Unutrašnja balistika mogućih tipova progresivnog baruta

Prezentira se mogućnost povećanja početne brzine projektila primenom višekanalnog barutnog zrna u oruđu »N«. Ilustruju se mogući oblici, tj. tipovi višekanalnog barutnog zrna. Na osnovu kriterijuma o progresivnom sagorevanju baruta određuju se optimalne dimenzije svakog oblika. Barutna zrna optimalnih dimenzija stavljaju se u barutnu komoru konkretnog oruđa »N«. Optimalni model baruta bira se na osnovu kriterijuma da bude $p_m \leq 320$ MPa, a $V_0 > 820$ m/s.

Simulacijom procesa opaljenja na računaru sa optimalnim tipom i modelom baruta dolazi se do rezultata unutrašnjobalističkog proračuna. Rezultati proračuna se analiziraju i izvode se određeni zaključci.

Uvod

Prema mišljenju stranih vojnih stručnjaka, mogućnosti za povećanje dometa savremenih oruđa, zasnovanih na primeni municije s čvrstim barutnim punjenjima, praktično su, skoro iscrpljene zbog ograničenja povezanih s krajnje dozvoljenim pritiskom barutnih gasova u kanalu cevi. Povećanje zapremine i mase municije, takođe, neće dovesti do suštinskih povećanja borbenih mogućnosti cevne artiljerije.

Saopšteno je da se u nizu zemalja razvijaju nove generacije artiljerijskih oruđa, koja su u stanju da gađaju uz primenu tečnih pogonskih materija. Veruje se da će to omogućiti znatno povećanje efikasnosti cevne artiljerije i tenkovskog naoružanja. Interes za primenu tečnih pogonskih materija objašnjava se činjenicama da se pri sagorevanju mnogih od tih materija izdvaja znatno više energije u poređenju s barutom [1].

Međutim, svedoci smo pojave prototipova, razvoja novih modela oruđa-oružja, kao i modifikacija postojećih sistema. Kao prilog modifikaciji, tj. usavršavanju klasičnog pogonskog sredstva — baruta realiziran je ovaj rad. Tokom analize sagorevanja devetnaes-

tokanalnih b/z [3], javlja se ideja za barutna zrna identična konstrukciji sedmokanalnih i devetnaestokanalnih b/z. Realizacija ideje daje nove moguće tipove progresivnog baruta.

Cilj ovog rada je dobijanje što veće relativne sagorele mase baruta (ϕ) i relativne sagorevajuće površine baruta (σ) na kraju prve progresivne faze. To su, ujedno i kriterijumi za izbor najboljeg odnosa geometrijskih dimenzija b/z — tipa baruta. Za geometrijski definisan tip baruta usvaja se hemijski sastav komponenata baruta — model baruta. Konačno, odabrana b/z stavljaju se u barutnu komoru postojećeg oruđa i metka s ciljem da se dobije što veće V_0 uz isti P_m , pošto je na osnovu dijagrama pritiska barutnih gasova u cevi i dimenzionisana ista.

Ideja je, uz zadržavanje svih konstruktivnih parametara oruđa i metka, zamena barutnog punjenja višekanalnim b/z za ostvarenje veće V_0 , a time i dometa oruđa.

Moguće varijante višekanalnog barutnog zrna

Osnova za dimenzionisanje b/z je tzv. geometrijski zakon o sagorevanju baruta [2]. Tip, tj. oblik višekanalnih

b/z, dobija se analogijom sedmokanalnog b/z. To znači pronalazak takvog odnosa dimenzija da se sagorevajuća površina poveća maksimalno i da u fa-

Sl. 1 — Tip 1/3 — baza trougao sa 3 kanala

zi raspada b/z (kraj progresivne faze) ostane što manje ostataka koji će sagorevati degresivno. Ako se ima u vidu brzina stvaranja barutnih gasova, onda je sasvim jasan napred definisani uslov. Mogući tipovi višekanalnog b/z prikazani su na slikama 1, 2, 3 i 4.

Sl. 2 — Tip 2/3 — baza trougao-rozeta sa 3 kanala

Sl. 3 — Tip 3/4 — baza romb sa 4 kanala

Sl. 4 — Tip 4/4 — baza romb-rozeta sa 4 kanala

Svaki od ilustriranih tipova (slikama 1 do 4) može da ima još po dve varijante. Sve moguće varijante imaju zajedničku konstruktivnu ideju, koja se zasniva na svim udaljenostima od kanala do kanala iznosa $2e_0$.

Tipovi 1 i 2 mogu se konstruisati sa 6 i 10 kanala, tako da se zadrži baza trougao. Tipovi 1/6 i 2/6 imaju 6 kanala rasporeda (3-2-1) u odnosu na ba-

zu trougla. Tipovi 1/10 i 2/10 imaju 10 kanala, rasporeda (4-3-2-1) u odnosu na bazu trougla.

Tipovi 3 i 4 mogu se konstruisati sa 9 i 16 kanala, tako da se zadrži baza romba. Tipovi 3/9 i 4/9 imaju 9 kanala raspoređenih (1-2-3-2-1) po većoj dijagonali. Tipovi 3/16 i 4/16 imaju 16 kanala raspoređenih (1-2-3-4-3-2-1) po većoj dijagonali.

Analizom mogućih tipova, tj. oblika višekanalnih b/z sa stanovišta tehnologije proizvodnje očigledno je da prvi tip ima jednostavniji oblik od sledeća tri moguća tipa.

Definirani uslov (što veće σ i φ u prvoj fazi sagorevanja) najbolje ispunjavaju tipovi 2 i 4.

Za sve moguće tipove višekanalnih b/z sa slike 1, 2, 3 i 4 izvode se analize sagorevanja, a u daljem tekstu se analizira sagorevanje tipa 1, s obzirom na to da najbolje ispunjava postavljene uslove.

Sagorevanje višekanalnih barutnih zrna

Po geometrijskom zakonu sagorevanja, brzina sagorevanja je ista po svim dimenzijama b/z. Prema tome, kraj progresivnog sagorevanja je onda kada sagori najmanja dimenzija b/z — debljina b/z. Kako se menja debljina zrna, tako se menjaju i ostale dimenzije, a od toga zavisi stvaranje barutnih gasova. Logično je da se veličine koje definišu proces sagorevanja baruta izraze u funkciji debljine b/z. Put plamena u jednom smeru označava se sa e , a u proizvoljnom momentu vremena debljina zrna se smanji za $2e$. Usvaja se da je odnos sagorele i početne debljine b/z — relativna sagorela debljina baruta:

$$y = \frac{2e}{2e_0} = \frac{e}{e_0} \quad (1)$$

Sagorevanje tipa 1 (slika 1) odvija se tako da se kanali šire, a širina i dužina se smanjuju. U jednom momentu svi krugovi se dodiruju i b/z se raspada na dve grupe štapića (slika 5). Štapići dalje sagorevaju degresivno. Kraj njihovog sagorevanja je kada sagori i debljina jednaka prečniku upisanog kruga (slika 6).

Sl. 5 — Kraj sagorevanja u progresivnoj fazi

Zbog raspada b/z, sagorevanje se deli na dve faze:

prva faza — progresivna je od početka sagorevanja pa do momenta raspada b/z, a

druga faza — degresivna je dogorevanje ostataka.

Zato se definiše φ i σ za obe faze.

Progresivna faza sagorevanja b/z

Na osnovu slike 1 za definisanje tipa 1 usvaja se konkretni e_0 , d , L , a računaju se:

$$\text{stranica trougla} \\ a = (2e_0 + d) + 2(2e_0 + d/2) \cdot \sqrt{3} \quad (2)$$

$$\text{visina trougla} \\ h = (a \sqrt{3}) / 2 \quad (3)$$

Početna zapremina b/z:

$$\Omega_0 = L(a^2 \sqrt{3} / 4 - nd^2 \pi / 4) = \\ = L/4(a^2 \sqrt{3} - nd^2 \pi) = L \cdot A_0 \quad (4)$$

gde je n — broj kanala.

Zapremina b/z u proizvoljnom trenutku sagorevanja:

$$\Omega = (L - 2e)[(a - 2e\sqrt{3})^2\sqrt{3} - n(d + 2e)^2\pi]/4 \quad (5)$$

Relativna sagorela masa b/z za proizvoljni trenutak sagorevanja, po definiciji, jeste:

$$\varphi = 1 - \Omega/\Omega_0 \quad (6)$$

Uvrštenjem izraza (4) i (5) u (6) dobija se:

$$\varphi = \kappa y(1 + \lambda y + \mu y^2) \quad (7)$$

gde su: κ , λ i μ koeficijenti oblika i za konkretni tip 1 imaju sledeći izgled:

$$\kappa = \frac{3a + nd\pi}{A_\delta} e_0 + \beta \quad (8)$$

$$\lambda = -e_0^2[3\sqrt{3} - n\pi + \beta(3a + nd\pi)/e_0]/(\kappa A_\delta) \quad (9)$$

$$\mu = \frac{3\sqrt{3} - n\pi}{\kappa A_\delta} \beta e_0^2 \quad (10)$$

površina baze

$$A_\delta = (a^2\sqrt{3} - nd^2\pi)/4 \quad (11)$$

odnos debljine i dužine b/z

$$\beta = 2e_0/L \quad (12)$$

Relativna sagorela površina b/z za proizvoljni trenutak vremena dobija se iz derivacije $d\varphi/dy$ u sledećem obliku:

$$\sigma = 1 + 2\lambda y + 3\mu y^2 \quad (13)$$

Kraj progresivne faze je kad se ostvari $e = e_0$, $y = 1$.

Degresivna faza sagorevanja b/z

Za ostatke b/z važi zavisnost za regresivne barute:

$$\varphi_1 = \kappa_2 y_1(1 + \lambda_2 y_1) \quad (14)$$

Veza između I i II faze sagorevanja je:

$$\varphi_1 = \varphi - \varphi_I \quad a \quad y_1 = y - 1$$

pa je:

$$\varphi = \varphi_I + \kappa_2(y - 1)[1 + \lambda_2(y - 1)] \quad (15)$$

Ovom izrazu odgovara izraz za σ :

$$\sigma = 1 + 2\lambda_2(y - 1) \quad (16)$$

gde je:

- φ_I — φ sa kraja progresivne faze a
- κ_2, λ_2 — koeficijenti oblika ostataka b/z
- φ — relativna sagorela masa u proizvoljnom trenutku druge faze
- y — relativna sagorela debljina b/z u proizvoljnom trenutku druge faze.

Koeficijenti oblika određuju se iz (15) i (16), stavljajući uslove za kraj sagorevanja:

$$y = y_k, \varphi = 1 \text{ i } \sigma = 0$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2(y_k - 1)} \quad (17)$$

$$\kappa_2 = \frac{2(1 - \varphi_I)}{y_k - 1} \quad (18)$$

Kraj regresivne faze je kada se ostvari:

$$y_k = 1 + r_1 \quad (19)$$

Na osnovu slike 6 iz trouglova OAB i ABC dobija se:

$$r_1 = \frac{(e_0 + d/2)}{3} \quad (20)$$

Analogno ovoj analizi sagorevanja izvode se analize i za sve preostale tipove višekanalnog b/z sa slika 2, 3 i 4.

Sl. 6 — Radijus upisanog kruga debljeg ostatka

Analiza dimenzija višekanalnih barutnih zrna

Za moguće tipove višekanalnih b/z (slike 1, 2, 3 i 4) variraju se osnovne dimenzije programskim rešenjem na PC računaru, a računa se relativna sagorela masa baruta (ϕ) i funkcija oblika — relativna sagorevajuća površina (σ).

Variranjem osnovnih dimenzija tipova sa slika uočava se da:

— povećanjem prečnika kanala — d i debljine — e_0 opadaju ϕ i σ , a

— povećanjem dužine b/z — L i broja kanala — n opada ϕ , dok σ raste i obrnuto.

Na osnovu kriterijuma $\phi > 0.90$ i $\sigma > 2.00$ dobija se suženi dijapazon osnovnih dimenzija svih tipova b/z:

$$e_0 = (0.5 \text{ do } 2.5)$$

$$d = (0.1 \text{ do } 0.3)e_0$$

$$a = f(d, e_0)$$

$$L = (1 \text{ do } 2.5)a$$

Ove odnose osnovnih dimenzija daju i [3] i [4] kao optimalne za sedmo-kanalna i devetnaestokanalna b/z.

Suženi dijapazon osnovnih dimenzija daje više kombinacija sa dobrim rezultatima za ϕ i σ . Međutim, odabire se najbolja kombinacija stavljanjem konkretnog tipa u barutnu komoru.

Unutrašnjobalistički proračun za oruđe »N«

Na osnovu optimalnih dimenzija mogućih tipova višekanalnih b/z, sa aspekta sagorevanja baruta, izvodi se unutrašnjobalistički proračun za konkretno oruđe »N«.

Odabrano oruđe »N« koristi cevčice za barutno punjenje i ima $p_m = 320$ MPa i $V_0 = 820$ m/s. Ideja je da se zadrže svi polazni konstruktivni parametri oruđa i metka, a da se zameni barutno punjenje novim tipom i modelom baruta kako bi se dobilo: $V_0 > 820$ m/s i $p_m \leq 320$ MPa.

Za unutrašnjobalistički proračun koristi se postojeće programsko rešenje na katedri naoružanja VTA koje diferencijalne jednačine [2] rešava metodom Runge-Kutta. Programsko rešenje je modificirano tako da varira modele i tipove baruta, a rešava problem sagorevanja višekanalnih b/z po fazama u procesu opaljenja. Variranjem modela baruta jugoslovenske proizvodnje dolazi se do najboljih rezultata modelom jednobaznog baruta od kojeg su izrađene cevčice za oruđe »N«. Kompletni rezultati unutrašnjobalističkog proračuna za svaki tip i model baruta ne daju se zbog obimnosti. Tabelarno se prikazuju samo karakteristične tačke proračuna za 13 odabranih tipova b/z radi uporedne analize.

Nulti tip barutnog zrna je cevčica koju, inače, koristi oruđe »N«, dok su ostali tipovi od 1/3 do 4/16 identični mogućim tipovima višekanalnog barutnog zrna sa slika 1, 2, 3 i 4.

Karakteristične tačke gasodinamičkog procesa

Mesto	Kraj I faze				Maksimalni pritisak				Kraj sagorevanja				Usta cevi			
Tip b/z	P_{kI} , MPa	t_{kI} , s	X_{kI} , m	V_{kI} , m/s	P_m , MPa	t_k , s	X_m , m	V_m , m/s	P_k , MPa	t_k , s	X_k , m	V_k , m/s	P_u , MPa	t_m , s	V_o , m/s	
Tip -0-	-	-	-	-	320	.0060	0.688	320	125	.0123	4.00	733	91	.0140	820	
Tip 1/3	374	.0065	1.303	593	406	.0054	0.706	415	207	.0084	2.62	795	81	.0121	978	
Tip 1/6	337	.0074	1.490	590	352	.0063	0.912	443	188	.0095	2.94	793	83	.0129	955	
Tip1/10	312	.0081	1.643	587	318	.0074	1.244	499	175	.0104	3.19	790	85	.0135	937	
Tip 2/3	444	.0067	1.208	598	460	.0060	0.836	478	335	.0073	1.62	692	79	.0123	995	
Tip 2/6	395	.0077	1.423	595	395	.0077	1.423	595	297	.0084	1.89	689	82	.0132	969	
Tip2/10	353	.0087	1.592	592	353	.0087	1.592	592	273	.0092	2.10	687	84	.0138	949	
Tip 3/4	383	.0066	1.296	593	410	.0056	0.790	444	209	.0084	2.59	795	81	.0122	979	
Tip 3/9	332	.0077	1.540	589	342	.0068	1.055	471	184	.0098	3.01	792	84	.0132	949	
Tip3/16	303	.0086	1.726	585	305	.0081	1.445	527	169	.0109	3.33	788	86	.0140	928	
Tip 4/4	441	.0064	1.218	593	448	.0059	0.930	504	333	.0071	1.64	687	79	.0120	991	
Tip 4/9	382	.0075	1.445	589	382	.0075	1.445	589	294	.0083	1.92	683	82	.0130	963	
Tip4/16	346	.0084	1.617	585	346	.0084	1.617	585	269	.0092	2.14	679	84	.0138	942	

Zajedničke dimenzije svih tipova b/z su: $e_o=0.0015$, $d=0.00015$, $a=f(e_o,d)$ i $L=1.5a$, koje su iste kao u [3] zbog komparativne analize rezultata unutrašnjobalističkog proračuna.

Analizom rezultata u tabeli očigledno je da tip 1/10 najbolje ispunjava napred postavljeni uslov $p_m < 320$ MPa a $V_o=937$ m/s, što je za 117 m/s veća V_o za oruđe »N«, te se za ovaj tip daje i grafička interpretacija $p(t)$, $V(t)$ i $X(t)$ (na slici 7).

Komparacijom ulazno-izlaznih rezultata u tabeli uočava se povećanje p_m i V_o povećanjem broja kanala u b/z. Nadalje, tipovi 2 i 4 su modifikacije tipova 1 i 3 da bi se dobilo što veće ϕ , što oni i daju. Međutim, povećanjem ϕ raste i p_m i V_o , tako da tipovi 2 i 4 imaju znatno veće p_m od tipova 1 i 3, pa treba biti obazriv pri izboru modela i tipa baruta.

Sl. 7 — Dijagram $p(t)$, $V(t)$ i $X(t)$

Karakteristika dijagrama i tabele jeste da se maksimalni pritisak ostvaruje pri kraju progresivne faze kod višekanalnih b/z. Komparacijom cevčice i višekanalnih b/z očigledno je da proces sagorevanja višekanalnih b/z duže traje do p_m , a time je i intenzivniji

priliv barutnih gasova, što rezultira veći ukupni impuls pritiska barutnih gasova i početnu brzinu projektila.

Zaključak

Rad daje teorijsku unutrašnjobalističku analizu kakva bi trebalo da prethodi usvajanju i proizvodnji b/z za konkretno oruđe.

Analiza obuhvata dimenzionisanje b/z, usvajanje hemijskog sastava — modela baruta i sagorevanje usvojenog tipa i modela u barutnoj komori oruđa. Odabire se oruđe »N« koje ima $p_m=320$ MPa i $V_o=820$ m/s, a koriste cevčice za barutno punjenje. Cevčice se zamenjuju višekanalnim b/z, uz iste konstruktivne parametre oruđa i metka uz p_m od 320 MPa, tako da zamena rezultira povećanje V_o na 937 m/s, što nije bez uticaja na domet i druge spoljnobalističke efekte. Inače, svi tipovi višekanalnog baruta sa slika 1, 2, 3 i 4 daju povećanje V_o za približno 100 m/s, pod uslovom da su modela jednobaznog baruta.

Rad ne razmatra tipove i modele sa aspekta tehnologije proizvodnje, već stručnjacima za proizvodnju prepušta da odaberu najadekvatniji tip i model.

Radi kompletnosti ove analize, svi navedeni modeli i tipovi baruta testirani su simulacijom na računaru i za druga oruđa, a rezultati simulacije u potpunosti verifikuju dobijene rezultate i zaključke za oruđe »N«. Rezultati simulacije se ne prezentiraju zbog svoje obimnosti.

Trebalo bi, razmotriti mogućnost flegmatiziranja navedenih tipova i modela kako bi se ispitale mogućnosti daljeg povećanja V_o .

Za potpunu verifikaciju ovog rada potrebno je izraditi navedene tipove i modele vašekanalnih b/z i staviti ih u barutnu komoru oruđa »N« i izvršiti gađanja i merenja p_m i V_o .

Literatura:

- [1] ***: Tečne pogonske materije za artiljerijska oruđa — stanje, problemi, perspektive, VTG-4/92, Beograd, 1992, 451—460.
- [2] Cvetković M.: Unutrašnja balistika, lekcije, CVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1984.
- [3] Tančić LJ.: Unutrašnja balistika devetnaestokanalnog baruta, NTP — 10/92, Beograd, 1992, 3—8.
- [4] Sharma B. K.: BALISTIQUE INTERIEURE DES POUDRES HEPTATUBULAIRES PARTIELLEMENT MODFIEES, SCI. & TECH. ARMEMENT, 1983. V 57, (2). BR. 224, 317—360.