p_a - atmosferski pritisak,
 ω_1 - zapremina produkata sagorevanja 1 kg baruta.

"Sila" baruta se obično kreće u granicama od 800 000 do 1 250 000 J/kg. Za određivanje sile baruta može se koristiti sledeća empirijska formula:

$$f = (6546 + 0.91 \cdot Q_{wp}) \cdot 98.1 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \quad (2.2)$$

gde je Q_{wp} u kJ/kg.

Kovolumen barutnih gasova. Pri visokim pritiscima, koji se razvijaju pri sagorevanju baruta u oruđu, gustina barutnih gasova je toliko velika da sami molekuli gasa zauzimaju značajan deo zapremine u kojoj se vrši sagorevanje. Zato se u jednačinu stanja gasa uvodi veličina koja je proporcionalna zapremini molekula gasa. Ta veličina se naziva kovolumen i definiše se kao zapremina proporcionalna zapremini molekula koji se obrazuju pri sagorevanju 1 kg baruta. Obično se uzima da je kovolumen $\alpha \approx 0.001 \cdot \omega_1$ pri 0 °C i pritisku od 1.033 bar. Može se smatrati da je pri pritiscima do 4000 bar kovolumen konstantan, a iznad 10 000 bar uočava se da se kovolumen smanjuje.

Empirijska formula za određivanje kovolumena je:

$$\alpha = (1456 - 0.14 Q_{wp}) \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (2.3)$$

gde je Q_{wp} u kJ/kg.

Brzina sagorevanja baruta. Brzina sagorevanja baruta na pritisku od 0.98 bar je funkcija fizičko-hemijskih karakteristika baruta. Promena hemijskog sastava baruta utiče na veličinu brzine sagorevanja. Brzina sagorevanja nitroglicerinskih baruta se menja od 0.070 do 0.150 mm/s pri pritisku od 0.98 bar i zavisi uglavnom od sadržaja nitroglicerina. Nitrocelulozni baruti menjaju brzinu sagorevanja u_1 od 0.060 do 0.090 mm/s zavisno od procenta azota u nitrocelulozi i sadržaja isparljivih sastojaka.

Empirijska formula za određivanje u_1 je:

$$u_1 = (-76.6 + 0.0478 \cdot Q_{wp}) \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{m/s}}{\text{bar}} \right] \quad (2.3)$$

gde je Q_{wp} u kJ/kg.

Oblik i dimenzije baruta. Od ovih veličina zavisi zakon obrazovanja gasova i oblik krive pritiska pri sagorevanju baruta. Pri tome najvažniju ulogu ima najmanja dimenzija - ona se naziva svod barutnog zrna.

Gustina barutnog punjenja. To je karakteristika barutnog punjenja, a predstavlja odnos mase barutnog punjenja ω prema početnoj zapremini u kojoj sagoreva punjenje W_0 :

$$\Delta = \frac{\omega}{W_0} \quad (2.4)$$

Neke fizičko-hemijske i balističke karakteristike baruta date su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Fizičko-hemijske i balističke karakteristike baruta

Barut	ω 1 [dm ³ /kg]	Q_w p [kJ/kg]	Q_{wt} [kJ/kg]	T_w [K]	f [J/kg]	u_1 [m/s/bar]
NC baruti za stre-ljačko naoružanje	9 10÷920	335 0÷3475	368 5÷3770	280 0 ÷2900	9 80000	0.0 0008
NC baruti za topove	9 20÷970	305 0÷3350	326 5÷3560	270 0 ÷2850	8 83000÷ 980000	0.0 00065÷ 0.000075
Nitroglicerín ski (balistitni)	8 50	448 0÷4600	481 5÷5025	340 0 ÷3500	1 100000÷ 1130000	0.0 00116÷ 0.000120
Nitroglicerín ski (hladni)	1 020÷ 1050	230 0÷2510	251 5÷2720	230 0 ÷2400	8 35000÷ 885000	0.0 00040÷ 0.000045

2.6 SAGOREVANJE BARUTA

2.6.1 Osnovne faze procesa sagorevanja

U procesu sagorevanja baruta razlikujemo tri faze: potpaljivanje, paljenje i sagorevanje.

Potpaljivanje - je proces početka sagorevanja pod uticajem spoljnog impulsa (brzo zagrevanje, udar). Posle toga, kada se barut potpali bar u jednoj tački, proces sagorevanja se nastavlja sam od sebe na račun oslobođene toplote. Malodimni baruti se potpaljuju na temperaturi oko 200 °C. Posle potpaljivanja baruta istovremeno idu dva procesa: paljenje i sagorevanje.

Paljenje baruta - je proces prostiranja procesa sagorevanja po površini barutnog zrna. Brzina paljenja zavisi najviše od pritiska barutnih gasova, a takođe od stanja površine baruta, od njegove prirode i oblika i od sastava produkata sagorevanja pripale i baruta.

Sagorevanje baruta - je proces rasprostiranja gorenja u dubinu baruta, normalno na površinu baruta. Brzina sagorevanja takođe, u osnovi zavisi od pritiska gasova oko baruta, od prirode i temperature baruta, a takođe od brzine strujanja gasova duž površine baruta (eroziono gorenje).

Na otvorenom vazduhu brzina paljenja malodimnih baruta je 2÷3 puta veća od brzine sagorevanja ($u_p=2÷4$ mm/s, $u=1÷1.5$ mm/s). Dimni (crni) barut pali se nekoliko stotina puta brže ($u_p=1÷3$ m/s, $u \approx 10$ mm/s).

Pri korišćenju pripale, koja formira gasove visoke temperature u stalnoj zapremini (manometarska bomba ili barutna komora do pokretanja projektila) i omogućava postizanje pritiska $p_p=30÷50$ bar, proces pripaljivanja se mnogostruko ubrzava, pa se u prvom približenju može usvojiti da je proces pripaljivanja trenutan.

Pri pritisku p_p pripala od crnog baruta pripaljuje površinu punjenja malodimnog baruta bolje nego pripala od malodimnog baruta, jer u produktima sagorevanja crnog baruta postoje i usijane čvrste čestice koje ubrzavaju proces pripaljivanja.

2.6.2 Sagorevanje malodimnih baruta po paralelnim slojevima

Svojstvo malodimnih baruta da gore po paralelnim slojevima utvrđeno je posmatranjem sagorevanja baruta prostog oblika (traka, kocka) i dobilo je naziv geometrijskog zakona sagorevanja. U osnovi geometrijskog zakona sago-revanja baruta leže tri pretpostavke:

1. Masa baruta je jednorodna po hemijskoj prirodi i fizičkim svojstvima.
2. Sva barutna zrna pripaljuju se trenutno i istovremeno.
3. Sagorevanje malodimnih baruta obavlja se po paralelnim slojevima sa jednakom linearnom brzinom u svim pravcima normalnom na površinu sagorevanja.

Geometrijski zakon sagorevanja zajedno sa zakonom brzine sagorevanja omogućava uzimanje u obzir uticaja oblika i dimenzija barutnih zrna na prtok gasova i brzinu njihovog formiranja, kako u stalnoj zapremini, tako i u cevi oruđa pri opaljenju.

Naravno, stvarno sagorevanje baruta se ostvaruje na drugačiji način nego što je predpostavljeno geometrijskim zakonom. Tako flegmatizovani baruti sagorevaju sa različitim brzinama sagorevanja u površinskim slojevima nejednake debljine i u središtu barutnog zrna.

Pripaljivanje baruta takođe nije trenutno, već postepeno i zavisi od oblika i rasporeda barutnih zrna u punjenju i od drugih uslova punjenja. Naprimjer, punjenja od šipkastog baruta se lakše pripaljuju nego punjenja od sitnog zrnastog baruta kod koga su putevi za kretanje gasova pripale mnogo složeniji; nitroglicerinski baruti se teže pripaljuju od nitroceluloznih; grafitirani teže od negrafitiranih; površine uskih kanala višekanalnih baruta kasnije se pripaljuju od spoljnih površina tih baruta.

U uskim kanalima višekanalnih baruta javljaju se pritisci znatno viši nego u okolnom prostoru, što prouzrokuje da se brzina sagorevanja u njima razlikuje od brzine sagorevanja spoljnih površina.

2.6.3 Mehanizam sagorevanja baruta

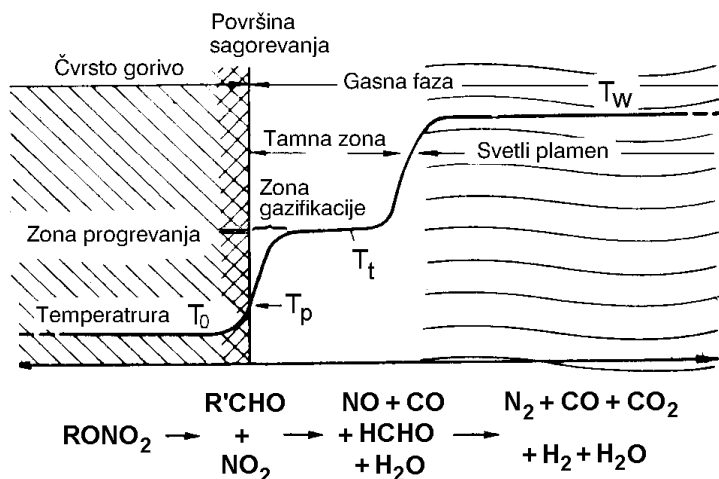
Kao primer mehanizma sagorevanja baruta daćemo mehanizam sagorevanja dvobaznog baruta (slika 2.6).

Pri kretanju površine sagorevanja u dubinu barutnog zrna temperatura slojeva baruta uz površinu sagorevanja raste. Raspodela temperature u dubini zrna pod površinom sagorevanja može se proračunati po formuli:

$$T = (T_p - T_o) e^{-\frac{\dot{m}_b c_b x}{\lambda_b}} + T_o \quad (2.5)$$

gde je $\dot{m}_b = \rho_b u$ - masena brzina sagorevanja baruta.

Sa porastom temperature u neposrednoj blizini površine počinje topljenje lakotopljivih sastojaka i termičko razlaganje osnovnih komponenti. Za dvobazne barute glavne reakcije u toj fazi sagorevanja su razlaganje nitroceluloze i nitroglicerina. U prvom stadijumu razgradnje nitroceluloze dolazi do kidanja veze RO - NO₂ sa naknadnim kidanjem veza ugljenik - ugljenik. Zatim se međudejstvom prvobitnih produkata sa NO₂ obrazuju jedinjenja višeg stepena oksidacije. Razlaganje nitroceluloze je praćeno oslobađanjem toplote. Količina toplote koja se oslobađa pri reakcijama u čvrstoj fazi zavisi od sastava baruta.



Slika 2.6 Šema sagorevanja dvobaznog baruta

Istraživanja pokazuju da se razlaganje osnovnih komponenti baruta, a time i masena brzina formiranja gasne faze, obavlja prema jednačini:

$$\dot{m}_b = K_{mp} e^{-\frac{E_p}{2RT_p}} \quad (2.6)$$

gde je:

K_{mp}	-	hemijska konstanta,
E_p	-	energija aktivacije,
R	-	gasna konstanta,
T_p	-	temperatura površine sagorevanja.

Na površini baruta formira se tečni sloj u koji su dispergovani mali mehurići gasa. Debljina tog sloja iznosi 10÷80 μm .

Temperatura površine sagorevanja T_p je jedna od najvažnijih karakteristika procesa, jer njena veličina određuje brzinu obrazovanja gasne faze tj. brzinu sagorevanja baruta. Složenost eksperimentalnog određivanja temperature T_p je posledica velikih temperaturnih gradijenata u zoni sagorevanja, kao i izvesne neodređenosti njenog položaja (topljenje, penjenje, itd.).

Na površinu sagorevanja naslanja se tamna zona. U njoj se, kao rezultat međudejstva produkata razlaganja baruta, izdvaja približno polovina količine toplote koja se oslobađa sagorevanjem baruta. Ovde se odvijaju reakcije oksidacije pomoću azotdioksida. Kao rezultat reakcija obrazuje se velika količina oksida ugljenika i azota. Pošto se pri reakcijama izdvaja toplota temperatura gasa raste sa udaljavanjem od površine baruta. Po karakteru promene temperature i reakcijama koje se odvijaju tamnu zonu delimo na dva dela: zonu gasifikacije neposredno uz površinu sagorevanja, gde dolazi do brzog rasta temperature, i pripremnu zonu gde se neznatno menja temperatura. Temperatura gasova pripreme zone iznosi $T_t = 1100 \div 1400 \text{ K}$.

Debljina tamne zone zavisi od pritiska. Pri niskim pritiscima debljina tamne zone iznosi od nekoliko desetih do nekoliko mm. Pri visokim pritiscima ona iščezava. Zona gasifikacije zauzima samo mali deo tamne zone ($\sim 10^{-2} \div 10^{-1} \text{ mm}$).

U zoni svetlog plamena vrši se dogorevanje CO i to korišćenjem azotnih oksida.

2.6.4 Zakon brzine sagorevanja

Zakon brzine sagorevanja baruta je jedna od najvažnijih karakteristika unutrašnje balistike. Brzina sagorevanja baruta je brzina kretanja površine sagorevanja normalno na površinu u dubinu barutnog zrna. Matematički se izražava promenom debljine baruta (e) u vremenu (t):

$$u = \frac{de}{dt} \quad (2.7)$$

i zavisi od prirode baruta, njegove temperature i pritiska okolnih gasova. Zakonom brzine sagorevanja obično se naziva funkcionalna zavisnost brzine sagorevanja (u) od pritiska (p).

Postoji nekoliko empirijskih zavisnosti za izražavanje zakona brzine sagorevanja:

$$\begin{aligned} u &= Ap^n && \text{(primenjuje se do pritiska 300 bar)} \\ u &= ap + b && \text{(primenjuje se za pritiske od 300 do 600 bar)} \\ u &= u_1 p && \text{(za pritiske veće od 600 bar)} \end{aligned}$$

Brzina sagorevanja u_1 zavisi od prirode baruta i kod nitroceluloznih baruta menja se sa sadržajem isparljivih sastojaka i azota, a kod nitroglicerinskih baruta sa sadržajem nitroglicerina.

Povećanje sadržaja isparljivih sastojaka H za 1 % snižava u_1 za ~ 10 %; ovo se izražava empirijskom zavisnošću:

$$u_1 = 0.00012 - 0.00001 \cdot H \left[\frac{\text{m/s}}{\text{bar}} \right] \quad (2.8)$$

Takođe za nitrocelulozne barute veza u_1 i sadržaja isparljivih sastojaka i azota data je empirijskom zavisnošću:

$$u_1 = \frac{0.175 \cdot 10^{-3} (N - 6.37)}{0.04(220 - t_b) + 3h + h'} \left[\frac{\text{m/s}}{\text{bar}} \right] \quad (2.9)$$

gde je:

- N- sadržaj azota u nitrocelulozi, u [%],
- t_b - temperatura baruta, u [°C],
- h - sadržaj isparljivih materija (voda) koje se mogu udaljiti šestočasovnim sušenjem na 95 °C, u [%],
- h' - sadržaj isparljivih materija koje se ne mogu udaljiti šestočasovnim sušenjem na 95 °C, u [%].

Formula pokazuje da u_1 raste sa povećavanjem procenta azota i temperature, a smanjuje se sa povećavanjem sadržaja rastvarača.

2.6.5 Brzina formiranja gasova

Za upravljanje procesom opaljenja treba znati regulisati formiranje barutnih gasova pri sagorevanju punjenja; pri tome značaj ima kako količina formiranih gasova, tako i njihov maseni pritok, intenzivnost ili brzina njihovog obrazovanja.

I količina gasova i intenzivnost njihovog obrazovanja zavise ne samo od brzine sagorevanja, već i od oblika i dimenzija barutnog zrna.

Ako sa ω označimo masu punjenja, a sa ψ relativni deo sagorelog punjenja, onda je tekuća količina sagorelog baruta, koja se do datog trenutka pretvorila u gas $\omega\psi$.

U toku sagorevanja ψ se menja od 0 do 1:

$$0 \leq \psi \leq 1 \quad (2.10)$$

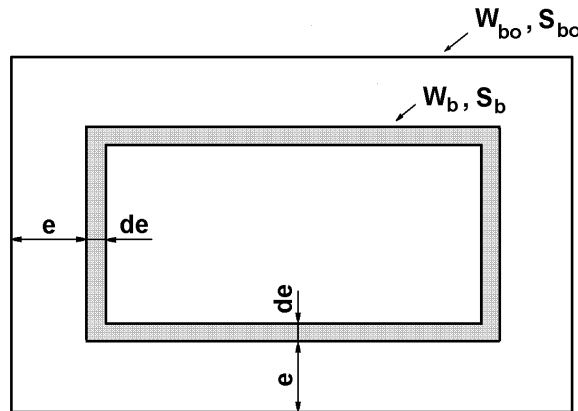
Veličina ψ može se predstaviti ili kao odnos mase ω' sagorelog baruta prema početnoj masi ω , ili kao odnos zapremine sagorelog baruta W_b' prema njegovoj početnoj zapremini W_{bo} (uzima se da je gustina baruta δ konstantna):

$$\psi = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{W_b'}{W_{bo}} \quad (2.11)$$

Brzinom formiranja gasova naziva se veličina $d\psi/dt$ i predstavlja relativni deo zapremine ili mase baruta koji sagoreva i prelazi u gasovito stanje u jedinici vremena. Analiza te veličine omogućava da se objasni kako je moguće regulisati brzinu pritoka gasova pri sagorevanju baruta.

Sekundni maseni prtok gasova izražava se veličinom $\omega d\psi/dt$; količina energije koja se oslobađa sagorevanjem baruta u jedinici vremena, karakteriše se proizvodom $f\omega d\psi/dt$. Veličina $f\omega d\psi/dt$ određuje karakter porasta pritiska u stalnoj zapremini i u kanalu cevi oruđa pri opaljenju. Kako su f i ω konstantne veličine, važno je znati od kojih faktora zavisi brzina formiranja gasova $d\psi/dt$.

Da bismo to izveli koristićemo geometrijski zakon sagorevanja. Neka barutno zrno ima oblik paralelopipeda. Razmotrimo njegovu zapreminu i površinu u početku sagorevanja (W_{bo} i S_{bo}) i u tekućem trenutku (W_b i S_b), kada sa svih strana sagori jedna ista debljina baruta e (slika 2.7)



Slika 2.7 Šema sagorevanja baruta po paralelnim slojevima

Za vremenski interval dt sva tekuća površina baruta S_b premešta se u dubinu zrna za debljinu de ; zapremina sagorelog sloja je $dW_b = S_b \cdot de$. Deljenjem obe strane sa W_{bo} i dt dobijamo:

$$\frac{d\left(\frac{W_b}{W_{bo}}\right)}{dt} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{S_b}{W_{bo}} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{S_b u}{W_{bo}} \quad (2.12)$$

$$\omega \frac{d\psi}{dt} = \frac{\omega}{W_{bo}} S_b u = \delta S_b u \quad (2.13)$$

Prethodne formule pokazuju da brzina obrazovanja gasova - i zapreminski i maseno - zavisi od proizvoda $S_b \cdot u$, gde je S_b - apsolutna veličina površine sagorevanja, a u - linearna brzina sagorevanja.

Zavisnost $u=f(p)$ je prethodno razmatrana; sada treba odrediti promenu S_b .

Formulu (2.12) obično dajemo u obliku:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_{bo}}{W_{bo}} \cdot \frac{S_b}{S_{bo}} u_1 p \quad (2.14)$$

gde u_1 zavisi od prirode baruta; p karakteriše stanje sredine u kojoj se obavlja sagorevanje baruta, a prva dva člana zavise od geometrije barutnih zrna i karakterišu uticaj oblika i dimenzija zrna na brzinu formiranja gasova:

(S_{b0}/W_{b0}) - početna specifična površina baruta zavisi od oblika i dimenzija baruta,

$(S_b/S_{b0})=\sigma$ - relativna površina baruta zavisi samo od oblika baruta i karakteriše promenu površine baruta pri sagorevanju.

Iz formule (2.14) deljenjem sa p dobijamo:

$$\frac{1}{p} \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{S_{b0}}{W_{b0}} \cdot \frac{S_b}{S_{b0}} u_1 = \frac{S_b \cdot u_1}{W_{b0}} \quad (2.15)$$

Proizvod $S_b \cdot u_1$ predstavlja zapreminu gasova koji se obrazuju u jedinici vremena pri $p=1$. Veličina $S_b \cdot u_1 / W_{b0}$ naziva se specifična intenzivnost formiranja gasova, koja se odnosi na pritisak $p=1$; označava se sa Γ pa je:

$$\Gamma = \frac{1}{p} \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{S_{b0}}{W_{b0}} \cdot u_1 \cdot \sigma \quad (2.16)$$

Veličina $\Gamma_1 = \frac{S_{b0}}{W_{b0}} \cdot u_1$ karakteriše početnu intenzivnost obrazovanja gasova pri $p=1$; zove se i "živost" baruta.

Različiti karakteri promene površine baruta izazivaju odgovarajuće karaktere promene krivih pritiska u stalnoj zapremini ili u kanalu oruđa.

2.6.6 Veza između geometrije baruta i obrazovanja gasova

a) Baruti degresivnog oblika

Označimo sa:

e_0	-	polovinu ukupne debljine baruta,
e	-	debljinu baruta sagorelu u datom trenutku,
$z=e/e_0$	-	relativnu debljinu sagorelog baruta,
$\psi=W_b/W_{b0}$	-	relativni deo sagorelog baruta,
$\sigma=S_b/S_{b0}$	-	relativnu površinu baruta.

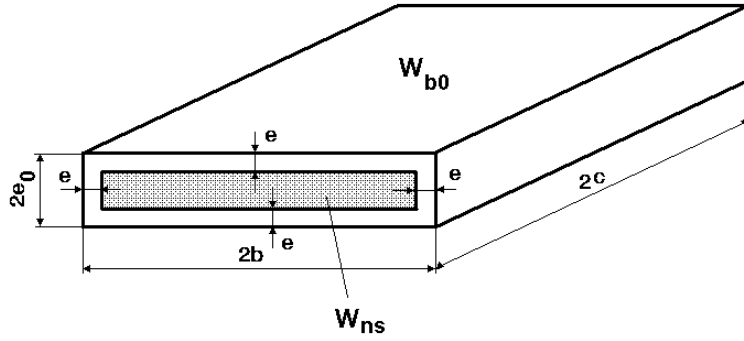
U toku sagorevanja ψ i z se menjaju od 0 do 1; σ se menja od 1 na početku sagorevanja do σ_K na kraju sagorevanja, pri čemu se u zavisnosti od oblika baruta σ_K menja u širokim granicama. Koristeći osnovne postavke geometrijskog zakona sagorevanja izvešćemo zavisnosti $\psi=f_1(z)$ i $\sigma=f_2(z)$.

Pokazalo se da za sve oblike baruta zavisnost ψ od z izražava formula u obliku:

$$\psi = \kappa z (1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (2.17)$$

gde su κ, λ, μ - karakteristike oblika baruta - konstante koje zavise od oblika zrna.

Izvedimo ovu zavisnost za trakasti barut, čija je šema sagorevanja data na slici 2.8. Ako je W_b zapremina sagorelog dela baruta onda je:



Slika 2.8 Šema sagorevanja trakastog baruta

$$\psi = \frac{W_b}{W_{b0}} = \frac{W_{b0} - W_{bn}}{W_{b0}} = 1 - \frac{W_{bn}}{W_{b0}} \quad (2.18)$$

Zamenimo W_{b0} i W_{bn} sa izrazima:

$$W_{b0} = 2e_0 \cdot 2b \cdot 2c$$

$$W_{bn} = 2(e_0 - e) \cdot 2(b - e) \cdot 2(c - e)$$

gde su $2e_0$, $2b$, $2c$ - debljina, širina i dužina trake. Uvedimo oznake: $2e_0/2b = e_0/b = \alpha < 1$; $2e_0/2c = e_0/c = \beta < 1$. Sada je:

$$\begin{aligned} \frac{W_{bn}}{W_{b0}} &= \left(\frac{e_0 - e}{e_0} \right) \cdot \left(\frac{b - e}{b} \right) \cdot \left(\frac{c - e}{c} \right) = \left(1 - \frac{e}{e_0} \right) \cdot \left(1 - \frac{e}{b} \right) \cdot \left(1 - \frac{e}{c} \right) = \\ &= \left(1 - \frac{e}{e_0} \right) \cdot \left(1 - \frac{e_0}{b} \cdot \frac{e}{e_0} \right) \cdot \left(1 - \frac{e_0}{c} \cdot \frac{e}{e_0} \right) = (1 - z) \cdot (1 - \alpha z) \cdot (1 - \beta z) = \\ &= 1 - (1 + \alpha + \beta)z + (\alpha + \beta + \alpha\beta)z^2 - \alpha\beta z^3 \end{aligned}$$

Stavljajući ovaj izraz u formulu $\psi = 1 - W_{bn}/W_{b0}$ dobijamo:

$$\psi = (1 + \alpha + \beta)z - (\alpha + \beta + \alpha\beta)z^2 + \alpha\beta z^3$$

Ako obeležimo:

$$\kappa = 1 + \alpha + \beta$$

$$\lambda = -\frac{\alpha + \beta + \alpha\beta}{1 + \alpha + \beta} \quad (2.19)$$

$$\mu = \frac{\alpha\beta}{1 + \alpha + \beta}$$

dobijamo traženu zavisnost $\psi = f_1(z)$ u obliku:

$$\psi = \kappa z (1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (2.20)$$

Izrazi za karakteristike oblika κ , λ , μ su opšteg oblika. Na kraju sagorevanja pri $z_k=1$ i $\psi_k=1$ formula (2.20) daje vezu:

$$1 = \kappa(1 + \lambda + \mu) \quad (2.21)$$

koju treba da zadovolje karakteristike κ , λ i μ . Ova jednakost služi za proveru proračuna karakteristika oblika baruta. Iz formula (2.19) izvedenih za traku mogu se dobiti karakteristike κ , λ i μ za druge oblike, kao specijalne slučajeve. Tako imamo:

1. Cevčicu možemo razmatrati kao ekvivalentnu traci beskonačne širine (videti sliku 2.8), jer kod nje nema sagorevanja po širini, pa se njene dimenzije u tom pravcu ne menjaju. Tako je $2b=\infty$, $\alpha=0$, pa je prema tome:

$$\kappa = 1 + \beta, \quad \lambda = -\frac{\beta}{1 + \beta}, \quad \mu = 0$$

Tada je:

$$\psi = \kappa z(1 + \lambda z)$$

2. Kvadratna pločica: $2c=2b$ $\alpha=\beta$

$$\kappa = 1 + 2\beta, \quad \lambda = -\frac{2\beta + \beta^2}{1 + 2\beta}, \quad \mu = \frac{\beta^2}{1 + 2\beta}$$

3. Kocka $2b=2c=2e_0$ $\alpha=\beta=1$

$$\kappa = 3, \quad \lambda = -1, \quad \mu = \frac{1}{3}$$

Relativna površina baruta $\sigma=S_b/S_{b0}=f(z)$

Pošto je $dW_b=S_b \cdot de$ i $S_b=dW_b/de$, za dobijanje $\sigma=f(z)$ diferenciraćemo jednačinu (2.20) po z :

$$\frac{d\psi}{dz} = \kappa(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \quad (2.22)$$

Levi deo jednačine (2.22) može se napisati u obliku: $\frac{d\psi}{dz} = \frac{d\psi}{dt} \frac{dt}{de} \frac{de}{dz}$

Kako je: $\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_{b0}}{W_{b0}} \cdot \frac{S_b}{S_{b0}} \frac{de}{dt}$ (jedn. 2.15), $z = \frac{e}{e_0} \Rightarrow \frac{de}{dz} = e_0$

Tada je:

$$\frac{S_{b0}}{W_{b0}} \cdot \frac{S_b}{S_{b0}} e_0 = \kappa(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \quad (2.23)$$

Na početku sagorevanja pri $z=0$ i $S_b/S_{b0}=1$ dobijamo:

$$\frac{S_{b0}}{W_{b0}} e_0 = \kappa \quad (2.24)$$

Deljenjem jednačine (2.23) sa jednačinom (2.24) dobijamo:

$$\sigma = \frac{S_b}{S_{b0}} = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2 \quad (2.25)$$

U početku sagorevanja pri $z=0$ je: $\sigma_0=1$

Na kraju sagorevanja pri $z=1$ je: $\sigma_K=1+2\lambda+3\mu$.

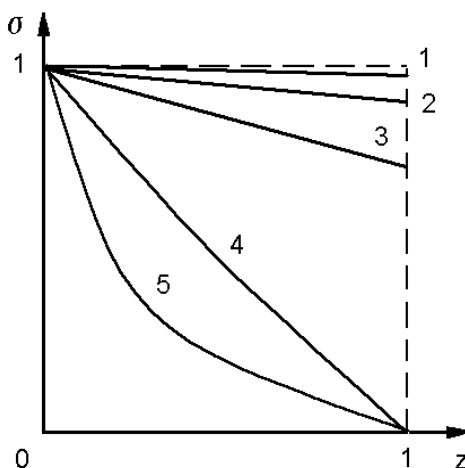
Iz formule (2.24) sledi izraz za početnu specifičnu površinu baruta:

$$\frac{S_{bo}}{W_{bo}} = \frac{\kappa}{e_0}$$

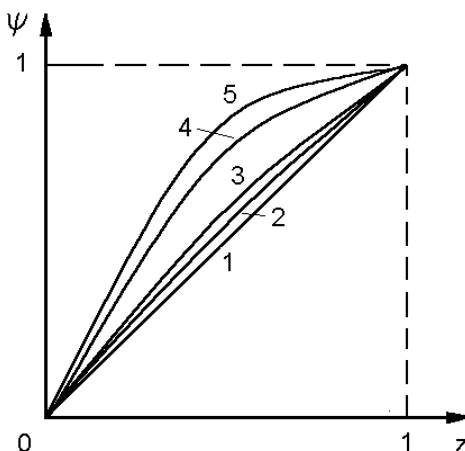
(2.26)

Prema tome, početna specifična površina baruta zavisi od oblika baruta (κ) i njegovih dimenzija (e_0).

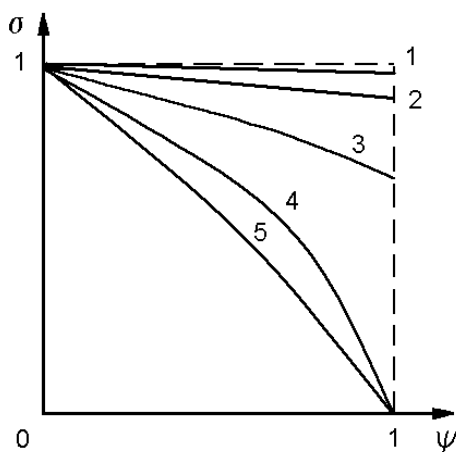
U zavisnosti od karaktera promene površine sagorevanja S_b ili σ baruti se dele na dve grupe: baruti degresivnog oblika, ako se površina pri sagorevanju smanjuje ($d\sigma/dz < 0$) i baruti progresivnog oblika ako površina pri sagorevanju raste ($d\sigma/dz > 0$). Zavisnosti $\sigma=f(z)$, $\psi=f(z)$ i $\sigma=f(\psi)$ su prikazane na slikama 2.9, 2.10, 2.11.



Slika 2.9 Promene površine pri sagorevanju degresivnih baruta
1--cevčica, 2-traka, 3-kvadratna pločica, 4-cilindar, 5-kocka



Slika 2.10 Uticaj oblika zrna na prtok gasova za degresivne barute
1--cevčica, 2-traka, 3-kvadratna pločica, 4-cilindar, 5-kocka



Slika 2.11 Zavisnost $\sigma=f(\psi)$ za barute degresivnog oblika
1- cevčica, 2-traka, 3-kvadratna pločica, 4-cilindar, 5-kocka

Dvočlana zavisnost $\psi=f(z)$ za barute degresivnog oblika

Radi uprošćenja izraza pri analitičkom rešavanju zadataka unutrašnje balistike, često se vrši zamena tročlane jednačine (2.20) dvočlanom u obliku:

$$\psi = \kappa_1 z(1 + \lambda_1 z) \quad (2.27)$$

Za $z=0$ u oba izraza je $\psi=0$.

Za određivanje κ_1 i λ_1 postavimo dva dopunska uslova. Vrednosti ψ za $z=1$ i $z=1/2$ proračunate po dvočlanoj i tročlanoj formuli treba da budu istovetne. Tako je:

$$\text{za } z=1 \quad \kappa(1 + \lambda + \mu) = \kappa_1(1 + \lambda_1) = 1 \quad (2.28)$$

$$\text{za } z=1/2 \quad \frac{\kappa}{2} \left(1 + \frac{\lambda}{2} + \frac{\mu}{4} \right) = \frac{\kappa_1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_1}{2} \right) \quad (2.29)$$

Rešavanjem ovog sistema dobijamo:

$$\kappa_1 = \kappa - \frac{\kappa\mu}{2} = \kappa \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) = 1 + \alpha + \beta - \frac{\alpha\beta}{2} \quad (2.30)$$

Iz jednačine (2.28) imamo:

$$\lambda_1 = \frac{1}{\kappa_1} - 1$$

$$\kappa_1 \lambda_1 = 1 - \kappa_1 = -(\kappa_1 - 1) = -\left(\alpha + \beta - \frac{\alpha\beta}{2} \right) \quad (2.31)$$

Po dvočlanoj zavisnosti je:

$$\psi = \kappa_1 z(1 + \lambda_1 z) \quad (2.32)$$

$$\sigma = 1 + 2\lambda_1 z \quad (2.33)$$

Isključivanjem z iz jednačina (2.32) i (2.33) dobijamo zavisnost $\sigma=f(\psi)$:

$$\sigma = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi} \quad (2.34)$$

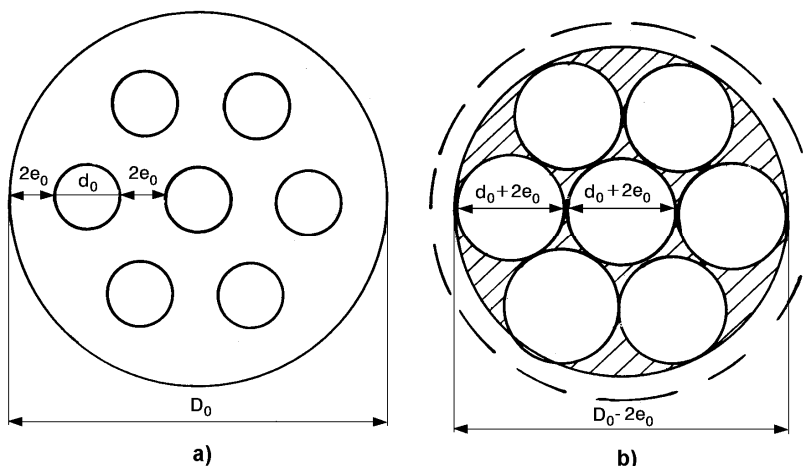
Koristeći jednačinu (2.31) dobijamo:

$$\sigma = \sqrt{1 - 4 \frac{\kappa_1 - 1}{\kappa_1^2} \psi} \quad (2.35)$$

b) Baruti progresivnog oblika

Barutima progresivnog oblika nazivaju se baruti kod kojih površina sagorevanja raste tokom procesa sagorevanja. Progresivni baruti su višekanalni baruti: 7-kanalni, 19-kanalni, 37-kanalni, itd.

Najviše se primenjuju 7-kanalni baruti. Kod zrna sa 7 kanala (slika 2.12) jedan kanal je centralni, a 6 kanala su smešteni u temenima pravilnog šestougla. Usled toga debljina svoda između centralnog kanala i svakog od spoljnih kanala po poluprečnicima i između spoljnih kanala po stranama šestougla su jednaki. Spoljna površina je takođe smeštena na rastojanju jednakom debljini svoda od spoljnih kanala. Kroz praksu su ustanovljeni sledeći odnosi dimenzija: prečnik kanala $d_0 = e_0$ (polovina debljine svoda); prečnik zrna $D_0 = 3d_0 + 4 \cdot 2e_0 = 11d_0 = 11e_0$; dužina zrna $2c = (2 \div 2.5) \cdot D_0$.



Slika 2.10 Barut sa 7 kanala, a) pre sagorevanja, b) u momentu raspada

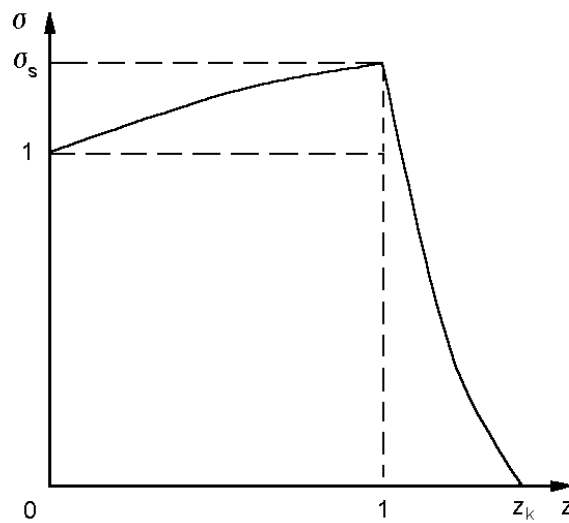
Pri sagorevanju višekanalnih baruta uočava se pojava raspada zrna, koje nema kod barutnih zrna sa jednim kanalom ili bez kanala.

Sagorevanje unutar kanala vrši se po koncentričnim cilindričnim površinama. Kada u svim pravcima i unutar kanala i sa spoljne površine sagori debljina e_0 , sve cilindrične površine se sreću i dolazi do raspada zrna na 12 štapića: 6 unutrašnjih malih i 6 spoljašnjih velikih. Ti produkti raspada sagorevaju uz brzo smanjenje površine.

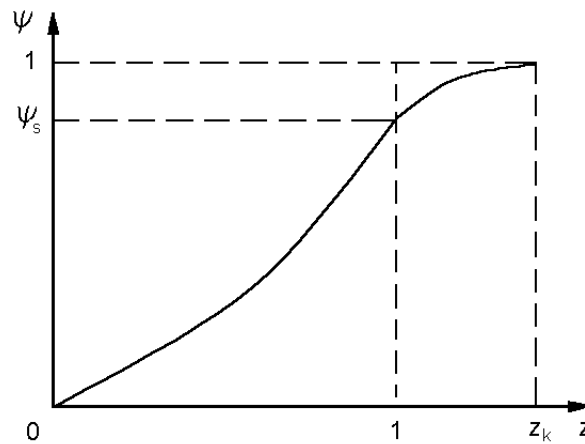
Osnovne karakteristike baruta koji sagorevaju sa raspadom su relativna površina u trenutku raspada σ_s , sagoreli deo baruta ψ_s i debljina elemenata raspada ρ . Za razliku od baruta degresivnog oblika pri $z_s = 1$ dolazi do raspada zrna, a kraj sagorevanja baruta odgovara kraju sagorevanja elemenata raspada, kada je: $e_k = e_0 + \rho$ i $z_k > 1$.

Karakteristike zrna sa 7 kanala pri standardnom odnosu dimenzija su: porast površine do momenta raspada 37 % ($\sigma_s = S_s/S_0 = 1.37$, S_s - površina zrna u trenutku raspada); sagoreli deo baruta u trenutku raspada je $\psi_s \approx 0.85$, a preostalih 15 % gori degresivno. Sagorevanje prizmatičnih štapića odgovara sagorevanju debljine ρ' , odnosno ρ (poluprečnici kružnica upisanih u krivolinijski presek produkata raspada zrna. Prvo završavaju sagorevanje unutrašnji produkti raspada, kod kojih je $\rho' \approx 0.23 \cdot e_0$; posle toga dogorevaju 6 spoljnih produkata raspada poluprečnika $\rho = 0.532 \cdot e_0$. Sagorevanje se završava kada je sagorela debljina $e_k = e_0 + \rho$, tj. $z_k = 1 + \rho/e_0$. Veličina $\rho = 0.1772 \cdot (d_0 + 2e_0) = 0.532 \cdot e_0$, tj. $z_k = 1.532$.

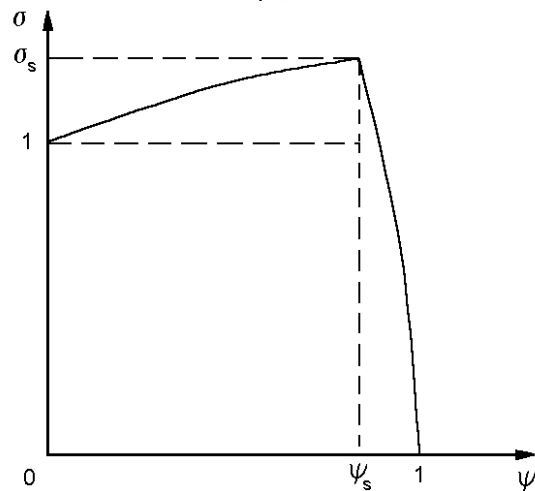
Zavisnosti $\sigma = \sigma(z)$, $\psi = \psi(z)$ i $\sigma = \sigma(\psi)$ za sedmokanalni barut date su na slikama 2.13, 2.14 i 2.15.



Slika 2.13 Zavisnost $\sigma(z)$ za sedmokanalni barut



Slika 2.14 Zavisnost $\psi(z)$ za sedmokanalni barut



Slika 2.15 Zavisnost $\sigma(\psi)$ za sedmokanalni barut

2.6.7 Veza između pritiska i uslova punjenja pri sagorevanju baruta u stalnoj zapremini

a) Zavisnost za najveći pritisak.

Najveći pritisak u prostoru stalne zapremine određuje se pomoću jednačine Abel - Nobela u obliku:

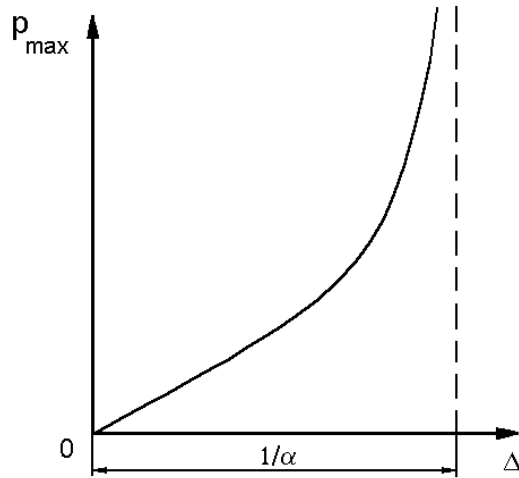
$$p_{\max} = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta} \quad (2.44)$$

Kada zamenimo Δ izrazom $\Delta = \omega/W_0$ dobijamo:

$$p_{\max} = \frac{f\omega}{W_0 - \alpha\omega} = \frac{f}{\frac{W_0}{\omega} - \alpha} \quad (2.45)$$

Analiza formule za $p_{\max} = f(\Delta)$ pokazuje da za $\Delta \rightarrow 1/\alpha$ $p_{\max} \rightarrow \infty$, što znači da kriva $p_{\max} = f(\Delta)$ ima asimptotu za $\Delta_{\infty} = 1/\alpha$ (slika 2.17)

Ako je manometarska bomba projektovana za $p_{\max} = 3000$ bar, maksimalna gustina punjenja za nitrocelulozne barute je $\Delta_{\max} \approx 0.25 \text{ kg/dm}^3$, a za nitroglicerinske balistitne barute $\Delta_{\max} \approx 0.22 \text{ kg/dm}^3$.



Slika 2.17 Zavisnost $p_{\max} = f(\Delta)$ po Abel - Nobelu

b) Zavisnost $p = p(\psi)$

Neka u stalnoj zapremini W_0 sagoreva barut mase ω i karakteristika f, α, δ . Neka je u datom trenutku sagoreo deo punjenja ψ . Treba izvesti formulu za tekući pritisak p_{ψ} . Masa sagorelog baruta je $\omega\psi$, masa nesagorelog baruta $\omega(1 - \psi)$, njegova zapremina $\omega(1 - \psi)/\delta$, kovolumen gasova sagorelog dela baruta $\alpha\omega\psi$.

Jednačina stanja ima oblik:

$$p_{\psi} = \frac{f}{v - \alpha} \quad (2.46)$$

Ovde je:

$$v = \frac{W_0 - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi)}{\omega\psi} \quad - \quad \text{specifična zapremina gasova u datom trenutku,}$$

$$W_0 - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) \quad - \quad \text{zapremina koju zauzimaju gasovi,}$$

$$\omega\psi \quad - \quad \text{masa gasova u datom trenutku.}$$

Stavljanjem izraza za ω u jednačinu za p_{ψ} dobijamo:

$$p_{\psi} = \frac{f\omega\psi}{W_0 - \frac{\omega}{\delta} - \omega\left(\alpha - \frac{1}{\delta}\right)\psi} = \frac{f\omega\psi}{W_{\psi}} \quad (2.47)$$

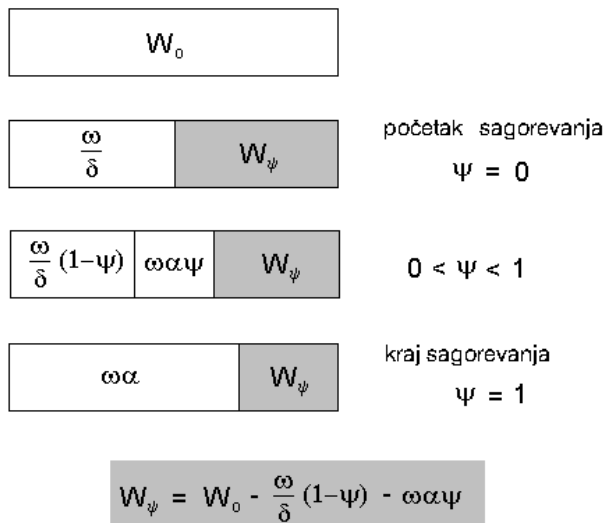
Slobodna zapremina bombe W_ψ dobija se oduzimanjem od geometrijske zapremine bombe W_0 zapremine još nesagorelog dela baruta i kovolumena sagorelog dela baruta.

Ako podelimo brojilac i imenilac desne strane sa W_0 dobijamo:

$$p_\psi = \frac{f \Delta \psi}{1 - \frac{\Delta}{\delta} - \Delta \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \psi} = \frac{f \Delta \psi}{\Lambda_\psi} \quad (2.48)$$

Ovde je $\Lambda_\psi = 1 - \Delta/\delta - \Delta(\alpha - 1/\delta)\psi = W_\psi/W_0$ - relativna slobodna zapremina bombe.

Slobodna zapremina za vreme sagorevanja baruta menja se zbog rasta ψ (slika 2.18).



Slika 2.18 Prikaz promene slobodne zapremine bombe pri sagorevanju baruta

c) Uticaj pripale na pritisak gasova

Često pri optima u bombi pripala ima drugačiju prirodu od prirode osnovnog baruta. Neka su poznate karakteristike pripale f_p , α_p , δ_p i ispitivanog baruta f , α , δ . Tada se ukupni pritisak sa uzimanjem u obzir i pritiska pripale dobija po formuli:

$$p'_\psi = \frac{f_p \omega_p + f \omega \psi}{W_0 - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha \omega \psi - \alpha_p \omega_p} = p_p + p_\psi \quad (2.49)$$

Veličina $\alpha_p \cdot \omega_p$ se obično zanemaruje. Ovde je:

$$p_\psi = \frac{f \omega \psi}{W_\psi} \quad - \quad \text{pritisak gasova baruta bez uzimanja u obzir pritiska pripale}$$

$$p_p = \frac{f_p \omega_p}{W_\psi} \quad - \quad \text{pritisak gasova pripale u slobodnoj zapremini bombe}$$

Pošto se W_ψ smanjuje, to p_p raste, ali sam pritisak pripale je mali (30÷50 bar). Zbog toga se njegova promena obično zanemaruje i računa se p_{p0} za početak sagorevanja baruta:

$$p_{p0} = \frac{f_p \omega_p}{W_0 - \frac{\omega}{\delta}} = \frac{f_p \Delta_p}{1 - \frac{\Delta}{\delta}} \quad (2.50)$$

Tada zavisnost:

$$p_{\psi}' = p_{po} + \frac{f\omega\psi}{W_{\psi}} = p_{po} + \frac{f\Delta\psi}{1 - \frac{\Delta}{\delta} - \Delta\left(\alpha - \frac{1}{\delta}\right)\psi} \quad (2.51)$$

predstavlja izraz za proračun pritiska barutnih gasova sa uzimanjem u obzir pritiska gasova pripale. Znajući ω ili Δ i karakteristike baruta po toj formuli može se računati veličina p_{ψ}' za svaku vrednost ψ . Ali prethodna zavisnost se češće koristi za rešavanje obrnutog zadatka, jer su p_{ψ}' poznati na osnovu opita u bombi i krive $p=p(t)$. Zavisnost ψ od p data je izrazom:

$$\psi = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p_{\psi}' - p_{po}} + \alpha - \frac{1}{\delta}} \quad (2.52)$$

2.6.8 Eksperimentalno određivanje karakteristika u manometarskoj bombi

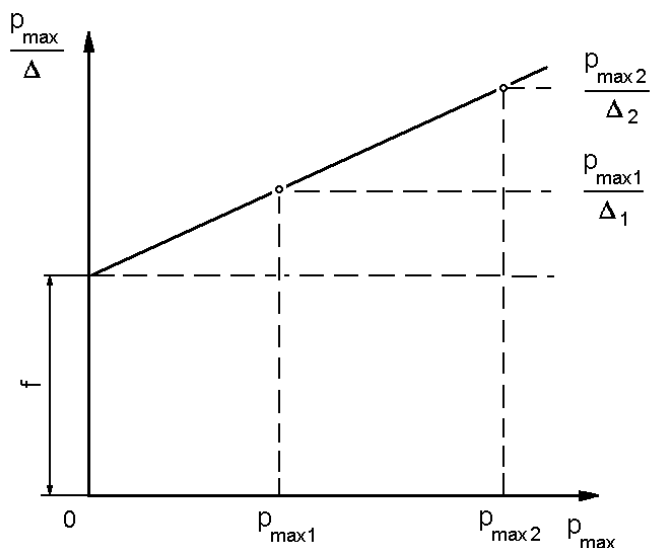
Abel-Nobelova jednačina za maksimalni pritisak barutnih gasova u manometarskoj bombi ima oblik:

$$p_{\max} = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta} \quad (2.53)$$

Ova jednačina se može napisati u obliku:

$$\frac{p_{\max}}{\Delta} = f + \alpha p_{\max} \quad (2.54)$$

U koordinatnom sistemu $(p_{\max}/\Delta, p_{\max})$ to je jednačina prave gde je f odsečak na ordinatnoj osi, a α koeficijent pravca prave (slika 2.19). Za svaki barut dobija se sopstvena karakteristična prava sa vrednostima f i α .



Slika 2.19 Grafičko određivanje sile baruta i kovolumena

Pošto je zavisnost linearna, za određivanje sile baruta f i kovolumena barutnih gasova α neophodno je izvesti opite za dve gustine punjenja Δ_1 i Δ_2 . Izmerivši $p_{\max1}$ i $p_{\max2}$ i izračunavši $p_{\max1}/\Delta_1$ i $p_{\max2}/\Delta_2$ dobijamo:

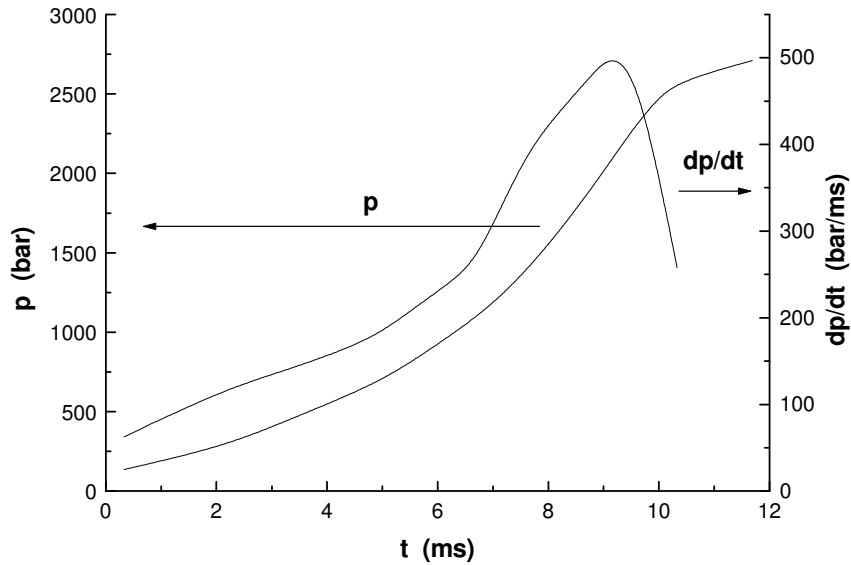
$$\alpha = \frac{\frac{p_{\max 2}}{\Delta_2} - \frac{p_{\max 2}}{\Delta_2}}{p_{\max 2} - p_{\max 1}} \quad (2.55)$$

$$f = \frac{p_{\max 1}}{\Delta_1} - \alpha \cdot p_{\max 1} = \frac{p_{\max 2}}{\Delta_2} - \alpha \cdot p_{\max 2} \quad (2.56)$$

Ove zavisnosti neposredno proizilaze sa slike 2.19. Pri izboru gustina punjenja Δ_1 i Δ_2 za eksperimentalno određivanje f i α gustina Δ_2 se određuje na osnovu dozvoljenog pritiska za bombu. Tada je:

$$\Delta_2 = \frac{p_{\max 2}}{f + \alpha p_{\max 2}} \quad (2.57)$$

U praksi se obično koriste 3 gustine punjenja 0.1, 0.15 i 0.2 g/cm³ (kg/dm³) i sa svakom gustinom opit se ponavlja 3 puta. Uobičajeni oblik krivih $p=p(t)$ i $dp/dt=f(t)$ dobijenih opitom u manometarskoj bombi dat je na slici 2.20



Slika 2.20 Uobičajeni oblik krivih $p=p(t)$ i $dp/dt=f(t)$ dobijenih opitom u manometarskoj bombi

Opiti u manometarskoj bombi se koriste i za određivanje relativnih karakteristika baruta koje se nazivaju "relativna živost" (RQ) i "relativna sila" (RF). Ove veličine su definisane na sledeći način:

$$RQ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(dp/dt)^{i.b.}}{(dp/dt)^{e.b.}} \quad RF = \frac{p_m^{i.b.}}{p_m^{e.b.}} \quad (2.58)$$

Pri određivanju RQ vrednosti dp/dt u broiocu i imeniocu su mereni pri istom propisanom trenutnom pritisku p . Ukupno se vrši N takvih merenja obično na 4 pritiska u sredini intervala merenih pritisaka (p između $0.2 \cdot p_m$ i $0.8 \cdot p_m$). Cilj određivanja ovih relativnih karakteristika je pouzdanije predviđanje mase barutnog punjenja novo proizvedene serije baruta ili čak izostavljanje gađanja za određivanje mase punjenja. Za to bi bilo neophodno izvršiti ispitivanje serije baruta i dobijanje zavisnosti oblika:

$$\begin{aligned} V_0 &= a + b \cdot RQ \\ \Delta V_0 &= a' \cdot RQ + b' \cdot RF \end{aligned} \quad (2.59)$$

Za sada ovi pokušaji nisu rezultirali potpunim uspehom.

3. OSNOVNI PROCESI I ZAVISNOSTI PRI OPALJENJU

3.1 UVODNA RAZMATRANJA

Osnovni procesi pri opaljenju iz oruđa su:

- sagorevanje baruta i formiranje barutnih gasova,
- pretvaranje hemijske energije baruta u kinetičku energiju kretanja sistema gas - projektil - punjenje - cev, pri čemu projektil ne dobija samo translatorno već i obrtno kretanje. Zajedno sa tim pod dejstvom pritiska barutnih gasova cev oruđa se kreće unazad (trzanje).

Daćemo osnovne zavisnosti i jednačine koje opisuju te procese:.

1. Zavisnosti koje definišu sagorevanje baruta

a) količina formiranih gasova u zavisnosti od debljine sagorelog dela baruta pri geometrijskom zakonu sagorevanja:

$$\psi = \kappa z (1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (3.1)$$

gde je $z = \frac{e}{e_0}$ i $\psi = \frac{W_b}{W_{b0}}$.

b) promena površine sagorevanja baruta:

$$\sigma = \frac{S_b}{S_{b0}} = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2 \quad (3.2)$$

c) brzina sagorevanja baruta:

$$u = u_1 p \quad (3.3)$$

d) brzina formiranja gasova:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_{b0}}{W_{b0}} \frac{S_b}{S_{b0}} u_1 p \quad (3.4)$$

2. Jednačina održanja energije

Gasovi koji se obrazuju pri sagorevanju baruta sadrže veliku količinu toplotne energije, čiji deo se koristi na saopštavanje kinetičke energije projektilu, punjenju i cevi i savlađivanje otpora tim kretanjima; drugi deo energije se u vidu toplote predaje zidovima cevi oruđa. Osim ovoga, deo energije sadržan u barutnim gasovima ostaje neiskorišćen i biva izbačen sa barutnim gasovima iz cevi oruđa u atmosferu, posle napuštanja cevi od strane projektila. Pošto pri opaljenju dolazi do transformacije energije to osnovnu zavisnost za ovaj proces daje prvi zakon termodinamike ili zakon održanja energije, koji u diferencijalnom obliku glasi:

$$dQ = dU + d(\Sigma L) \quad (3.5)$$

gde je :

- Q - količina toplote predata sistemu kao posledica sagorevanja baruta,
U - unutrašnja energija barutnih gasova,
 ΣL - zbir spoljnih radova koje izvrše gasovi pri opaljenju.

Ova zavisnost se preobražava u tzv. osnovnu jednačinu unutrašnje balistike.

3. Jednačine translatornog kretanja projektila i trzajućih delova oruđa

Translatorno kretanje projektila i trzajućih delova oruđa opisuje se sledećim jednačinama:

a) za projektil

$$\begin{aligned} p_s &= \varphi m \frac{dv}{dt} \\ p_s &= \varphi m v \frac{dv}{dl} \end{aligned} \quad (3.6)$$

b) za trzajuće delove oruđa

$$p_z s = M \frac{dV}{dt} \quad (3.7)$$

Ovde je:

p -	pritisak gasova u prostoru iza projektila
s -	poprečni presek cevi oruđa
m -	masa projektila
φ -	koeficijent fiktivnosti koji uzima u obzir sekundarne radove barutnih gasova pri opaljenju ($\varphi > 1$)
v -	brzina projektila
l -	pređeni put projektila
p_z -	pritisak gasova na dno kanala cevi (zatvarač)
M -	masa trzajućih delova oruđa
V -	brzina trzajućih delova oruđa

4. Jednačina obrtnog kretanja projektila

Jednačina obrtnog kretanja projektila ima oblik:

$$rN_o = I \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.8)$$

gde je:

r -	rastojanje od ose projektila do centra aktivne strane vodećeg prstena (gde deluje N_o)
N_o -	sila koja izaziva obrtanje
I -	moment inercije projektila u odnosu na obrtnu osu
Ω -	ugaona brzina projektila
$d\Omega/dt$ -	ugaono ubrzanje projektila

5. Zavisnost između brzine projektila i brzine trzajućih delova oruđa

Pri opaljenju sistem punjenje - projektil - cev se kreće pod dejstvom unutrašnjih sila - pritiska barutnih gasova i može se primeniti poznata teorema mehanike: delovi sistema, na koji deluju unutrašnje sile, kreću se tako da je njihov zbir količina kretanja jednak nuli:

$$mv_a + \mu U + MV = 0 \quad (3.9)$$

Ovde je:

v_a -	apsolutna brzina projektila
μ, U -	masa i brzina barutnih gasova
M, V -	masa i brzina trzajućih delova

Ova jednačina daje vezu između brzine projektila i brzine trzajućih delova.