Mr Radenko Dimitrijević,
potpukovnik, dipl. inž.
Dr Radun Jeremić,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

ISPITIVANJE BRZINE DETONACIJE MALODIMNIH BARUTA

UDC: 623.51:623.485

Rezime:

U određenim uslovima malodimni baruti, laborisani u uskladištenim ubojnim sredstvima, mogu detonirati. S obzirom na njihov značajan udeo u ukupnoj masi eksplozivnih materija laborisanih u ubojnim sredstvima, za pouzdanu procenu pirotehničke bezbednosti neophodno je utvrditi njihov realan doprinos neto količini čistog eksploziva, što je moguće jedino na osnovu poznavanja detonacionih karakteristika. Radi toga ispitivan je kritični prečnik i zavisnost brzine detonacije od prečnika punjenja za nekoliko tipova malodimnih baruta koji se kod nas najčešće primenjuju za pogon projektila, što je prikazano u ovom radu.

Ključne reči: brzina detonacije, malodimni baruti, kritični prečnik.

SMOKELESS POWDERS DETONATION RATE TESTING

Summary:

Under certain conditions smokeless powders assembled in stored explosive ordnance can detonate. Since their content in the total mass of explosive materials assembled in explosive ordnance is significant, it is necessary to determine their real contribution to the net quantity of the pure explosive in order to obtain a reliable estimation of pyrotechnic safety, which can be done only if based on the previous knowledge of detonation characteristics. For that reason the critical diameter and the dependence of detonation rate on the charge diameter are tested for several types of smokeless powders most frequently used for the charge of projectiles.

Key words: detonation rate, smokeless powders, critical diameter.

Uvod

Osnovni oblik eksplozivnog pretvaranja malodimnih baruta jeste sagorevanje (deflagracija). Proces sagorevanja potisnih eksplozivnih materija (EM) u eksploatacionim uslovima odvija se pri relativno visokim pritiscima, koji kod malodimnih baruta mogu iznositi i nekoliko hiljada bara. U takvim uslovima proces sagorevanja poprima karakter eksplozivnog sagorevanja ili deflagracije koje prati i pojava udar-

nog talasa. Čak i u tim uslovima proces sagorevanja ima karakter stabilnog, slojevitog sagorevanja.

Međutim, u određenim kritičnim uslovima, malodimni baruti mogu i detonirati, pri čemu su posledice po okolnu sredinu slične kao i pri detonaciji brizantnih eksploziva. Takvih slučajeva je bilo u praksi.

Proces detonacije malodimnih baruta može se inicirati detonacijom određene količine brizantnog ili inicijal-

nog eksploziva, ili može doći do prelaska procesa sagorevanja u detonaciju, ako se postignu kritični uslovi.

S obzirom na to da baruti u ukupnoj masi EM u UbS učestvuju preko 50%, neophodno je da se utvrde uslovi pri kojima realna pogonska punjenja mogu prihvatiti detonaciju u slučaju eksplozije uskladištenih UbS u masi. Radi toga je neophodno detaljno ispitati njihove detonacione karakteristike, kao što su: sposobnost prihvatanja detonacije, kritični prečnik, brzina detonacije kao i njihovu zavisnost od različitih parametara.

Zavisnost brzine detonacije od prečnika punjenja

Poznato je da brzinu detonacije uglavnom određuje toplota eksplozije ako su ostali uslovi jednaki. Pored nje na brzinu detonacije utiču i ostali fizički uslovi, kao što su: prečnik eksplozivnog punjenja, gustina, agregatno stanje, vrsta i kvalitet obloge, dimenzije čestica i sl. Neki od navedenih faktora utiču na brzinu detonacije samo u određenom obimu i do određene granice.

Zavisnost brzine detonacije od prečnika punjenja proučavali su mnogi autori [1], a na osnovu njihovih radova može se reći da:

— postoji minimalni prečnik eksplozivnog punjenja ispod kojeg detonacija, bez obzira na način i jačinu inicijacije, nije moguća,

— taj prečnik naziva se kritični prečnik — d_{kr} ,

— sa povećanjem prečnika brzina detonacije raste,

— brzina detonacije raste sve dok ne dostigne maksimalnu vrednost, a dalje povećanje prečnika ne dovodi do povećanja brzine detonacije,

— prečnik kod kojeg je brzina detonacije maksimalna naziva se granič-

ni prečnik — d_{gr} , a brzina detonacije kod tog prečnika — idealna brzina — D_{id} .

Na osnovu navedenog opšti oblik zavisnosti brzine detonacije od prečnika eksplozivnog punjenja prikazan je na slici 1.

Sl. 1 — Opšta zavisnost brzine detonacije od prečnika eksplozivnog punjenja

Na veličinu kritičnog prečnika utiču mnogobrojni parametri od kojih su najvažniji vrsta i sastav EM, početna temperatura, gustina eksplozivnog punjenja, karakteristike i debljina obloge eksplozivnog punjenja, granulacija EM, itd.

U literaturi se mogu naći različiti modeli za opisivanje zavisnosti brzine detonacije od prečnika punjenja.

Aproksimirajući krivu na slici 1

u linearnu zavisnost između $\left(\frac{D_{id}}{D}\right)^2$ i

$\left(\frac{D_{id}}{D} \cdot \frac{2a}{d}\right)^2$ Džons je dobio sledeću jednačinu [2]:

$$\left(\frac{D_{id}}{D}\right)^2 \cong 1 + B \left(\frac{2\tau}{d}\right)^2 \quad (1)$$

gde je:

$\tau \equiv a/D$,

B — konstanta sa vrednošću $0,8 \cdot 10^{-9} D_{id}^2$, pri čemu je d (cm), τ (μs) i D_{id} (ms^{-1}).

U skraćenom obliku, izražena preko širine zone hemijskih reakcija — *a*, i koristeći SI jedinice, ova jednačina ima oblik:

$$\left(\frac{D}{D_{id}}\right)^2 = 1 - 3,2 \left(\frac{a}{d}\right)^2 \tag{2}$$

Za razliku od Džonsa, Ejring sa saradnicima, pri određivanju uticaja prečnika punjenja na brzinu detonacije, krenuo je od eksperimentalno utvrđene zakrivljenosti fronta detonacionog talasa. Njihov rezultat za punjenja bez obloge moguće je prikazati u sledećem obliku [3]:

$$D = D_{id} - \frac{a \cdot D_{id}}{d} \tag{3}$$

Za eksplozive velike gustine Kem-pbel je utvrdio sledeću zavisnost brzine detonacije od prečnika punjenja [4]:

$$D = D_{id} - \frac{D_{id} \cdot a}{d - d_{kr}} \tag{4}$$

Ipak, i pored dobre teoretske utemeljenosti, osnovna zamerka za ove tri teorije jeste što se širina zone hemij-

skih reakcija smatra konstantnom. Čak se i podaci dobijeni pomoću njih bitno razlikuju.

Očigledno je da samo korektni eksperimentalni podaci o širini zone hemijskih reakcija u detonacionom talasu mogu dati odgovor na pitanje kako se menja brzina detonacije sa prečnikom punjenja. Čak se i parametri detonacionog talasa, dobijeni različitim eksperimentalnim metodama (odbijanje metalnih pregrada, elektromagnetna metoda), razlikuju nekoliko puta [1]. Podaci za vreme i širinu zone reakcije se međusobno razlikuju za 5 do 10 puta. Pored toga, i pravilna pretpostavka o mehanizmu odvijanja hemijskih reakcija u zoni može dati objašnjenja za mnoge eksperimentalne činjenice.

Eksperiment

Ispitivanje detonacionih karakteristika sprovedeno je na:

- nitroglicerinskom pločastom barutu, NGB, tip A, B, C i D,
- nitroceluloznom pločastom barutu, NC, tip A i B.

Oblici, dimenzije i hemijski sastav ovih baruta prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1

Oblici i dimenzije ispitivanih malodimninih baruta

Vrsta baruta	Oblik	Debljina <i>w_a</i> (mm)	Širina <i>a</i> (mm)	Dužina <i>L</i> (mm)	NC %	NGI %
NGB, tip A	pločica	0,10	0,6	0,6	57,5	40,5
NGB, tip B	pločica	0,20	1,5	1,5	57,5	40,5
NGB, tip C	pločica	0,55	3,0	3,0	57,5	40,5
NGB, tip D	pločica	0,90	10,0	10,0	57,5	40,5
NC, tip A	pločica	0,10	1,3	1,5	98,7	
NC, tip B	pločica	0,30	1,25	1,35	98,6	

Merenje brzine detonacije obavljeno je pomoću uređaja za merenje brzine detonacije »EXPLOMET«. Princip rada uređaja zasniva se na merenju vremena za koje detonacioni talas pređe određeno rastojanje u eksplozivnoj materiji (L). Kao senzori za registrovanje nailaska udarnog talasa koriste se optička vlakna. Tačnost instrumenta je ± 10 m/s.

Detonacija je ispitivana na standardizovanim cilindričnim punjenjima, različitih prečnika i konstantne dužine $l=600$ mm. Punjenja su formirana u oblogama od papira, tako da se mogu smatrati punjenjima bez obloge (slika 2).

Tabela 2

Rezultati određivanja kritičnih prečnika ispitivanih baruta

Vrsta baruta	Kritični prečnik d_{kr} (mm)	Zapremina barutnog zrna (mm ³)	Srednja gustina punjenja ρ_{sr} (g/cm ³)
NGB-tip A	14	0,036	0,870
NGB-tip B	20	0,45	0,858
NGB-tip C	34	4,95	0,898
NGB-tip D	55	90	0,803
NC-tip A	20	0,195	0,539
NC-tip B	24	0,506	0,628

Sl. 2 — Izgled barutnog punjenja za ispitivanje detonacije

Za aktiviranje barutnih punjenja korišćeno je eksplozivno punjenje od plastičnog eksploziva na bazi pentrita, mase 75 g. Iniciranje je vršeno standardnom detonatorskom kapislom br. 8 i sporogorećim štapinom.

Rezultati ispitivanja

Pri određivanju kritičnih prečnika baruta pošlo se od većih prečnika punjenja ka manjim. Za kritični prečnik smatrano je punjenje najmanjeg prečnika koje je prihvatilo detonaciju u tri ponavljanja. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 2.

Dobijeni rezultati pokazuju da se kritični prečnici malodimnih baruta prilično razlikuju od kritičnih prečnika ostalih eksploziva. Kod inicijalnih i brizantnih eksploziva kritični prečnici se kreću od 0,01 mm (olovo azid) do 10 mm (presovani trotil). Kod malodimnih baruta najmanji $d_{kr} \approx 14$ mm je za barut NGB-tip A. Kod ostalih baruta kritični prečnici su daleko veći. Analizom eksperimentalnih rezultata ne može se uočiti opšta zavisnost kritičnih prečnika pločastih malodimnih baruta tipa balistita od gustine punjenja. Međutim, kod pločastih nitroceluloznih baruta zapaža se rast kritičnih

prečnika sa porastom nasipne gustine, što ukazuje na sličnost sa eksplozivima na bazi amonijum-nitrata.

Rezultati merenja pokazuju da kritični prečnici rastu sa povećavanjem zapremine barutnih zrna. To važi kako za balistite tako i za nitrocelulozne barute. Sa porastom dimenzija (zapremine) barutnih zrna rast kritičnih prečnika je sve manji, tako da se može pretpostaviti da ima svoj maksimum iza kojeg bi trebalo da pada i približava se vrednosti kritičnih prečnika barutne mase.

Za barute kojima su određeni kritični prečnici ispitivan je uticaj prečnika punjenja na brzinu detonacije. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 3.

Regresionom analizom rezultata zavisnosti brzine detonacije od prečnika punjenja po jednačinama (3) i (4) dobijene su vrednosti idealne brzine detonacije, kritičnog prečnika i širine zone hemijskih reakcija (tabela 4).

Na slici 3 grafički su prikazani uporedni rezultati merenja i rezultati regresione analize zavisnosti brzine detonacije od prečnika punjenja. U tabeli 4 su, pored podataka dobijenih regresionom analizom eksperimentalnih rezultata, date i procenjene idealne brzine detonacije $D_{id. proc.}$ za sve ispitivane barute. Ova praksa je poznata u literaturi i služi kao ocena uspešnosti regresione analize eksperimentalnih rezultata [5].

Tabela 3

Rezultati ispitivanja zavisnosti brzine detonacija od prečnika punjenja

Tip baruta	Gustina punjenja (g/cm ³)	Prečnik punjenja (mm)						
		Prečnik punjenja (mm)						
NGB tip A	0,877	15	19	22	24	29,5	35	40
		3898	4250	4464	4440	4568	4845	4949
NGB tip B	0,898	23	26	30	34	50		
		3710	3980	4048	4419	4643		
NGB tip C	0,957	34	40	44	49	55	63	
		3000	3692	4177	4282	4457	4643	
NGB tip D	0,808	58	64	69	71	75		
		1002	2694	2777	2970	3179		
NC tip A	0,557	25	30	34	39	45	51	
		2216	2301	2591	2755	2797	3198	
NC tip B	0,621	25	30	35	40	45		
		2435	3060	3289	3444	3720		

Detonacioni parametri dobijeni regresionom analizom

Barut	NGB-tip A	NGB-tip B	NGB-tip C	NGB-tip D	NC-tip A	NC-tip B
D_{id} (m/s)*	5495	5485	6680	10477	3929	5220
D_{id} (m/s)**	5714	5258	5333	3445	>7600	4446
$D_{id,proc.}$ (m/s)	5200	4900	4800	3400	3400	3900
$D_p=0,885$	5766	5182	4932	3773	4155*	4951*
d_{kr} (mm)**	-5	6	22	55	<-100	12
d_{kr} (mm)	14	20	34	55	20	24
$a=d_{kr}$ (mm)*	4,36	7,34	18,01	50,75	11,54	13,04
a (mm)**	6,28	5,00	5,26	2,13	>90	5,84
ρ_{st} (g/cm ³)	0,877	0,898	0,957	0,808	0,557	0,621

* rezultati dobijeni regresionom analizom po jednačini (3)

** rezultati dobijeni regresionom analizom po jednačini (4)

^a preračunate vrednosti na srednju gustinu NC baruta $\rho=0,589$ g/cm³

Analizom dobijenih rezultata može se zaključiti da jednačina (4) daje najbolje rezultate za D_{id} balistita. Ako se uzmu u obzir dimenzije barutnih pločica (tabele 1 i 2), vidi se da vrednosti D_{id} padaju sa njihovim povećanjem. Malo odstupanje se uočava kod NGB-tip B i NGB-tip C, ali posle svođenja na prosečnu gustinu svih balistita (0,885 g/cm³) ono se gubi. Ista jednačina ne opisuje dobro idealne brzine nitroceluloznih baruta. Regresiona analiza za NC-tip A daje preveliku D_{id} , što se ne može prihvatiti.

Jednačina (3) daje prihvatljivije vrednosti D_{id} za nitrocelulozne barute. To odgovara literaturnim podacima, jer je ova jednačina primenljiva za eksplozive male gustine. Ovi baruti imaju gustine baš u tom opsegu (0,5 do 0,7 g/cm³). Međutim, kao što se vidi iz tabele 4, barut NC-tip B, koji ima 2,5 puta veću barutnu pločicu od baruta NC-tip A, ima i veću brzinu detonacije, što

ne odgovara podacima iz literature. Karakteristično je da je i procenjena brzina detonacije za NC-tip B veća od brzine za NC-tip A što ukazuje da razloge odstupanja od opšteg pravila treba tražiti u drugim parametrima, prvenstveno gustini, odnosno poroznosti pločica nitroceluloznih baruta.

Za balistite ova jednačina ne daje logične vrednosti D_{id} . Sa povećanjem dimenzija barutnog zrna ove vrednosti rastu da bi za NGB-tip D ona iznosila čak 10477 m/s. Takav rezultat se mogao i očekivati, jer balistiti sa svojim prosečnim gustinama od 0,885 g/cm³ ne spadaju u eksplozive male gustine. Zbog toga se ta jednačina i ne može primeniti na njih.

Kod ispitivanih malodimnih baruta utvrđen je isti karakter zavisnosti brzine detonacije od prečnika punjenja kao i kod brizantnih eksploziva. Ta zavisnost se za balistite može opisati jednačinom (4), a za nitrocelulozne barute jednačinom (3).

Sl. 3 — Regresione krive zavisnosti brzine detonacije od prečnika punjenja

Suprotno podacima iz literature po kojima granulacija određuje samo brzinu dostizanja idealne brzine detonacije, a ne i njenu konačnu vrednost, utvrđeno je da idealna brzina detonacije malodimnih baruta zavisi od granulacije, a najverovatnije i od oblika barutnih pločica.

Vrednosti d_{kr} dobijene po jednačini (4) slede poznato pravilo da kritični prečnici rastu sa porastom dimenzija barutne pločice. Međutim, osim za NGB-tip D, eksperimentalne i računске

vrednosti kritičnih prečnika dosta se razlikuju. Razlike se mogu pripisati malom broju merenja na ekstremnim vrednostima.

Jednačina (4) ne daje logične vrednosti d_{kr} za nitrocelulozne barute. Kao što je već istaknuto, ova jednačina i nije primenljiva za eksplozive malih gustina, kao što su nitrocelulozni baruti. Iz uslova da je pri $D=0 \Rightarrow d=d_{kr}$, onda iz jednačine (3) sledi da je:

$$a = d_{kr}. \quad (5)$$

Ova jednakost je i osnovni nedostatak jednačine (3), jer je teško prihvatiti da su kritični prečnik i širina zone hemijskih reakcija iste veličine. S obzirom na to da ova jednačina dobro opisuje eksperimentalne rezultate za eksplozive male gustine, njena praktična primena je opravdana.

Ipak, vrednosti d_{kr} po jednačini (3) za sve ispitivane barute su logične. Veća odstupanja kod nekih baruta posledica su malog broja merenja na ekstremnim vrednostima prečnika. Najbolje slaganje je kod balistita NGB-tip D.

Ako se ove vrednosti d_{kr} posmatraju kao širine zona hemijskih reakcija a, što proizilazi iz karaktera jednačine (3), rezultati su, takođe, prihvatljivi, jer je poznato da su one nešto manje od d_{kr} . Zapaža se njihov rast u zavisnosti od dimenzija barutnih pločica. Takođe je i vrednost a za NC-tip B veća od vrednosti za NC-tip A, kao što su i dimenzije barutnih pločica veće. U literaturi nema podataka o zavisnosti širine zone hemijskih reakcija od granulacije.

Širine zona hemijskih reakcija, izračunate po jednačini (4), padaju sa povećanjem dimenzija barutnih pločica. Dosadašnja literatura ne pominje ovakvu zakonitost za detonaciju čiji je mehanizam udarno sabijanje vazdušnih uključaka. Bez obzira na već pomenuti nedostatak broja merenja, sa velikom sigurnošću može se reći da ova jednačina nije primenjiva za određivanje veličine a. Da bi bili apsolutno sigurni, potrebno je tačno odrediti mehanizam odvijanja detonacije balistita; na primer, ispunjavanjem praznog prostora između barutnih pločica vodom i određivanjem detonacionih karakteristika jednog takvog sistema [6].

Opšte je pravilo da je brzina dostizanja D_{id} veća ako je granulacija posmatranog eksploziva manja, naravno, za istu gustinu. To znači da bi krive zavisnosti brzina detonacije — prečnik punjenja trebalo da budu strmije što

su dimenzije barutnih pločica manje. Već prvi pogled na sliku 3 govori da nije tako. Naprotiv, situacija je potpuno obrnuta. Kriva za NGB-tip C je daleko strmija od krive za NGB-tip A, a kriva za NGB-tip D samo potvrđuje to pravilo. Slična zavisnost uočava se i za nitrocelulozne barute. Regresiona analiza za NC-tip A po jednačini (4) daje ekstremno velike vrednosti D_{id} i d_{kr} (tabela 4). Praktično, dobijena hiperbola je veoma »ispravljena«, pa je regresiona analiza sprovedena za linearnu jednačinu.

Ova pojava je verovatno slična opisanoj ekstremno velikoj brzini detonacije pentrita i heksogena velike granulacije pri malim nasipnim gustinama [1]. Ukoliko su dimenzije čestica eksploziva veće od kritičnih dimenzija, detonacija se prenosi u svakoj čestici pojedinačno i postiže se brzina detonacije kao da se radi o homogenoj eksplozivnoj materiji.

Nasuprot barutu NGB-tip D balistiti manjih dimenzija poseduju vazdušne prostore između zrna takođe malih dimenzija koji se mogu smatrati vazdušnim uključcima. Istovremeno, sitniji baruti ne mogu stvoriti konglomerate natkritičnih dimenzija, tako da se detonacija prostire jedinstvenim mehanizmom — udarnim sabijanjem vazdušnih uključaka, prodiranjem produkata detonacije i pojedinačnim sagorevanjem barutnih pločica.

Zaključak

Rezultati ispitivanja pokazuju da presudan uticaj na veličinu kritičnih prečnika malodimnih baruta imaju dimenzije i oblik barutnih zrna. Kritični prečnici malodimnih baruta slični su kritičnim prečnicima eksploziva malih gustina, kao što su eksplozivi na bazi amonijum-nitrata.

Kod ispitivanih malodimnih baruta utvrđen je isti karakter zavisnosti brzine detonacije od prečnika punje-

nja kao i kod brizantnih eksploziva. Ta zavisnost se za balistite može opisati jednačinom (4), a za nitrocelulozne barute jednačinom (3).

Suprotno podacima iz literature, po kojima granulacija određuje samo brzinu dostizanja idealne brzine detonacije, a ne i njenu konačnu vrednost, utvrđeno je da idealna brzina detona-

cije malodimnih baruta zavisi od granulacije, a najverovatnije i od oblika barutnih pločica.

Pri detonaciji nekih balistita uočena je i pojava dva režima detonacije, koja je već proučena kod mnogih eksploziva male gustine kao i kod nitroglicerina.

L i t e r a t u r a:

- [1] K. P. Stanjuković (urednik), Fizika vzriva, Nauka, Moskva, 1975.
- [2] H. Jones, Proc. Roy. Soc., A189 (1947), 415.
- [3] H. Eyring, R. E. Powell, G. H. Duffey, R. B. Parlin, Chem. Rev., 45 (1949), 69.
- [4] A. W. Campbell, R. Engelke, The diameter effect in high density heterogeneous explosives, Proc. Sixth Symposium (International) of Detonation, ACR-221, 642-652, 1976.
- [5] J. Lee, P.-A. Persson, Prop. Expl. Pyr., 15 (1990), 208.
- [6] M. Dervaux, J. Mala, Influence de la granulometrie de la charge sur les Proprietes detoniques d'explosifs composites, XIX International Conference of ICT, Karlsruhe, 1988.