

ODREĐIVANJE ŽIVOTNOG VEKA CEVI ORUĐA – ORUŽJA

Nebojša P. Hristov^a
Gordana R. Jovičić^b

^a Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija,
Odeljenje za logistiku, Beograd

^b Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

DOI: 10.5937/vojtehg61-2062

OBLAST: mehanika, tehnologija održavanja
VRSTA ČLANKA: stručni članak

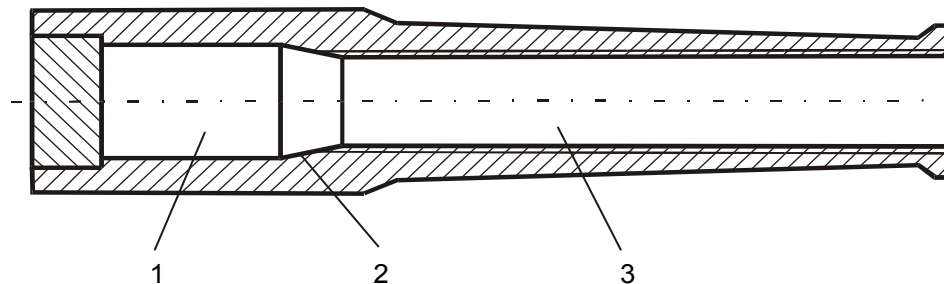
Sažetak:

U radu se opisuju dinamički procesi unutar cevi oruđa u toku procesa opaljenja za vreme eksploatacije. Definišu se načelno osnovni principi konstruisanja elemenata cevi i prikazuje narušavanje osnovne geometrije unutrašnjosti cevi usled habanja, kao i posledice prouzrokovane njima tokom eksploatacije. Takođe, definisani su osnovni empirijski modeli, kao i model zasnovan na mehanici loma za proračun upotrebnog – životnog veka cevi, kao i drugi elementi bitni za sigurnu upotrebu cevi kao osnovnog elementa oružja – oruđa. U radu se vrši i analiza uzroka erozije i način kontrole i umanjenja habanja radi produženja životnog veka cevi oruđa i daju smernice za reparaciju cevi kojima su istrošeni resursi. U zaključku se navode elementi koji najviše utiču na habanje cevi i načini za izvršenje modifikacije postojećih sistema, prvenstveno barutnih punjenja, radi produženja životnog veka cevi oruđa. Predložene su i smernice za pravilno određivanje životnog veka na osnovu ocene stanja cevi.

Ključne reči: habanje – erozija, životni vek cevi, kontrola habanja cevi.

Uvod

Cev je osnovni element svakog oruđa – oružja i predstavlja toplotnu mašinu u kojoj se odvijaju dinamički procesi pretvaranja potencijalne hemijske energije baruta u kinetičku i toplotnu energiju u veoma kratkom intervalu. Svi procesi i pojave su impulsnog karaktera, jer je vreme za koje se odvijaju reda nekoliko μs , a oslobođena energija reda MJ. U cevi se vrši opaljenje metka i lansiranje projektila sa definisanom početnom brzinom i pravcem leta. Prema konstruktivnom rešenju, cev je načelno debelozidni cilindar čija se unutrašnja šupljina naziva kanal cevi, slika 1.



Slika 1 – Presek monoblok cevi
Figure 1 – The intersection of the mono-block barrel

Kanal cevi sastoji se od ležišta metka 1, prelaznog konusa 2 i vodišta projektila 3. Ležište metka je deo u koji se smešta metak. Prelazni konus spaja ležište metka sa vodištem projektila. Vodište projektila je prednji deo cevi po kojem se kreće projektil za vreme opaljenja.

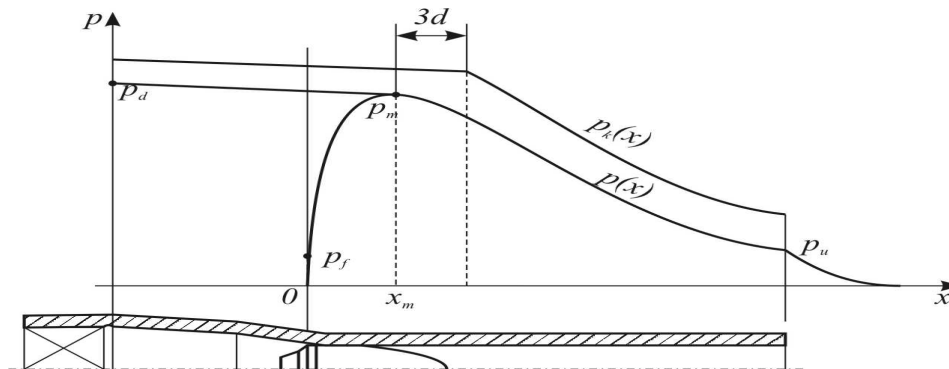
Oblik izrade navedenih elemenata cevi zavisi od punjenja i vođenja projektila u cevi. Zidovi cevi takođe mogu biti različito izvedeni. Po svojoj spoljašnjoj konfiguraciji pojedini delovi cevi mogu biti samo cilindrični ili konusni. Za cev se čvrsto vezuju zadnjak sa zatvaračem, omotač, gasna kočnica ili zaštitnik usta cevi, delovi neophodni za povezivanje cevi sa protivtrzajućim uređajem (PTU), odnosno ogrlice i dr.

Zavisno od načina izrade vodišta projektila u kanalu cevi, postoje cevi sa ožlebljenim (olučenim) i glatkim vodištem.

Prvi i osnovni zahtev za cev kao glavni deo oruđa proističe iz njene namene – obezbeđenja zahteva balistike, tj. da se iz cevi zadatog kalibra d pri opaljenju metka projektilu određene mase m saopšti početna brzina v_0 i obezbedi stabilnost leta u potrebnom pravcu. Iz toga se vidi da je pre nego što se pristupi projektovanju cevi, neophodno imati elemente metka i unutrašnje balistički proračun (Cvetković, 1998), (Tančić, 1998). Potrebno je sagledati i mogućnosti UB proračuna za kombinovana barutna punjenja (Hristov, Savić, 2011. pp.158-173).

Najvažniji zadatak UB je određivanje zakonitosti kretanja projektila i razvoja pritiska barutnih gasova u cevi oruđa – oružja u toku procesa opaljenja. Ukupno povećanje UB krive pritiska iznosi približno (30–40)%. Na taj način dobija se kriva konstrukcionog pritiska $p_k(x)$. Proračun debljine zidova cevi izvodi se dalje prema ovom fiktivnom pritisku, odnosno sili, po određenoj metodologiji.

Ovaj postupak je relativno jednostavan i služi za proračune i provere otpornosti monoblok cevi, a tačnija metodologija pri projektovanju cevi oruđa je sa aspekta njene čvrstoće (Čuev, 1976), koja je i eksperimentalno potvrđena.



Slika 2 – Kriva poželjne otpornosti $p_k(x)$

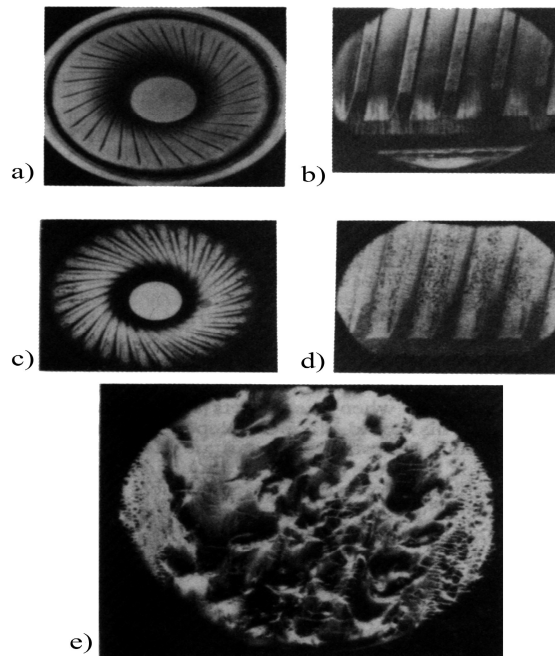
Figure 2 – A desirable resistance curve

Radi pojednostavljenja proračuna otpornosti cevi uzima se da pritisak deluje normalno na površinu kanala cevi, da je presek cevi kružni prsten koji se ravnomerno deformiše i da je materijal cevi homogen i izotropan. Neophodno je da se osnovni dijagram krive pritiska barutnih gasova koriguje izvesnim koeficijentima sigurnosti. Da bi se došlo do krive poželjne otpornosti prikazanoj na slici 2.

Habanje kanala cevi i deformacije

Svaka cev oruđa izrađena je od kvalitetnih materijala sa potrebnom rezervom čvrstoće, koja obezbeđuje sve konstruktivne zahteve u skladu sa Pravilnikom o kvalitetu proizvoda (PKP) u procesu opaljenja. Tokom eksploatacije postepeno se haba (troši) usled čega više ne zadovoljava postavljene zahteve. Smatra se da je cev završila svoj životni vek kada posle određenog broja ispaljenih projektila više ne zadovoljava najvažnije zahteve PKP (početnu brzinu projektila v_0 , veličinu kalibra d i tačnost gađanja). Brojni pristupi su upotrebljavani u karakterizaciji mehanizama habanja–erozije cevi, tj. proračunu životnog veka cevi oruđa. Preko jednostavnih termomehaničkih i termohemijskih modela još uvek nije dobijen jedinstven valjan model za proračun erozije i životnog veka cevi.

Erozija cevi prikazana na slici 3 (Progress in Astronautics and Aeronautics, 1984) može se definisati kao progresivno oštećenje površine cevi i proširenje kalibra usled normalne eksploatacije, koja bitno utiče na pad početne brzine projektila, tačnost i efektivnost oruđa.



Slika 3 – Oštećenja površine cevi oruđa 105 mm M68
 Figure 3 – Damage of the 105 mm M68 gun tube surface

- a) izgled cevi posle 2 opaljenja,
- b) uveličan pogled početka ožlebljenog dela,
- c) izgled cevi posle 702 opaljenja,
- d) uveličan pogled početka ožlebljenog dela,
- e) izgled cevi posle 1744 opaljenja.

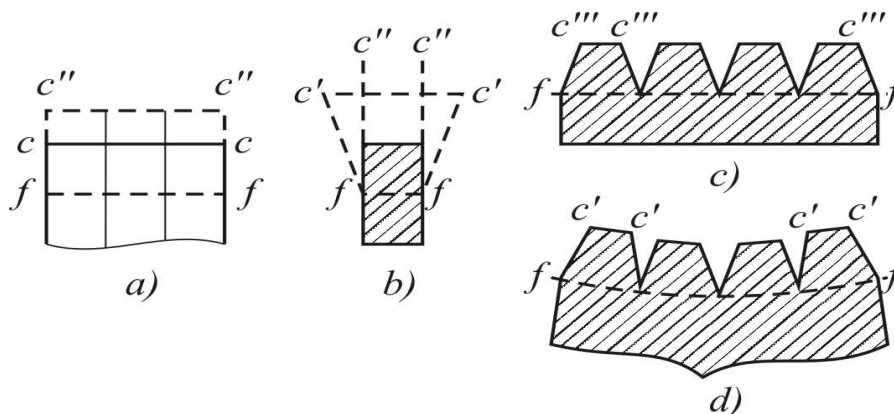
Život cevi zavisi od intenziteta habanja, ali i od ranije proračunski definisanog životnog veka cevi. Postoji i niz drugih pojava i uslova kada se cev artiljerijskog oruđa zabranjuje za upotrebu, ali oni nisu vezani za eroziju. Na primer, povećanje mehaničkih oštećenja usled uboja, zareza, pojava prskotina, kidanja polja, naduvavanja cevi i dr.

Pojavu habanja unutrašnjeg reljefa cevi i naročito olučenog vodišta istraživali su mnogi autori, kako u eksperimentalnom, tako i u teorijskom pogledu. U istraživanjima habanja cevi pojavilo se više teorija koje objašnjavaju habanje cevi kao toplotno, mehaničko i hemijsko dejstvo barutnih gasova i projektila na unutrašnje površine cevi. Ustanovljeno je da do habanja cevi dolazi istovremenim dejstvom svih faktora koji su uzajamno povezani i vrlo složeni, pa se u teorijskom smislu ne mogu jednoznačno odrediti. Koliki će stepen imati pojedini faktori na proces habanja zavisi od vrste sistema naoružanja i uslova eksploatacije (režim vatre, intenzitet i režim hlađenja cevi, održavanja, uslovi čuvanja i sl.).

Smatra se da je kod streljačkog naoružanja osnovni faktor habanja dejstvo projektila na cev, a kod cevi artiljerijskog oruđa erozivno dejstvo barutnih gasova. Habanje cevi razvija se postepeno, uz određene manifestacije.

Prvo što se može primetiti u kanalu cevi je bakarisanje njene površine. Posle nekoliko opaljenja (slika 3a i 3b), jasno se vide slojevi bakra vodećeg prstena na radnim bokovima polja i u dnu žlebova. Na drugim delovima površine kanala bakarisanje se manje primećuje. Nanošenje materijala vodećeg prstena (bakra) na površine kanala nastaje usled dejstva barutnih gasova koji prodiru kroz najmanje zatore između vodećeg prstena i cevi. Čestice bakra skidaju se sa prstena projektila silama trenja i slažu u slojevima na površinu kanala cevi. Posle nekoliko desetina opaljenja, bakarisanje površine se sve više uvećavaju, a u oblasti prelaznog konusa i početka ožlebljenja površina kanala cevi poprima taman „matirani“ izgled. Pregledom matirane površine kanala cevi mogu se uočiti različita posebna mesta ili tačke i mali risevi paralelno usmereni duž cevi ili po obimu njegovog poprečnog preseka. Posle nekoliko stotina opaljenja (slika 3c i 3d) na početku ožlebljenja jasno se uočava mreža kratkih i plitkih pukotina koja se sve više širi sa produženjem gađanja i pokriva celu površinu kanala cevi na dužini 2 do 3 kalibra prema ustima cevi. Mreža pukotina javlja se i u ležištu metka, pogotovo tamo gde cev nije zaštićena čaurom. Dubina pukotina se naročito brzo povećava u podnožju polja sa obe strane polja i može da dostigne vrednost do 2 mm. Jasno je da će pod delovanjem sile urezivanja vodećeg prstena F_N lako doći do smicanja takvog polja na manjoj ili većoj dužini.

Proces obrazovanja pukotina D Černov (Ristić, 2010) objašnjava na sledeći način: pri gađanju površinski sloj metala cevi cf (na slici 4a) zagreva se i širi izazivajući suženje kanala cevi.



Slika 4 – Šema formiranja pukotina u površinskom sloju cevi
 Figure 4 – Scheme of cracks formation in the surface layer of the tube

Ako se izdvoji poseban prstenasti element sloja čiji je uzdužni presek dat na slici 4b, i ako se apstrahuju susedni elementi, površinske tačke c za vreme zagrevanja cevi premeštaju se u tačke c' , a postepenim hlađenjem ponovo se vraćaju u početni položaj (tačka c). Istovremeno susedni elementarni slojevi sprečavaju osnu deformaciju izdvojenog sloja i povećavaju radialne deformacije, zbog čega se tačka c pri zagrevanju površine cevi ne premešta u tačku c' već u tačku c'' . Pri tome materijal površinskog sloja cevi trpi osne (uzdužne) deformacije, koje prelaze granicu elastičnosti σ_e . U prekidi-ma ili zastojima u toku gađanja, površinski sloj se hladi i tačka c'' se premešta u tačku c''' (slika 4c), izazivajući na taj način posle nekog broja opaljenja (ciklusa zagrevanja – hlađenja) pojavu pukotina u tangencijalnom pravcu.

Analogno se mogu opisati pojave koje nastaju u uzdužnim elementima cevi (slika 4d). Pri merenju prečnika kanala cevi po poljima utvrđeno je povećanje prečnika na početnom delu ožlebljenja. Polja se pokazuju kao znatno smekšana i pohabana.

Delovanje vodećeg prstena projektila na polja p_v i radne bokove žleba p_o , može dovesti ne samo do krzanja metala već i smicanja celog polja, posebno kod tvrdih (keramičkih ili bimetalnih) vodećih prstenova.

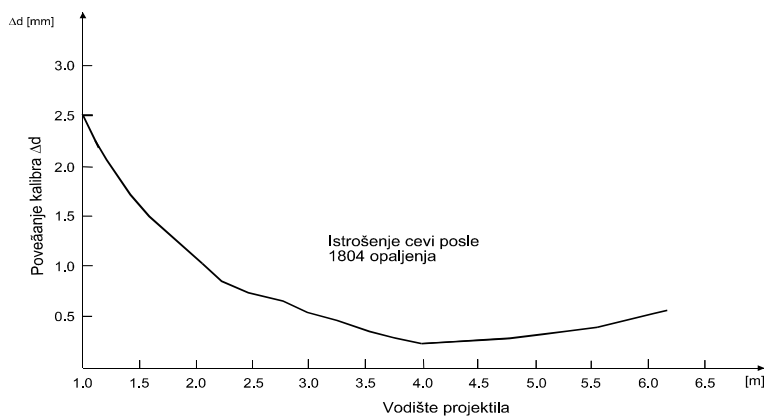
Bakarisanje kanala cevi se jako povećava ka srednjem delu kanala, a takođe znatno raste i u preseku usta cevi, a sasvim je zanemarivo u predelu najvećeg habanja cevi (prelazni konus i početak ožlebljenja). U ovom delu preseka cevi čestice materijala prstena i metal cevi odnose se snažnim dejstvom gasne struje koja se iz barutne komore kreće ka projektilu. Merenjem pomoću mikrometerske zvezde može se takođe ustanoviti povećanje kalibra u preseku usta cevi.

Po Šarbonjeu (Ristić, 2010), kretanje projektila kroz cev praćeno je odbijanjem talasa barutnih gasova o dno projektila i dno cevi, pri čemu je brzina talasa do 1500 m/s. Prelaz sa ležišta metka na vodište projektila predstavlja „prigušnicu“ struje gasova, gde zbog nagle kontrakcije ili širenja mlaza nastaju prazni prostori sa vrtlozima. Nesagorele čestice baruta ubacuju se strujom gasova u ove vrtloge, pri čemu deluju kao „abrazivi“ koji skidaju materijal cevi na tim mestima. Na mestima gde mlaz potpuno ispunjava presek kanala cevi, tih vrtloga nema, pa se tamo lako deponuju čestice bakra i čestice čelika skinutog sa prelaznog konusa. Po ovom autoru, životni vek cevi definiše se, pre svega, erozivnim delovanjem gasova. Nesumnjivo je pokazano da erozija cevi, uporedo sa drugim faktorima, doprinosi trošenju, tj. habanju kanala cevi, ali sigurno je da ona nema odlučujuću i dominantnu ulogu u procesu habanja kanala cevi.

Pri ispitivanju kanala cevi, posle 1000 do 2000 opaljenja, mogu se uočiti znatno veće i dublje pukotine i iskrzana polja. Neka polja mogu biti delimično ili potpuno skinuta na delu dužine do jednog kalibra. Merenjem se uočava povećanje dužine ležišta metka. Cela površina ožlebljenog kanala je matirana. Sa povećanjem broja opaljenja dužina ležišta metka neprekidno raste. Polja se sve više stanjuju i zaokrugljuju po ivici radnog

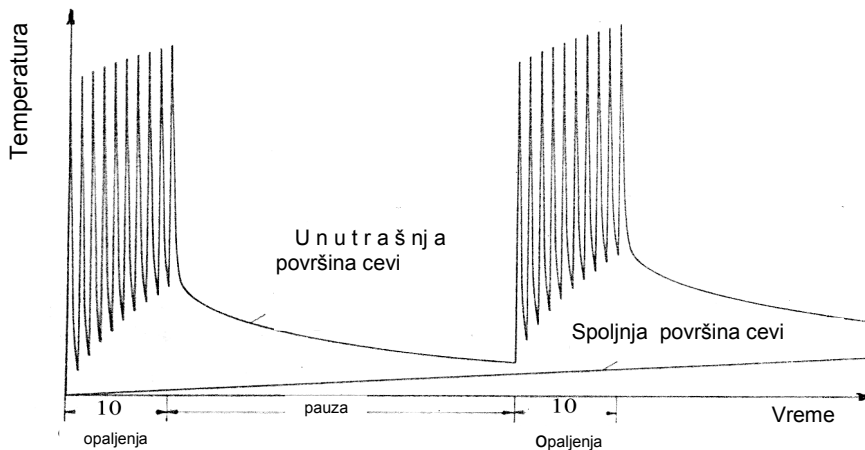
boka polja, a na površini kanala cevi stalno se povećava širina i dubina pukotina. Cev postaje neupotrebljiva, jer je prekomerno istrošena.

Na slici 5 prikazan je dijagram trošenja po dužini kanala cevi 155 mm XM 199 američke proizvodnje, posle ispaljenih 1804 projektila. Maksimalno habanje ili istrošenost cevi je na početku ožlebljenog dela vodišta, najmanje na srednjem delu cevi, a znatna ishabanost cevi javlja se u preseku usta cevi.



Slika 5 – Dijagram habanja cevi po njenoj dužini
 Figure 5 – Diagram of the tube wear along the tube length

Opisani proces habanja cevi je intenzivniji pri većem tempu ili režimu gađanja, npr. kod automatskih topova bez hlađenja, što se objašnjava intenzivnim zagrevanjem i hlađenjem zidova kanala cevi (slika 6).



Slika 6 – Promena temperature cevi pri rafalnoj paljbi sa pauzom
 Figure 6 – Change of the tube temperature during burst fire with a break

Kako se vidi, proces habanja je veoma složen i zavisi od mnogih faktora. Oni se mogu razvrstati u dve grupe koje imaju najveći uticaj.

Prvu grupu faktora čine **toplotni faktori** koji pojačavaju proces habanja kanala cevi i to:

- zagrevanje cevi neposredno barutnim gasovima pri opaljenju, čije temperature dostižu 2000 do 3500 K, zagrevanje površine kanala cevi toplotom usled rada sile trenja na mestu kontakta prstena i cevi,
- zagevanje cevi toplotom od rada unutrašnjih sila trenja u slojevima materijala cevi pri njegovim deformacijama i udarnog delovanja centrirajućeg prstena projektila po poljima.

Drugu grupu čine faktori koji izazivaju neposredno habanje zagrejanе cevi usled mehaničkog skidanja materijala sa površine kanala cevi strujom barutnih gasova u prostoru iza projektila i u zazorima između vodećeg prstena projektila i površine kanala cevi.

Razmatranje fizičkog modela habanja cevi dovodi do zaključka da intenzitet ovog procesa zavisi od:

- temperature barutnih gasova T_g ,
- mase projektila m_p ,
- kalibra cevi d ,
- početne brzine projektila v_0 .

Kada cev zbog prekomernog habanja ne obezbeđuje definisane kriterijume PKP i nije više za upotrebu, kažemo da je doživela „**balističku smrt**“ i ona se rashoduje.

Život cevi obično se izražava ukupnim brojem ispaljenih metaka do njenog odbacivanja. Mera ili kriterijumi za odbacivanje ili „deklasiranje“ cevi mogu biti različiti, a obično se definiše: padom početne brzine projektila v_0 za $\geq 10\%$ (za protivoklopne – PO i protivavionske – PA topove), proširenjem kalibra Δd iznad dozvoljene granice i povećanjem rasturanja pogodaka na cilju (Tančić, 1998), (Hristov, Savić, 2011. pp.158-173).

S obzirom na to da je cev najvažniji deo oruđa, vrlo skup za projektovanje i proizvodnju, a da se neminovno haba pri svakom opaljenju, od interesa je da se razmotre mogućnosti i mere kako se njen životni vek može produžiti. U vezi s tim, na osnovu brojnih istraživanja upotrebljivanih cevi došlo se do određenih zaključaka koji su relevantni za ovaj problem:

1. Svi uobičajeni materijali za cevi daju približne ili slične rezultate, tako da se njihov uticaj na životni vek cevi može smatrati slabim, odnosno zanemarivim.

2. Temperatura zida cevi je najveća na ustima cevi, gde je zid cevi najtanji. Utvrđeno je da se može dozvoliti svaki režim gađanja kod kojeg temperatura unutrašnje površine cevi na ustima cevi ne prelazi 300-350°C. Ovaj kriterijum načelno vredi do kalibra 105 mm.

3. Vodeći prsten (VP) projektila od sinterovanog gvožđa ne izaziva eroziju i pomeranje prelaznog konusa, ali, zbog većeg koeficijenta trenja po čeliku, habanje na radnim bokovima polja je intenzivnije u prednjem delu vodišta, a najčešće i na ustima cevi. Situacija je obrnuta kada je VP projektila od bakra. Zato je povoljnija primena VP od gvožđa za veće kalibre (od 100 do 150 mm), a za kalibre ispod 50 mm povoljnija je primena bakarnog prstena. Za kalibre između 50 i 100 mm primena jednog ili drugog VP daje slične rezultate.

4. Bolje je primeniti barute manje kalorične moći (hladni baruti). Tada se može povećati gustina punjenja, pa se uz isti intenzitet habanja dobijaju veće početne brzine projektila v_0 .

5. Ugao ožlebljenja vodišta projektila, naročito sa progresivnim uvijanjem, ima niz prednosti s obzirom na habanje. Još je bolje kombinovano ožlebljenje sa uglom uvijanja $\alpha = \alpha_0 = 0^\circ$ sve do mesta maksimalnog pritiska gasova. Odatle se uzima trasa za silu urezivanja $F_N(x) = const$, a od 3 ÷ 4 kalibra pre usta cevi ugao uvijanja $\alpha = \alpha_u = const$.

6. Za smanjenje delovanja vrtložnih struja gasova pri projektovanju ležišta metka treba izbegavati nagle promene poprečnih preseka kanala.

7. Prelaz od polja na žlebove treba da bude što zaobljeniji – sa većim radiusom zaobljenja.

8. Da bi se usporilo bakarisanje cevi u punjenje treba stavljati leguru od oko 63% Sn i 37% Pb, kojom se bakar vezuje, topi i izbacuje sa gasovima za projektilom.

9. Strogo pridržavanje uputstava i mera o propisanoj eksploataciji i održavanju oruđa.

Ishabana cev, kod koje je utvrđena „balistička smrt“, ne mora biti i doslovno odbačena. Ako se na velikom broju oruđa istog modela deklasiraju cevi, onda je svrsishodno da se na neki način te cevi obnove tj. renoviraju. Renoviranje cevi može se izvesti tzv. „prekalibrisanjem“. Obično se neki top prekalibriše u haubicu (npr. top 145 mm M1916 u haubicu 155 mm M1).

Drugi način prekalibrisanja izvodi se pomoću tzv. „košuljica“. Košuljica je relativno tanka cev, u čijem kanalu su izrađeni ležište metka i ožlebljeno vodište. Ishabana cev se iznutra obradi znatno dublje nego kod prekalibrisanja i u nju se ubacuje košuljica, koja može biti istog kalibra. Materijal košuljice obično je znatno kvalitetniji od materijala cevi, tako da granica σ_e često bude $\sigma_e > 1000 \text{ N/mm}^2$. Cev se zagreva na 200–300°C, a onda se u nju ubaci košuljica, koju cev tokom hlađenja sve više steže. Zbog toga se ove košuljice zovu „ojačane košuljice“.

Ako između cevi i košuljice postoji određeni zazor onda se radi o „slobodnim košuljicama“. Kada se kanal košuljica ishaba, umesto nje se istim postupkom može zameniti nova košuljica. Pretpostavlja se da se u jednoj cevi može do tri puta zamenjivati „ojačana košuljica“.

Pomoću košuljica istrošena cev se može ne samo renovirati već i modernizovati, tj. osposobiti za veće pritiske i početne brzine. To posebno važi za slobodne cevi, pomoću kojih se može povećati dužina cevi, jer slobodna cev ne mora po celoj dužini biti pokrivena starom cevi, kao što je to slučaj kod košuljice. Slobodne cevi po dužini mogu biti sastavljene od više delova, što još više povećava ekonomičnost, jer je habanje najveće na početku vodišta do mesta x_m (mesto postizanja maksimalnog pritiska gasova u cevi), pa se uglavnom menja samo ta sekcija.

Što se tiče povećanja pritiska, modernizacija je lakša pomoću ojačanih košuljica. Danas se ojačane košuljice u cevi stavljaju sa malim zazorom, a zatim se pod pritiskom koji se ostvaruje ili sagorevanjem baruta ili hidraulički, ovaj pozitivni zazor poništi i promeni u negativni (stezanje). Tako se ostvaruje u suštini autofretovani sastav cevi. Proračun ojačane košuljice je u suštini isti kao i proračun za sastavljene dvoslojne cevi, dok je proračun slobodne košuljice nešto složeniji.

Metode proračuna životnog veka cevi oruđa – oružja

Životni vek cevi može se obezbediti samo „programiranim“ gađanjem, tj. odgovarajućim izborom određene dužine paljbe i prekidima između opaljenja. Prinudno hlađenje kanala cevi samo neznatno dozvoljava veću dužinu rafalne (brze) paljbe i skraćivanje vremena prekida gađanja. Eksperimenti su pokazali da životni vek cevi naglo pada sa rastom početne brzine projektila v_0 i pri nekoj njenoj vrednosti postaje nedopustivo kratak.

Posebno oštri zahtevi u pogledu životnog veka cevi postavljaju se u slučaju projektovanja artiljerijskih sistema velike moći, kod kojih je koefi-

cijent moći $K_e = \frac{mv_0^2}{2d^3} \cong 4 \cdot 10^9 J / m^3$. U tom slučaju, jedan od mogućih

načina za povećanje životnog veka cevi je primena potkalibarnih projektila koji imaju male vrednosti koeficijenta mase projektila K_m . Takođe, ustanovljeno je da se u slučaju povećanja mase punjenja m_b , koja iznosi do $\geq 25\%$ mase projektila, životni vek cevi približno smanjuje za četiri puta.

Proračun životnog veka cevi klasičnim poluempirijskim metodama

Prva razmatranja fizičkog modela trošenja kanala cevi pokazuju da intenzitet ovog procesa zavisi od: temperature barutnih gasova, mase projektila, kalibra cevi i početne brzine projektila. Matematički izraz za

određivanje dopuštenog broja metaka N koje se može ispaliti iz cevi oruđa, se uzima za meru životnog veka cevi, koji su razni autori definisali na različite načine (Ristić, 2010). U literaturi se susreće čitav niz zavisnosti, uglavnom poluempirijskog karaktera. Tako, na primer, formula Justrova ima sledeći oblik:

$$N = \frac{xy c_m v_0^2 \sigma \varepsilon}{d^2 \lambda \mu k_1} \quad (1)$$

gde su: $x = f_1(p_m, R, k) = 3$ – empirijska konstanta,

$y = f_2(d, n) = 4,5$ – empirijska konstanta,

n – tempo gađanja,

d – kalibar cevi,

$\lambda = L_c / d$, L_c – dužina cevi,

c_m – koeficijent mase projektila,

σ – naprezanje materijala cevi,

ε – relativna tangencijalna deformacija zidova cevi,

μ – koeficijent trenja vodećeg prstena projektila i

k_1 – otpornost na sabijanje materijala vodećeg prstena.

Prema Linteu, zavisnost za ocenu veka trajanja cevi po kriterijumu pada v_0 , ima sledeći oblik:

$$N = 350 \frac{n_0 d^2 \sigma_v}{n \sigma_e W}, \quad (2)$$

gde su: n_0, n – propisani i stvarni tempo gađanja,

σ_v, σ_e – granica tečenja i elastičnosti materijala cevi i

$W = mv_0 / 2$ – moment kretanja projektila.

Francuski naučnik Gabo postavio je relaciju za život cevi, blisku hipotezi Šarbonijea u obliku:

$$N = N_0 e^{-\beta t}, \quad (3)$$

gde su: $\beta = \frac{k(1-\lambda)}{\theta}$ – eksponent,

N_0, λ – koeficijenti koji zavise od svojstava metala, vrste baruta i uslova punjenja,

k – koeficijent,

θ – temperatura prelaza materijala u stanje tečenja i

t – temperatura površine kanala cevi.

Prema relaciji Orlova, životni vek cevi približno se određuje prema:

$$N = \frac{K_t}{C_m^x v_0^y d^z}, \quad (4)$$

gde su: K_t – temperaturni koeficijent koji zavisi od kalorične moći baruta i mehaničkih karakteristika cevi,

$K_t \cong 7 \cdot 10^{24}$ za oruđa srednjeg kalibra i

$K_t \cong 10^{24}$ za streljačka oružja,

C_m – koeficijent mase projektila,

$x \cong 3$, $y \cong 4,5$, $z \cong 2,5$ – veličine eksponenata (empirijske konstante).

Životni vek cevi oruđa ograničen je padom početne brzine projektila, obično za 10% u odnosu na nominalnu vrednost, odnosno vrednošću dopuštenog istrošenja kanala cevi. Kod glatkih cevi istrošenje se manifestuje povećanjem kalibra d , a kod ožlebljenih povećanjem kalibra, prečnika po dnu polja i pomeranjem prelaznog konusa prema ustima cevi, odnosno produženjem ležišta metka.

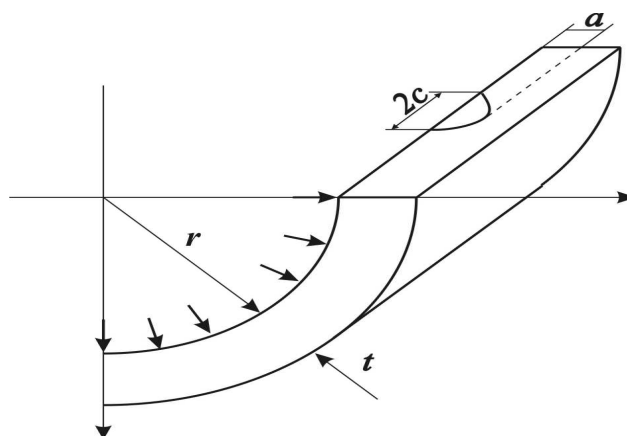
Na osnovu datih relacija za životni vek cevi jasno je da neke relacije ne samo da ne daju dobre proračunske rezultate već su i u fizičkom smislu problematične. Tako, na primer, prema (1) vidi se da životni vek raste sa rastom C_m i v_0 , a prema (2) sa rastom kalibra cevi d , što naravno nije tačno i u suprotnosti je sa rezultatima eksploatacije oruđa u praksi.

Proračun životnog veka cevi usled zamora materijala (princip mehanike loma)

U novije vreme se kao drugi kriterijum za ocenu životnog veka cevi uvodi zamor materijala (principi mehanike loma), jer je konstatovano da se kod cevi oruđa dešavaju rasprskavanja i havarije iako su deformacije pri opaljenju bile u oblasti linearne elastičnosti (Ristić, 2010).

Na cevi koja nije posebno površinski tretirana u slučaju kada nema dodatka za smanjivanje habanja, već posle prvih opaljenja na unutrašnjem sloju cevi debljine $(40 \div 60) \mu\text{m}$, dolazi do strukturalnih promena koje se metalografski vrlo jasno uočavaju. U ovom sloju, naime, dolazi do velikog difundiranja azota i ugljenika (iz barutnih gasova) i stvaranja mreže mikroskopskih prskotina jače izraženih u predelu prelaznog konusa. Istovremeno, dejstvo visokih mehaničkih opterećenja (pritisk gasova) i termičkih opterećenja (toplota pri sagorevanju baruta), stvara u najopte-

rećenijim zonama cevi cementirani sloj velike tvrdoće. Razlika u mehaničkim svojstvima cementiranog sloja i osnovnog materijala cevi doprinosi, takođe, stvaranju i prostiranju prskotina (slika 7).



Slika 7 – Prskotina (inicijalna) na unutrašnjoj površini cevi
 Figure 7 – Crack (initial) on the inner surface of the tube

Ukupan broj opaljenja pri kojem će se uzdužna početna prskotina dubine a povećati do kritične veličine a_k nakon koje dolazi do loma, tj. rasprskavanja cevi, određuje se primenom metode mehanike loma, prema relaciji (zakon Parisa):

$$N = \frac{1}{Cp^m M^m} \frac{2}{m-2} \left(\frac{1}{a_p^{\frac{m}{2}-1}} - \frac{1}{a_k^{\frac{m}{2}-1}} \right) \quad (5)$$

gde su: a – dubina prskotine,

C, m – konstante koje zavise od vrste materijala cevi i termičke obrade, (obično su: $C \cong 2 \cdot 10^{-10}$, $m = 2,5$),

M – koeficijent koji zavisi od oblika prskotine i zida cevi gde se ona nalazi ($M \cong 0,9$) i

p – pritisak barutnih gasova u cevi.

Brzina prostiranja prskotine može da se odredi sledećim izrazom:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_I^m, \quad (6)$$

gde je ΔK_I – promena faktora intenziteta naprezanja u toku jednog opaljenja.

Kritična veličina prskotine zavisi od kritične vrednosti koeficijenta intenziteta naprezanja K_{IC} (žilavost loma pri ravanskoj deformaciji) i određuje se izrazom:

$$a_k = \frac{K_{IC}^2}{M^2 p^2} \cdot \quad (7)$$

U slučaju autofretovane cevi, tangencijalna naprezanja na unutrašnjem sloju cevi teže da zatvore prskotinu, odnosno sprečavaju njeno otvaranje. Pošto je ovo naprezanje veće od tangencijalnog naprezanja usled dejstva pritiska barutnih gasova, ukupno naprezanje ima karakter naprezanja na sabijanje, pa je prostiranje prskotine znatno usporeno u odnosu na monoblok cev.

Da bi se u toku eksploatacije oruđa proverilo stanje zamora materijala, cev se mora pregledati posle određenog broja opaljenja metaka (npr. svakih $N/10$ od proračunske vrednosti broja opaljenja N) i odgovarajućom mernom opremom utvrditi veličina najveće prskotine. Ukoliko je ta veličina blizu kritične dubine prskotine a_k sa određenim stepenom sigurnosti, cev se odbacuje i zamenjuje novom.

Ako se, prema navedenim autorima, uporede dobijeni rezultati korišćenjem izraza za izračunavanje životnog veka cevi sa brojem ispaljenih projektila iz cevi za neka oruđa (100 mm M44, 130 mm M46 i 152 mm M84) do njihovog deklasiranja (odbacivanja), uočava se da su izrazi nepouzdati i daju nerealan (veći ili manji) životni vek cevi. Zbog toga nemaju veću upotrebnu vrednost u praksi, osim za neke dosta grube procene životnog veka cevi. Najrealnije vrednosti dobijene su u slučaju primene metode mehanike loma, ali uz tačno ispitivanje i utvrđivanje ΔK_I i K_{IC} – faktora intenziteta naprezanja.

Prema našim istraživanjima, najrealnije vrednosti dobijene su korišćenjem korigovane metode Smit-O'Braski. Korigovani obrazac ima izgled:

$$\left. \begin{aligned} T_w &= T_i \cdot 1,096 \cdot 10^{-3} (T_f - \Delta T_c - 600) \frac{\sqrt{Cp}}{d} \\ T_i &= 1,465 \cdot 10^{-5} (T_f - \Delta T_c - 600) C^{0,75} \sqrt{R} \frac{(N-1)^{0,6}}{d^{1,5}} \\ W &= 0,04216 e^{0,0049(T_w - T_i)} \\ N &= \frac{W_u}{W} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

U relacijama (8) oznake su:

- T_w – najveća temperatura kanala cevi, K,
- T_c – jedinični porast temperature unutrašnjosti cevi, K,
- T_f – adijabatska temperatura barutnih gasova, K,
- ΔT_c – korekcija temperature gasova zbog uticaja flegmatizatora, K,
- W – povećanje prečnika cevi usled habanja, pri jednom opaljenju, μm ,
- d – prečnik kanala cevi, mm,
- C – masa barutnog punjenja, kg,
- W_u – ukupno dozvoljeno povećanje kalibra, μm ,
- v – brzina projektila, m/s,
- p – najveći pritisak gasova u komori cevi, MPa,
- R – brzina gađanja, metaka/min. i
- N – broj opaljenja.

Koristeći dobijene rezultate može se izračunati faktor ekvivalentnog punjenja (FEP) na osnovu Rielove empirijske formule:

$$FEP = \left(\frac{p_m}{p_{m0}} \right)^{0,4} \left(\frac{m_b}{m_{b0}} \right)^2 \frac{v_0}{v_{00}} \frac{e}{e_0}, \quad (9)$$

gde su: p_m – maksimalni pritisak u barutnoj komori,

m_b – masa barutnog punjenja,

v_0 – početna brzina projektila,

e – specifična energija baruta,

a indeks „0“ označava puno punjenje.

Preko relacije (9) može se svesti ukupan broj ispaljenih metaka na metak sa punim punjenjem pri normalnoj temperaturi. Ovom relacijom se, takođe, može oceniti životni vek cevi pri korišćenju smanjenih punjenja.

Koristeći dobijene rezultate FEP se može izračunati i preko relacije:

$$FEP = \frac{W_p}{W_0}, \quad (10)$$

gde su W_p , W_0 – povećanje kalibra po jednom opaljenju sa smanjenim ili tormentačnim, tj. punim punjenjem.

Prema američkim standardima postoje dva kriterijuma za ocenu istrošenosti cevi: 1,7% i 2% povećanje kalibra cevi na udaljenosti jedne širine vodećeg prstena od početka ožlebljenog dela cevi. Prema tim kriteri-

jumima dopuštena je sledeća erozija (povećanje kalibra) za prsten širine $h = 35$ mm:

- kriterijum 1,7% – 2,5908 mm,
- kriterijum 2% – 3,048 mm.

U PKP za oruđe je propisan sledeći režim gađanja:

- 4 metka za 1 minut,
- 15 metaka za 5 minuta,
- 40 metaka za 20 minuta i
- 90 metaka za 60 minuta.

Proračunom životnog veka cevi oruđa 152 mm M84 prema (8), pri gađanju brzinom od 2 metka/min, grupe od 40 metaka (tzv. treći režim gađanja), dobijeno je 342 EBM (ekvivalentni broj metaka) za kriterijum 1,7% i 403 EBM za kriterijum 2%. Za ocenu opravdanosti ovih rezultata rezultati su upoređeni sa podacima dobijenim merenjem unutrašnjosti cevi. Tako su vrednosti povećanja kalibara dobijene merenjem za tri ispitivane cevi iznosile (tabela 1):

Mereno i proračunato povećanje kalibra

Tabela 1

Measured and calculated caliber increase

Table 1

Cev	Povećanje kalibra izmereno u m	Povećanje kalibra izračunato u m
1	0,00003	0,0000228
2	0,00002	0,0000195
3	0,00003	0,0000323

Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da se primenom ove metode može korektno proceniti životni vek cevi.

Kontrola habanja i produžetak životnog veka cevi oružja – oruđa

Na osnovu prethodnih razmatranja može se konstatovati da su glavni uzročnici habanja u cevi oruđa: visoka temperatura, visoki pritisak barutnih gasova, hemijska interakcija barutnih gasova u kontaktu sa površinom cevi, interakcija vodećeg prstena projektila sa površinom cevi i nepotpuno zaptivanje barutnih gasova (Ilić, 2007).

Adekvatno tome, osnovni pristup u pokušaju da se erozija cevi smanji mora da uključi sledeće mere:

- smanjenje temperature površine cevi,
- korišćenje takozvanih "hladnih" baruta,
- primena manje erozivnih barutnih punjenja,

– smanjenje veličine naprezanja vodećeg prstena i cevi konstrukcijski boljim oblikovanjem vodećeg prstena i ožlebljenja, kao i korišćenjem tzv. "inertnih" materijala vodećeg prstena koji obezbeđuju potrebnu rotaciju projektila i pouzdano zaptivanje barutnih gasova duž vodišta cevi i

– korišćenje poboljšanih vrsta materijala cevi ili upotreba prevlaka i omotača (lajnera) cevi koji su otporni na tri glavna uzroka erozije.

Sprovedena su brojna istraživanja radi smanjenja temperature površine cevi. Kao rezultat tih istraživanja proistekle su četiri danas poznate metode (Progress in Astronautics and Aeronautics, 1984) za redukciju temperature na površini cevi:

1. spoljašnje hlađenje cevi,
2. pomoću FISA protektora,
3. pomoću ablativa i
4. pomoću aditiva u barutnom punjenju, koji obezbeđuju laminarno hlađenje površine cevi.

Prve tri metode poznate su još od Drugog svetskog rata. Spoljašnje hlađenje cevi uglavnom je razvijeno za cevi avionskih automatskih topova. Kod oruđa zemaljske artiljerije ovaj metod nije našao veću primenu zbog dodatnog povećanja mase oruđa.

FISA protektori sastoje se od tankog sloja mekog čelika koji je prevučen preko projektila, tako da je zadnji kraj u dodiru sa čaurom i punjenjem. Korišćenje ovih protektora eksperimentalno je pokazalo najbolje rezultate u smanjenju erozije kod protivavionskog topa kalibra 37 mm.

Korišćenje ablativa razvijali su, Bracuti, Mark i Brown (Bracuti, 1988) u Engleskoj i SAD. Suština metode jeste stvaranje termičke barijere između površine cevi i barutnih gasova pomoću tzv. inertnih ulja. Na primer, silikonsko ulje smešteno u PVC kapsulama smanjilo je temperaturu površine cevi za oko 302°K na početku ožlebljenog dela cevi. Da bi se ostvario puni učinak primene ablativa, potrebno je da se razviju takvi oblici barutnog punjenja u koje će biti ugrađene ablativne kapsule uz minimalnu promenu gustine punjenja.

Sredinom 50-tih godina prošlog veka prikazan je laminarni omotač cevi sa barutnim gasovima duž unutrašnjosti cevi za vreme opaljenja. Dickenson i McLennon (Dickenson, McLennon, 1968) predložili su korišćenje poliuretanske pene za obezbeđenje hlađenja tela omotača. Efekti poliuretanske pene na životni vek usled erozije za neka oruđa dati su u tabeli 2.

Efekti poliuretanske pene na životni vek oruđa

Tabela 2

Effects of polyurethane foam on the barrel lifetime

Table 2

Kalibar [m]	Metak	Tip	Pritisak [MPa]	Početna brzina [m/s]	Životni vek cevi [broj projektila]	
					standardna municija	municija sa poliuretanskom penom
0,090	M318	APT	358	914	700	1900
0,105	M392	APDS	379	1478	200	400
0,120	M358	APT	372	1066	300	700

Glavni doprinos u smanjenju trošenja cevi pomoću hlađenog omotača cevi ostvarili su švedski naučnici Ek i Jacobson (Ek, Jacobson, 1962). Oni su predložili korišćenje omotača koji se sastoji od 46% titan dioksida, 53% voska i 1% stearil alkohola. Rezultati za nekoliko vrsta ispitivanih oruđa prikazani su u tabeli 3. Naravno, korišćenje ovih aditiva ne podrazumeva uvek univerzalni uspeh. Tako, na primer, kod tenkovskog topa 105 mm M68 primenjeni aditiv vrlo efikasno je smanjio eroziju cevi sa projektilom M392 APDS, dok je njegova primena sa projektilom M490 HT imala znatno manji uspeh. Slično se desilo i kod eksperimentalnih ispitivanja sa haubicama 105 mm XM204 i 155 mm XM115, gde primenjeni aditivi nisu pokazali zadovoljavajuće rezultate. U radu (Lawton, 2001) prikazan je uticaj aditiva na smanjenje temperature u cevi tokom opaljenja. Korišćene su dve nove cevi kalibra 155 mm i pucano je sa dve vrste baruta, od kojih je jedna sadržala adekvatne aditive. Merenja sa 50 ispaljenih projektila pokazala su da je sa modifikovanim barutnim punjenjem temperatura u cevi smanjena za 600 do 950°K. U više radova koji su tretirali primenu aditiva utvrđeno je da su pored titan dioksida i drugi oksidi, posebno oni sa većim specifičnim toplotnim kapacitetom bili još efektivniji.

Efekti TiO₂ i voska na životni vek oruđa

Tabela 3

Effects of TiO₂ and wax on the barrel lifetime

Table 3

Kalibar [m]	Metak	Tip	Pritisak [MPa]	Početna brzina [m/s]	Masa aditiva [kg]	Životni vek cevi [broj projektila]	
						municija bez aditiva	municija sa aditivom
0,090	M431	HEAT-T	365	1200	0,113	240	2100
0,090	M353	APT	358	914	0,170	700	2100
0,105	M456	HEAT-T	400	1173	0,127	125	1000
0,105	M392	APDS-T	379	1478	0,226	100	10000
0,120	M469	HEAT-T	282	1143	0,481	350	1750
0,175	M65			914		375	1200
0,155	XM119	M30			0,368	700	2100

Tako je Pikard (Picard, Ahmad, 1977) razmatrao brojne okside i silikate i pronašao da je hidratizirani magnezijum silikat ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sa toplotnim kapacitetom od 300 kcal/kg u poređenju sa TiO_2 čiji je toplotni kapacitet 193 kcal/kg bio mnogo efikasniji. Superiornost mešavine talka sa voskom u odnosu na mešavinu TiO_2 sa voskom pokazana je na brojnim eksperimentima izvršenim na različitim artiljerijskim oruđima. Slična istraživanja izveli su 2001. autori (Franco, Peter, 2001) koji su eksperimentisali sa silicijumdioksidom kao izolacionim materijalom na zidu cevi. Pokazali su da je potrebna veća temperatura u cevi za oko 150°K kako bi došlo do topljenja čelika, jer silicijumdioksid predstavlja dobar izolacioni materijal.

T. Brousseau i J. Ward (Brousseau, Ward, 1975) merili su smanjenje temperature u blizini površine cevi sa poliuretanskim omotačem i mešavinom (TiO_2 – vosak). Utvrdili su da je prolaz toplote na površinu cevi preko oba aditiva bio skoro isti na početku ožlebljenog dela cevi i vrlo sličan duž cevi. Eksperimentišući sa dve vrste baruta M203 osnovno i M203A1 sa aditivom od TiO_2 autori (Kruczynsk, Stobie, 1989 a) pokazali su, u eksperimentu u kojem su ispalili 1000 projektila, da je stanje cevi koja je koristila barutno punjenje sa aditivom i ukupno ispaljenih 3726 projektila isto kao stanje cevi koja nije imala aditive u barutnom punjenju, a ukupno je ispalila 1800 projektila.

U slučaju municije malih kalibara bilo je dosta teško da se obezbede omotači sa prevlakom aditiva. I pored toga zabeleženi su određeni uspesi. Tako je istraživač Fedyna (Progress in Astronautics and Aeronautics, 1984) objavio da se dodatkom 0,5% mešavine MoO_3 i CaCO_3 jednobaznom barutnom punjenju koje se koristilo kod municije 7,62 mm M80, povećao životni vek cevi za oko 7750 projektila u odnosu na projektovani koji je iznosio 10420. Nastavljajući dalja istraživanja u ovom smeru, Alkidas i dr. (Alkidas, Summerfield, 1977) razmatrali su brojne mehanizme ovih aditiva koji su uključeni u smanjenje trošenja cevi. Neki od njihovih mehanizama koji su bili primećeni su:

- organski sastojci na bazi krečnjačkih aditiva i smanjenje temperature barutnih gasova duž kanala cevi;
- organski sastojci za reakciju sa barutnim punjenjem radi povećanja odnosa CO/CO_2 u laminarnom omotaču, čineći tako da barutni gasovi budu manje hemijski erozioni;
- neorganski sastojci u aditivima uticali su na smanjenje turbulencije u blizini zida cevi, npr. dispergovani vosak i apsorbovanje viška toplotne energije, u nekim slučajevima i uspostavljanje endotermnih reakcija (dehidratacija talka).

Zaključak

Na osnovu do sada iznetog zaključna razmatranja mogu da obuhvate sledeće činjenice:

- Habanje cevi uključuje interakciju većeg broja termičkih, hemijskih i mehaničkih faktora sa površinom cevi, koji aktivno deluju pri svakom opaljenju i promenljivim intenzitetom duž vodišta cevi.
- Mehanizam delovanja erozije, zbog međusobne uslovljenosti relevantnih faktora, vrlo je složen i do današnjih dana još uvek ne postoji realan i pouzdan model određivanja habanja i životnog veka cevi.
- U literaturi postoje brojni manje ili više pojednostavljeni termo-mehanički i termo-hemijski modeli koji su dobro postavljeni, ali koji samo parcijalno rešavaju neke od problema habanja i određivanja životnog veka cevi.
- Prema izvršenim istraživanjima i merenjima dominantan uticaj na eroziju cevi ima termički faktor, zatim hemijski i na kraju mehanički. Ovu gradaciju faktora erozije treba shvatiti uslovno, jer su navedena tri faktora međusobno uslovljena. Drugim rečima, najefikasniji rezultati u smanjenju habanja mogu se postići smanjenjem temperature na površini vodišta cevi, čime bi se povećao životni vek cevi.
- Razvijena su brojna kontrolna merenja, uređaji i tehnike za identifikaciju stanja cevi usled delovanja erozije, a od njih su najizraženiji: proširenje prečnika (kalibar) cevi, pad početne brzine projektila, pad pritiska barutnih gasova u cevi zbog lošeg zaptivanja i pad preciznosti gađanja.
- Kao novije metode istraženi su i drugi prateći elementi erozionog procesa u cevi (mikroprrsline, bele mrlje, kidanje polja), koji se uz primenu teorije mehanike loma mogu koristiti kao relevantni dijagnostički alat za praćenje životnog veka cevi.
- Niže temperature sagorevanja baruta, odnosno korišćenje takozvanih "hladnih" baruta, znatno utiče na povećanje životnog veka cevi.
- Ustanovljeno je da hemijski sastav baruta, odnosno glavni produkti sagorevanja baruta, utiču na životni vek cevi. Preporučuje se da smeša barutnih gasova sadrži što manje koncentracije CO, CO₂ i H₂O, a da se povećaju koncentracije H₂ i N₂.
- Pojedini aditivi, kao što su TiO₂, talk, etil centralit, MoO₃, KCO₃, CaCO₃ i ZnCO₃ koji se dodaju barutima značajno utiču na povećanje životnog veka, pri čemu se, prema literaturi (Bracuti, 2002), kao najefikasniji aditiv izdvaja KCO₃.

- Razvojem materijala od kojih se izrađuje vodeći prsten projektila može se uticati na povećanje životnog veka cevi. Korišćenje organskih polimera, posebno poliamida, za vodeći prsten projektila (Kruczynski, Stobie, 1989 b) utiče se na smanjene sile urezivanja, bolje zaptivanje barutnih gasova i ujednačeno trošenje cevi u vertikalnoj i horizontalnoj ravni.
- Optimizacijom konstrukcije unutrašnje trase cevi, posebno vodišta projektila, takođe je moguće povećanje životnog veka. U tom smislu poželjni su manji uglovi koničnosti u forsirnom konusu, manji uglovi uvijanja polja i žlebova, a posebno polazni ugao, manja dubina žleba odnosno visina polja i veći odnos širina žleba – polje.
- Korišćenje legiranih čelika sa Mo, Co, Cr i V za cevi artiljerijskih oruđa pokazali su veliku otpornost prema eroziji.
- Dobru otpornost na tri glavna uzroka erozije pokazale su i cevi sa prevlakama na bazi hroma i tantala.
- Problematika erozije cevi, iako odavno otkrivena (XIX vek), sa nesmanjenom pažnjom i dalje se istražuje kao važno pitanje ne samo konvencionalnih oruđa velikih kalibara već i budućih – novih koncepcija oruđa, kao što su tečni i gasni topovi, elektromagnetni topovi i dr. Sa sigurnošću se predviđa da će biti potrebno vršiti pravilnu identifikaciju materijala i konstrukcije radi povećanja životnog veka i za nekonvencionalna artiljerijska oruđa.

Problem erozije cevi i definisanja metoda za predviđanje životnog veka cevi je, po problematici koju rešava, vrlo složen i multidisciplinaran. Za rešavanje ovog problema neophodan je timski rad stručnjaka kojim bi bile pokrivene oblasti: mehanike naoružanja, unutrašnje i spoljašnje balistike, mehanike fluida, termodinamike, otpornosti materijala, mehanike loma, metalurgije, fizičke hemije i održavanja, odnosno dijagnostike. Objektivna ocena stanja cevi daje dobar preduslov da se izvrši relativno pouzdana prognoza životnog veka cevi u budućnosti.

Literatura

- Alkidas, A., Summerfield, M. 1977. *Erosive effects of high pressure and high temperature gases on steel*, ASME Journal of Engineering Materials and Technology,
- Bracuti, A., i dr, 1988. *Wear reducing additives-role of the propellant*, Gun Propulsion Technology, American Institute of Aeronautics, Washington,
- Bracuti, A.J. 2002. *Wear Reducing Additives*, US Army Armament Research, Development and Engineering Center, ARWEC-TR-02006, Watervliet, New York,
- Brousseau, T. and Ward, J. 1975. *Reduction of heat transfer to gun barrels by wear reducing additives*, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground,
- Cvetković, M. 1998. *Unutrašnja balistika*, SŠONID-VTA VJ, Beograd,
- Čuev, B. 1976. *Projektovanje stvolnih kompleksov*, Mašinstroenie, Moskva,

Dickenson, D., and McLennon, D. 1968. *Improvement of firing accuracy and the effectiveness of gases through the use of urethane foams*, Journal of Cellulose Plastic,

Ek, S. and Jacobson, D. 1962. *Engineering study of barrel wear Reducing additive*, Wegematic Cooperation, Pt.A,

Franco, P., Peter, H. 2001. *Study of thermally insulating layers*, 19-ti internacionalni simpozijum iz balistike, Interlaken, Švajcarska,

Hristov, N., Savić, S. 2011. *Modelovanje dvofaznog strujanja u cevima oruđa sa kombinovanim punjenjem*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 59, No. 4, pp.158-173,

Ilić, S. 2007. *Razvoj modela održavanja prema stanju sredstava naoružanja*, Doktorska disertacija, Vojna akademija,

Kruczynski, D., Stobie, I. 1989a. *Gun tube-charge-projectile interactions and gun tube wear*, Technical report, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Mayland,

Kruczynski, D., Stobie, I. 1989b. *The effects of obturators on gun tube wear*, Technical report, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Mayland,

Lawton, B. 2001. *Temperature and Heat transfer at the commencement of rifling of a 155 mm gun*, 19-ti internacionalni simpozijum iz balistike, Interlaken, Švajcarska,

Picard, J. and Ahmad, I. 1977. *Proceedings of the Tri-Service Gun Tube Wear and Erosion*, Monterey, California,

Progress in Astronautics and Aeronautics, 1984. *Problem of gun barrel erosion – an overview*, Gun Propulsion Technology, American Institute of Astronautics and Aeronautics, vol. 109. Washington,

Ristić, Z. 2010. *Mehanika artiljerijskih oruđa*, Vojna akademija, Beograd,

Tančić, Lj. 1998. *Zbirka zadataka iz unutrašnje balistike*, SŠONID-VTA VJ, Beograd, TU SSNO,

WEAPONS BARREL LIFE CYCLE DETERMINATION

FIELD: Mechanics, Technology of Maintenance

ARTICLE TYPE: Professional Paper

Summary:

This article describes the dynamic processes within the gun barrel during the firing process in exploitation. It generally defines the basic principles of constructing tube elements, and shows the distortion of the basic geometry of the tube interior due to wear as well as the impact it causes during exploitation. The article also defines basic empirical models as well as a model based on fracture mechanics for the calculation of a use-life of the barrel, and other elements essential for the safe use of the barrel as the basic weapon element. Erosion causes are analysed in order to control and reduce wear and prolong the lifetime of the gun barrel. It

gives directions for the reparation of barrels with wasted resources. In conclusion, the most influential elements of tube wear are given as well as possible modifications of existing systems, primarily propellant charges, with a purpose of prolonging lifetime of gun barrels. The guidelines for a proper determination of the lifetime based on the barrel condition assessment are given as well.

Introduction

The barrel as the basic element of each weapon is described as well as the processes occurring during the firing that have impulsive character and are accompanied by large amounts of energy. The basic elements of barrel and their constructive characteristics are described. The relation between Internal ballistics, ie calculation of the propellant gas pressure in the firing process, and structural elements defined by the barrel material resistance is shown. In general, this part of the study explains the methodology of the gun barrel structural elements calculation, ie. barrel geometry, taking into account the degrees of safety in accordance with Military Standards.

Tube wear and deformations

The weapon barrel gradually wears out during exploitation due to which it no longer satisfies the set requirements. It is considered that the barrel has experienced a lifetime when it fails to fulfill the most important requirements of Military Standards (muzzle velocity, caliber size and shooting accuracy). In studies of barrel wear, there are numerous theories that explain barrel wear as thermal, mechanical and chemical effects of the projectile and propellant gas on the inner tube surface. It was found that barrel wear is a result of simultaneous effects of all factors mutually linked and very complex, so that, theoretically speaking, they cannot be uniformly determined. The extent of effects of particular factors in the wear process depends on the type of weapon systems and exploitation conditions (mode of fire, intensity and mode of barrel cooling, maintenance, storage conditions, etc.).

It is considered that, for small arms, the main factor of wear is the effect of projectiles on the barrel while for artillery weapon barrels it is the erosive effect of powder gases. A life-death barrel which is determined by "ballistic death," is not necessary to be discarded, ie reparation can be done by "new calibration". The procedure of barrel reparation is economically acceptable and gives the possibility of extension of working lifetime and modification of the gun barrel.

Methods of barrel life-time calculation

The conditions for calculating the gun barrel lifetime are described. Since the barrel lifetime depends primarily on the exploitation regime, the usage procedure (shooting program in the military terminology) is prescribed for each individual weapon in particular.

The lifetime empirical calculation methods discussed here comprise the methods of French and Russian scientists, i.e. Justrov, Linte, Gabo and Orlov. They are mainly based on empirical constants and elements of the barrel, bullet, projectile velocity and mode of fire. These methods are only partially reliable and cannot predict with certainty the barrel lifetime, - for example, some expressions state that lifetime increases with the increase in initial velocity and barrel caliber, which is incorrect and contrary to the results of the exploitation in practice.

As far as modern methods are concerned, the principles of fracture mechanics according to the Paris expression and the modified expression of Smith-O'Braski are discussed. A reference value is the crack dimensions, i.e. material fatigue, and, due to the regime of exploitation, temperature, material, pressure, etc. are also taken into account.

For the purpose of controlled wear and extension of the barrel lifetime, the following means for wear reduction are used: agents for lowering the tube surface temperature; so-called "cold" gunpowders; less erosive propellant charges; reduction of the leading ring stress using so-called "inert" materials which provide the necessary rotation of projectiles and reliable sealing of propellant gases along the tube and the use of improved types of barrel materials or the use of coatings and layers (liners) resistant to three main causes of erosion. The application of these barrel materials significantly increases the barrel lifetime (Tables 2 and 3).

Conclusion

The problem of tube wear and the definition of a method for predicting tube lifetime is very complex and multidisciplinary. This problem requires a team work of experts that would cover the following fields: mechanics of weapons, internal and external ballistics, fluid mechanics, thermodynamics, strength of materials, fracture mechanics, metallurgy, physical chemistry, maintenance and diagnostics. Since diagnostics, i.e. the determination of the tube technical conditions, precedes a prognosis of the tube service lifetime, it is logical that the first step towards solving this complex problem is to estimate the conditions, which should serve as a good basis for a proper evaluation of the tube lifetime.

Key words: wear-erosion, barrel lifetime, control of barrel wear.

Datum prijema članka/Paper received on: 31. 05. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on:
18. 07. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted
for publishing on: 20. 07. 2012.