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

ISPITIVANJE NEKIH DETONACIONIH OSOBINA MALODIMNIH BARUTA

UDC: 662.311.001.4

Rezime:

Za pouzdanu procenu pirotehničke bezbednosti neophodno je poznavati količinu eksplozivnih materija u uskladištenim ubojnim sredstvima koja može odjednom detonirati u masi. U određenim uslovima i malodimni baruti su skloni detonaciji. S obzirom na to da čine preko 50% ukupne mase eksplozivnih materija laborisanih u ubojnim sredstvima vrlo je važno da se tačno utvrdi njihov udeo u neto količini čistog eksploziva. To je i cilj ispitivanja detonacionih osobina nekoliko tipova malodimnih baruta koji se kod nas najčešće primenjuju za pogon projektila, a u radu su izneti eksperimentalni rezultati.

Ključne reči: detonacione osobine, malodimni baruti, kritični prečnik.

TESTING DETONATION PROPERTIES OF SMOKELESS POWDERS

Summary:

For the reliable evaluation of pyrotechnic safety it is necessary to know the quantity of explosive materials in stored explosive ordnance which can suddenly detonate in the mass. Under certain conditions smokeless powders also have a tendency to detonate. Bearing in mind that smokeless powders amount to more than 50% of the total mass of explosive materials in explosive ordnance, it is very important to determine their accurate content in the pure explosive net weight. This was the objective of testing the detonation properties of several types of smokeless powders most commonly used for projectile charges in our country. The experimental results of these tests are presented as well.

Key words: detonation properties, smokeless powders, critical cross section.

Uvod

Malodimni baruti su vrsta potisnih eksplozivnih materija (EM) kod kojih je proces sagorevanja (deflagracije) osnovni oblik eksplozivnog pretvaranja. Pri tome se toplota potrebna za odvijanje procesa hemijskog razlaganja prenosi kroz EM, uglavnom, termičkom provodljivošću. Zato je i brzina sagorevanja relativno mala i, zavisno od vrste EM i pritiska, kreće se od nekoliko milimetara pa do nekoliko desetina metara u sekundi, za razliku od procesa detonacije, čija

je brzina reda veličine nekoliko hiljada metara u sekundi.

Sagorevanje potisnih EM u eksploatacionim uslovima odvija se pri relativno visokim pritiscima, koji u slučaju baruta mogu iznositi i nekoliko hiljada bara. U takvim uslovima proces sagorevanja poprima karakter eksplozivnog sagorevanja ili deflagracije koje prati i pojava udarnog talasa. Čak i u tim uslovima proces sagorevanja ima karakter stabilnog, slojevitog sagorevanja.

Međutim, u određenim kritičnim uslovima potisne EM mogu i detonirati, pri čemu su posledice po okolnu sredinu slične kao i pri detonaciji brizantnih eksploziva. Takvih primera bilo je u prošlosti. Na primer, na francuskim brodovima »Jena«, 1907. godine, i »Liberta«, 1911. godine, došlo je do eksplozije nitroceluloznih baruta. Samo na »Liberti« eksplozija je usmrtila više od 200 mornara i oficira.

Proces detonacije potisnih EM može se inicirati detonacijom određene količine brizantnog ili inicijalnog eksploziva ili može doći do prelaska procesa sagorevanja u detonaciju, ako se postignu kritični uslovi.

Zato je proučavanje procesa detonacije potisnih EM od velikog teorijskog i praktičnog značaja za utvrđivanje uslova pri kojima proces sagorevanja može preći u detonaciju, kao i za predviđanje mogućnosti prihvatanja i prenošenja detonacije realnih pogonskih punjenja u ubojnim sredstvima (UbS) u slučaju masovne eksplozije uskladištenih UbS.

Prema našim starijim propisima [1] malodimni baruti činili su polovinu mase neto količine eksploziva za proračun dejstva udarnog talasa na okolnu sredinu u slučaju masovne eksplozije uskladištenih UbS. Međutim, za to nisu postojale nikakve teorijske i empirijske osnove.

Prema propisima novijeg datuma [2] masi brizantnih eksploziva dodaje se odgovarajući ekvivalent za malodimne barute, raketna goriva i pirotehničke smeše, ako postoji. Taj ekvivalent određuje se posebnim testovima za koje nema podataka u literaturi. U nedostatku tih testova ove EM tretiraju se kao i ostali brizantni eksplozivi, tj. celokupnom svojom količinom, ulaze u neto količinu čistog eksploziva.

Poseban problem jeste što se, bez odgovarajućih testova, UbS ne mogu

svrstati u odgovarajuću grupu opasnosti prema preporukama UN [3].

U oružanim snagama SAD nelaborisani baruti i raketna goriva sa tog aspekta tretiraju se kao i ostali brizantni eksplozivi. Međutim, baruti i raketna goriva laborisana u UbS, podvrgavaju se posebnim ispitivanjima prema odgovarajućim standardima i propisima radi utvrđivanja njihovog učešća u količini čistog eksploziva koja se uzima u obzir prilikom procene posledica dejstva UbS koja detoniraju u masi. Ova ispitivanja uključuju određivanje kritičnih prečnika malodimnih baruta, prenos detonacije u sredstvima pakovanja, između sredstava pakovanja, između stokova UbS, paljenje na lomači, itd.

S obzirom na to da baruti čine preko 50% [4] ukupne mase EM u UbS, posledice nepreciznosti u određivanju neto količine eksploziva mogu biti velike. Zbog toga nije pravilno određen stepen ugroženosti objekata oko skladišta UbS, niti verovatnoća prenosa detonacije sa jednog magacina UbS na drugi.

Imajući sve to u vidu može se zaključiti da je za precizno utvrđivanje doprinosa malodimnih baruta količini EM laborisanih u UbS, koje mogu odjednom detonirati, neophodno detaljno ispitati njihove detonacione karakteristike, kao što su: sposobnost prihvatanja detonacije, brzina detonacije, kritični uslovi detonacije, itd.

Osnovne postavke teorije detonacije

Detonacija predstavlja proces supersoničnog prostiranja fronta reakcija hemijskog razlaganja kroz eksplozivnu materiju pomoću udarnog talasa. Ako su brzine reakcija toliko velike da se dostiže stanje hemijske ravnoteže, onda se radi o stacionarnoj ili

normalnoj detonaciji čija se brzina određuje samo na osnovu zakona termodinamike i hidrodinamike.

Prema hidrodinamičkoj teoriji, proces detonacije uslovljen je rasprostranjem udarnog talasa po EM. Ako je pritisak na frontu udarnog talasa veći od neke kritične vrednosti, onda je on u stanju da iza fronta pobuđuje intenzivne hemijske reakcije usled kojih se oslobađa energija neophodna za podržavanje parametara udarnog talasa i stacionarnog karaktera detonacije.

Reakcije eksplozivnog pretvaranja započinju usled dinamičkog sabijanja sloja EM, koja se nalazi pod normalnim pritiskom p_0 , i koja ima specifičnu zapreminu, V_0 ($\rho_0 = 1/V_0$ je njena početna gustina). Po EM, brzinom D , prostire se front udarnog talasa koji sabija materiju u skladu sa Hugoniotovom (ili udarnom) adiabatom za čvrstu EM, dovodeći je u stanje p_1V_1 (slika 1). Reakcije se odigravaju u zoni debljine nekoliko desetina mikrona do nekoliko desetina milimetara. Nakon završetka reakcije pritisak i specifična zapremina poprimaju vrednosti p_2 , V_2 , koje odgovaraju tački na udarnoj adijabati produkata detonacije. Nakon toga produkti detonacije se šire po izentropi (talas Taylora) koja prolazi kroz tačku p_2 , V_2 .

Sl. 1 — Udarna adiabatna eksplozivne materije i produkata detonacije

U slučaju da tačke (p_0, V_0) , (p_2, V_2) i (p_1, V_1) leže na istom pravcu, što znači da je brzina fronta udarnog talasa jednaka brzini zadnje granice zone hemijskih reakcija, radi se o stacionarnoj detonaciji. Ove tačke definišu Miheljsionovu pravu koja tangira udarnu adiabatnu produkata detonacije u tački (p_2, V_2) , poznatu kao Chapman-Jougeotova tačka ili C-J tačka.

Na osnovu zakona o očuvanju mase, energije i količine kretanja, pomoću hidrodinamičke teorije detonacionog talasa mogu se izvesti sledeće jednačine za parametre detonacionog talasa:

$$p - p_0 = \rho_0(D - w_0)(w - w_0), \quad (1)$$

$$D - w_0 = V_0 \sqrt{\frac{p - p_0}{V_0 - V}}, \quad (2)$$

$$w - w_0 = \sqrt{(p - p_0)(V_0 - V)}, \quad (3)$$

$$U - U_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V) + Q_v, \quad (4)$$

gde je:

- D — brzina detonacije,
- w — brzina produkata detonacije iza fronta detonacionog talasa,
- U — unutrašnja energija produkata detonacije,
- Q_v — toplota eksplozije, (indeks »0« označava stanje polazne eksplozivne materije).

Brzinu detonacije, pri ostalim jednakim uslovima, uglavnom, diktira toplota eksplozije. Pored nje, na brzinu detonacije utiču i drugi parametri, kao što su: prečnik eksplozivnog punjenja, gustina, agregatno stanje, vrsta i kvalitet obloge, dimenzije čestica i sl.

Pojam kritičnog prečnika

Zavisnost brzine detonacije od prečnika punjenja bila je predmet mnogobrojnih istraživanja [5, 6, 7] koja su pokazala da:

— postoji minimalni prečnik eksplozivnog punjenja ispod kojeg nije moguća detonacija, bez obzira na način i jačinu inicijacije, koji se naziva kritični prečnik, d_{kr} .

— sa povećanjem prečnika do određene granice brzina detonacije raste, sve dok ne dostigne maksimalnu vrednost.

Prečnik kod kojeg se postiže maksimalna brzina detonacije naziva se granični prečnik, d_{gr} , a brzina detonacije kod tog prečnika — idealna brzina detonacije, D_{id} (slika 2).

Sl. 2 — 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.

Sa povećavanjem početne temperature smanjuje se i kritični prečnik, što se objašnjava njenim uticajem na brzinu hemijskih reakcija u zoni hemijskih reakcija detonacionog talasa [8].

Sa smanjenjem veličine čestica EM smanjuju se takođe, d_{kr} i d_{gr} , kao i razlika između njih. To važi kako za homogene tako i za smese EM. Pored toga, veličina čestica ne utiče na veličinu D_{id} , ukoliko je gustina eksplozivnog punjenja (EP) ostala ista, ali utiče na brzinu dostizanja te vrednosti.

Obloga na EP otežava prodiranje bočnih talasa razređenja u produkte detonacije i njihovo delovanje na zonu hemijskih reakcija u detonacionom talasu, čime se smanjuje i kritični prečnik. Uticaj obloge izraženiji je kod eksploziva sa manjom brzinom detonacije, npr. privrednih eksploziva, nego kod brizantnijih, kao što je heksogen, a pogotovo kod inicijalnih eksploziva.

Obloga deluje na detonacione procese najviše kod relativno malih prečnika i gustina, dok je kod velikih prečnika i gustina delovanje obloge minimalno.

Što je obloga masivnija, manji je i kritični prečnik.

Uticaj gustine EM na brzinu detonacije

Ukoliko je prečnik punjenja veći od graničnog prečnika onda na brzinu detonacije utiču samo toplota eksplozije Q i gustina punjenja ρ_0 . Svi ostali faktori utiču samo na mogućnost pobuđivanja detonacije, procese prenoša, veličinu početnog impulsa, itd.

Mnogobrojni eksperimentalni rezultati ukazuju na to da brzina detonacije sa povećanjem gustine raste. Za eksplozive tipa $C_a-H_b-O_c-N_d$ i njihove smese, brzina detonacije uglavnom linearno zavisi od gustine i može se prikazati sledećom empirijskom jednačinom [9]:

$$D = A + B\rho_0, \quad (5)$$

gde su: A i B konstante.

Međutim, brzina detonacije ne raste monotono za sve vrednosti gusti-

ne EP. Usled pogoršanih uslova za odvijanje hemijskih reakcija, kod većih gustina, funkcija $D=f(\rho_0)$ dobija drugačiji karakter, kako je prikazano na slici 3.

Sl. 3 — Opšta zavisnost brzine detonacije od gustine EM

U početnom delu krive brzina detonacije raste sa gustinom i za neku vrednost gustine dostiže maksimum (tačka B). Sa daljim porastom gustine brzina se ili gasi ili naglo pada, da bi se kod neke gustine ρ_{kr} ugasila (tačka C). Ovaj oblik zavisnosti važi samo za punjenja dovoljno malog prečnika i, uglavnom, za smese na bazi amonijumnitrata, kao i slične kompozicije. Za ostale EM, u području gustina koje se mogu tehnološki ostvariti, zavisnost je, uglavnom, linearna.

Opis eksperimenta

Ispitivanje detonacionih karakteristika sprovedeno je na sledećim vrstama malodimnih baruta:

- nitroglicerinski pločasti baruti tipa balistita, NGB, tip A, B, C i D,
- nitroglicerinski cevasti topovski baruti, NGH, tip A i B,
- nitrocelulozni pločasti baruti, NC, tip A i B,
- nitrocelulozni zrnasti barut, NC, tip C,

— nitrocelulozni cevasti baruti, NC, tip D i E.

Oblik, dimenzije i sastav ovih baruta dati su u tabeli 1.

Merenje brzine detonacije vršeno je pomoću uređaja za merenje brzine detonacije EXPLOMET. Princip rada uređaja je u merenju vremena za koje detonacioni talas pređe određeno rastojanje po eksplozivnoj materiji. Kao senzori za registrovanje nailaska udarnog talasa koriste se optička vlakna.

Uređaj omogućuje merenje brzine detonacije svih vrsta eksploziva: čistih jedinjenja i njihovih smeša, privrednih eksploziva, kašastih (slurry) eksploziva, itd. Merenje brzine detonacije moguće je u temperaturnom intervalu od 0 do 50°C. Preciznost instrumenta je ± 10 m/s.

Detonacija je ispitivana na standardizovanim cilindričnim punjenjima, različitih prečnika, a konstantne dužine od 600 mm. Punjenja pločastih i zrnastih baruta formirana su u oblogama od papira, nasipanjem do približno gravimetrijske gustine, tako da se ovakva punjenja mogu smatrati punjenjima bez obloge (slika 4). Punjenja od cevastih baruta formirana su u obliku snopova određenog prečnika.

Sl. 4 — Izgled barutnog punjenja za ispitivanje detonacije

Za aktiviranje barutnih punjenja, pri određivanju kritičnog prečnika, korišćeno je eksplozivno punjenje od plastičnog eksploziva na bazi pentri-

Oblik, dimenzije i sastav ispitivanih malodimnih baruta

Vrsta baruta	Oblik	Debljina w. [mm]	Širina a [mm]	Dužina L [mm]	Spoljni prečnik D [mm]	Unutr. prečnik d [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
NGH, tip A	Jednokanalna cilind. cevčica	1,8		256	5,8	2,2	56,0	26,8
NGH, tip B	Jednokanalna cilind. cevčica	2,40		363	7,32	2,52	56,0	26,8
NC, tip A	Pločica	0,10	1,3	1,5			98,7	
NC, tip B	Pločica	0,30	1,25	1,35			98,6	
NC, tip C	Jednokanalni cilindar	0,45		6,5	1,2	0,3	98,6	
NC, tip D	Jednokanalna cilind. cevčica	1,85		305	5,7	2,0	98,6	
NC, tip E	Jednokanalna cilind. cevčica	1,23		265	5,05	2,6	98,6	

ta, mase 75 g, a za ispitivanje osetljivosti na udarni talas korišćena su eksplozivna punjenja promenljive mase od istog eksploziva. Iniciranje je obavljeno standardnom detonatorskom kapislom br. 8 i sporogorećim štapinom.

Za ispitivanje uticaja obloge punjenja na brzinu detonacije korišćena je čaura metka 40 mm. Pored merenja brzine detonacije praćene su i druge pojave bitne za ocenu ponašanja baruta, kao što su: razbacani delovi punjenja ili čaure, oblik i dubina traga na peščanoj podlozi, itd.

Rezultati ispitivanja i diskusija

Određivanje kritičnog prečnika

Aktiviranje je obavljano na podlozi od sitnog peska. U slučaju da detonacija nije prihvaćena, na mestu eksplozije pronalazeni su ostaci punjenja ili njegovi delovi. U slučaju potpune detonacije, na pesku se jasno raznavalo izduženo udubljenje, dugo oko 750 mm, nešto šire i dublje na mestu gde se nalazilo podsticajno punjenje. Ukoliko nije prihvaćena deto-

nacija otisak na peščanoj podlozi je kraći ili je postojao samo otisak od podsticajnog metka.

U tabeli 2 prikazani su rezultati ispitivanja kritičnog prečnika za barut NGB, tip C.

najsličniji eksplozivima na bazi amonijum-nitrata ili amonijum-perhlorata.

Analizom eksperimentalnih rezultata ne može se uočiti opšta zavisnost kritičnih prečnika pločastih malodimnih baruta tipa balistita od srednje

Tabela 2

Rezultati određivanja kritičnog prečnika za barut NGB, tip C

Pločasti barut NGB, tip C					
d [mm]	ρ [g/cm ³]	M [g]	L [mm]	m [g]	Opis rezultata
10,5	0,800	41	600	75	Detonacija nije prihvaćena
14,5	0,858	85	600	75	Detonacija nije prihvaćena
18,5	0,878	141	600	75	Detonacija nije prihvaćena
23	0,901	224	600	75	Vrlo malo prihvatanje
26	0,887	282	600	75	Vrlo malo prihvatanje
27	0,908	312	600	75	Detonaciju prihvatila 1/10 b/p
30	0,967	410	600	75	Detonaciju prihvatile 2/3 b/p
36	0,872	532	600	75	Detonacija prihvaćena potpuno
39	0,939	673	600	75	Nije vršena proba
41	0,972	769	600	75	Detonacija prihvaćena potpuno
$d_{kr} \approx 34 \text{ mm}$					

Na analogan način određeni su i kritični prečnici za ostale ispitivane barute (tabela 3).

Dobijeni rezultati (tabela 3) pokazuju da se kritični prečnici malodimnih baruta dosta razlikuju od kritičnih prečnika ostalih eksploziva. Kod inicijalnih i brizantnih eksploziva kritični prečnici kreću se od 0,01 mm (olovni azid) do 10 mm (presovani trotil). Kod malodimnih baruta najmanji $d_{kr} \approx 14 \text{ mm}$ je za barut NGB, tip A. Kod ostalih baruta kritični prečnici su daleko veći. Što se tiče veličine kritičnih prečnika, malodimni baruti su

gustine punjenja. Ispitivanja su sprovedena u dosta širokom rasponu nasipnih gustina, što je posledica relativno velike granulacije i specifičnog oblika (pločice) ispitivanih baruta. Naime, kod većih granulacija nasipna gustina se povećava sa prečnikom punjenja. Pored toga, oblik (grafitirane pločice) omogućava sleganje prilikom manipulacije pripremljenim punjenjima. Raspon nasipnih gustina je minimalan kod sitnijih baruta.

Međutim, kod pločastih nitroceluloznih baruta zapaža se rast kritičnih prečnika sa porastom nasipne gustine,

što ukazuje na sličnost sa eksplozivima na bazi amonijum-nitrata.

Za cevaste barute, zbog malog broja opita, ne može se utvrditi bilo kakva zavisnost d_{kr} od gustine. Nasipne gustine punjenja od ovih baruta veće su od gustina pločastih i zrnastih ba-

nitrocelulozne barute. Sa porastom dimenzija (zapremine) barutnih zrna rast kritičnih prečnika je sve manji, tako da se može pretpostaviti da ima svoj maksimum iza koga bi trebalo da pada i približava se vrednosti kritičnih prečnika barutne mase.

Tabela 3

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
NGH, tip A	> 80	5791	1,107
NGH, tip B	> 80	13466	1,128
NC, tip A	20	0,195	0,539
NC, tip B	24	0,506	0,628
NC, tip C	> 80	6,89	0,783
NC, tip D	> 80	6825	1,03
NC, tip E	> 80	3901	0,817

ruta. Međutim, punjenja sa cevastim barutima poseduju relativno velike i izdužene šupljine. Za ove barute karakteristično je gotovo potpuno odsustvo poroznosti, jer se pomenute šupljine ne mogu smatrati vazдушnim uključcima.

Očigledno da na veličinu d_{kr} malodimnih baruta, pored gustine, presudan uticaj imaju oblik i veličina barutnih zrna. Dobijeni rezultati pokazuju da kritični prečnici rastu sa povećanjem zapremine barutnih zrna. To važi, kako za balistite, tako i za

Posebno interesantni su cevasti baruti. Oni koji su ispitivani imaju velike kritične prečnike koji nisu dostignuti na ispitivanim uzorcima. Ispitivanja su prekinuta na $d \approx 80$ mm, što su približni prečnici konkretnih b/p u artiklima UbS.

Ovi baruti imaju relativno velike gustine punjenja (oko 1,10 g/cm³), tako da je logično bilo očekivati manje vrednosti kritičnih prečnika. Očigledno je da presudan uticaj na kritične prečnike imaju dimenzije i oblik barutnih cevčica.

Ovaj fenomen može se objasniti mehanizmom iniciranja i prostiranja detonacije. U ovom slučaju, zbog velikih šupljina, svaka cevčica se ponaša kao individualno punjenje, tako da presudnu ulogu na prihvatanje i prenos detonacije ima debljina svoda barutnog zrna (w_a). Pod pretpostavkom da je $w_a < d_{kr}$, razumljivo je što su i d_{kr} ovih baruta daleko iznad najvećih vrednosti za pločaste barute. Velike šupljine između cevčica sprečavaju iniciranje i prostiranje detonacije mehanizmom udarnog sabijanja vazdušnih uključaka.

Kod balistita i sitnih nitroceluloznih baruta vazduh između zrna baruta je pomagao prostiranju detonacije (udarno sabijanje vazdušnih uključaka, prodiranje produkata, sagorevanje pojedinih zrna), ali u slučaju cevastih baruta, zbog svojih dimenzija, imao je suprotan efekat.

Analizom dobijenih rezultata za balistite i poređenjem sa realnim b/p (uglavnom kod minobacačkih projektila) može se zaključiti da u slučaju masovne eksplozije uskladištenih UbS ova b/p neće prihvatiti detonaciju. Dimenzije školjki kod dopunskih b/p minobacačkih projektila su, uglavnom, manje od utvrđenih kritičnih prečnika. Pored toga, školjka kod dopunskih b/p, i telo stabilizatora kod osnovnih b/p, veoma otežavaju proces prenošenja detonacije. Shodno tome, ti baruti ne moraju se uzimati u obzir pri proračunu neto količine eksploziva uskladištenih UbS.

Laborisani krupnozrnasti višekanalni baruti, kao i cevasti baruti, na osnovu analogije sa barutima NC-tip C, D i E i NGH-tip A i B, takođe nemaju uslova da detoniraju. To se posebno odnosi na b/p artiljerijske municije srednjeg kalibra (57 do 100 mm) koja su najčešće formirana od ovih vrsta baruta.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da većina realnih

b/p ne mogu detonirati u uslovima masovne eksplozije uskladištenih UbS. Međutim, za pouzdano utvrđivanje ekvivalenta malodimnih baruta u neto količini eksploziva, potrebna su dodatna ispitivanja, pre svega na konkretnim b/p (bez projektila) u skladišnim jedinicama (sanduk, paletna jedinica, stok UbS i sl.), kako bi se detaljnije proučio uticaj konfiguracije punjenja, čaure, ambalaže, načina pakovanja, i sl.

Osetljivost malodimnih baruta na detonacioni talas

Kao mera osetljivosti malodimnih baruta na detonacioni talas uzeta je minimalna količina plastificiranog pentrita koja je inicirala stabilnu detonaciju standardizovanog barutnog punjenja. Pri tome je korišćeno barutno punjenje identično punjenju za određivanje kritičnog prečnika. Barutna punjenja su formirana sa prečnicima koji su bili veći od kritičnih za 20 do 50%.

Iniciranje je vršeno standardnom detonatorskom kapislom br. 8, a onda je masa pentrita povećavana za po 1 g dok nije postignuta stabilna detonacija. Rezultati ispitivanja osetljivosti malodimnih baruta prikazani su u tabeli 4. Osetljivost je određivana samo za one barute kojima je određen kritični prečnik.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je osetljivost malodimnih baruta približna osetljivosti nekih brizantnih eksploziva, na primer, livenom trotilu, smesama na bazi amonijum-nitrata, i sl.

Polovina od ispitivanih baruta se lako iniciraju standardnom detonatorskom kapislom br. 8, a ostali zahtevaju minimalni pojačnik (1 do 8 g plastificiranog pentrita).

Slično kao i kod kritičnog prečnika zapaža se veliki uticaj dimenzija (zapremine) barutne pločice na osetljivost baruta. Na primer, balistit NGB,

povećanje kreće se čak i preko 20% kod baruta NC, tip A. Utvrđeno je da je najveće povećanje brzine detonacije kod baruta NGB, tip C, (16,8%) od

Tabela 4

Vrednosti osetljivosti malodimnih baruta

Vrsta baruta	Osetljivost [g]	Gustina punjenja ρ [g/cm ³]	Zapremina barutnog zrna [mm ³]	d [mm]	d _K [mm]
NGB, tip A	kap. br. 8	0,917	0,036	25	14
NGB, tip B	1	0,856	0,45	27	20
NGB, tip C	3	0,939	4,95	40	34
NGB, tip D	8	0,845	90	63	55
NC, tip A	kap. br. 8	0,566	0,195	30	20
NC, tip B	kap. br. 8	0,646	0,506	30	24

tip A, koji je najsitniji, lako detonira pri iniciranju sa kapislom br. 8, ali porastom dimenzija pločice količina pentrita potrebnog za izazivanje detonacije raste, da bi kod najkrupnijeg baruta NGB, tip D, iznosila 8 g.

Dakle, sa smanjenjem dimenzija barutnih pločica osetljivost baruta raste, što se slaže sa podacima iz literature [5].

Uticaj čaure na brzinu detonacije

Cilj ovih merenja bio je da se približno ispita uticaj čaure artiljerijskog metka na detonacione osobine malodimnih baruta, prvenstveno na brzinu detonacije. Ispitivanja su obavljena sa čaurom 40 mm za top D/40 i M1 sa svim ispitivanim barutima.

Kao što se i očekivalo, zapaža se povećanje brzine detonacije u čauri u odnosu na brzinu detonacije punjenja sa papirnom oblogom (tabela 5). To

svih ispitivanih balistita. Sa povećanjem brzine detonacije bez obloge smanjuje se uticaj čaure tako da kod baruta NGB, tip B, dolazi do povećanja od 8,8%, a kod baruta NGB, tip A, koji je najbrizantniji, čak smanjenje od 5,2%. Ovi rezultati su u skladu sa literaturnim podacima o uticaju obloge na brzinu detonacije brizantnih eksploziva [5].

Slični rezultati dobijeni su i kod nitroceluloznih baruta. Barut NC, tip A, ima povećanje brzine detonacije od 21,2%, dok barut NC, tip B, sa većom brzinom detonacije u papirnoj oblozi ima povećanje od samo 3,8%.

Kako su svi ostali uslovi merenja bili konstantni, može se zaključiti da presudan uticaj na stepen povećanja brzine detonacije u čauri, u odnosu na brzinu detonacije u papirnoj oblozi, imaju dimenzije i oblik barutnih pločica.

Pored povećanja brzine detonacije zapaža se i pojava detonacije baruta NGB-tip D, NC-tip C i NGH-tip A,

koji pri tim prečnicima nisu mogli detonirati. Ostala tri cevasta baruta nisu prihvatala detonaciju. To je u skladu sa literaturnim podacima [5] prema kojima metalna obloga smanjuje kritični prečnik.

Oznaka »st« odnosi se na brzine detonacije pri standardnoj gustini ρ_{st} pri kojoj je određivan odnos: brzina detonacije (D) — prečnik punjenja (d).

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da čaura u određenoj meri smanjuje kritične prečnike ma-

potrebno je, po ovoj metodologiji, ispitati sva barutna punjenja konkretnih UbS.

Sposobnost baruta za prenos detonacije

Cilj ovih ispitivanja bio je da se utvrdi sposobnost malodimnih baruta, kao aktivnih EP, da prenesu detonaciju na pasivno punjenje od brizantnog eksploziva. Izabran je pravac prenosa detonacije u smeru prostiranja detonacionog talasa — aksijalni pre-

Tabela 5

Poređenje brzine detonacije u čauri i brzine detonacije bez obloge za $d=45$ mm

Barut	D_{st} [m/s] u čauri	D_{st} [m/s] bez obloge	Pove- ćanje [%]	ρ [g/cm ³]	ρ_{st} [g/cm ³]	Primedba
NGB, tip A	4738	5000	—5,2	0,945	0,877	
NGB, tip B	4993	4590	8,8	0,881	0,898	
NGB, tip C	4814	4120	16,8	0,951	0,957	
NGB, tip D	3361	—	—	0,860	0,808	d_{kr} veće od 45 mm
NGH, tip A	2750	—	—	0,853	—	d_{kr} veće od 45 mm
NC, tip A	3540	2920	21,2	0,552	0,557	
NC, tip B	3840	3700	3,8	0,628	0,621	
NC, tip C	3494	—	—	0,796	—	d_{kr} veće od 45 mm

lodimnih baruta laborisanih u njoj. Međutim, sa sigurnošću se može tvrditi da barutna punjenja artiljerijske municije malog kalibra, laborisana zrnastim nitroceluloznim barutima (20, 23, 25, 30 i 37 mm), nemaju dovoljno velike prečnike za stabilnu detonaciju.

Za pouzdanu ocenu uticaja čaure na kritični prečnik laborisanih baruta i ocenu verovatnoće prihvatanja detonacije u uslovima masovne eksplozije

nos. Ovim eksperimentima simulirana je moguća situacija u praksi kada bi, zbog različitih razloga, došlo do detonacije konkretnih barutnih punjenja u UbS. U stvari, to bi bila simulacija prenosa detonacije sa barutnih punjenja na EP projektila. Pored toga, ova ispitivanja trebalo je da pokažu razlike u sposobnosti prenosa detonacije pojedinih vrsta malodimnih baruta. Kao aktivno punjenje korišćen je stan-

dardizovani oblik barutnog punjenja, a kao pasivno trotilski metak TM-100. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 6.

Za ocenu ponašanja municije sa aspekta prenosa detonacije potrebna su detaljnija istraživanja kojima bi se obuhvatio i prenos detonacije u sup-

Tabela 6

Poređenje prenosa detonacije na standardni trotilski metak TM-100

Barut	Daljina prenosa [mm]	M [g]	d [mm]	ρ [g/cm ³]	Zapremi-na zrna [mm ³]	p_H [kbar]	D [m/s]
NGB, tip A	17	375	29,5	0,914	0,036	54,8	4898
NGB, tip B	14	374	30	0,905	0,45	39,6	4182
NC, tip B	7	263	30	0,612	0,506	13,4	2956

Mase punjenja baruta NC, tip B, i NGB, tip B, međusobno se razlikuju za oko 30%. Prečnici barutnih punjenja su im isti, a i dimenzije barutnih pločica su slične. Istovremeno, daljine prenošenja detonacije razlikuju se za 50%. Veći procenat povećanja daljine prenosa u odnosu na procenat razlike u masama može se pripisati različitim hemijskim sastavima tih baruta.

Barutna punjenja od balistita NGB, tip A, i NGB, tip B, imaju skoro istu masu, prečnike i iste hemijske sastave. Gustine punjenja im se razlikuju minimalno — za 0,009 g/cm³. Ipak, balistit NGB, tip A, prenosi detonaciju na daljini koja je za 21% veća od daljine za NGB, tip B. Ova bitna razlika u daljinama prenosa može se objasniti samo velikim razlikama u dimenzijama barutnih pločica, zbog kojih se i brzine detonacije ovih baruta razlikuju.

Na osnovu dobijenih rezultata, a uzevši u obzir realan položaj barutnih punjenja prema EP projektila (međusobna udaljenost i različite prepreke među njima), sa sigurnošću se može tvrditi da je prenos detonacije sa barutnog punjenja na EP projektila malo verovatan.

rotnom smeru, sa EP projektila na barutno punjenje, uticaj različitih prepreka (kartonski distanceri, dance projektila, donji upaljači i sl.), zatim prenos detonacije u radijalnom smeru, itd.

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 cevastih baruta debljina svoda cevčice manja je od kritičnog prečnika, tako da barutna punjenja ne prihvataju detonaciju bez obzira na njihov prečnik.

Poređenjem vrednosti kritičnih prečnika ispitivanih baruta sa dimenzijama konkretnih barutnih punjenja može se zaključiti da jedan njihov deo ne može detonirati u uslovima masovne eksplozije UbS. To se naročito odnosi na barutna punjenja formirana od cevastih baruta.

Dobijeni rezultati ispitivanja osetljivosti malodimnih baruta pokazuju da presudan uticaj imaju dimenzije i oblik barutnih zrna. Malodimni baruti su po vrednostima osetljivosti slični nekim brizantnim eksplozivima, kao što su: liveni trotil, smese amonijum-nitrata i trotila, pikrinska kiselina itd.

Utvrđeno je da čaura artiljerijskog metka povećava brzinu detonacije malodimnih baruta. Najveće povećanje je kod malodimnih baruta sa najmanjom brzinom detonacije (veće granulacije), dok je kod baruta sa najvećom brzinom detonacije (manje granulacije) to povećanje minimalno.

Utvrđeno je, takođe, da pojedini baruti detoniraju u čauri iako je utvr-

đeni kritični prečnik veći od prečnika čaure. To znači da čaura, bez obzira na relativno malu debljinu plašta, bitno smanjuje kritični prečnik malodimnih baruta. To smanjenje iznosi i do 50%.

Radi pouzdanog predviđanja ponašanja realnih barutnih punjenja u uslovima masovne eksplozije uskladištenih UbS i određivanja njihovog ekvivalenta u neto količini eksploziva, ova istraživanja potrebno je proširiti ispitivanjima procesa iniciranja, razvoja, prostiranja i prenošenja detonacije unutar i između skladišnih jedinica UbS (metak, sanduk, paletna jedinica, stok).

Literatura:

- [1] Uputstvo za smeštaj i rukovanje municijom i MES, TS-V,3, TU DSNO, Beograd, 1970.
- [2] Uputstvo za određivanje rastojanja pri skladištenju municije, MES i UbS u nadzemnim objektima OS SFRJ (privremeno), TU SSNO, Beograd, 1989.
- [3] Uputstvo za primenu međunarodnih propisa o prevozu opasnih materija u pomorskom i vazdušnom saobraćaju, SDPR, Beograd, 1987.
- [4] Municijska deo I i II, knjiga I, TU SSNO, Beograd, 1974.
- [5] Stanjuković, K. P.: Fizika vzriva, Nauka, Moskva, 1975.
- [6] Drjomin, A. N., Savrov, S. D., Trofimov, V. S., Švedov, K. K.: Detonacionnie volni v kondensirovannih sredah, Nauka, Moskva, 1970.
- [7] Beljajev, A. F.: Gorenje, detonacija i rabota vzriva kondensirovannih sistem, Nauka, Moskva, 1968.
- [8] Beljajev, A. F., Kurbangalija, R. H.: Zh. Phys. Khim., 34 (1960), 603.
- [9] Andrejev, K. K., Beljajev, A. F.: Teorija vzrivčatih veščestv, Oborongiz, Moskva, 1960.