

UDC: 623.526
531.57

FENOMEN EROZIJE CEVI NAORUŽANJA

Potpukovnik dr *Slobodan Ilić*, dipl. inž., simill@ptt.rs,
Vojna akademija,
potpukovnik mr *Goran Marjanović*, dipl. inž., masamisa@ptt.rs,
Vojnotehnički institut

Rezime:

U radu su prikazana dosadašnja istraživanja erozije cevi. Trošenje cevi je neizbežan proces do kojeg dolazi pri svakom opaljenju. Erozijski proces može se definisati kao progresivna povreda ili oštećenje površine cevi i proširenje kalibra usled opaljenja, koja utiče na: gubitak ili pad početne brzine projektila, tačnost i efektivnost oruđa. Kao glavni uzročnici koji utiču na intenzitet erozije cevi opisani su termički, hemijski i mehanički faktori. Njihov uticaj prikazan je u interakciji cev – projektil – barutno punjenje.

Ključne reči: cev, erozija, trošenje, temperatura, abrazija, hemijsko dejstvo, pad početne brzine, projektil, barutno punjenje.

GUN BARREL EROSION

Summary:

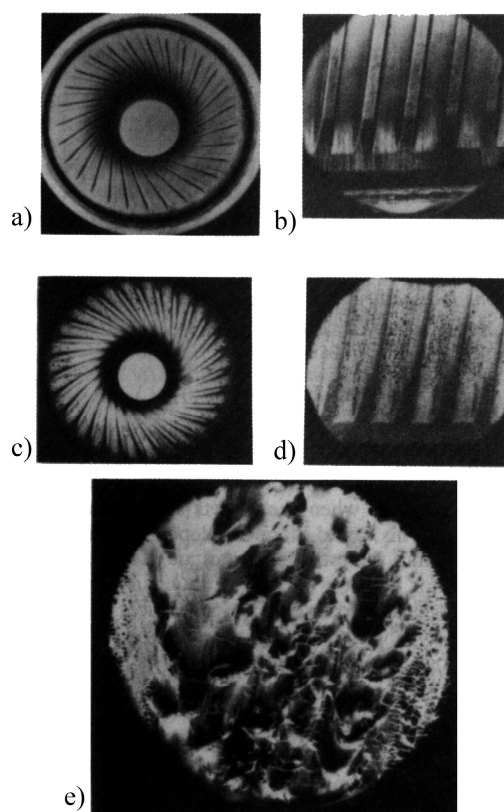
An overview of research into gun barrel erosion is presented in this paper. The gun bore wear is an unavoidable process during normal firing. The wear can be defined as progressive damage of the bore surface and enlargement of the bore, ultimately resulting in loss in the muzzle velocity, range and accuracy. Thermal, chemical and mechanical factors are described as major factors of gun barrel erosion. The influence of these factors is presented in the interaction of gun tube – projectile – propellant.

Key words: gun tube, barrel, erosion, wear, temperature, abrasion, chemical affect, loss of muzzle velocity, projectile, propellant.

Uvod

Brojni pristupi su korišćeni u karakterizaciji mehanizama erozije cevi, kao i u proračunu upotrebnoг veka cevi oruđa [1, 2]. Preko jednostavnih termomehaničkih i termohemijskih modela, koji se navode u brojnoj literaturi, još uvek nije dobijen jedinstven valjan model za proračun erozije i upotrebnoг veka cevi, niti je on potpuno razvijen. To ukazuje na činjenicu

da je problem erozije cevi složen i kompleksan, pa je neophodno da se što bolje sagleda i sistematski izuči. Erozijski proces uključuje interakciju većeg broja termičkih, mehaničkih i hemijskih faktora sa površinom kanala cevi, koji svi aktivno deluju i u isto vreme sa promenljivim intenzitetom duž vodišta projektila i sa različitim uslovima opaljenja [3].



Slika 1 – Oštećenja površine cevi oruđa 105 mm M68 kao rezultat opaljenja metka:

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

Erozija cevi prikazana na slici 1 [4] može se definisati kao progresivna povreda ili oštećenje površine cevi i proširenje prečnika cevi (kalibra) usled opaljenja, koja utiče na smanjenje: početne brzine projektila, tačnosti i efektivnosti oruđa. Naravno, kada smanjenje početne brzine projektila pređe određenu veličinu ili kada projektil premaši dozvoljena odstupanja tačnosti pogađanja, zabranjuje se upotreba cevi (cev se deklasira i nastaje balistička smrt 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.

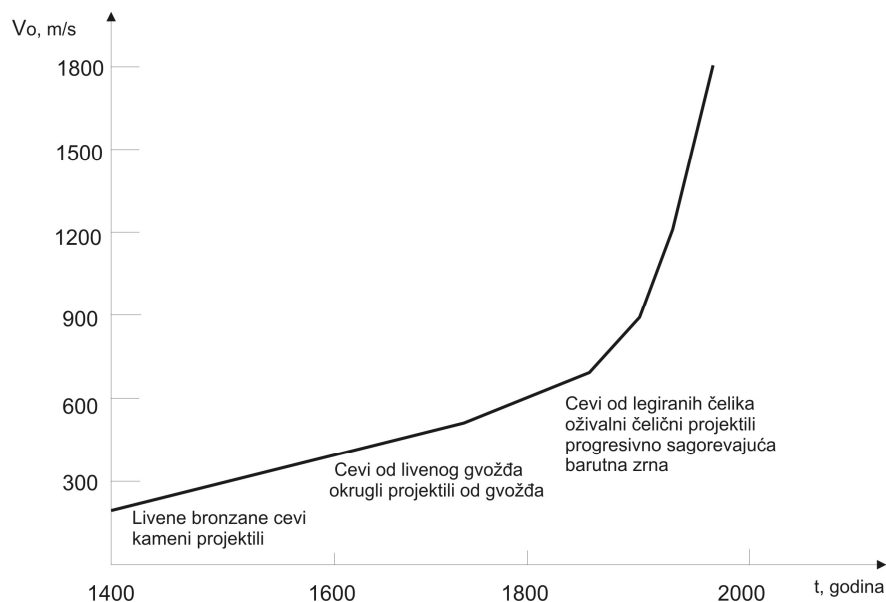
Iako je problem erozije uočen vrlo rano, već sa prvim ožlebljenim cevima, prve sistematske studije ovog problema datiraju od sredine 20 veka. Najautentičniji radovi nastali su za vreme Drugog svetskog rata pod sponzorstvom nacionalnog biroa za istraživanje (National Defense Research Committee – NDRC) i naučnog instituta za razvoj i istraživanje (Office of the Scientific Research and Development) u SAD. Rezultati su sumirani u radu iz 1946. pod naslovom „Hiperbzi topovi i upravljanje erozijom cevi“ [4].

Posle Drugog svetskog rata zanimljivi radovi posvećeni problemima erozije bili su objavljeni na simpozijumima 1950. i 1952. godine. Posebno interesovanje za efekte erozije cevi bilo je u vreme Vijetnamskog rata, kada su intenzivno korišćena artiljerijska oruđa i kada se zbog efekata erozije menjao izgled i geometrija unutrašnje površine cevi, što je direktno uticalo na tačnost i preciznost artiljerijskih oruđa. Od 1970. godine problem erozije cevi je opšte prihvaćen u svetu, a najpre je iniciran u SAD u brojnim projektima koje je pokrenulo ministarstvo odbrane. Neki rezultati ovih projekata saopšteni su na simpozijumima 1977. i 1982. godine. Istraživanja u oblasti erozije i trošenja cevi veoma su značajna. Gotovo na svim simpozijumima U. S. Army Symposium on Gun Dynamics prezentovani su radovi iz ove oblasti, a na simpozijumima održanim 1998. i 2001. godine posebne sekcije pratile su ovu oblast istraživanja.

Fenomenologija erozije cevi artiljerijskih oruđa

U proteklih 600 godina artiljerijska oruđa imala su stalni trend povećanja početne brzine projektila. Na slici 2 prikazan je trend povećanja početne brzine projektila od početka XV veka.

Neke od cevi oruđa, prema slici 2, bile su konstruisane za početne brzine projektila veće od 600 m/s, uključujući i razvoj savremenih artiljerijskih oruđa sa početnim brzinama projektila do 1800 m/s. Ovakav trend povećanja početne brzine projektila, radi povećanja njegove kinetičke energije ili dometa, i povećanje brzine gađanja, bili su glavni uzročnik erozije cevi. Istorijski gledano, haubice i minobacači, zbog manjih opterećenja pri opaljenju i nižih vrednosti prethodno navedenih veličina, imale su manje iznose trošenja cevi i zato duži životni vek od cevi tenkovskih topova i protivoklopnih topova. Danas, međutim, savremene vučne ili samohodne haubice koje imaju cevi dužine oko 7 metara i domete do 50 km imaju i realne probleme sa erozijom cevi. Zbog velikih opterećenja u cevi njihov životni vek je i do 10 puta kraći. Prema nekim nepotvrđenim informacijama, životni vek cevi kod savremenih haubica, pri maksimalnom dometu od 50 km, iznosi samo oko 100 metaka.



Slika 2 – Trend povećanja početne brzine projektila od 1400. godine

Tabela 1

Granice zabrane upotrebe cevi oruđa

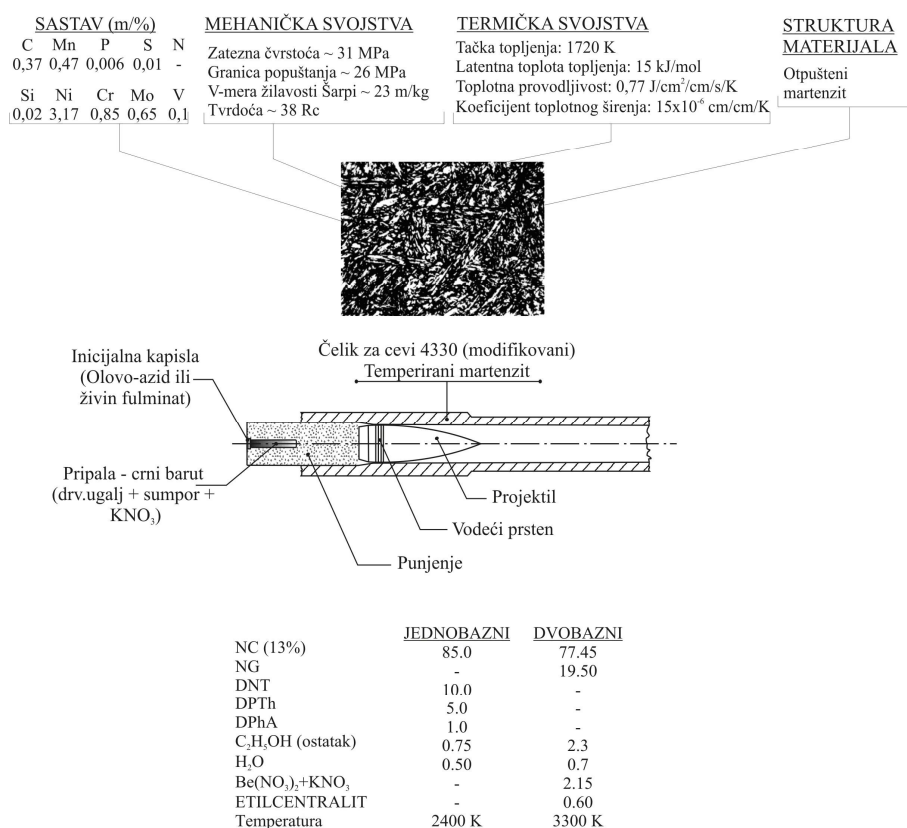
Kalibar	Granica trošenja u mm	Životni vek ^{f)} EFC projektila	Proračunski životni vek EFC projektila	Početna brzina v_o , m/s	Projektil	Temperatura u cevi T , °K
Protivavionski top 40 mm M1	1,32	12000	12000	875	M91(A1)	2433
	^{a)} 349,25					
^{b)} tenkovski top 90 mm	2,54	700	3000	914	M353	2974
	628,65					
Tenkovski top 105 mm	1,91	^{c)} 100	1000	1478	APDS-T	3040
	641,35	^{d)} 125	1000	1173	HEAT-T M456	3040
	1,91					
	641,35	^{e)} 1000	1000	1173	HEAT-T M456	3040
Haubica 155 mm M126	2,54	3350	5000	684	M107	2470
	762					
Haubica 203 mm	3,43	10000	7500	762	M106	2700
	1346,2					

a) mereno od zadnjeg preseka cevi, b) hromirana cev, c) sa poliuretanom, d) bez aditiva, e) sa TiO₂ aditivom, f) EFC (Effective full round) ekvivaletno puno punjenje

U tabeli 1, prema [4], dat je prikaz cevi nekih oruđa velikih kalibara koje su deklasirane zbog erozije ili prslina na unutrašnjoj površini cevi. Oruđa malih kalibara, posebno sa velikom brzinom gađanja, imaju ograničenu veličinu erozije. Tako, na primer, cev topa 20 mm M61, zavisno od brzine gađanja, ima životni vek od 3 000 do 12 000 metaka, a zbog erozije nije veći od 500 do 2 000 metaka.

Prema navedenim podacima u tabeli 1 vidi se da su granice trošenja i granice životnog veka cevi oruđa različite i među njima ne postoji nikakva korelacija, što znači da zavise i od drugih veličina, kao što su: vrsta projektila, temperatura barutnog punjenja, maksimalni pritisak barutnih gasova u cevi, brzina gađanja, vrsta materijala od koje je izrađena cev, geometrija cevi, itd. S obzirom na to da je proizvodnja cevi vrlo skupa, posebno je značajno da se u razvoju novih cevi sagledaju svi aspekti erozije kako bi se njeni efekti minimizirali.

Na slici 3 prikazani su glavni elementi koji se razmatraju pri eroziji.



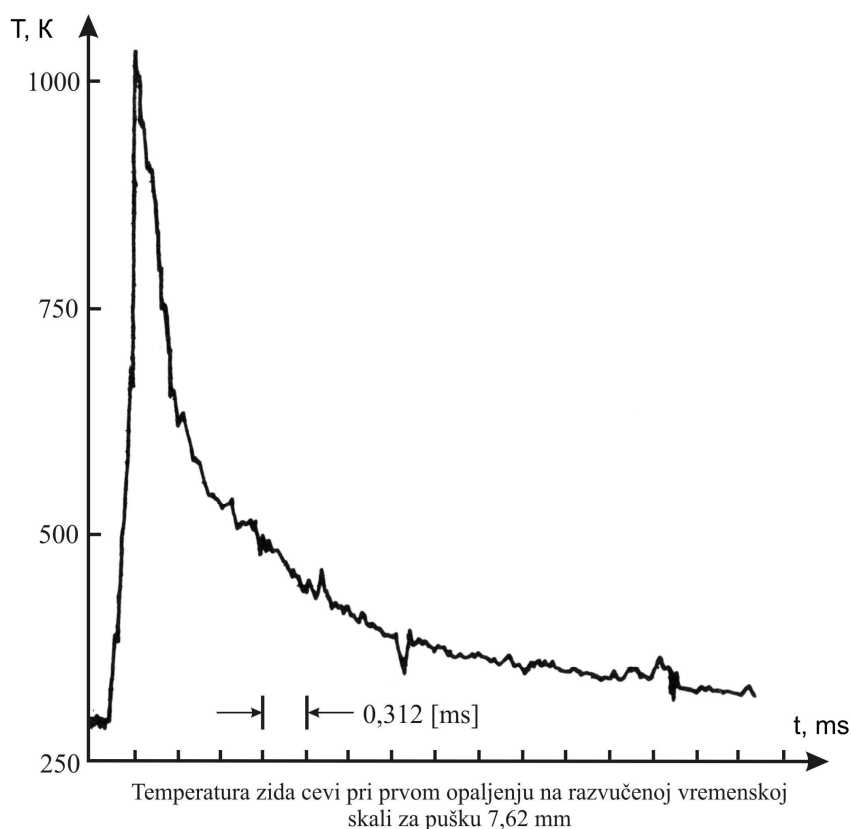
Slika 3 – Sastavni elementi erozije cevi

To su:

- cev koja je izrađena od čelika sa ožlebljenom površinom vodišta projektila, čije su osnovne karakteristike i sastav prikazani na sl. 3, i
- metak, sa barutnim punjenjem, pripalom, kapislom i projektilom. Projektil ima vodeći i centrirajući prsten. Vodeći prsten projektila ne obezbeđuje samo rotaciju projektila oko uzdužne ose, već i zaptivanje barutnih gasova radi dobijanja maksimalnog pritiska u cevi iza projektila.

Opaljenje metka prate visoka temperatura ($2800\text{--}3000^\circ\text{ K}$) i pritisak od oko $140\text{--}550\text{ MPa}$, zavisno od veličine zapremine gasova iza projektila nastalih sagorevanjem barutnog punjenja. Glavni sastojci barutnih gasova su: CO , CO_2 , H_2O , H_2 i N_2 . U gasovima su prisutne i male koncentracije NH_3 , CH_4 , NO i H_2S , kao i drugi molekuli u zanemarljivim količinama. Zavisno od vrste barutnog punjenja barutni gasovi će sadržati veće ili manje koncentracije CO i H_2 .

Navedene komponente produkata sagorevanja barutnih gasova za vreme opaljenja, kao i posle opaljenja, na određeni način hemijski reaguju ne samo međusobno već i sa unutrašnjom površinom kanala cevi.

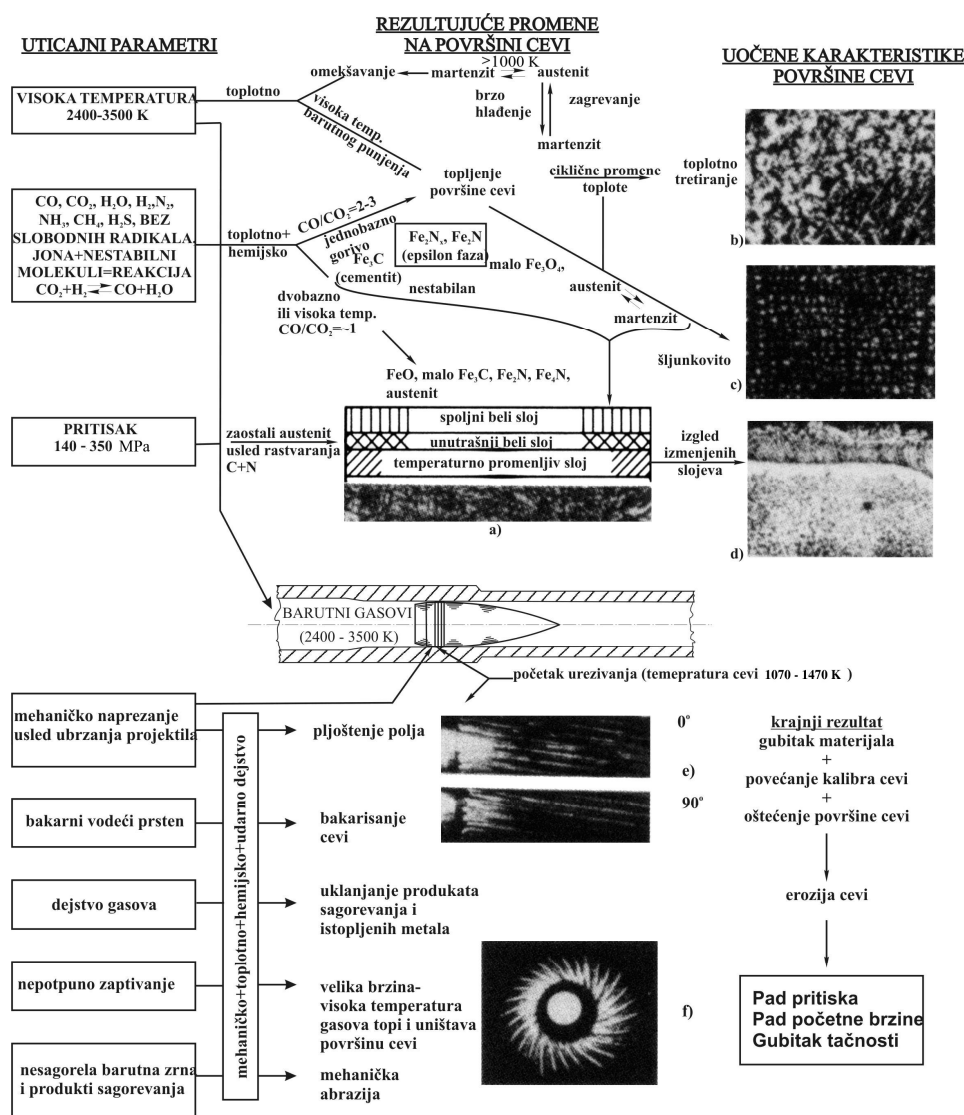


Slika 4 – Temperaturni profil površine cevi

Kod artiljerijskih oruđa velikih kalibara, na primer američke haubice 175 mm M113, vreme za koje se projektil nađe na ustima cevi iznosi $t_u=20$ ms, a kod malih kalibra automatskog naoružanja $t_u=1-2$ ms. U toku ovog kratkog perioda pod pritiskom barutnih gasova, projektil se kreće prema napred, a vodeći prsten utisnut u žleb vodišta cevi stvara kontaktni pritisak velikog iznosa oko 350 MPa. Povećana temperatura međukontakta projektila i cevi može da topi površinu vodećeg prstena stvarajući skoro hidrodinamičko podmazivanje projektila. Toplota se prenosi od zagrejanih gasova na površinu cevi konvekcijom, povećavajući temperaturu površine cevi, koja ne samo da smanjuje mehaničku čvrstoću cevi, već izaziva i hemijsku interakciju. Teorijski proračun i eksperimentalni merni podaci, dobijeni u neposrednoj blizini površine cevi, pokazali su da za prvih nekoliko milisekundi na površini cevi, prema sl. 4 [5], dolazi do naglog temperaturnog skoka.

U slučaju brze paljbe iz cevi velikih početnih brzina temperaturni profil površine cevi se slično menja za kraće vreme i može uzrokovati parcijalno topljenje površine cevi. Neki od važnih procesa koji su uključeni u dejstvo prema površini kanala cevi i utiču na stanje površine cevi za vreme opaljenja zbirno su prikazani na slici 5 [4].

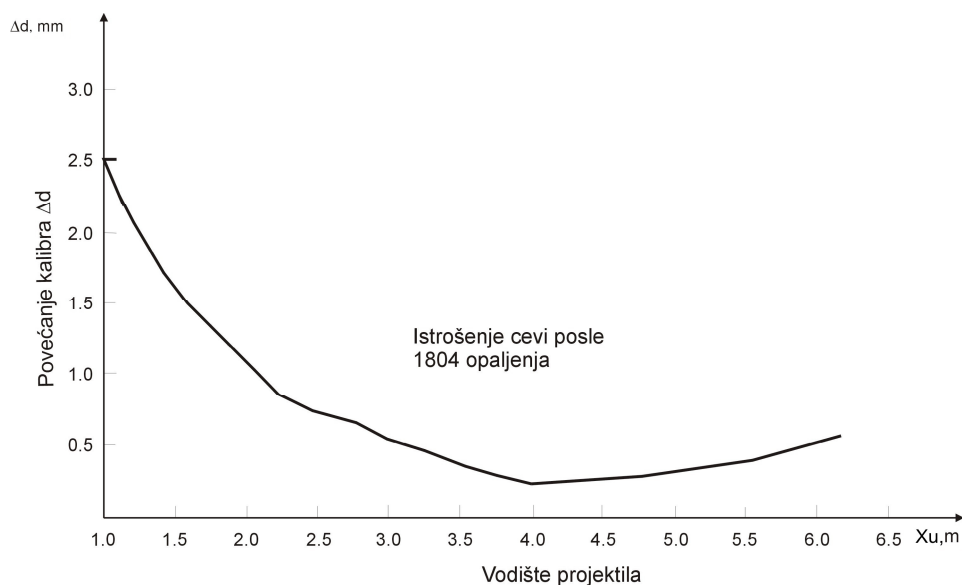
Reakcioni parametri uključuju veliki pritisak i temperaturu, hemijski reaktivne barutne gasove, naprezanja vodećeg prstena i prirodu materijala cevi. Ciklično ponavljanje visokih vrednosti temperature i pritiska doводи do difuzija atoma ugljenika i azota, što izaziva promenu strukture i stanja površine cevi i indukuje feritno-austenitnu i martenzitno-austenitnu transformaciju čelika. Fazne transformacije praćene su zapreminskim promenama kristalne rešetke i stvaranjem dodatnih naprezanja na površini kanala cevi od kojih nastaju mikroprrsline. Pojava ovakovog stanja na površini cevi naziva se toplotno tretiranje (heat checking) [4] i prikazana je na sl. 5. Ako barutno punjenje pri sagorevanju oslobađa visoku temperaturu i ako je odnos gasova CO/CO_2 oko jedan, na površini cevi dolazi do lokalnog rastapanja FeO čestica i austenita. Ovo parcijalno topljenje površine daje izgled „šljunkovite površine“. Barutni gasovi sa nižom temperaturom normalno reaguju sa površinom kanala cevi, stvarajući takozvani beli sloj, koji se sastoji od Fe_3C (cementit) i tzv. gama i epsilon faza (Fe_4N i Fe_2N_x), malih količina Fe_3O_4 , zaostalog austenita i nešto martenzitne faze koja nastaje pri brzom hlađenju. Sledeći sloj koji se povremeno javlja nalazi se između termički izmenjenog sloja i belog sloja i naziva se unutrašnji beli sloj. To je, u stvari, austenit stabilizovan rastvaranjem ugljenika i azota i ponekad može biti parcijalno rastopljen. Vidljivo formiranje ovih slojeva je šematski prikazano na slici 5a. Tačka topljenja ovih slojeva je 1370–1420 K i za približno 520–600 K niža od tačke topljenja čelika. Velike brzine isticanja barutnih gasova ka ustima cevi dovode do odnošenja ovih rastopljenih produkata [4].



Slika 5 – Termofizički i hemijski procesi na površini cevi za vreme opaljenja

Gasna struja često prelazi preko vodećeg prstena projektila (slučaj nepotpunog zaptivanja), pa se po kanalu žleba raznese rastopljeni materijal vodećeg prstena, što dovodi do tzv. bakarijanja cevi. Nepotpuno zaptivanje vodećeg prstena utiče na funkciju vodećeg prstena projektila i na povećanje erozije cevi. Naime, nanošenje bakra u površinske prsline može ubrzati njihovo širenje po dubini zida cevi.

Nesagorele čestice barutnog punjenja na ustima cevi izazivaju mehaničku abraziju površine cevi. Svi navedeni faktori doprinose skidanju dela materijala sa unutrašnje površine cevi, što neizbežno vodi ka povećanju kalibra cevi. Ove pojave su najizraženije na početku ožlebljenog dela cevi. Tipičan oblik promene kalibra neke erodirane cevi prikazan je na slici 6 [4]. Karakter promene prečnika cevi usled erozije utvrđen je eksperimentalno [4], tj. merenjem na eksperimentalnoj cevi 155 mm XM 199 američke proizvodnje, posle 1804 ispaljena projektila. Utvrđeni maksimum erozije unutrašnjosti cevi bio je na udaljenosti od 0,92 m od zadnjeg preseka cevi, gde se upravo nalazio početak ožlebljenog dela cevi.



Slika 6 – Promena prečnika cevi usled erozije

Može se zaključiti da je tokom opaljenja, unutar određenih perioda merenih u milisekundama, površina cevi izložena:

- visokim temperaturama,
- visokim naprezanjima usled pritiska barutnih gasova,
- hemijskim interakcijama sa barutnim gasovima,
- naprezanju usled urezivanja vodećeg prstena, sile trenja i interakcije površine cevi sa vodećim prstenom,
- delovanju toplotnih i mehaničkih efekata usled nedovoljnog (nepotpunog) zaptivanja vodećeg prstena,
- ispiranju površine strujom isticanja barutnih gasova i
- abraziji usled sudara nesagorelih čestica barutnog punjenja sa površinom cevi.

Navedeni toplotni, hemijski i mehanički faktori kompleksno deluju i stalno menjaju uslove duž cevi oruđa za vreme balističkog (cikličkog) opterećenja. Posle svakog opaljenja neminovno dolazi do erozije cevi, a njene posledice su:

- povećanje prečnika cevi (kalibra) i oštećenje površine cevi,
- pad početne brzine projektila,
- pad dometa i gubitak tačnosti gađanja, odnosno povećano rasturanje projektila na cilju.

Može se reći da je upotrebni vek cevi ekstremno kratak. Na primer, kod haubice 105 mm projektil napusti usta cevi nakon 10 ms od trenutka opaljenja. Ako je upotrebni vek cevi ograničen na 1000 projektila, zbog erozije, to znači da će cev imati samo 10 sekundi efektivnog rada. Obično cevi većeg kalibra ranije postaju neupotrebljive od prognoziranog veka upotrebe zbog erozije, osim ako se dodatno ne koriste aditivi, ablativi i drugi dodaci u barutnom punjenju.

Manji kalibri koji imaju veću brzinu gađanja takođe imaju kraći životni vek u odnosu na predviđeni životni vek određen proračunskim putem. Intenzivna eksploatacija cevi kod koje se odstupa od propisanog režima paljbe izlaže unutrašnji kanal povišenim naprezanjima, a posebno temperaturnim. U tom slučaju znatno će se umanjiti normalni (projektovani životni vek) radni vek cevi oruđa.

Istraživanje i određivanje veličine erozije

Pojava, odnosno nastajanje erozije tretirano je sa više aspekata [6, 7, 8, 9, 10] u pokušaju da se matematičkim modelom opiše proces erozije ili da se eksperimentalnim putem odredi zakonitost trošenja cevi. Pri tome je kod većine autora ulazna temperatura u cevi najuticajniji faktor za eroziju cevi. Proračun i merenja blizu površine cevi pokazuju da je površina cevi na početku ožlebljenja opterećena najvećom temperaturom. Zbog sporosti procesa termičke kondukcije samo vrlo tanak sloj površine trenutno dostiže temperaturu provođenja (slika 4).

Ako se prihvate neka pojednostavljenja, kao npr. da je veličina erozije cevi direktno proporcionalna dubini prodiranja neke od brojnih kritičnih izoterma, došlo se do korelacije za prosečnu veličinu trošenja na sloju od 25,4 mm od početka ožlebljenja i izračunata je maksimalna temperatura cevi u toj tački. Pokazano je [4] da je pri temperaturi ispod 930 K erozija cevi zanemarljiva. Kada je veličina temperature između 930 K i 1270 K, veličina erozije raste, proporcionalno kvadratnom korenu od kalibra cevi. Ako je temperatura cevi veća od 1270 K, veličina erozije raste vrlo brzo, jer je temperatura topljenja Fe_3C oko 1420 K.

U istraživanjima [4], koja su sprovedena još 1950, eksperimentišući sa 29 cevi različitog kalibra, razvijena je poluempirijska formula za odre-

đivanje veličine erozije u radijalnom smeru. Pokazano je da se u cevi javljaju mesta sa mikropukotinama, koje su nazvane toplotne mrlje, a rezultat su turbulencije barutnih gasova i sile trenja između vodećeg prstena i cevi. Ove površine se sa svakim opaljenjem tope i ispiraju strujom vrelih gasova. U radovima novijeg datuma koriste se matematički modeli i računarski programi za predviđanje erozije [11, 12].

Značajnu ulogu u istraživanju efekata erozije cevi imaju i hemijski faktori. Kako je ranije istaknuto, efekat „bele cevi“ nastaje usled hemijskih reakcija između barutnih gasova, površine cevi i temperature u cevi. Različiti baruti, sličnih balističkih karakteristika, mogu imati različitu erozivnost.

Barutna punjenja mogu biti jednobazna, dvobazna i trobazna i sastoje se od ugljenika (C), vodonika (H), kiseonika (O) i azota (N). Osim toga, u barutima se obično nalaze i aditivi koji sprečavaju blesak nakon izlaska projektila iz cevi i taloženja u cevi, kao što su kalijum, sumpor, kalaj i olovo. Barutna punjenja sastoje se i od relativno malog udela inicijalnih materijala, kao što su kapisla i pripala. U tim materijalima nalazi se veliki broj elemenata, kao što su: barijum, antimon, aluminijum, bor, kalcijum, kalijum i sumpor.

U radu [13] autor navodi da se barutni gasovi sastoje od CO, CO₂, H₂, H₂O i N₂. Osim ovih glavnih sastojaka u barutnim gasovima nalaze se i jedinjenja u veoma malim količinama, oko 1×10^{-2} mol/kg baruta, kao što su: COS, KOH, HCN i HS. Hemijske reakcije koje se odvijaju na površini cevi zavise od vrste pogonskog punjenja i temperature barutnih gasova. Studije su pokazale da do cementacije površine cevi dolazi već nakon prvog opaljenja i da se ona povećava sa svakim narednim ispaljenim projektilom. Sa povećanjem koncentracije ugljenika tačka topljenja austenita se smanjuje. Penetracija azota slična je ugljeniku i prouzrokuje sniženje tačke topljenja austenita i povećava obrazovanje belog sloja. Spoljašnji beli sloj, iako je u osnovi cementit, biće takođe izložen penetraciji azota i ugljenika. U slučaju da se iz oruđa otvara vatra sa barutnim punjenjem sačinjenim od dvobaznog baruta (koji je u Drugom svetskom ratu imao visoku temperaturu sagorevanja), duž unutrašnje trase cevi stvarao se oksidni sloj FeO, koji se lako skidao mehaničkim delovanjem projektila ili strujom vrelih barutnih gasova.

Istraživanja koja su sprovedena još davne 1946. pokazala su da su cementitni i austenitni sloj glavni uzročnici pojave erozije cevi. Sagorevanjem baruta dolazi do penetracije ugljenika, a možda i azota u površinske slojeve cevi, a njihova količina se povećava sa brojem ispaljenih projektila. Formirani cementitni sloj i/ili visokougljenični austenitni sloj smanjuju tačku topljenja čelika, stvarajući na površini cevi efekte koji su poznati kao „pomorandžina kora“ ili temperaturni zamor. Prsline nastale usled temperaturnog zamora povećavaju izloženost površine cevi barutnim gasovima koji su bogati ugljenikom, čime se povećava i obrazovanje belog sloja. Nadalje dolazi do račvanja i širenja prskotina, zbog čega se, usled njihovog spajanja, otkidaju površinski slojevi cevi. Širenju zamorne prsline doprinose i taloženje bakra ili nekog drugog materijala sa vodećeg prstena projektila, čime povećavaju krtost površinskog sloja čelika.

Prema [14] sprovedena su istraživanja koja su se sastojala u izlaganju cevi visokim pritiscima (300–400 MPa) i temperaturama (oko 3000 K) u veoma kratkom periodu (oko 1 ms), uz pomoć balističkog kompresora. Ovi uslovi odgovaraju brojnim sredstvima naoružanja, kao što su automatska oružja, haubice, tenkovski topovi. Na osnovu promene dimenzija cevi, pomenuti istraživači su došli do zaključka da je erozija cevi linearno proporcionalna prisustvu molekula O_2 u (O_2 / N_2) jedinjenjima. Takođe, zaključili su da veoma slab doprinos eroziji cevi daju jedinjenja CO , N_2 i CO_2 . Prema njihovim istraživanjima mehanizam erozije obuhvata reakcije oksidujućih gasova sa oksidnim slojem koji se skida i odnosi strujom vrelih barutnih gasova. Ova istraživanja su u suprotnosti sa osnovnim mišljenjima vezanim za eroziju cevi.

Nilier i Birkmire [15] vršili su istraživanja interakcije jona sadržanih u barutnim gasovima sa površinom cevi. U istraživanju su merili koncentraciju i dubinu penetracije azota N_2 i kiseonika O_2 . Za eksperiment su koristili 37 milimetarski cilindar u koji su pod pritiskom uduvali različite vrelе barutne gasove. Korišćene su tri vrste baruta M1, M2 i M30 bez aditiva koji smanjuju eroziju cevi i sa aditivima za smanjenje erozije cevi. Za aditive koji smanjuju eroziju cevi koristili su TiO_2 vosak, talkirani vosak i poliuretansku penu.

Pri korišćenju visokotemperaturnog baruta M2 (3319 K) sa talkiranim voskom trošenje cevi se smanjilo sa $36,8 \pm 5,5$ mg na $6,9 \pm 3,2$ mg. Korišćeni niskotemperaturni barut bez aditiva trošenje cevi je bilo još manje i iznosilo je $4,9 \pm 1,9$ mg. Velika koncentracija azota N_2 i kiseonika O_2 na površini cevi nađena je pri korišćenju niskotemperaturnog baruta M1, dok je pri korišćenju visokotemperaturnog i izrazito erozionog baruta M2 koncentracija tih elemenata u površinskom sloju cevi bila zanemarljiva.

Neki istraživači [4] u svojim istraživanjima došli su do zaključka da je debljina sloja u koji su penetrirali azot N_2 i kiseonik O_2 obrnuto proporcionalna temperaturi sagorevanja baruta. Oni su želeli da pokažu da li prisustvo kiseonika O_2 u površinskom sloju cevi utiče na eroziju pri opaljenju sledećeg metka, budući da ovaj tzv. oksidni sloj ima ulogu izolatora. Istraživanja, koja su sprovedena na tenkovskom topu, pokazala su da je erozija cevi više zavisila od temperature baruta nego od hemijskog sastava baruta. Može se reći da je tek u slučaju nižih temperatura gorenja baruta hemijski uticaj na eroziju veći od temperaturnog.

Treba napomenuti da mehanički faktor, takođe, značajno utiče na eroziju cevi. Mehaničko skidanje polja usled interakcija izložene površine cevi sa vodećim prstenom projektila jedan je od mehanizama mehaničke erozije. Drugi ključni faktori su mehanička abrazija, usled nesagorelih čestica barutnog punjenja i visokih brzina klizanja projektila po zidu cevi. Čvrste čestice u gasnoj struji najčešće su nesagorele čestice barutnog punjenja i erodirani delovi materijala otkinuti od zida cevi.

Istraživanja erozije cevi u našoj zemlji

Problem erozije cevi u dužem periodu nije ozbiljno razmatrala ni jedna institucija u našoj zemlji, pa ni institucije Vojske, kao što su VTI i TOC. Razlog tome jeste u činjenici da su sredstva naoružanja u Vojsci vrlo malo eksploatisana, pa je zanemarljivo mali broj cevi oruđa uopšte dostigao svoj životni vek na osnovu broja ispaljenih metaka. Često se događalo da artiljerijsko sredstvo bude taktičko-tehnički zastarelo i kao takvo zamenjeno pre nego što mu istekne bilo koji resurs. S druge strane, i za ona oruđa koja su imala veliki broj opaljenja (kao osnovu za dobru analizu trošenja) nije bilo merenih i zabeleženih podataka. U takvoj situaciji krajni efekti trošenja cevi određivali su se (i sada se određuju) na osnovu nekritički usvojenih kriterijuma koji važe u Rusiji ili SAD.

Osamdesetih godina prošlog veka stručnjaci iz VTI radili su na prognozi životnog veka cevi artiljerijskih oruđa na osnovu saznanja iz postojeće literature [16, 17]. Metode proračuna životnog veka cevi zasnivaju se na empirijskim relacijama koje su razni autori predlagali uz odgovarajuće pretpostavke i pojednostavljenja, zavisno od pristupa problemu. U periodu od 1999. do danas, posle saznanja o realnom stanju po pitanju trošenja cevi, Katedra mehanike naoružanja i balističkih sistema, Odseka logistike VA, tokom 2000. godine započinje izradu projekta u kojem se razmatra ovaj problem u okviru NIR-a. S tim u vezi, objavljeno je nekoliko radova o trošenju cevi i vodećeg prstena projektila. U radu [18] prikazan je jedan model trošenja vodećeg prstena projektila. Projektil u kretanju rotira sa vodećim prstenom kao klizačem velikom brzinom klizanja. Model za kvantifikaciju trošenja prstena, zasnovan na teoriji trošenja usled zagrevanja (topljenja), postavljen je na osnovu jednačine za jednodimenzionalno provođenje toplote.

U radu [19] opisan je mehanizam trenja i trošenja vodećeg prstena projektila usled zagrevanja i topljenja kontaktne površine projektila. Teorijski model je dat na osnovu poznatog modela u literaturi. U radu je određena veličina trošenja vodećeg prstena i uticaj nekih parametara na silu trenja i debljinu filma otopljenog materijala prstena. Dobijeni rezultati ilustrovani su na odabranom primeru.

U proteklom periodu do danas u dostupnim stručnim publikacijama, kao i sa stručnih skupova i saopštenja, mogu se povremeno naći radovi u kojima su tretirani problemi erozije cevi. Do danas nije poznata publikacija u kojoj je problem erozije cevi, s obzirom na složeno delovanje uticajnih veličina i faktora, potpuno i do kraja rešen analitičkim putem. Može se reći da su eksperimentalna i fundamentalna istraživanja samog procesa erozije cevi na mnogo višem nivou od matematičkog opisa i formalizacije ovog problema. Kod nas, u našoj praksi, uglavnom se koristi klasična teorija koju su prihvatili strani autori pre 50 godina. Od tog vremena do danas praktično nisu učinjeni nikakvi značajni pomaci, bilo u teorijskom, bilo u eksperimentalnom izučavanju ovog problema.

Zaključak

Na osnovu iznetih činjenica može se zaključiti:

- erozija cevi uključuje interakciju većeg broja termičkih, hemijskih i mehaničkih faktora sa površinom cevi, koji aktivno deluju pri svakom opaljenju i promenljivim intenzitetom duž vodišta projektila;

- mehanizam delovanja erozije zbog međusobne uslovljenosti relevantnih faktora vrlo je složen i do danas još uvek ne postoji realan i pouzdan model određivanja erozije i životnog veka cevi;

- postoje u literaturi brojni manje ili više pojednostavljeni termomehanički i termohemijski modeli koji su dobro postavljeni, ali koji samo parcijalno rešavaju neke od problema erozije;

- 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 međusobno uslovljena faktora. Drugim rečima, najefikasniji rezultati u smanjenju erozije mogu se postići smanjenjem temperature na površini vodišta projektila;

- ustanovljeni su i istraženi i drugi prateći „nusproizvodi“ erozivnog procesa u cevi (mikroprsrline, bele mrlje, kidanje polja) koji dovode do mehaničkih oštećenja cevi;

- niže temperature sagorevanja baruta, odnosno korišćenje takozvanih „hladnih“ baruta znatno utiče na smanjenje efekata erozije cevi;

- ustanovljeno je da hemijski sastav baruta, odnosno glavni produkti sagorevanja baruta, utiču na eroziju cevi. Preporučuje se da smeša barutnih gasova sadrži što manje koncentracije CO, CO₂ i H₂O, a da se povećaju koncentracije H₂ i N₂;

- fenomen erozije cevi, iako odavno otkriven (XIX vek), sa nesmanjenom pažnjom i dalje se istražuje ne samo kod konvencionalnih oruđa velikih kalibara već i budućih – novih koncepcija oruđa, kao što su tečni i gasni topovi, elektromagnetni topovi i dr. Predviđa se da će biti potrebno vršiti pravilnu identifikaciju materijala i konstrukcije radi smanjenja efekata erozije i za nekonvencionalna artiljerijska oruđa;

- u našoj zemlji problem erozije nije adekvatno tretiran u dužem periodu, u teorijskom i eksperimentalno-istraživačkom smislu. Zato su saznanja o ovom problemu nedovoljna. Zbog ovakvog stanja u našoj praksi problemu erozije cevi treba pristupiti sistematski, korak po korak, praktično od početka, sa težištem na matematičkom modelovanju u odnosu na eksperimentalne provere koje moraju da sačekaju bolja vremena.

Radi boljeg sagledavanja relevantnih veličina i faktora koji interaktivno i neprestano deluju u procesu opaljenja, neophodno je da se na osnovu poznatih teorija i metoda primenjene mehanike kretanja tela, mehanike oruđa, unutrašnje i spoljašnje balistike, postavi teorijsko-numerički model koji je

tačniji i pouzdaniji za određivanje relevantnih podataka koji će omogućiti objektivniju ocenu stanja cevi, odnosno erozije. Problem erozije cevi i definisanja metoda za predviđanje upotrebnoog veka cevi je, po problematici koju rešava, vrlo složen i multidisciplinaran. Za njegovo rešavanje neophodan je timski rad stručnjaka kojim bi bile pokrivene oblasti: mehanike naoružanja, unutrašnje i spoljašnje balistike, mehanike fluida, termodinamike, otpornosti materijala, metalurgije, fizičke hemije i održavanja, odnosno dijagnostike. Objektivna ocena radne sposobnosti cevi daje dobar preduslov da se izvrši relativno pouzdana prognoza upotrebnoog veka cevi u budućnosti.

Literatura

- [1] Ministarstvo odbrane SSSR: *Инструкция по категорированию артиллерийского вооружения*, Vojno izdavaštvo ministarstva odbrane, Moskva, 1951.
- [2] TU SSNO: *Uputstvo o oštećenjima cevi artiljerijskih oruđa i načini ocene ishabanosti*, TU JNA, bilten br. 25, Beograd, 1959.
- [3] Jaramaz, S., *Metode za predviđanje erozije cevi artiljerijskih oruđa*, Tehnički izveštaj, 02–240–63, VTI Beograd, 1983.
- [4] Progress in Astronautics an Aeronautics: *Problem of gun barrel erosion – an overview*, Gun Propulsion Technology, American Institute of Astronautics an Aeronautics, vol. 109. Washington, 1984.
- [5] Moeller, C. E., *Measurement of Transient Bore Surface Temperatures in 7.62 mm Gun Tubes*, Technical report, AD-780938, 1973.
- [6] Conroy, J. P., *Theoretical Thermal and Erosion Investigations*, Technical report, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 2001.
- [7] Sopok, S., Fleszar, M., *Ablative erosion model for the M256-M829E3 gun system*, US Army Armament Research, Development and Engineering Center, Watervliet, New York, 2001.
- [8] Conroy, J. P. i dr, *An Investigation of the Erosion Physics-Mechanisms of Curent Army Systems*, Technical report, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 2001.
- [9] Sopok, S., Vottis, P., *Comprehensive erosion model for the 120 mm gun system*, US Army Armament Research, Development and Engineering Center, Watervliet, New York, 2001.
- [10] Weinacht, P., *A numerical method for predicting thermal erosion in gun tubes*, Technical report, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 2001.
- [11] Sopok, S. i dr., *First computer code for predicting thermochemical erosion in gun barrels*, US Army Armament Research, Development and Engineering Center, Watervliet, New York, 2001.
- [12] Sopok, S., *Erosion modeling of vented combustor cannon bore materials*, Technical report, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 1996.
- [13] Fredman, E., *Thermodynamic Properties of Propellants*, Gun Propulsion Technology, American Institute of Astronautics an Aeronautics, vol. 109. Washington, 1984.