

# Adhezijsko trošenje glatke cijevi topničkih oružja

---

**Gelemanović, Leopold**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2012**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:697554>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-28**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:  
Doc. dr. sc. Mirko Jakopčić, dipl. ing

Student:  
Leopold Gelemanović

Zagreb, 2012

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ.....	2
POPIS SLIKA.....	4
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA.....	6
SAŽETAK.....	7
1. UVOD.....	8
2. NAMJENA I OSNOVNE KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE GLATKIH CIJEVI TOPNIČKIH ORUŽJA.....	9
2.1 Namjena i podjela topničkog naoružanja.....	9
2.1.1 Topovi.....	10
2.1.2 Haubice.....	10
2.1.3 Top haubice.....	10
2.1.4 Minobacači.....	11
2.2 Povijesni razvoj topničkih oružja.....	12
2.3 Dijelovi topničkih oružja.....	14
2.4 Osnovne konstrukcijske značajke glatkih cijevi topničkih oružja.....	16
2.4.1 Načini mjerenja istrošenosti cijevi.....	16
3. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE PROJEKTILA NAMIJENJENOG KRETANJU KROZ GLATKU CIJEV.....	18
4. MEHANIZAM ADHEZIJSKOG TROŠENJA I NJEGOVO NASTAJANJE U CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA.....	20
5. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE I IZBOR MATERIJALA ZA IZRADU UZORAKA.....	22
5.1 Otpornost na adhezijsko trošenje.....	22
5.2 Izbor materijala za izradu uzoraka.....	24
5.2.1 Poboljšavanje.....	25
5.2.2 Nitriranje.....	28
5.2.3 Tvrdo kromiranje.....	30
6. ANALIZA REZULTATA.....	31
6.1 Ispitni uzorci.....	32
6.2 Rezultati ispitivanja.....	32
6.2.1 Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 36CrNiMo4.....	32
6.2.2 Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 35CrMo4.....	33

6.2.3 Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN C45.....	35
6.3 Analiza rezultata .....	36
7. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA .....	40

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1	Američki top 155 mm M1 [3] .....	11
Slika 1.2	Minobacač 82 mm [4] .....	12
Slika 2.1.	Prve bacačke naprave: balista (lijevo) i katapult (desno) [5] [6] .....	12
Slika 2.2.	Topnička cijev na postolju odnosno lafetu [8] .....	14
Slika 2.3.	Prikaz osnovnih dijelova topničkog oružja [9].....	14
Slika 4.1	Jedinični događaj adhezije [13].....	20
Slika 5.1.	Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje.....	22
Slika 5.2	Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje .....	23
Slika 5.3	Dijagram postupka klasičnog poboljšavanja čelika [17].....	26
Slika 5.4	Dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja čelika [17].....	26
Slika 6.1	Srednje vrijednosti faktora trenja za čelik 36CrNiMo4 .....	36
Slika 6.2	Srednje vrijednosti faktora trenja za čelik 35CrMo4 .....	37
Slika 6.3	Srednje vrijednosti faktora trenja za čelik C45 .....	37
Slika 6.4	Srednje vrijednosti faktora trenja za pojedine čelike ovisno o stanju uzorka .....	38

**POPIS TABLICA**

Tablica 6.1	Rezultati ispitivanja poboljšanog čelika 36CrNiMo4 .....	32
Tablica 6.2	Rezultati ispitivanja poboljšanog i nitriranog čelika 36CrNiMo4 .....	33
Tablica 6.3	Rezultati ispitivanja poboljšanog i tvrdo kromiranog čelika 36CrNiMo4 .....	33
Tablica 6.4	Rezultati ispitivanja poboljšanog čelika 35CrMo4 .....	33
Tablica 6.5	Rezultati ispitivanja poboljšanog i nitriranog čelika 35CrMo4 .....	34
Tablica 6.6	Rezultati ispitivanja poboljšanog i tvrdo kromiranog čelika 35CrMo4 .....	34
Tablica 6.7	Rezultati ispitivanja poboljšanog čelika C45 .....	35
Tablica 6.8	Rezultati ispitivanja poboljšanog i nitriranog čelika C45 .....	35
Tablica 6.9	Rezultati ispitivanja poboljšanog čelika C45 .....	35
Tablica 6.10	Usporedba faktora trenja svih uzoraka nakon 15 sekundi ispitivanja .....	36

POPIS			OZNAKA
Oznaka	Jedinica	Opis	
d	mm	kalibar cijevi	
$F_N$	N	normalna sila	
$F_T$	N	sila trenja	
G	N	opterećenje	
$n_{okr}$	okr/min	broj okretaja ispitnog prstena	
$\mu$	-	faktor trenja	
$R_{p0,2}$	$N/mm^2$	konvencionalna granica razvlačenja	
$R_m$	$N/mm^2$	vlačna čvrstoća	
A	%	istezljivost	
Z	%	konačno suženje presjeka	
KU	J	udarna radnja loma	
$S_k$	-	stupanj zakaljenosti	
$H_{max}$	HV	tvrdoća kaljenja na presjeku	
$H_{kaljeno}$	HV	maksimalno postiziva tvrdoća	
t	s	vrijeme	
L	mm	produljenje	

## SAŽETAK

U radu je opisan razvoj topničkog naoružanja, njihova namjena i osnovne konstrukcijske značajke cijevi i projektila namjenjenog gibanju kroz glatku cijev. Proučeni su mehanizmi trošenja cijevi i posljedice trošenja cijevi na balističke značajke oružja. U radu se istražuje otpornost materijala cijevi na adhezijsko trošenje. Ispitani uzorci su od čelika za poboljšavanje 36CrNiMo4, 35CrMo4 i C45. Čelici su poboljšani, poboljšani i nitrirani, te poboljšani i tvrdo kromirani.

Ispitivanje je odrađeno na uređaju za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje, a pokazatelj otpornosti je faktor trenja  $\mu$  postignut na dodirnoj površini između uzorka i ispitnog prstena. Dobiveni rezultati su kvantitativni pokazatelji otpornosti ispitivanih čelika na trošenje adhezijom.



## 1. UVOD

Na dodirnim površinama dva predmeta javlja se trenje koje uzrokuje trošenje materijala, te dolazi do promjene uporabnih svojstava djelova. Kako se trenje javlja u radu strojeva, tako se javlja i kod oružja i to u cijevi između projektila i kanala cijevi. Trenje i trošenje negativno utječe na rad, a kako ih nije moguće potpuno eliminirati teži se smanjiti ih na najmanju moguću mjeru.

Glavni cilj smanjenja trenja i trošenja je povećanje efikasnosti sustava, smanjenje troškova održavanja i zastoja, povećanje sigurnosti te produljenje vijeka trajanja oružja. Jedan od mehanizama trošenja koje se javljaju u cijevi je i adhezijsko trošenje koje je opisano u ovom radu.

Rad je napisan u šest poglavlja u kojima će biti opisana namjena i glavne značajke glatkih cijevi topničkih naoružanja i njihova podjela. Opisane su glavne značajke projektila namjenjenog za ovu vrstu cijevi. Rad sadrži rezultate ispitivanja adhezijskog trošenja na tri različite vrste čelika u tri različita stanja toplinske obrade.

Rezultati su nakon ispitivanja analizirani i prikazani tablično, te radi boljeg razumijevanja i praćenja sadržaja, rad je ilustriran slikama i dijagramima.

## 2. NAMJENA I OSNOVNE KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE GLATKIH CIJEVI TOPNIČKIH ORUŽJA

### 2.1 Namjena i podjela topničkog naoružanja

Topničko naoružanje predstavlja skup sredstava borbene tehnike koja paljbenim djelovanjem izvršavaju različite zadaće, kao što su: uništavanje neprijateljske žive sile, borba s tenkovima i drugim oklopnim sredstvima, borba s topničkim oružjima, razaranje građevinskih objekata i utvrda, uništavanje zapovjednih mjesta itd. Ovo je najmasovnije naoružanje suvremenih postrojbi, poslije streljačkog naoružanja. Topničko naoružanje obuhvaća oružja klasičnog topništva i topnička raketna oružja. Ova oružja se odlikuju velikom bojnom moći i pouzdanim radom. S obzirom na široku primjenu topničkog naoružanja i njegova podjela se može izvršiti prema ovim kriterijima:

a) Prema konstrukcijsko balističkim osobinama na:

- Klasična oružja (topovi, haubice, top-haubice, minobacači),
- Raketna oružja (lanseri raketa).

b) Prema osnovnoj namjeni u borbi na:

- Oružja za potporu,
- Protuoklopna oružja.

c) Prema veličini kalibra na:

- Oružja malog kalibra (do 105mm),
- Oružja srednjeg kalibra (od 105 do 155 mm),
- Oružja velikog kalibra (preko 155 mm).

d) Prema bojnoj moći djelovanja na:

- Laka oružja (topovi do 90 mm, haubice do 105 mm, minobacači do 82 mm),
- Srednja oružja (topovi do 105 mm, haubice do 155 mm, minobacači do 120 mm),
- Teška oružja (topovi preko 105 mm, haubice preko 155 mm, minobacači preko 120 mm).

e) prema načinu kretanja na:

- Samovozna oružja,
- Vučna oružja,
- Prijenosna-prijevozna oružja [1].

### **2.1.1 Topovi**

Osnovni predstavnici topništva su topovi, a prepoznatljivi su po velikoj dužini cijevi koja je u rasponu od 25 do 70 kalibara. Zbog velike početne brzine projektila njihove su trajektorije položene i u pravilu se rabe za paljbu donjim skupinama kutova elevacije (do 45 stupnjeva). Budući da se najčešće rabe za izravnu paljbu, njihovi su ciljevi ograničenih dimenzija (tzv. točkasti ciljevi), koji mogu biti pokretni i nepokretni. Takvi su ciljevi najčešće tenkovi, kamioni, zrakoplovi, brodovi i slično, dok su nepokretni ciljevi bunker i drugi fortifikacijski objekti. Zbog mogućnosti izravnog pogađanja ciljeva, rabi se u protuoklopnoj odnosno u protutenkovskoj borbi. U tu svrhu prilagođeno je i posebno streljivo (potkalibarno, kumulativno, pancirno) [2].

### **2.1.2 Haubice**

Na prvi pogled riječ je o oružjima koja su vrlo slična topovima, no postoji niz razlika među njima. Prvo će se zamijetiti njihove kratke cijevi, dužine u pravilu od 15 do 30 kalibara. Ta se oružja češće rabe za posrednu paljbu, dakle tamo gdje postoji potreba za ubacne putanje koje se postižu pri gornjoj skupini kutova (iznad 45 stupnjeva). Streljivo namijenjeno haubicama ima promjenljiva barutna punjenja, čime se već kod punjenja oružja može mijenjati količina barutnog punjenja, a košuljica projektila je najčešće razorno-rasprskavajuća. Na taj način se omogućuje paljba različitim putanjama i daljinama pri istoj elevaciji. Zbog nižih tlakova u cijevi i uporabom manjih barutnih punjenja produžuje se operativni vijek cijevi, a ukupna masa oružja zbog toga može konstrukcijski biti manja [2].

### **2.1.3 Top haubice**

Današnja su topnička oružja zbog svoje univerzalnosti konstrukcijski u pravilu top-haubice koje u sebi sadrže obilježja obaju gore spomenutih oružja. Elevacije koje postižu su u pravilu od -5 do 75 stupnjeva, a broj barutnih punjenja je u pravilu veći od 10. Zbog univerzalnosti takva oružja su opremljena ciljničkim napravama i borbenim kompletom streljiva koji omogućavaju zadovoljenje zahtjeva za izravnu i posrednu paljbu. Topnička oružja u samovoznim izvedenicama u pravilu su top-haubice, bez obzira na to kakva im je tipska oznaka proizvođača [2].

### 2.1.4 Minobacači

Minobacači su topnička oružja koja se po konstrukciji i načinu gađanja znatno razlikuju od topova i haubica. Ispaljuju projekte (minobacačke mine) pod velikim kutovima elevacije (45 do 88 stupnjeva), s relativno malim početnim brzinama, do 350 m/s. Zbog malih barutnih punjenja i niskih tlakova (reda veličine 1000 bara), stijenke njihovih cijevi su daleko tanje od topovskih, pa u usporedbi s topovima i haubicama njihova masa može biti i do 30 puta manja. Cijev minobacača koja može biti glatka ili ožljebljena se pri paljbi svojom petom oslanja na široku i krutu podlogu, izravno ili preko hidroelastičnog sustava, a na gornjem se dijelu naslanja na odgovarajući dvonožac koji omogućava postavljanje smjera i elevacije. Zbog svoje lagane konstrukcije i jeftine proizvodnje, minobacači se masovno rabe kako u pješaštvu (manjih kalibara) tako i u topništvu (u pravilu kalibra 120 mm i većeg). U novije doba minobacači se sve više ugrađuju na pokretne platforme, a njihov rad je automatiziran. Na slici 1.1 i 1.2 prikazana su moderna topnička naoružanja [2].



Slika 1.1 Američki top 155 mm M1 [3]



Slika 1.2 Minobacač 82 mm [4]

## 2.2 Povijesni razvoj topničkih oružja

Bacačke naprave (baliste, katapultit itd.) od prije dvije tisuće godina predstavljaju prva ozbiljnija ostvarenja čovjekove želje da protivnika pogodi sa što veće udaljenosti. Na slici 2.1 prikazane su takve naprave.



Slika 2.1. Prve bacačke naprave: balista (lijevo) i katapult (desno) [5] [6]

Da su se u raznim europskim zemljama vatrena balistička oružja počela javljati tek tokom 14. stoljeća, povjesno je registrirano, ali gdje i kada se baš prvi put ostvarilo i primjenilo vatreno oružje, nema dovoljno pouzdanih podataka. U početku su vatrena oružja imala drvene cijevi ojačane željeznim obručima, ali se ubrzo prešlo na otpornije cijevi od lijevanog željeza ili bronce. Kanal cijevi je bio gladak. Cijev se punila sprijeda crnim barutom i kamenim

(odnosno kasnije metalnim) kuglama. Domet je jedva dostizao par stotina metara. O preciznosti gađanja i ubojnoj moći nije bilo ni govora. Najvredniji je bio psihološki učinak grmljavine, koja je pratila opaljivanje takvog oružja. Izrada oružja je bila individualna, proizvođači su bili pojedini majstori, pa je vladalo veliko šarenilo kalibara i rješenja uopće. Osnovni podatak o moćnosti oružja je bila masa odnosno promjer kugle koju je izbacivalo oružje, a to znači unutarnji promjer cijevi. Pošto se u Italiji masa izražavala u librima, onda u ovisno o tome, koliko je težak projektil „qua libra“, cijenila se i mogućnost oružja. Otuda i dolazi današnja riječ kalibar. Kalibar cijevi se i danas uzima kao jedan od osnovnih pokazatelja mogućnosti topničkog oružja [7].

Novi val razvoja topništva počinje zapravo polovicom XIX. stoljeća pronalaskom moćnijeg baruta, tzv. malodimnog ili bezdimnog baruta. Primjena moćnijeg baruta omogućila je veće domete oružja, a projektili su se mogli puniti eksplozivnim (barutnim) punjenjem za čije je aktiviranje na cilju bio potreban upaljač. U želji da se u projektil smjesti što više eksploziva, došlo se na ideju da projektil dobije izduženi, cilindrični oblik. No pri letu takvog projektila je, zbog djelovanja otpora zraka, dolazilo do njegovog prevrtanja (tumbanja), što je rezultiralo rasipanjem pogodaka i smanjivalo domete. Jednako tako problem se pojavljivao i kod aktiviranja upaljača, budući da je projektil na cilj padao u nekontroliranom položaju pa je često dolazilo do zatajivanja funkcije upaljača. Da bi se onemogućilo tumbanje projektila u letu, uvodi se žiroskopska stabilizacija projektila na trajektoriji koja se postiže njegovom velikom rotacijom tijekom leta. Sve do polovice devetnaestog stoljeća cijev je bila čvrsto povezana s postoljem (lafetom), a preko njega s podvozom. Prilikom opaljenja sila reakcije koja se prenosila na postolje trzala je čitavo oružje koje se pomicalo sa zadanog položaja i po nekoliko metara. Poslije svakog opaljenja oružje se moralo dogurati na njegovo paljbeno mjesto i ponoviti ciljanje i usmjeravanje cijevi, što je bilo zamorno za posluhu, a brzina paljbe bila je vrlo mala. Takva su se oružja nazivala "oružja s krutim lafetom". Zbog svega toga moralo se riješiti spajanje cijevi s lafetom na elastičan način, najčešće hidroelastičnom vezom. Razvili su se odgovarajući hidroelastični sustavi (ili tzv. protutržajući sustavi) koji su omogućavali paljbu bez pomicanja oružja s osnovnog položaja. Naime, pri opaljenju je dolazilo do trzanja samo jednog dijela oružja (cijev sa zadnjakom i zatvaračem), dok je lafet s ciljničkim napravama i drugim pomoćnim uređajima ostao nepokretan [7].

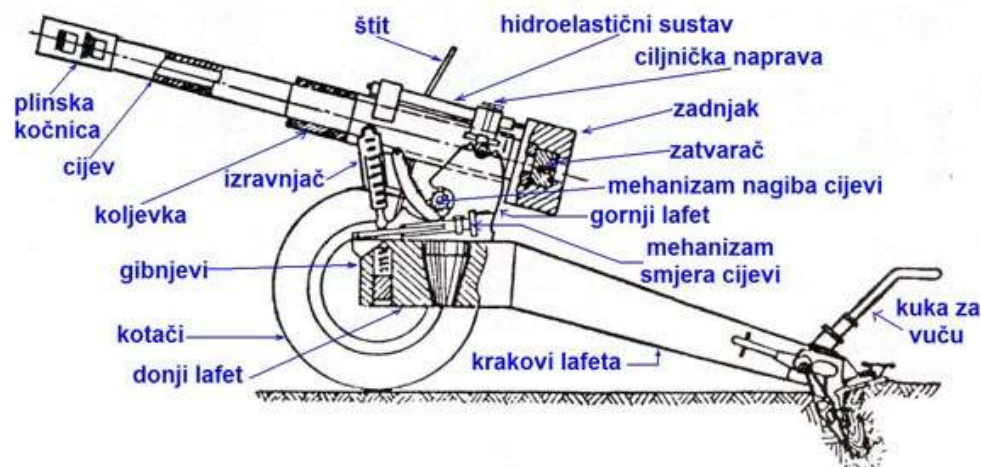
Današnja topnička oružja kalibra 155 mm postižu domete od 40 kilometara i više, s najvećom masom oružja ispod 4 tone [7]. Na slici 2.2 prikazan je top na lafetu.



Slika 2.2. Topnička cijev na postolju odnosno lafetu [8]

### 2.3 Dijelovi topničkih oružja

Topnička oružja, poglavito ona koja pripadaju skupini topova i haubica sastavljena su od nekoliko osnovnih dijelova i sklopova koji su zajednički za većinu klasičnih topničkih oružja. Uglavnom ih možemo nabrojati kao: cijev, zadnjak, zatvarač, plinska kočnica, kolijevka, hidroelastični sustav, gornji i donji lafet, mehanizmi elevacije i smjera, izravnjači, krakovi lafeta, elementi podvoza, ciljničke naprave i dr. [9]. Na slici 3.1 shematski su prikazani osnovni dijelovi topničkog oružja.



Slika 2.3. Prikaz osnovnih dijelova topničkog oružja [9]

Cijev je zapravo najvažniji dio topničkog oružja, a u njoj prilikom paljbe dolazi do pretvaranja kemijske energije barutnog punjenja u kinetičku i potencijalnu energiju potrebnu za pokretanje projektila i njegov dolet na cilj. Na prvi pogled teško je percipirati red veličine energije predane projektilu i razvijanje goleme snage tih toplinskih strojeva. Cijev omogućava

projektilu postizanje potrebne početne brzine (brzina na ustima cijevi) i određuje mu smjer poleta. Projektilima koji su žiroskopski stabilizirani u letu, daje potrebnu rotaciju do koje dolazi zbog ožljebljenja cijevi pod određenim kutom. Za ispaljivanje projektila koji su stabilizirani krilcima nije potrebno ožljebljenje unutarnje površine cijevi, pa je njihov kanal gladak. Glatke cijevi su jeftinije za izradu, a primjenjuju se kod minobacača, na tenkovskim topovima, protuoklopnim oružjima i sl. Središnji prolaz cijevi nazivamo kanal cijevi, koji je posebno oblikovan. Prednji otvor cijevi u smjeru paljbe nazivamo usta cijevi, a stražnji dio koji se zove dno cijevi, završava zadnjakom u kojemu je smješten zatvarač cijevi. Kod velike većine topničkih oružja na usta cijevi se ugrađuje plinska kočnica različitih oblika i učinkovitosti. U dnu cijevi odmah iza zadnjaka nalazi se barutna komora namijenjena smještaju barutnog punjenja, bilo u čahuri ili posebnim vrećicama kada je riječ o streljivu bez čahure [9].

Životni vijek cijevi se obično izražava brojem ispaljenih projektila do trenutka kada cijev izgubi deklarirane balističke značajke (balistička smrt cijevi). Nakon svakog ispaljenja projektila dolazi do većeg ili manjeg trošenja cijevi, čime se povećava njezin kalibar. Na trošenje cijevi utječe niz čimbenika koji ovise o izboru materijala, režimu paljbe, načinu i brzini hlađenja cijevi, ukupnom broju ispaljenih projektila, uvjetima održavanja i čuvanja [9]. Cijev topničkog oružja je prije opaljenja s jedne strane zatvorena nepokretnim zatvaračem, a s druge strane pokretnim projektilom: Barutno punjenje se nalazi u slobodnom prostoru između zatvarača i projektila- u barutnoj komori. Proces opaljenja traje oko jedne stotinke sekunde, pri čemu se u cijevi postižu sljedeće orijentacijske vrijednosti osnovnih balističkih značajki:

- najveći tlak barutnih plinova ..... 6000 bara,
- najveća temperatura barutnih plinova ..... 3800 K,
- najveća početna brzina projektila ..... 1800 m/s,
- najveće ubrzanje projektila ..... 15 do 60 tisuća  $\text{g m/s}^2$ ,
- vrijeme kretanja projektila kroz cijev ..... 0,01 s [10].

Proces opaljenja sastavljen je od tri osnovna procesa:

1. proces izgaranja baruta i stvaranja barutnih plinova vrlo visoke temperature i visokog tlaka;
2. proces pretvaranja toplinske energije barutnih plinova u kinetičku energiju kretanja sustava projektil-punjenje-cijev-lafet;
3. proces kretanja plinova, barutnog punjenja, projektila i cijevi.

Svi ovi procesi međusobno su povezani i odvijaju se istodobno [10].



## 2.4 Osnovne konstrukcijske značajke glatkih cijevi topničkih oružja

Namjena i konstrukcijske značajke cijevi opisane su na primjeru tenkovskog topa 125 mm 2A46 s glatkom cijevi koji je ugrađen u kupolu tenka T-72. Cijev služi da se u njoj izvrši opaljenje naboja i projektilu da određeni pravac i početna brzina. Sklop cijevi se sastoji od: cijevi, omotača, spojnice, zadnjaka i odvodnika barutnih plinova. Cijev je ojačana omotačem koji je na nju navučen u vrućem stanju. Omotač i cijev imaju vodeći cilindrični dio kojim sklop cijevi klizi po mjedenim čahurama kolijevke pri trzaju i vraćanju. Cijev na zadnjem dijelu ima cilindrični vijenac, na koji se oslanja omotač. Spojnica je uvrnuta do kraja u zadnjak i oslanja se na vijenac omotača, te tako spriječava pomicanje cijevi naprijed pri opaljenju. Zadnjak omogućava pomak cijevi unazad. Na zadnjoj strani cijevi nalaze se dva žlijeba za izbacivače. U svakom žlijebu nalazi se ležište u koje se smješta čašica s oprugom. Cijev i omotač su od okretanja osigurani klinom. Ispadanje klina iz ležišta onemogućava vijak. Na prednjem dijelu cijevi nalaze se dva cilindrična ojačanja u jednom od kojih se nalaze žlijebovi, koji omogućavaju odvod barutnih plinova. Kod prednjeg ojačanja nalazi se šest kosih otvora sa navojem za mlaznicu odvodnika barutnih plinova. Osi otvora u odnosu na os cijevi, zatvaraju kut od  $25^\circ$ . Na zadnjem ojačanju nalazi se prstenasto ležište za poluprsten i udubljenje za klin, kojim se učvršćuje cilindar odvodnika barutnih plinova. Prednji dio cijevi završava sa ojačanjem, koje sa čeonu stranu ima četiri međusobno okomita zareza, koji služe za postavljanje končića pri provjeri ciljničkih sprava. Unutrašnjost cijevi dijeli se na glatki dio i barutnu komoru. U barutnu komoru smještaju se elementi projektila. Unutrašnji cilindrični glatki dio cijevi služi za usmjeravanje projektila za vrijeme gađanja. Spojnica spaja cijev sa zadnjakom. Zadnjak služi za smještaj i utvrđivanje dijelova zatvarača s poluautomatom, kao i za povezivanje cijevi s kočnicom trzanja i povratnikom. Odvodnik barutnih plinova je usisno-isisnog tipa. On je namijenjen za odstranjivanje barutnih plinova iz cijevi poslije opaljenja i smanjenje količine plinova i zagrijanosti zraka u borbenom dijelu tenka [11].

### 2.4.1 Načini mjerenja istrošenosti cijevi

Tijekom uporabe oružja treba pratiti koliki je stupanj istrošenosti cijevi, da bi se moglo zaključiti kakve su promjene u balističkom smislu nastale na oružju. S povećanjem stupnja istrošenosti cijevi pada početna brzina projektila, a s njome i domet i preciznost oružja [11]. Za utvrđivanje stupnja istrošenosti cijevi topničkih oružja primjenjuju se sljedeći postupci:

- mjerenje povećanja kalibra cijevi,
- mjerenje produženja barutne komore,
- vizualni pregled kanala i vanjske površine cijevi,

- usporedba broja izvršenih opaljenja s predviđenim životom cijevi,
- provjera savijenosti cijevi.

#### **a) Mjerenje povećanja kalibra cijevi**

Povećanje kalibra cijevi mjeri se kalibarnikom ili mikrometarskom zvijezdom. To je uređaj za mjerenje unutarnjih promjera dugačkih glatkih i ožlijebljenih provrta. Može biti mehaničkog, optičkog, pneumatskog i elektromehaničkog tipa. Kalibarnikom ili mikrometarskom zvijezdom se ne utvrđuje apsolutna mjera kalibra, nego se mjeri relativna razlika između nazivnog i stvarnog promjera cijevi [11].

#### **b) Mjerenje produženja barutne komore**

Izvodi se s ciljem utvrđivanja pada početne brzine projektila. Ovaj se postupak može provesti mjerenjem razmaka od dna čahure naboja do dna projektila, koji je prethodno uz normalnu ručnu silu nabijen u cijev. Pri tome čahura mora biti bez inicijalne kapsule, a projektil bez upaljača. Mjerna šipka se provlači kroz otvor za smještaj inicijalne kapsule, od dna čahure do dna projektila. Dakle, mjeri se dubina ulaska projektila u cijev [11].

#### **c) Vizualni pregled kanala i vanjske površine cijevi**

Prije vizualnog pregleda, cijev treba temeljito očistiti. Vizualni pregled se izvodi s ciljem otkrivanja raznih tragova trošenja i oštećenja cijevi: korozije, pobakrivanja, pukotina, riseva, udubljenja, lomova i dr. Vizualni pregled se može izvršiti golim okom i pomoću elektrooptičkog pribora. Za detaljan pregled koristi se endoskop i boroskop [11].

#### **d) Usporedba broja izvršenih opaljenja iz cijevi s predviđenim životom cijevi**

Ovaj postupak daje orijentacijski zaključak o stupnju istrošenosti cijevi. Stvarno stanje cijevi ne ovisi samo o broju opaljenja, nego i o režimu paljbe i pridržavanju propisanog procesa održavanja. Naboji s manjim punjenjem razmjerno manje troše cijev [11].

#### **e) Provjera savijenosti cijevi**

Pojava savijenosti je naročito izražena kod protuoklopnih topova kao oružja s velikom dužinom cijevi (preko 50 kalibara). Savijenost se mjeri optičkim ili laserskim uređajem. U postrojbama se savijenost može lako provjeriti cilindričnim kontrolnikom. Nazivni promjer cilindra **d** odgovara nazivnoj mjeri promjera kanala cijevi, umanjenoj za pola tolerancije mjere kalibra cijevi [11].

### 3. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE PROJEKTILA NAMIJENJENOG KRETANJU KROZ GLATKU CIJEV

Konstruktivske značajke projektila opisane su na primjeru protutenkovskog topa 100 mm MT 12 (2A19-M). Za gađanje iz navedenog topa upotrebljavaju se sljedeća streljiva:

- streljivo 100 mm UBM1 s podkalibarno-obilježavajućim projektilom (sa jezgrom),
- streljivo 100 mm UBM2 s podkalibarno-obilježavajućim projektilom (bez jezgre),
- streljivo 100 mm UBK2 s kumulativno-obilježavajućim projektilom,
- streljivo 100 mm 3UKB2 s vježbovno-obilježavajućim projektilom.

Podkalibarno-obilježavajući projektil BM2 sastoji se od tijela, vodećeg prstena, pancirne kape, balističke kape, šestopernog stabilizatora, trasera i bakrenog prstena. Podkalibarno-obilježavajući projektil BM1 sastoji se od istih predhodno navedenih dijelova, a pored toga ima jezgru od tvrde legure, koja je smještena u gornjem djelu projektila. Vodeći prsten projektila sastoji se od tri odvojena segmenta spojena međusobno i sa tijelom projektila bakrenim prstenom. Pri laboraciji streljiva ovaj prsten fiksira položaj projektila u grliću čahure. Na vodećem prstenu nalazi se prstenasti kanal gdje obod grlića čahure obuhvaća projektil što obezbjeđuje čvrsto spajanje projektila s čahurom. Poslije paljenja barutnog punjenja u početku kretanja projektila bakreni prsten se sabija.

Centriranje projektila u cijevi vrši se pomoću vodećeg prstena i stabilizatora čija pera imaju kružni promjer naspram dva pera nešto manji od kalibra cijevi. Vodeći prsten prima tlak barutnih plinova i zahvaljujući kosim plinskodinamičkim otvorima na njemu, projektil u cijevi dobiva laganu rotaciju neophodnu radi odvajanja segmenta vodećeg prstena djelovanjem centrifugalne sile poslije izlijetanja projektila iz cijevi. Pri tome se bakreni prsten raspada. Odvojivši se od zrna tri dijela vodećeg prstena padaju ispred topa u sektoru sa kutom od  $\pm 4^\circ$  od pravca gađanja na daljini do 700 m.

Stabilan let projektila osigurava stabilizator. Na prednjem kraju pera stabilizatora ivica je srezana, što osigurava dopunsko okretanje projektila na putanji uslijed djelovanja zraka na skošene površine. Ovo osigurava stabilnost projektila na cijeloj putanji te preciznost pogodaka. U centralnoj šupljini stabilizatora smješten je traser. Pri probijanju oklopa projektilima BM1 i BM2 djelovanje na posadu i tehnička sredstva imaju komadi projektila i probijeni oklop [11].

Kumulativno-obilježavajući projektil sastoji se od košuljice s prstenom koji fiksira položaj projektila u grlu čahure pri laboraciji navojne glave s navojnim otvorom za upaljač GPV-2. Navojna glava spaja se sa tijelom pomoću čahure. U košuljici je smješteno kumulativno

eksplozivno punjenje. U stražnji dio košuljice projektila stavljeno je tijelo stabilizatora sa šest šarnirno učvršćenih pera. U donjem dijelu pera smješten je traser. Pera stabilizatora drže se u složeno položaju do laboracije streljiva. Za spajanje projektila sa čahurom služi cilindrično proširenje na srednjem dijelu tijela projektila.

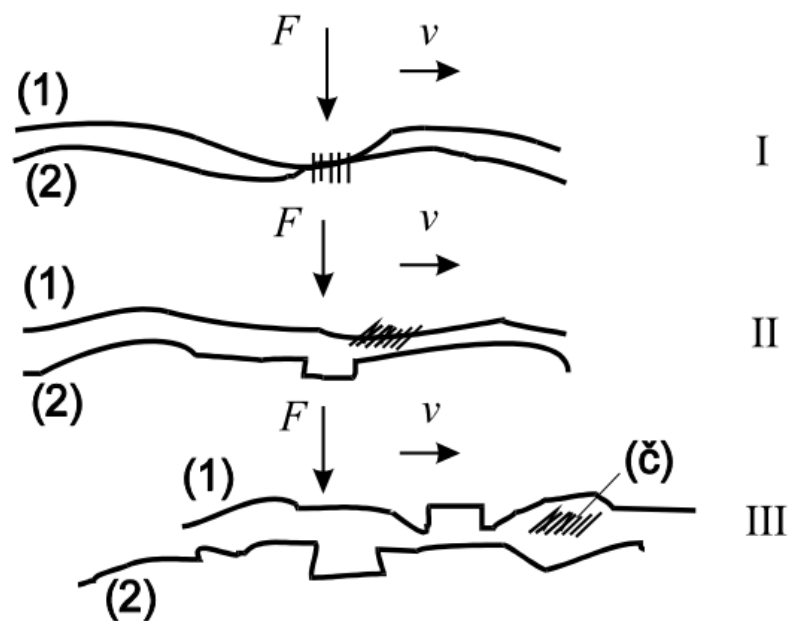
Pri kretanju projektila kroz cijev i plinsku kočnicu, pera stabilizatora drže se u sklopljenom položaju djelovanjem momenta tromosti zbog linearnog ubrzanja, koje nastaje zbog toga što je težište svakog pera bliže osi projektila nego osi rotacije pera. Poslije izlaska projektila iz cijevi linearna rotacija se naglo smanjuje i pera stabilizatora preklapaju se unatrag pod djelovanjem otpora zraka.

Potrebna stabilnost projektila na putanji osigurava se nadkalibarnim stabilizatorom poslije preklapanja njegovih pera unatrag. Uz to u toku leta projektil dobiva rotacijsko kretanje uslijed djelovanja zraka na skošene površine prednjeg kraja pera stabilizatora, čime se osigurava potrebna preciznost gađanja [12].

#### 4. MEHANIZAM ADHEZIJSKOG TROŠENJA I NJEGOVO NASTAJANJE U CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA

Procesi trošenja prisutni su u prirodi gdje god postoje dva dijela materije u relativnom gibanju (dinamički kontakt). U tehnici se bavimo onim procesima trošenja koji predstavljaju problem jer dovode do neželjenog smanjenja ili prestanka funkcije tehničkih sustava.

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze, slika 4.1 [13].



Slika 4.1 Jedinični događaj adhezije [13]

Faza I- nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina (mikrozavarivanje)

Faza II- raskidanje mikrozavarenog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para

Faza III- eventualno otkidanje čestice. Oblik čestice trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Za materijale koji nisu skloni stvaranju mikrozavarenih spojeva kažemo da su inkompatibilni i to je osnovni zahtjev na materijale tarnog para u slučaju kada postoji opasnost od adhezije. Na inkompatibilnost povoljno utječu razlike u kemijskom sastavu i kristalnoj strukturi površina u kontaktu.

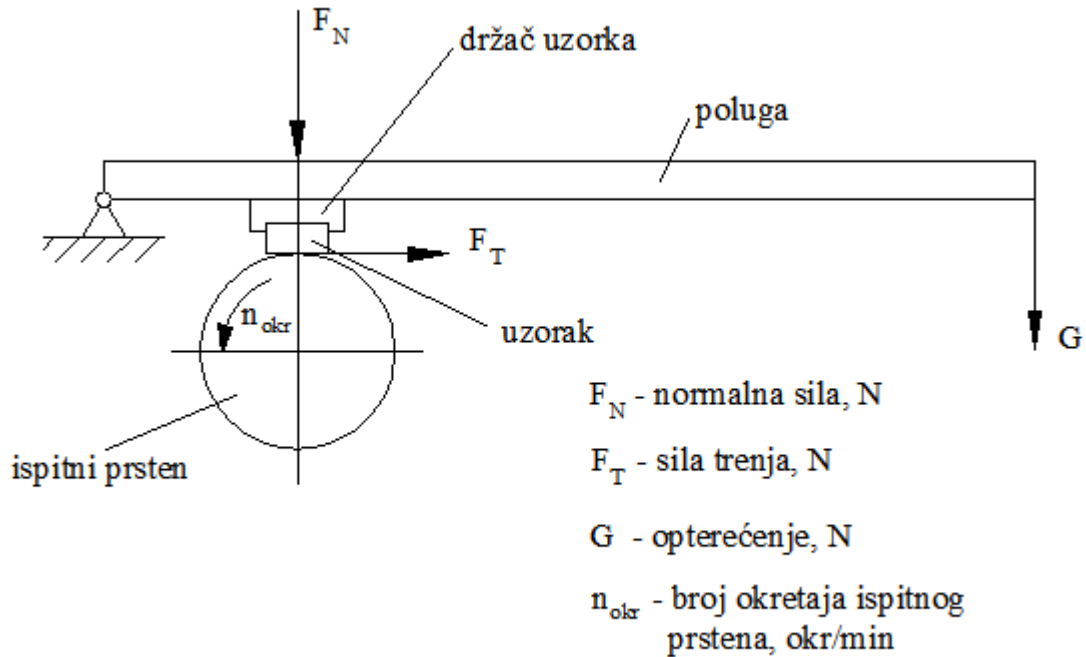
#### 4.1 Trošenje cijevi topničkog oružja

Cijev topničkog oružja je izložena vrlo teškim uvjetima eksploatacije, što se posebno odnosi na površinu kanala cijevi, bilo glatku ili ožlijebljenu. Prilikom opaljenja, u kanalu cijevi se odvijaju izrazito dinamički kemijsko-fizikalni procesi, čije se djelovanje očitava na unutarnjoj površini cijevi, ali i po cijeloj dubini poprečnog presjeka cijevi. Barut izgara vrlo brzo što znači da se u kratkom vremenskom roku razvije vrlo velika količina barutnih plinova. Zbog zatvorenog, relativno malog prostora, naglo raste njihov tlak, pa u jednom trenutku počinje kretanje projektila. Na ustima cijevi projektil postiže predviđenu početnu brzinu  $v_0$ . Izgaranjem baruta razvija se velika količina topline, zbog čega se na visoku temperaturu zagrijevaju i barutni plinovi i cijev oružja. Zbog mase projektila i njegovog kretanja, na dodirnim površinama nastaje dodirni pritisak i sila trenja klizanja. Temperatura površinskih slojeva kanala cijevi može dosegnuti nekoliko stotina, pa čak i do 1000 °C. To dovodi do promjene strukture materijala i njegovih mehaničkih svojstava. Cijev se nejednoliko zagrijava po presjeku, što uzrokuje pojavu toplinskih naprezanja i mikropukotina, najizraženijih na površini kanala cijevi, s tendencijom pada prema vanjskim slojevima cijevi. Trošenju cijevi doprinosi i korozija izazvana djelovanjem okolne atmosfere. Čelični materijal cijevi je pored toga podložan i procesu starenja materijala. Adhezija je izazvana gibanjem centrirajućeg prstena po površini kanala cijevi, pri čemu nastaje adhezijski spoj čestica mjedi s česticama čelika. Čestice mjedi se otkidaju i navaruju na čeličnu tarnu površinu, te dolazi do pobakrivanja cijevi. Tu se zapravo adhezijski primarno troši centrirajući prsten, ali zbog pobakrivanja površine kanala cijevi i naknadne elektrokemijske korozije, to izaziva razgradnju materijala same cijevi [14].

## 5. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE I IZBOR MATERIJALA ZA IZRADU UZORAKA

### 5.1 Otpornost na adhezijsko trošenje

Otpornost na adhezijsko trošenje ispitana je na uređaju koji je shematski prikazan na slici 6.1



Slika 5.1. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Čelični prizmatični uzorak je učvršćen u držaču uzorka i tijekom ispitivanja miruje. Mjedeni ispitni prsten rotira s 1,5 okr/min, te tako kliže po čeličnom uzorku. Normalna sila  $F_N$  na dodirnim površinama podešena je na vrijednost od 100 N, a sila trenja  $F_T$  očitava se na mjernom instrumentu uređaja (sl. 5.2).



Slika 5.2 Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Poznavanjem ovih dvaju sila izračuna se faktor trenja klizanja  $\mu$  prema izrazu:

$$\mu = F_T / F_N$$

Adhezijsko trošenje nastaje kao posljedica trenja klizanja između dvaju površina koje su u dodiru u relativnom kretanju. To znači da su upravo sila trenja  $F_T$  i faktor trenja  $\mu$  pokazatelji otpornosti materijala na adhezijsko trošenje: što su vrijednosti ovih pokazatelja manje, to je otpornost na adhezijsko trošenje veća.

No, prethodna tvrdnja vrijedi samo u slučaju kada prilikom trošenja materijal ostaje u čvrstom stanju i ne dolazi do njegovog taljenja. Takav je slučaj bio i prilikom izvođenja triboloških ispitivanja opisanih u ovom radu. Kada tijekom adhezijskog trošenja dođe do taljenja površinskog sloja materijala, zbog njegove žitkosti opada faktor trenja, ali se intezitet trošenja naglo povećava.



## 5.2 Izbor materijala za izradu uzoraka

Materijali koji se koriste za izradu cijevi su visoko kvalitetni legirani čelici. Kako oružje djeluje u velikom rasponu temperatura, čelici moraju imati istaknuta sljedeća svojstva:

- visoku čvrstoću i granicu razvlačenja,
- dobru žilavost,
- visoku tvrdoću i otpornost na trošenje,
- otpornost na udarna opterećenja,
- visoku udarnu radnju loma,
- otpornost na kemijsko djelovanje produkata izgaranja baruta i djelovanje atmosfere

Zbog navedenih svojstava najčešće se koriste čelici za poboljšavanje, legirani niklom, molibdenom i kromom.

Nakon provedene toplinske obrade svojstva čelika bi trebala biti jednaka po cijelom presjeku proizvoda, a to se postiže kada je materijal potpuno prokaljen i tada bi mikrostruktura čelika trebala biti 100% martenzitna.

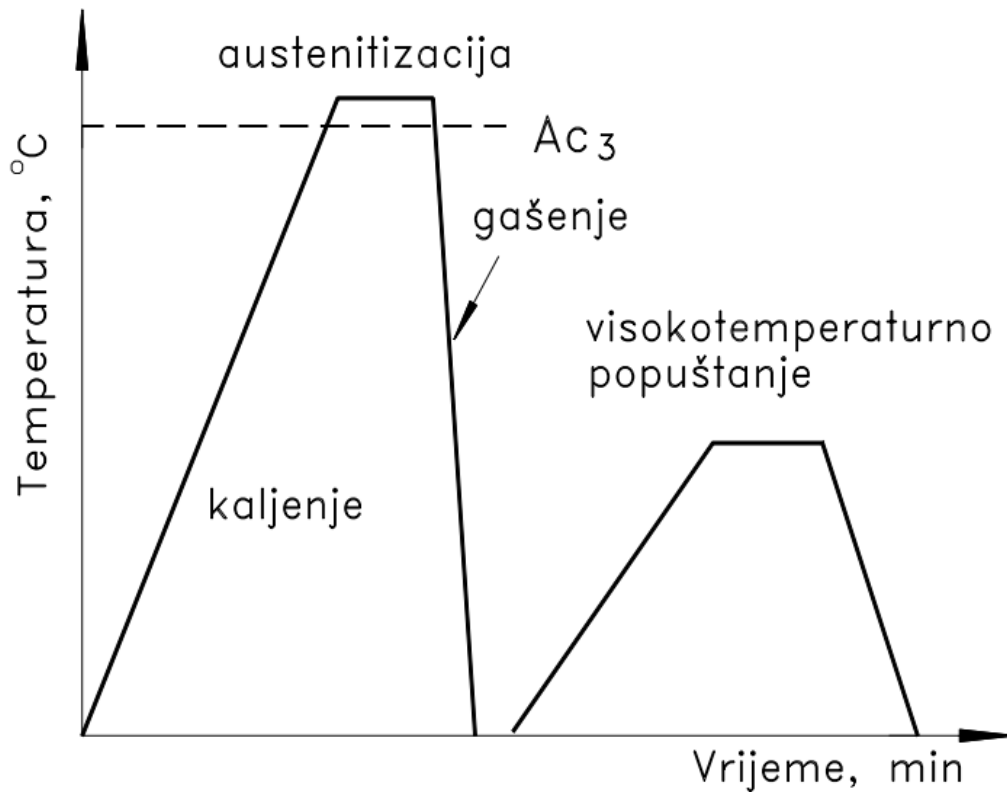
Čelici za debelostjene topničke cijevi imaju sljedeće vrijednosti mehaničkih svojstava:

- konvencionalna granica razvlačenja,  $R_{p0,2}$  ..... od 930 do 1470 N/mm<sup>2</sup>,
- vlačna čvrstoća,  $R_m$  ..... od 1030 do 1780 N/mm<sup>2</sup>,
- istezljivost,  $A$  ..... od 8 do 20 %,
- konačno suženje presjeka ..... od 20 do 46 %,
- udarna radnja loma,  $KU$  .....  $\geq 36$  J [15].

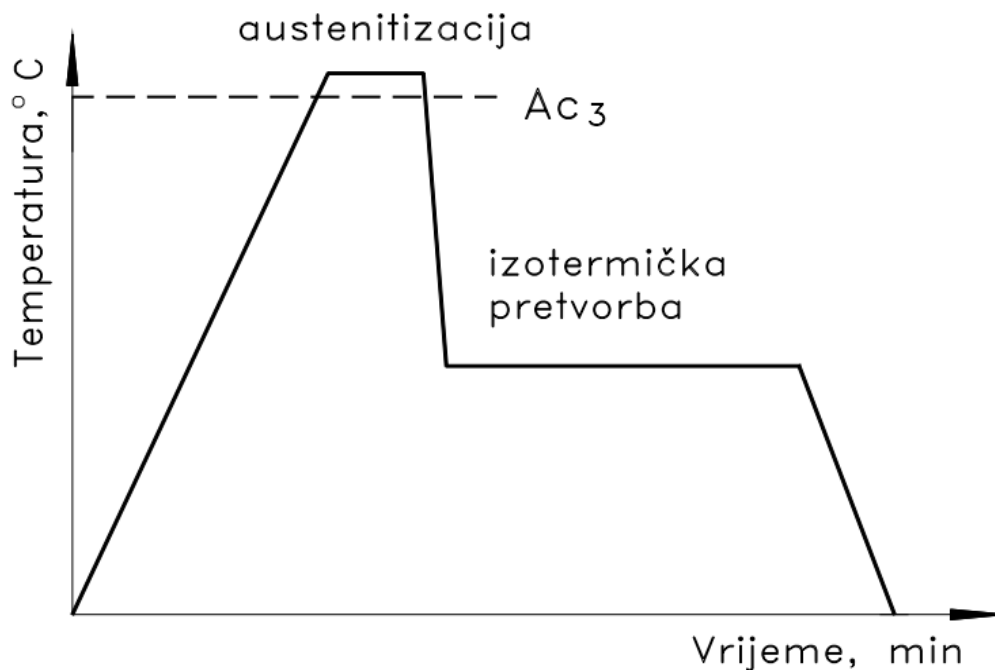
Za proizvodnju cijevi od navedenih čelika, traži se osiguranje maksimalnih mehaničkih svojstava korištenjem mogućnosti toplinske obradbe. Za ostale dijelove kao što su zatvarač, zadnjak i dr. se traži niža razina mehaničkih svojstava zbog nižih razina opterećenosti tih dijelova.

### 5.2.1 Poboljšavanje

Poboljšavanje je kombinirani postupak toplinske obrade čelika, koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Cilj poboljšavanja je postizanje visoke granice razvlačenja i visoke vrijednosti žilavosti. Ovaj postupak nalazi najširu primjenu kod konstrukcijskih ugljičnih (0,3-0,6%C), niskolegiranih i srednjelegiranih čelika. Od kakvog je značaja toplinska obrada poboljšavanja može se zaključiti po tome što se najodgovorniji dijelovi strojeva (osovine, vratila, zupčanici...) ugrađuju u poboljšanom stanju. Poslije kaljenja čelik ima visoku vrijednost granice razvlačenja, ali malu plastičnost i nisku vrijednost žilavosti. Naknadnim visokotemperaturnim popuštanjem, zagrijavanjem do temperature od 530-680°C i sporim hlađenjem, uklanjaju se ili barem smanjuju unutarnja naprezanja i strukturne nehomogenosti karakteristične za kaljene dijelove. Sa porastom temperature popuštanja smanjuju se vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i tvrdoća, a rastu žilavost, istežanje i kontrakcija. Čelik u poboljšanom stanju ima višu granicu razvlačenja nego što je ona bila prije kaljenja, ali i konačno istežanje je veće nego što je bilo prije kaljenja [16]. Time se znatno povećava površina ispod krivulje razvlačenja, što kvalitativno ukazuje na znatno povećanje žilavosti kako u odnosu na stanje prije poboljšavanja, tako pogotovo u odnosu na kaljeno nepopušteno stanje. Rezultati poboljšavanja mogu se prikazati i u „dijagramu poboljšavanja“ (tj. dijagram visokog popuštanja), gdje se uočava da mehanička svojstva ovise o temperaturi popuštanja. Poboljšavanje može biti klasično ili izotermičko što je prikazano na sljedećim slikama [17].



Slika 5.3 Dijagram postupka klasičnog poboljšavanja čelika [17]



Slika 5.4 Dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja čelika [17]

Čelici za poboljšavanje pripadaju skupini nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji kaljenjem i visokim popuštanjem (>500 °C) postižu odgovarajuću granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i žilavost. Kaljenjem se nastoji postići što potpunija martenzitna mikrostruktura po presjeku, tj. što viša prokaljenost. Ova skupina čelika sadrži 0,25-0,60 % ugljika koji utječe na njihovu zakaljivost. U čelike za poboljšanje ubrajaju se i čelici za cementiranje koji nisu pougljičeni, ali su kaljeni s temperature austenitizacije jezgre, te popušteni pri temperaturi oko 200°C ili iznad 500°C. Odgovarajućim izborom čelika za poboljšavanje i prikladnom provedbom postupka poboljšavanja postiže se visoka “konstrukcijska čvrstoća” proizvoda. Pod pojmom “konstrukcijska čvrstoća” podrazumijeva se visoka granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, žilavost, te dinamička izdržljivost. Kako se pri visokom popuštanju kaljenog čelika mikrostrukturno mijenjaju martenzit i donji bainit, a ostali mikrostrukturni konstituenti ostaju nepromijenjeni, može se zaključiti da se idealna jednoličnost svojstava preko cjelokupnog presjeka proizvoda može postići samo potpunim prokaljivanjem. Potpuno prokaljivanje podrazumijeva gašenje cijelog presjeka proizvoda nadkritičnim intenzitetom kako bi mikrostruktura bila potpuno martenzitna. Na taj način postiže se maksimalno moguća udarna radnja loma i jednoličnost ostalih mehaničkih svojstava. Prokaljivost se određuje na osnovi stupnja zakaljenosti ( $Sk$ ) koji se definira kao omjer tvrdoće kaljenja na nekom mjestu presjeka ( $H$  kaljeno) i maksimalno postizive tvrdoće ( $H_{max.}$ ) za određeni čelik:

$$Sk = H_{kaljivo} / H_{max} = 0,72 - 1,00 \quad [17]$$

Vrijednost stupnja zakaljenosti  $Sk \sim 0,72$  odgovara približno 50%-tnoj martenzitnoj mikrostrukturi, a vrijednost  $Sk \sim 1,00$  odgovara 100%-tnoj martenzitnoj mikrostrukturi. Prokaljivost čelika se standardno određuje čeonim gašenjem Jominy metodom. Visoko popuštanje čelika za poboljšanje mora se provesti radi postizanja dovoljne žilavosti srednje- i visokougljičnog martenzita. Niskim popuštanjem se mogu postići više vrijednosti granice razvlačenja, ali proizvod ostaje krhak. Granica razvlačenja čelika za poboljšavanje najčešće iznosi do 1200 N/mm<sup>2</sup>, a temperatura popuštanja je iznad 500 °C (najčešće 550-680 °C). Čelici s nižim sadržajem ugljika (čelici za cementiranje) mogu se nisko popuštati, jer im niskougljični martenzit osigurava dovoljnu žilavost. Čelik za poboljšavanje treba odabrati prema što boljoj prokaljivosti, tj. da je viši stupanj legiranosti. Pritom su kao mikrostrukturni konstituenti povoljni martenzit i donji bainit, dok su gornji bainit, perlit i ferit nepovoljni jer snižavaju vrijednost udarne radnje loma. Razlog tome je što gornji bainit i perlit imaju nejednolični raspored razmjerno grubih karbida u usporedbi s donjim bainitom i popuštenim martenzitom.

Čelici za poboljšavanje se uglavnom isporučuju i obrađuju odvajanjem čestica u mekožarenom stanju, pa im je uz mikrostrukturu glavni pokazatelj obradljivost i najviša dopuštena tvrdoća. Posebnu grupu čelika za poboljšavanje čine nelegirani čelici koji mogu biti kvalitetni (npr. C35, C45, C60) ili plemeniti (npr. Ck35, Ck45, Ck60). Vlačna čvrstoća ove skupine čelika raste s porastom sadržaja ugljika, ali karakterizira ih slaba prokaljivost. Nelegirani čelici za poboljšavanje se primjenjuju samo za dobivanje gotovog proizvoda dimenzije do promjera 40 mm (iznimno promjera 100 mm) budući da kod promjera iznad 40 mm nema transformacije austenit→martenzit već austenit→perlit+ferit. Također, nelegirani čelici su skloni pregrijavanju, tj. pojavi grubog zrna u mikrostrukturi.

### 5.2.2 Nitiranje

Nitiranje je jedan od najvažnijih postupaka površinske termokemijske obradbe koji je u komercijalnoj primjeni od 20-ih godina prošlog stoljeća. Postupak nitiranja se temelji na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta. Nitiranje se provodi radi postizanja visoke površinske tvrdoće, poboljšanja otpornosti na trošenje i umor, bolje korozijske otpornosti s neznatnim promjenama u dimenzijama i svojstvima obrađivanih predmeta. Dobivena tvrdoća se temelji na promjeni kemijskog sastava površinskog sloja i prisutnosti nitrida, a ne na promjeni mikrostrukture naglim hlađenjem. Postupak se provodi tako da se pripremljeni predmeti (bez oksida, masti i drugih nečistoća) ulažu u peći i izlažu djelovanju sredstva za nitiranje na temperaturi ispod  $A_1$  točke, kako nebi došlo do transformacije ferita u austenit. U pravilu nitiraju se svi čelici, sivi lijev, čelični lijev (u temperaturnom području 500-590° C) i Ti-legure (750-900° C). Plinsko nitiranje se ne preporuča za ugljične čelike, jer se dobiva krhka površina s malim porastom tvrdoće u difuzijskoj zoni. Legirani čelici, zbog izlučivanja nitrida u difuzijskom sloju, pružaju veću otpornost na trošenje i omogućavaju primjenu većih površinskih tlakova. Postoji posebna grupa niskolegiranih čelika za nitiranje koji sadrže 1,0-2,5 % C, oko 1% Al, oko 0,2 % Mo, a mogu sadržavati i druge legirajuće elemente (Ti, Nb, W, Mn), tzv. nitridotvorce, radi dobivanja još viših tvrdoća. Pored toga, za nitiranje se koriste i niskolegirani čelici koji sadrže aluminij, srednjeugljični niskolegirani čelici s kromom, alatni čelici za rad u toplom stanju, niskougljični niskolegirani kromovi čelici, alatni čelici koji otvrdnjavaju na zraku, brzorezni čelici, feritni i martenzitni nehrđajući čelici serije AISI 400, austenitni nehrđajući čelici serije AISI 200 i 300, precipitacijski očvrnuti čelici itd. Poželjno toplinski obrađeno stanje proizvoda prije nitiranja može biti različito, ali se najčešće koristi poboljšavanje (kaljenje+popuštanje) kojim se postižu

optimalna mehanička svojstva sa sitnozrnatom mikrostrukturom, što olakšava apsorpciju dušika. Nakon poboljšavanja, a prije nitriranja, provodi se završna strojna obrada (radi uklanjanja razugljenja površine), uz eventualno žarenje na 500-600° C radi uklanjanja naprezanja od obrade ili ravnjanja. Kod poboljšavanja prije nitriranja temperatura popuštanja treba biti viša od temperature nitriranja, jer se na taj način zadržavaju mehanička svojstva jezgre obrađivanih predmeta. Ponekad se nitriranje provodi istodobno s popuštanjem. Nitrirani površinski sloj u većini slučajeva poboljšava otpornost na koroziju, posebice u uvjetima kloridne, octene i fosfatne kiseline. Otpornost na koroziju nitriranih nehrđajućih čelika se smanjuje zbog vezanja kroma u kromov nitrid. S obzirom na izvor dušika postupak nitriranja se može provoditi u plinovitom sredstvu (amonijak), u solnim kupkama i u ioniziranom plinu. Zajedničko za sve postupke je da se nitriranje čeličnih proizvoda odvija ispod  $A_1$  temperature, kako ne bi došlo do strukturnih promjena u jezgri obrađivanog predmeta. Općenito, čelici za nitriranje u amonijaku predstavljaju legirane čelike za poboljšavanje koji sadrže jedan ili više elemenata koji stvaraju nitride (npr. aluminij, molibden, krom, vanadij). Nitriranjem u struji amonijaka postiže se visoka tvrdoća površine i otpornost na trošenje. Porast tvrdoće površine nitriranog čelika postiže se stvaranjem vrlo tvrdih nitrida (AlN, MoN, CrN, VN). Pored povišenja otpornosti na trošenje, nitrirani čelici imaju povišenu dinamičku izdržljivost i postojanost na koroziju. Nitriranje čelika u amonijaku provodi se pri temperaturi 480-580°C, uz popuštanje kod nešto više temperature. Vrijednost postignute tvrdoće nitriranog sloja ovisi o legiranju čelika. Čelici legirani s aluminijem imaju tvrdoću 900-1100 HV<sub>0,2</sub> a čelici bez aluminija imaju tvrdoću 800-900 HV<sub>0,2</sub>. Važno je napomenuti da se kod čelika nitriranih u struji amonijaka nastoji izbjeći pojava tzv. zone spojeva koja bi zbog nastalih nitrida bila izrazito krhka. Ukoliko bi takva zona nastala uslijed nepravilnog vođenja procesa nitriranja, potrebno ju je ukloniti brušenjem nitriranog proizvoda. Čelici 31CrMo12, 41CrAlMo7 i 34CrAlNi7 predviđeni su za izradu proizvoda većih dimenzija, dok su ostali predviđeni za izradu proizvoda do promjera 40 mm. Međutim, nitriranje u amonijaku sve više gubi na važnosti, budući da su razvijeni novi postupci (solna kupka, ionsko) koji su znatno ekonomičniji i brži, te se mogu primijeniti i na ostale čelike. Postupak nitriranja u solnoj kupci se ponekad naziva i postupak cijanizacije, jer se odvija u smjesi cijanidno-cijanatnih soli pri temperaturi 570-580°C, u trajanju od 2 do 4 sata (osim kod brzoreznih čelika čija obrada traje 10-20 minuta). Odvijanje postupka se sastoji od taljenja krutih suhih soli, starenja solne kupke (zadržavanje na 565-595°C najmanje 12 sati) i uranjanja predmeta predgrijanih na 400-450° C u zagrijanu kupku. Produkti starenja kupke smanjuju sadržaj cijanida, a povećavaju sadržaj cijanata, te nastaje i mala količina karbonata

( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Kada se starenjem postigne 5%  $\text{NaCNO}$ , kupka se može nesmetano koristiti. Minimalni sadržaj  $\text{NaCN}$  za obradu brzoreznog čelika je 15%, a za obradu alatnih čelika za rad u toplom stanju je 20%. Nitiranje u solnoj kupci se koristi za obradu proizvoda iz ugljičnih i niskolegiranih čelika, brzoreznih čelika, alatnih čelika za rad u toplom stanju, nehrđajućih čelika i lijevanih željeza. Nitiranjem u solnoj kupci ne postižu se visoke tvrdoće kao u slučaju nitiranja u amonijaku, pa se ovaj postupak još naziva „meko nitiranje“ [17].

### 5.2.3 Tvrdo kromiranje

Krom je sjajan, bijeli, vrlo tvrd metal. Kemijski vrlo otporan: ni na vlažnome zraku ne oksidira, s kisikom izgara tek na veoma visokoj temperaturi, a isto se tako tek na visokoj temperaturi spaja se s fluorom, klorom, bromom, sumporom, ugljikom itd. [18]. Ferokrom - legura kroma sa željezom, koja se upotrebljava za proizvodnju legura sa željezom ili niklom i željezom, otpornih prema koroziji i visokim temperaturama, kao i za proizvodnju kromovih čelika dobrih mehaničkih svojstava. Čisti krom se dobiva iz krom-oksida aluminotermijski ili elektrolizom vodenih otopina kromovih soli.

Tvrdo kromiranje je elektrokemijski proces nanošenja tvrdog kroma na osnovni materijal (čelik, bakar, mesing, broncu i dr.). Ova vrsta površinske zaštite se preporučuje za dijelove raznih strojeva i postrojenja koja su izložena trošenju.

Osobine tvrdo kromiranih površina:

- visoka otpornost prema trošenju,
- visoka tvrdoća,
- dobra korozijska zaštita,
- kemijska otpornost,
- visoka temperaturna otpornost,
- nizak faktor trenja.

Tvrdo kromiranje zapravo nije drugačije od ostalih postupaka kromiranja, nego je debljina kromiranog sloja dovoljno debela da se mjerenje tvrdoće može obavljati izravno, dok je na kromiranom sloju koji služi kao ukras debljina sloja i puno manja od tvrdo kromiranog, pa se njegova tvrdoća ne može mjeriti izravno [19]. Tvrđi krom poznat kao industrijski krom nanešen na površinu predmeta ima vrlo visoku tvrdoću, između 66-70 HRC. Debljina tvrdo kromirane površine obično se kreće u rasponu od 0,075 do 0,25 mm [19]. Površinski defekti i hrapavost su pojačani. Dekorativno kromiranje vrši se izravno na prethodno pripremljenu površinu metala, dok se kvalitetno antikorozivno kromiranje vrši na prethodno poniklanu površinu. Debljina sloja kroma kod dekorativnog kromiranja je od 25 - 50 nm. Kromirati se

također mogu predmeti od aluminija, bakra i magnezija, a i cinka, ali sa šesterovalentnim kromom [19]. Sam postupak kromiranja provodi se zagrijavanjem metalnog predmeta u okruženju kromovog praha ili pak zagrijavanjem predmeta u atmosferi kromovog klorida. U oba slučaja krom ulazi u površinske slojeve procesom difuzije u čvrstom stanju. Na manjim se predmetima koristi i metoda elektro-taloženja.



## 6. ANALIZA REZULTATA

### 6.1 Ispitni uzorci

Uzorci su izrađeni od tri različite vrste čelika za poboljšavanje, svaki od njih je toplinski obrađen trima toplinskim obradama.

Navedeni čelici su:

- EN C45 (Č1530),
- EN 35CrMo4 (Č4730),
- EN 36CrNiMo4 (Č5430).

Provedene toplinske obrade:

- poboljšavanje,
- poboljšavanje i nitriranje,
- poboljšavanje i tvrdo kromiranje.

### 6.2 Rezultati ispitivanja

Ispitano je *devet* uzoraka s *tri* ponavljanja.

#### 6.2.1 Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 36CrNiMo4

Trajanje ispitivanja za svaki uzorak je 60 s. Rezultati se očitavaju u početnom trenutku ispitivanja, te nakon svakih 15 s ispitivanja. Sila trenja  $F_T$  očitava se na mjernom instrumentu uređaja. Rezultati ispitivanja za čelik 36CrNiMo4 prikazani su tablicama 6.1, 6.2 i 6.3.

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$
36CrNiMo4	poboljšani	0	2,7	20,5	0,205	2,8	21	0,21	3,1	23,5	0,235
36CrNiMo4	poboljšani	15	3	22,5	0,225	3,3	25	0,25	3,25	24,5	0,245
36CrNiMo4	poboljšani	30	2,6	20	0,2	2,75	20,5	0,205	3,1	23,5	0,235
36CrNiMo4	poboljšani	45	2,8	21	0,21	2,7	20,5	0,205	3,1	23,5	0,235
36CrNiMo4	poboljšani	60	2,55	19	0,19	2,8	21	0,21	3,15	23,5	0,235

Tablica 6.1 Rezultati ispitivanja poboljšanog čelika 36CrNiMo4

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ
36CrNiMo4	nitrirani	0	2,2	16,5	0,165	2,5	19	0,19	2	15	0,15
36CrNiMo4	nitrirani	15	2,2	16,5	0,165	2,6	20	0,2	2,2	16,5	0,165
36CrNiMo4	nitrirani	30	2,4	18	0,18	2,6	20	0,2	2,6	20	0,2
36CrNiMo4	nitrirani	45	2,4	18	0,18	2,5	19	0,19	2,5	19	0,19
36CrNiMo4	nitrirani	60	2,3	17	0,17	2,55	19	0,19	2,5	19	0,19

Tablica 6.2 Rezultati ispitivanja poboljšanog i nitriranog čelika 36CrNiMo4

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ
36CrNiMo4	Tvrdo kromirani	0	4,6	34,5	0,345	4,1	31	0,31	5,6	42	0,42
36CrNiMo4	Tvrdo kromirani	15	3,7	28	0,28	4,1	31	0,31	6	45	0,45
36CrNiMo4	Tvrdo kromirani	30	3,9	29,5	0,295	4,1	31	0,31	5,9	44,5	0,445
36CrNiMo4	Tvrdo kromirani	45	3,5	26,5	0,265	3,8	28,5	0,285	4,6	34,5	0,345
36CrNiMo4	Tvrdo kromirani	60	3,5	26,5	0,265	3,9	29,5	0,295	4	30	0,3

Tablica 6.3 Rezultati ispitivanja poboljšanog i tvrdo kromiranog čelika 36CrNiMo4

### 6.2.2 Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 35CrMo4

Trajanje ispitivanja za svaki uzorak je 60 s. Rezultati se očitavaju u početnom trenutku ispitivanja te nakon svakih 15 s ispitivanja. Sila trenja  $F_T$  očitava se na mjernom instrumentu uređaja. Rezultati ispitivanja za čelik 35CrMo4 prikazani su tablicama 6.4, 6.5 i 6.6

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ
35CrMo4	poboljšani	0	2,5	19	0,19	2,5	19	0,19	2,5	19	0,19
35CrMo4	poboljšani	15	3,4	25,5	0,255	2,6	20	0,2	2,4	18	0,18
35CrMo4	poboljšani	30	3,15	23,5	0,235	2,8	21	0,21	3	23	0,23
35CrMo4	poboljšani	45	2,9	22	0,22	2,7	20,5	0,205	2,6	20	0,2
35CrMo4	poboljšani	60	3,1	23,5	0,235	2,6	20	0,2	2,5	19	0,19

Tablica 6.4 Rezultati ispitivanja poboljšanog čelika 35CrMo4

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ
35CrMo4	nitrirani	0	2,45	18,5	0,185	2,3	17,5	0,175	2,4	18	0,18
35CrMo4	nitrirani	15	2,5	19	0,19	2,85	21,5	0,215	2,55	19	0,19
35CrMo4	nitrirani	30	2,6	20	0,2	2,95	22	0,22	2,45	18,5	0,185
35CrMo4	nitrirani	45	2,6	20	0,2	2,95	22	0,22	2,6	20	0,2
35CrMo4	nitrirani	60	2,55	19	0,19	2,95	22	0,22	2,5	19	0,19

Tablica 6.5 Rezultati ispitivanja poboljšanog i nitriranog čelika 35CrMo4

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>t</sub> [N]	μ
35CrMo4	Tvrdo kromirani	0	4	30	0,3	4,9	37	0,37	5,5	41,5	0,415
35CrMo4	Tvrdo kromirani	15	3,6	27	0,27	4	30	0,3	5,1	38,5	0,385
35CrMo4	Tvrdo kromirani	30	3,2	24	0,24	2,8	21	0,21	4,1	31	0,31
35CrMo4	Tvrdo kromirani	45	3,3	25	0,25	4	30	0,3	4	30	0,3
35CrMo4	Tvrdo kromirani	60	3,2	24	0,24	3	22,5	0,225	3,7	28	0,28

Tablica 6.6 Rezultati ispitivanja poboljšanog i tvrdo kromiranog čelika 35CrMo4

### 6.2.3 Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN C45

Trajanje ispitivanja za svaki uzorak je 60 s. Rezultati se očitavaju u početnom trenutku ispitivanja te nakon svakih 15 s ispitivanja. Sila trenja  $F_T$  očitava se na mjernom instrumentu uređaja. Rezultati ispitivanja za čelik EN C45 prikazani su tablicama 6.7, 6.8 i 6.9

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1. ispitivanje				2. ispitivanje			3. ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$
C45	poboljšani	0	2,3	17	0,17	2,1	16	0,16	2,6	20	0,2
C45	poboljšani	15	2,5	19	0,19	2,2	16,5	0,165	2,7	20,5	0,205
C45	poboljšani	30	2,5	19	0,19	2,25	17	0,17	2,8	21	0,21
C45	poboljšani	45	2,45	18,5	0,185	2,2	16,5	0,165	2,7	20,5	0,205
C45	poboljšani	60	2,3	17	0,17	2,25	17	0,17	2,8	21	0,21

Tablica 6.7 Rezultati ispitivanja poboljšanog čelika C45

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$
C45	nitrirani	0	2,85	21,5	0,215	2,6	20	0,2	2,9	22	0,22
C45	nitrirani	15	2,5	19	0,19	2,7	20,5	0,205	3,1	23,5	0,235
C45	nitrirani	30	2,7	20,5	0,205	2,65	20	0,2	2,95	22	0,22
C45	nitrirani	45	2,8	21	0,21	2,65	20	0,2	2,95	22	0,22
C45	nitrirani	60	2,5	19	0,19	2,6	20	0,2	2,85	21,5	0,215

Tablica 6.8 Rezultati ispitivanja poboljšanog i nitriranog čelika C45

Vrsta čelika	Vrsta obrade	1.ispitivanje				2.ispitivanje			3.ispitivanje		
		t [s]	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_t$ [N]	$\mu$
C45	Tvrdo kromirani	0	5,1	48,5	0,485	3,5	26,5	0,265	6	45	0,45
C45	Tvrdo kromirani	15	4,7	35,5	0,355	4,9	37	0,37	4,4	33	0,33
C45	Tvrdo kromirani	30	4,4	33	0,33	4	30	0,3	4,4	33	0,33
C45	Tvrdo kromirani	45	3,8	28,5	0,285	2,8	21	0,21	4,1	31	0,31
C45	Tvrdo kromirani	60	3,4	25,5	0,255	4,15	31	0,31	3,95	29,5	0,295

Tablica 6.9 Rezultati ispitivanja poboljšanog i tvrdo kromiranog čelika C45

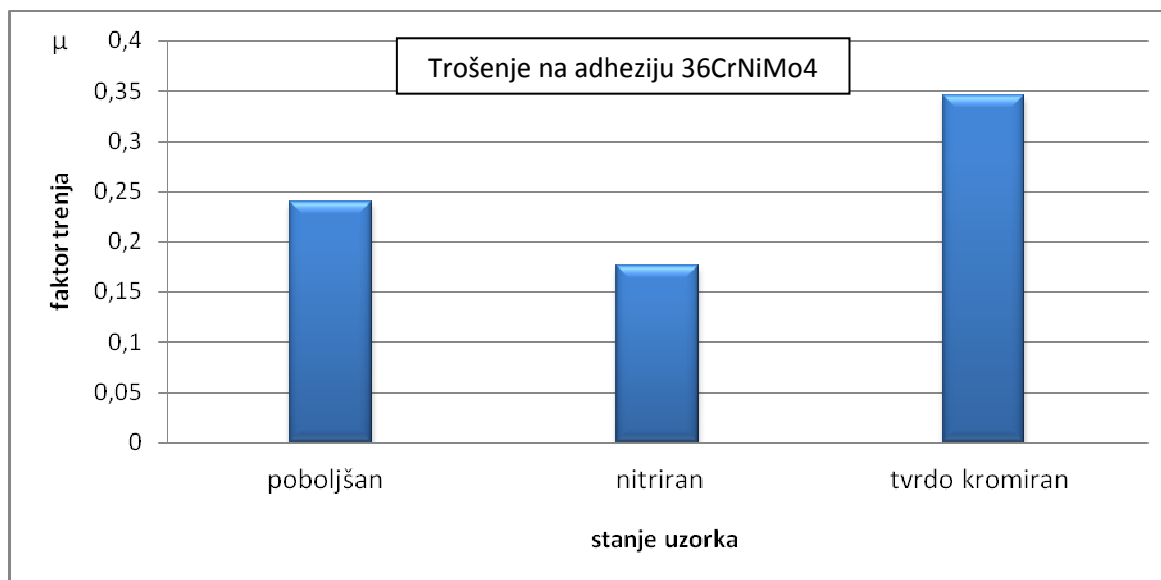
### 6.3 Analiza rezultata

Dobiveni rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje prikazani su zbog lakše preglednosti, tablično i na dijagramima. U tablici 6.10 prikazane su srednje vrijednosti faktora trenja za pojedinu vrstu obrade i vrstu čelika nakon 15 sekundi ispitivanja.

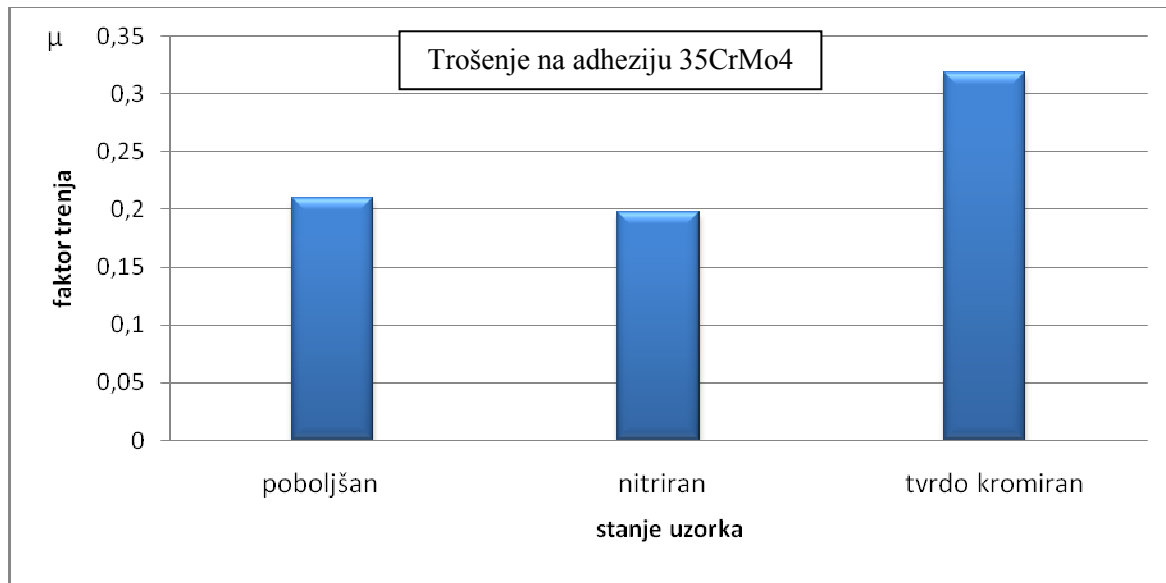
		1.Ispitivanje	2.Ispitivanje	3.Ispitivanje	Srednja vrijednost
Vrsta obrade	Vrsta čelika	$\mu$	$\mu$	$\mu$	$\mu$
Poboljšani	36CrNiMo4	0,225	0,25	0,245	0,24
	35CrMo4	0,255	0,2	0,18	0,21
	C45	0,205	0,165	0,19	0,186
Poboljšani i nitrirani	36CrNiMo4	0,165	0,2	0,165	0,176
	35CrMo4	0,19	0,215	0,19	0,198
	C45	0,19	0,205	0,235	0,21
Poboljšani i tvrdo kromirani	36CrNiMo4	0,28	0,31	0,45	0,346
	35CrMo4	0,27	0,3	0,385	0,318
	C45	0,355	0,37	0,33	0,352

Tablica 6.10 Usporedba faktora trenja svih uzoraka nakon 15 sekundi ispitivanja

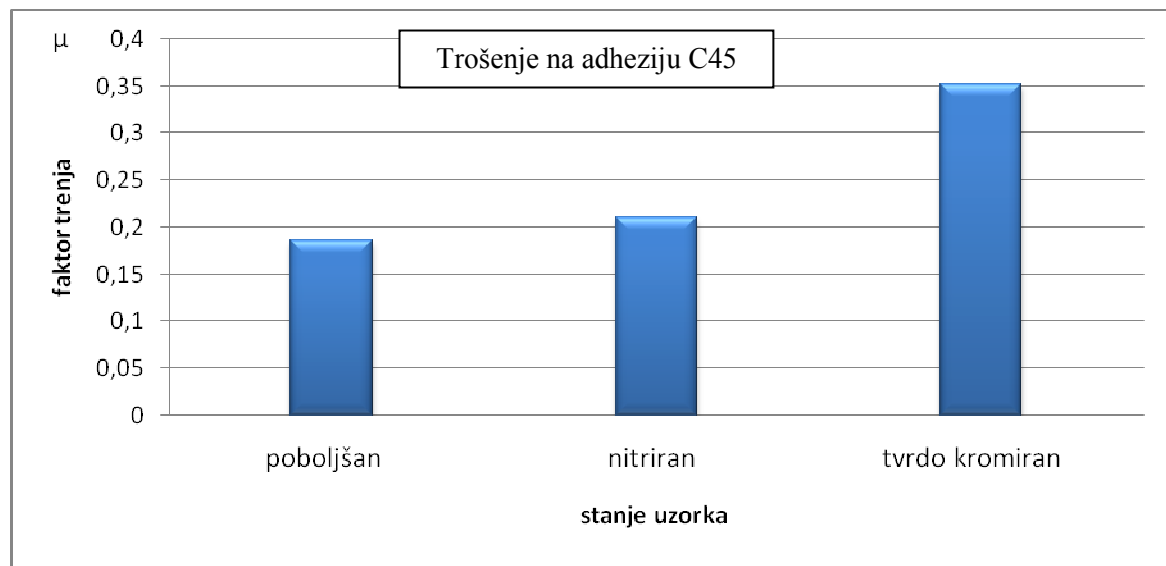
Srednje vrijednosti faktora trenja u ovisnosti od stanja uzorka prikazane su grafički na slikama 6.1, 6.2 i 6.3.



Slika 6.1 Srednje vrijednosti faktora trenja za čelik 36CrNiMo4



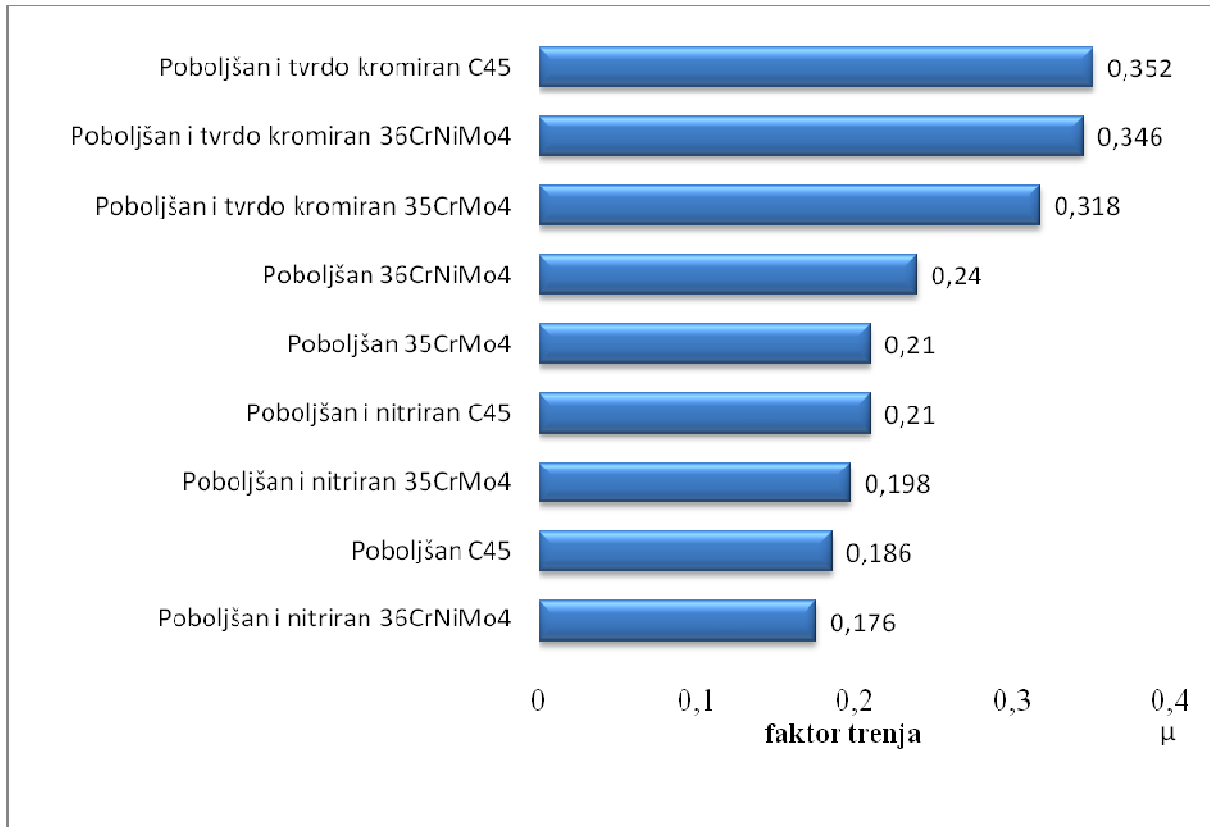
Slika 6.2 Srednje vrijednosti faktora trenja za čelik 35CrMo4



Slika 6.3 Srednje vrijednosti faktora trenja za čelik C45

Rezultati se analiziraju na temelju vrijednosti faktora trenja  $\mu$ . Analizom rezultata uzoraka izrađenih od čelika C45 vidi se da najmanji faktor trenja ima čelik koji je poboljšan. Kod uzoraka koji su izrađeni od čelika 36CrNiMo4 i 35CrMo4 najmanji faktor trenja imaju čelici koji su poboljšani i nitrirani, a najveći poboljšani i tvrd kromirani. Iako tvrd kromirani uzorci kod sva tri čelika imaju najveći faktor trenja, to ne znači da se oni i najviše troše, zbog velike površinske tvrdoće sloja kroma.

Zbog lakše usporedbe, rezultati srednjih vrijednosti faktora trenja su grupirani prema vrsti čelika i stanju toplinske obrade uzorka. Zbog preglednosti rezultati su raspoređeni od najlošijeg prema najboljem, a prikazani su grafički na slici 6.4.



Slika 6.4 Srednje vrijednosti faktora trenja za pojedine čelike ovisno o stanju uzorka

## 7. ZAKLJUČAK

Cijev je najvažniji dio topničkog naoružanja, te najviše utječe na rad samog oružja. Zbog toga se mora konstantno pratiti njezino stanje. Između projektila i cijevi se javlja trenje koje izaziva trošenje kanala cijevi. Nakon ispitivanja i analize rezultata može se zaključiti da adhezijsko trošenje negativno utječe na karakteristike cijevi topničkog oružja.

Nitrirani uzorci imaju relativno najmanji faktor trenja bez obzira na vrstu čelika od koje su izrađeni. Faktor trenja kod poboljšanih uzoraka je nešto veći nego kod uzoraka koji su nitrirani, a manji nego kod tvrdo kromiranih uzoraka. Tvrdo kromirani čelici imaju relativno najveći faktor trenja kod sva tri čelika, što ne znači da se oni najviše troše. Tvrdoća nije najvažniji zahtjev na materijal kad je u pitanju adhezijsko trošenje, već je bitna inkompatibilnost tarnog para.

Kako je faktor trenja kod nitriranih čelika najmanji, glatku cijev topničkog oružja je najbolje uz poboljšavanje i nitrirati. Iz ovoga se da zaključiti da otpornost na adhezijsko trošenje u pravilu ovisi o tome kako je modificirana površina čelika, a ne toliko o samoj vrsti čelika.

Na trošenje cijevi utječe i niz drugih čimbenika kao što su izbor materijala, režim paljbe, način i brzina hlađenja cijevi, ukupni broj ispaljenih projektila.

Uz navedene čimbenike i ovisno o uvjetima održavanja i čuvanja, životni vijek cijevi se može produžiti.



## LITERATURA

- [1] Jakopčić M., *Osnove topničkog naoružanja*, Skripta, Zagreb, 1996
- [2] <http://www.hrvatski-vojn timer.hr/hrvatski-vojn timer/2692009/top.asp>
- [3] <http://www.flickr.com/photos/13439092@N04/3368346170/sizes/m/in/photostream/>
- [4] [http://www.wfyi.org/fireandice/images/arms/fi\\_f\\_ar\\_mortar.jpg](http://www.wfyi.org/fireandice/images/arms/fi_f_ar_mortar.jpg)
- [5] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f1/Ballista\\_%28PSF%29.png/200px-Ballista\\_%28PSF%29.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f1/Ballista_%28PSF%29.png/200px-Ballista_%28PSF%29.png)
- [6] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cb/Replica\\_catapult.jpg/300px-Replica\\_catapult.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cb/Replica_catapult.jpg/300px-Replica_catapult.jpg)
- [7] Abdulji R., Cvetković M., Kravos I., Kršić N., Obrenović R., Pejčić V., Vučković D.: *Osnovi klasičnog naoružanja*, Tehnički školski centar KoV JNA, Zagreb, 1973
- [8] [http://sumterartillery.com/can\\_four.jpg](http://sumterartillery.com/can_four.jpg)
- [9] <http://www.hrvatski-vojn timer.hr/hrvatski-vojn timer/2722732009/top2.asp>
- [10] Jakopčić M.: *Otpornost na trošenje cijevi topničkih oružja*, Disertacija, Zagreb, 2002
- [11] Šljivić V., *Tenkovski top 125 mm 2A46 (opis, rukovanje i održavanje)*, Vojna štamparija, Beograd, 1984
- [12] Vujatović D., *Protivtenkovski top 100 mm T12 (2A19-M) (opis, rukovanje i održavanje)*, Vojna štamparija, Split, 1968
- [13] Grilec K., Ivušić V., *Tribologija*, Autorizirana predavanja, Zagreb, 2011
- [14] RH Ministarstvo obrane., GS OSRH, *Održavanje naoružanja*, Zagreb, 2006
- [15] Pavelić V., *Specifične tehnologije u proizvodnji oružja*, MORH, Zagreb, 1995
- [16] <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/VDj-TO.pdf>
- [17] <http://www.scribd.com/doc/51985488/18/%C4%8Celici-za-pobolj%C5%A1avanje>
- [18] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/cr/index.html>
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Chrome\\_plating](http://en.wikipedia.org/wiki/Chrome_plating)