

Prikaz numeričkog i programskog rešavanja novog profila olučenih cevi oružja

Dr Marinko Petrović, dipl.inž.¹⁾

Prikazan je postupak određivanja novog oblika vodišta projektila olučenih cevi oružja. Opisano je uobičajeno radno stanje vodišta tokom gađanja sa uzrocima habanja, bakarisanja i strukturnog diskontinuiteta koji dovode do rapidnog skraćivanja radnog veka cevi. Definišu se kriterijumi za ocenu optimalne geometrije vodišta projektila. Daju se tok i uslovi za numeričko rešavanje oblika vodišta. Koriste se izvedene jednačine naprezanja dobijene primenom teorije ljuski na košuljicu projektila i specifičnog opterećenja na radni bok oluka dobijene preko jednačina kretanja i sumarne reakcije polja na košuljicu. Proračun se ugrađuje u teorijski i eksperimentalni model unutrašnje balistike i izvodi primenom programskog jezika FORTRAN. Daje se algoritam programskog rešenja. Prikazuju se klasični i utvrđeni novi profil vodišta, a deo rezultata unutrašnjebalističkog proračuna (pritisak, brzina strujanja i energija barutnih gasova) pokazuju se u Dekartovom koordinatnom sistemu u obliku prostornih zakrivljenih površina.

Ključne reči: Unutrašnja balistika, cev oružja, vodište projektila, poligonarno ožljebljenje, numerički model, programsko rešenje.

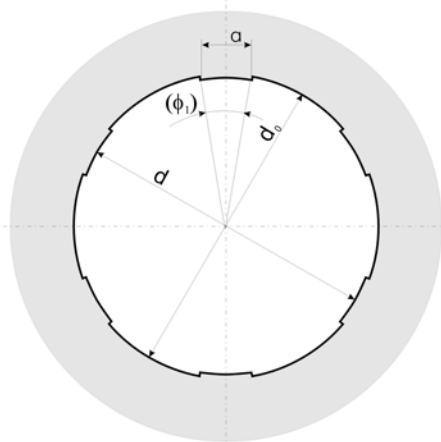
Uvod

TEŽNJA savremenih sistema streljačkog oružja sa olučenim cevima je povećanje efikasnosti projektila na cilju. Jedan od načina da se to realizuje je povećanje početne brzine projektila (kakav je slučaj npr. kod projektila kalibra 5.56 mm), što je dominantno funkcija povećanja pritiska barutnih gasova.

Međusobne sile pritiska vodišta i projektila kao i veličine tarnih površina uslovljavaju habanje elemenata olučenog dela vodišta projektila.

Kod klasičnog pravougaonog oblika olučenja (sl.1) tarne površine su relativno male, pa se habaju radni bokovi oluka cevi i stvaraju zazoru na strani neradnih bokova. Kroz te

$$\phi_1 = 2 \arcsin\left(\frac{a}{d}\right); \quad S_c = \frac{\pi}{4} \left[\left(1 - \frac{n_p \phi_1}{360}\right) d_o^2 + \frac{n_p \phi_1}{360} d^2 \right]$$



Slika 1. Klasični pravougaoni profil vodišta projektila kal. 5.56 mm

zazore brizgaju usijani mlazevi barutnih gasova vrlo velikom brzinom, znatno većom od brzine projektila. Usled toga dolazi ne samo do pada početne brzine, već i do mnogo bržeg izgaranja i propadanja površine vodišta projektila u cevi.

S obzirom da vrednost radijalnog pritiska znatno prelazi vrednost maksimalnog pritiska barutnih gasova što uslovljava smanjenu elastičnost polja, dobija se otvrdnutija struktura od ostalog materijala cevi koja teže može da sledi "disanje" i oscilacije ostale mase cevi.

Delovanjem sile košuljice na prelazima između radnog boka i dna oluka, počinju da se javljaju naprsline, koje se s povećanjem broja ispaljenih metaka sve više šire i produbljuju. Naprsline se utoliko brže javljaju, ukoliko su manji radijusi zakrivljenja na tim prelazima. Posle izvesnog broja ispaljenih metaka dolazi do odvajanja polja na prelaznom konusu. Na mestima gde je bilo uzvišenje polja ostaje duboka brazda, koja u poprečnom preseku ima trouglast oblik. Taj trougao predstavlja zonu otvrdnutog - krto materijala, na čijim je granicama došlo do strukturnog diskontinuiteta. Drobljenje i čupanje polja ima za praktičnu posledicu formiranje prelaznog konusa na mestima sve dalje od početnog, a sve bliže „ustima“ cevi. To dovodi do povećanja zapremine barutne komore i smanjenja gustine punjenja, a time i do opadanja početne brzine, dometa i preciznosti.

Posle potpunog urezivanja radijalni pritisak se smanjuje. Kod „usta“ cevi ovaj pritisak ponovo raste na vrednost veću od polovine maksimalne vrednosti. Kriva habanja potvrđuje ovakvu krivu radijalnog pritiska košuljice. Najveće habanje nastaje tamo gde se dobija maksimalni radijalni pritisak košuljice.

Povećane početne brzine projektila zahtevaju nesrazmerno povećanje pritiska barutnih gasova, znači i sile

¹⁾ „Zastava namenski proizvodi“, 34 000 Kragujevac, Trg topolivaca 4

košuljice. Sve to dovodi do još razornijeg delovanja spomenutih faktora, potpomognutih još višim temperaturama i hemijskim delovanjem sastavnih komponenata baruta, što rapidno skraćuje radni vek cevi.

Na mestima manjeg radijalnog pritiska omogućeno je deponovanje skinutog bakra (tombaka) sa košuljice, tzv. bakarisanje. Bakarisanje može da dovede do jakih lokalnih sužavanja vodišta zbog kojih dolazi do "naduvavanja" cevi ili raspada projektila u samoj cevi.

Analizom uzroka oštećenja unutrašnje trase cevi (habanje, erozija, korozija, bakarisanje i sl.) bavili su se mnogi istraživači i postavljali različite teorije: Černov - eroziju izaziva toplota, Vjej – habanje nastaje usled hemijskog (cementacija), fizikalnog (kaljenje) i mehaničkog (strujanje) dejstva barutnih gasova, Šarbonje – bakarisanje i erozija se objašnjava gušenjem fluidnog mlaza, Justrov – uzrok habanja je uglavnom pritisak i temperatura. Međutim, u rezultatu istraživanja svi su saglasni u zaključku: treba izbeći pojavu zazora, tj. obezbediti sigurno zaptivanje cevi vodećim prstenom (košuljicom) projektila.

Broj žljebova vodišta projektila i njegove dimenzije međusobno su zavisi. Njihov izbor predstavlja kompromis protivrečnih zahteva. S jedne strane, nastoji se da se dobije rešenje koje obezbeđuje jeftinu proizvodnju, lako održavanje i lako urezivanje, a to znači mali broj plitkih žljebova. S druge strane, želi se da se obezbedi sigurno vođenje (bez opasnosti da se smakne urezani zub košuljice) i neznatno habanje radnih površina, što zahteva veći broj dubljih žljebova. Pri tome dubina žljeba mora da obezbedi sigurno vođenje i u uslovima delimično ishabane cevi, kao i zahtev za temperaturno širenje kanala cevi.

Očigledan je zaključak da za izbor parametara profila vodišta projektila treba utvrditi dovoljno valjane kriterijume i postupak kojima će se oni definisati.

Empirijska i teorijska određenja

Navedene mane klasičnih pravougaonih profila vodišta projektila posebno su prisutne kod savremenih oružja malih kalibara i velikih početnih brzina. Uslovi koji obezbeđuju izlazne performanse uz smanjeni korak uvijanja kod ovih oružja dodatno su pospešili taloženje tombaka košuljice i probleme disperzija vrednosti početnih brzina i preciznosti pogodaka na cilju.

Tako je npr. NATO metak kal. 5.56 mm, standardizovan 1984.god. kroz STANAG 4172, uslovio primenu izrazito kvalitetnog materijala za cev oružja i povećanje spoljašnjih dimenzija cevi.

Autor ovog rada je u [1] istraživao nove oblike vodišta projektila s ciljem da utvrdi optimalni profil koji bi, pri kretanju projektila, obezbedio **bolje zaptivanje i manje habanje**, u eksploataciji **lakše čišćenje, održavanje i duži vek trajanja** po balističkim karakteristikama, a u proizvodnji **jeftiniju** izradu.

Istorijski gledano, oblici olučenja bili su u funkciji primenljivih tehnologija. Klasično primenjena tehnologija rezanjem nije davala mnogo mogućnosti za promenu pravougaonog profila olučenja i zamenu drugim oblikom.

U novije vreme konstruktorima streljačkog oružja postale su dostupne tehnologije rezanjem, kovanjem, protiskivanjem i elektrohemijским olučenjem, kao baza projektovanja zavisno od postavljenih zahteva za cev.

U [1] se aktuelizuju pomalo zamlre ideje (Metford, Vitvort, Martini-Henry itd.) s kraja prošlog veka,

o poligonalnom obliku vodišta projektila (Izraz je nastao prema izgledu poprečnog preseka i u suštini se vezuje za oblik poligona i profile bez konveksnih promena sa spolja na žleb vodišta projektila).

Osnovne prednosti ove konstrukcije su poboljšano zaptivanje, smanjeno habanje, produženje veka trajanja cevi za približno 60% i olakšano čišćenje i održavanje. Preciznost pogodaka takvih cevi je bolja od one koju imaju dosadašnje cevi, a što je najvažnije, nivo preciznosti održava se gotovo do kraja veka cevi. U slučaju primene površinske zaštite kod ovakvih cevi, zbog nepostojanja oštih prelaza, značajno se smanjuje škart i olakšava proizvodnja.

Kada je utvrđen korak uvijanja žljebova, projektovanje optimalnog vodišta projektila-profila nastavlja se definisanjem oblika, broja žljebova, vrednosti kalibra, prečnika žljebova, širine žljeba, prelaza s polja na žleb...

Poligonalno olučenje, kao osnovnu pretpostavku, podrazumeva promenu prirode deformisanja projektila pri urezivanju. Povoljnija priroda plastičnog tečenja materijala košuljice projektila kod poligonalnog vodišta projektila obezbeđena je konveksnošću prelaza polje-žleb koje smanjuju mogućnost lokalnih oštećenja polja u vodištu, prilikom izrade i u eksploataciji.

Priroda plastične deformacije košuljice kod poligonalne cevi dozvoljava smanjenje veličine poprečnog preseka vodišta projektila, čime se poboljšava zaptivanje.

Specifični pritisak na radni bok je utoliko manji, ukoliko je manja sila pritiska košuljice, s jedne strane, odnosno veća dužina vodećeg dela košuljice, dubina i broj polja, s druge strane.

Opređenjenje za manji broj žljebova je u skladu sa činjenicom da takva cev sadrži manje izvora lokalnih naprezanja, mogućih oštećenja, diskontinuiteta i grešaka izrade.

Numeričko i programsko rešenje

Da bi se dimenzijski potpuno definisao novi profil, pripremljen je numerički model koji se ugrađuje u programsko rešenje kompletnog unutrašnjebalističkog modela.

Polazi se od poznatih i definisanih karakteristika projektila i klasičnog pravougaonog profila vodišta sa dozvoljenim vrednostima naprezanja košuljice i kontrakcije projektila i specifičnim opterećenjem na radni bok oluka.

Odabrani tip profila i_{prof} pretpostavlja da je definisana njegova funkcija površine poprečnog preseka:

$$S_c = \frac{\pi d_o^2}{4} - n_p S'_c \quad (1)$$

gde su: d_o prečnik žljebova vodišta, a S'_c funkcija koja definiše površinu poprečnog preseka jednog od ukupno n_p polja vodišta projektila.

Ulazne parametre novog profila čine vrednosti tehnološki ostvarljivih tolerancija kalibra T_d i prečnika žljebova T_{do} , očekivana vrednost maksimalnog pritiska barutnih gasova p_m , vrednost minimalnog koeficijenta kontrakcije k_{pmin} , maksimalne projektovane relativne kontrakcije poprečnog preseka projektila ψ_{pmax} i očekivana vrednost minimalnog prečnika žljebova $d_{o,min}$, koja se poredi sa minimalnim prečnikom projektila, a procenjuje sa uslovom $d_{o,min} \approx d_{pmin}$ [2].

Imajući to u vidu, najpre se odredi vrednost maksimalnog prečnika žljebova

$$d_{o\max} = d_{o\min} + T_d \quad (2)$$

Kada se, prema [1], definiše koeficijent kontrakcije k_{pc} i relativna kontrakcija projektila ψ_p odnosom površina poprečnih preseka projektila S_p i vodišta S_c :

$$k_p = \frac{S_p}{S_c} \quad \text{i} \quad \psi_p = \frac{S_p - S_c}{S_p} \quad (3)$$

tada se na osnovu maksimalne relativne kontrakcije $\psi_{p\max}$ određuje maksimalni koeficijent kontrakcije projektila u vodištu prema sledećem izrazu:

$$k_{pc\max} = \frac{1}{1 - \psi_{p\max}} \quad (3a)$$

pri čemu mora da bude $k_{pc\max} \leq k_{pc\text{doz}}$. Koeficijent $k_{pc\max}$ i maksimalni poprečni presek projektila $S_{p\max}$ određuju minimalni poprečni presek vodišta projektila u cevi:

$$S_{c\min} = \frac{S_{p\max}}{k_{pc\max}} \quad (3b)$$

Pošto je funkcija površine poprečnog preseka vodišta $S_c(d_o, \delta_1, n_p)$ obično nelinearna jednačina, pa se nepoznata nominalna vrednost dubine olučenja δ_1 ne može eksplicitno izraziti, vrednost za δ_1 traži se pronalaženjem korena jednačine $S_c(d_o, \delta_1, n_p)$ numerički, npr. metodom sekante (REGula FALsi, [3]):

$$\delta_1 = f_1(S_c, d_o, \delta_1, n_p) \quad (4)$$

Zatim se, pomoću δ_1 i prečnika žljeba d_o , određuje minimalna vrednost kalibra d .

Ostali parametri profila određuju se na sledeći način:

$$\begin{aligned} d_{\max} &= d_{\min} + T_d \\ 2\delta_{1\min} &= d_{o\min} - d_{\max} \\ 2\delta_{1\max} &= d_{o\max} - d_{\min} \\ d_s &= (d_{o\max} + d_{\min}) / 2 \end{aligned} \quad (5)$$

Maksimalni poprečni presek određuje se formulom:

$$S_{c\max} = S_c(d_{o\max}, T_d, d_{\max}, T_d, n_p) \quad (6)$$

Kako je za minimalnu kontrakciju definisan uslov:

$$k_{pc\min} = \frac{S_{p\min}}{S_{c\max}} \geq 1 \quad (3c)$$

onda mora da bude:

$$S_{c\max} \leq S_{p\min} \quad (3d)$$

gde su: $S_{p\min}$ - minimalni poprečni presek projektila a, $S_{c\max}$ - maksimalni poprečni presek vodišta projektila.

Ako taj uslov nije ispunjen, nužno je smanjenje minimalne vrednosti prečnika žljeba $d_{o\min}$ faktorom f_{do} i ponav-ljanje proračuna.

Kada su određeni $S_{c\min}$ i $S_{c\max}$, čime je utvrđena dubina urezivanja košuljice projektila δ_1 , mora da se proveri naprezanje košuljice projektila i specifično opterećenje na radni bok oluka.

Naprezanje košuljice projektila

Naprezanja košuljice projektila ne smeju da naruše čvrstoću košuljice i pravilan let projektila.

Naprezanje košuljice projektila koji rotira, dobija se primenom teorije ljuski na košuljicu koja se posmatra kao tankoslojna. Za aksijalnu površinu koja je u kontaktu sa olukom $S_a = H(t_k - \delta_1)$ integracija po obimu košuljice daje napre-zanje:

$$\sigma' = \frac{\pi^2 d_s^2 \rho_k V_o^2}{h^2} 10^{-4} \quad (7)$$

$$\sigma_k(\delta_{1\max}) = \sigma' \frac{t_k}{t_k - \delta_{1\max}}$$

gde su: d_s - srednji prečnik košuljice projektila u aksijalnom zahvatu sa poljem, ρ_k - zapreminska masa materijala košuljice, V_o - translatorska početna brzina projektila, t_k - debljina košuljice projektila, h - korak uvijanja žljebova olučenja vodišta projektila u cevi, δ_1 - dubina urezivanja košuljice projektila i H - dužina vodećeg dela projektila.

Dobijeno naprezanje mora da bude manje od dozvoljenog naprezanja koje je karakteristika materijala košuljice projektila potvrđeno eksperimentom, odnosno:

$$\sigma_k(\delta_{1\max}) \leq \sigma_{k\text{doz}} \quad (7a)$$

Specifično opterećenje na radni bok oluka

Rešavanjem jednačina za rotaciono i translatorsno kretanje u unutrašnjebalističkom procesu uzimajući u obzir vezu između sumarne reakcije W_s radnog boka oluka i specifičnog pritiska bok oluka-košuljica q_1 , prema [1], specifično opterećenje na radni bok oluka definisano je izrazom:

$$q_1(\delta_{1\min}) = \frac{1.25 * 10^{-2} d_s^2 p_m}{n_p H \eta \delta_{1\min}} \quad (8)$$

gde je η korak uvijanja u kalibrima.

Pri tome mora da bude ispunjen uslov da je specifično opterećenje na radni bok oluka manje od dozvoljenog, odnosno:

$$q_1(\delta_{1\min}) \leq q_{1\text{doz}} \quad (8a)$$

U slučaju da taj uslov nije ispunjen, vrši se korekcija dubine olučenja smanjenjem nominalne vrednosti preko faktora $f_{\delta_1} < 1$:

$$\delta_1 = f_{\delta_1} * \delta_1 \quad (9)$$

uz ponavljanje proračuna parametara profila.

Kada je utvrđena dubina olučenja, proverava se stvarna veličina kontrakcije koja mora biti manja od eksperimentalno utvrđene, tj.:

$$\psi_{pmax} < \psi_{pdo} \quad (10)$$

U protivnom se koriguje dobijena vrednost i ponavlja određivanje

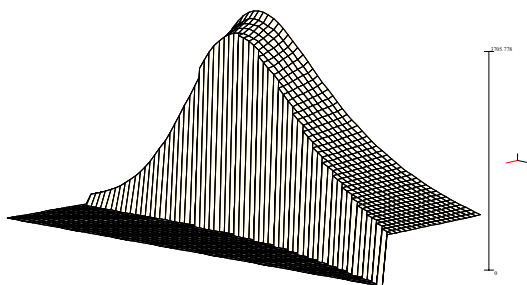
Kada se faktorni pla

U [1] je presek proj prečnik žlj teorijskog i svi ostali pa

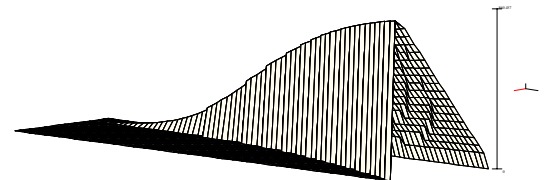
Autor je određivanj ovoj meto preciznosti dobijeni su dobijaju se

Algoritma modelom č vremenskoj

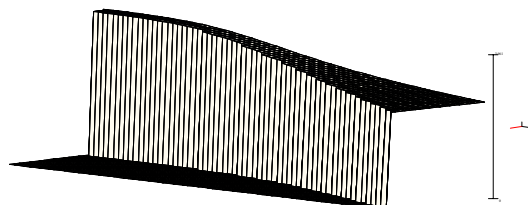
Delovi rezultata proračuna, prema definisanom postupku koji je integrisan u teorijski i eksperimentalni model unutrašnje balistike, grafički su prikazani na slikama 4,5,6.



Slika 4. Pritisak barutnih gasova



Slika 5. Brzina strujanja barutnih gasova



Slika 6. Energija barutnih gasova

Zaključak

Opisano je stanje u vodištu projektila za vreme gađanja, potom jedan od načina poboljšanja izlaznih performansi kroz novi - poligonalni oblik vodišta projektila i savremeni postupak unutrašnjebalističkog projektovanja novog oblika vodišta projektila ožljebljenih cevi koji se integriše u kompletan model unutrašnje balistike.

Postupak je proveren na cevi streljačkog oružja, ali je principijelno primenljiv i na cevi artiljerijskih oruđa.

U ovom postupku je ugrađen faktorski plan eksperimenta 2^2 sa eksperimentalnim unutrašnjebalističkim modelom i teorijskim modelom dvofaznog strujanja sa vremenskim urezivanjem projektila.

Model daje izlazne parametre profila i unutrašnjebalističke karakteristike. Grafički izlazi su pogodni i za vizuelnu analizu pojava u cevi oružja.

Literatura

- [1] PETROVIĆ, M. *Analiza novog oblika vodišta zrna za cev kal. 5.56mm*. Doktorska disertacija, Vojnotehnička akademija, Beograd, 1999.
- [2] ĆIRIĆ, M. Osvrt na rešenja odnosa diametara zrna i vodišta zrna u cevima streljačkog oružja, *Naučnotehnički PREGLED*, 1973, no.3.
- [3] DOVEDAN, Z., SMILEVSKI, M., DIVJAK, J. *FORTRAN 77*, ZOTKS, Ljubljana, 1988.

Rad primljen: 21.6.2000.god.

