

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Трибологија машинских система

Број индекса: 304/2013

Дамјан Н. Дамјановић

-Трибологија стрељачког наоружања-

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Блажа Стојановић, доцент - ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада, кандидат треба да изврши анализу основних триболошких процеса карактеристичних машинских система стрељачког наоружања. Такође кандидат треба да прикаже основне делове наоружања са посебним освртом на цев као најодговорнији део наоружања. С обзиром да се цеви стрељачког наоружања најчешће израђују од челика Č4732, кандидат треба да опис материјала као и његове карактеристике. Треба извршити испитивање датог елемента у лабораторијским условима.

Препоручена литература:

- [1] С. Танасијевић: ТРИБОЛОШКИ ИСПРАВНО КОНСТРУИСАЊЕ, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2004.
- [2] С. Танасијевић: ОСНОВИ ТРИБОЛОГИЈЕ МАШИНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА, Војнотехнички институт Београд, 1989.
- [3] Д. Јовановић, Б. Недић: РЕГЕНЕРАЦИЈА ПОВРШИНА УНУТРАШЊЕ ТРАСЕ ЦЕВИ СТРЕЉАЧКОГ ОРУЖЈА Крагујевац, 2006.

Крагујевац, јул 2015. Год.

Ментор
Доц. др Блажа Стојановић

Резиме:

Стрељачко наоружање је израз који се користи за све врсте и типове ватреног оружја којим се служи пешадија у сврху неутрализације непријатељске живе силе, односно непосредне одбране. Најважнији елемент оружја стрељачког наоружања је цев. За израду цеви оружја као најважнијег елемента оружја, најчешће се користе хром-никл-молибденски челици зато што они постижу најбоља својства од 350°C-400°C, њихова чврстоћа и жилавост расту, а у цеви се достиже температура и до 400°C. У овом раду су описани типови стрељачког наоружања, цев као најважнији елемент, методе за повећање животног века цеви, трибологија стрељачког наоружања као и упоредна испитивања материјала од ког се цеви израђују (Č4732) и челика V700.

Кључне речи: стрељачко наоружање, цеви стрељачког наоружања, методе за повећање животног века цеви, трибометар TR-95, триболошка испитивања.

Summary:

Small arms is a term used for all kinds and types of firearms used by the infantry for the purpose of neutralizing the enemy forces live and direct defense. The most important element of small arms weapons the tube. To create small arms as the most important element of arms, are commonly used chrome-nickel-molybdenum steels because they achieve the best properties of 350-400 °C, their strength and tenacity grow, and in the pipe is reached and the temperature to 400 °C. This paper describes the types of small arms, the pipe as the most important element methods for increasing the lifetime of the tube, tribology small arms as well as comparative tests of material from which the tubes are produced (Č4732) and steel V700.

Keywords: armament, tube artillery weapons, methods for increasing the lifetime of the tube, Tribometer TR-95, tribological tests.

Садржај:

1.0 Увод	1
2.0 Конструкција стрељачког наоружања	2
2.1 Основни делови	2
2.2 Цеви	6
2.3 Материјали и израда	10
3.0 Триболошки процеси код стрељачког наоружања	13
3.1 Хабање канала цеви и деформације	16
4.0 Методе за прорачун животног века цеви	22
4.1 Прорачун животног века цеви класичним полуемпиријским методама	22
4.2 Прорачун животног века цеви услед замора материјала	23
5.0 Контрола хабања и продужетак животног века цеви	25
6.0 Триболошка испитивања материјала за израду цеви оружја	28
6.1 Опрема за испитивање материјала цеви оружја	28
6.2 План триболошких испитивања и приказ добијених резултата	37
6.3 Анализа добијених резултата	43
7.0 Закључак	49
8.0 Литература	54

1.0 Увод

Стрељачко ватрено оружје, познатије као ручно ватрено оружје, је оружје калибра до 20 *mm*. Намењено је за разоружавање непријатељске живе силе изнад заклона. У ову групу оружја спадају, [1]:

- пиштољи,
- аутомати,
- пушкомитраљези и
- митраљези.

Због своје сличности ту се сврставају и против тенковске пушке, а њихова је намена за уништавање лаких оклопних возила.

Стрељачко оружје је основно оружје сваке армије. До тридесетих година XX века стрељачко наоружање се производило традиционалним поступцима, са много обраде квалитетних металних блокова, пажљивим ручним подешавањем и са финим толеранцијама за покретне делове. Увођењем нових поступака у процесу производње оружја, резултирало је и убрзаним развојем стрељачког наоружања, већим избором различитог оружја и масовнијом производњом. Данашње оружје је прескупо и превелико да би се њиме лако могло експериментисати. Разлог томе је примена нових материјала и најновије технологије у процесу производње, [1].

Прве пушке су се пуниле барутом кроз уста цеви и после сваког испаливања процес пуњења је дуго трајао. Појавом метка који је у себи садржао барутно пуњење брзина опаљивања се знатно повећала. Прве пушке појавиле су се почетком четрнаестог века, када је откривен црни барут чијим се паљењем ослобађала енергија помоћу које се избацивао пројектил. На почетку су се за пројектиле користиле камене или металне кугле. Цеви оружја су биле израђене са затвореним дном на којем се налазио отвор за фитиљ за паљење барута. Овако прављена оружја била су кратког домета, а цев је усмеравана по правцу визуелно, јер тада нису постојали оптички уређаји. Прецизност и моћ ових оружја биле су врло мале. На слици 1а приказан је изглед пушке из четрнаестог века и пушке модерније израде 1б, [1].



а) Изглед пушке из XIV века

б) Изглед пушке модерније израде

Слика 1: Изглед пушке некад и сад, [1].

2.0 Конструкције стрелачког наоружања

2.1 Основни делови

Стрелачко наоружање је израз који се користи за све врсте и типове ватреног оружја којим се служи пешадија у сврху неутрализације непријатељске живе силе, односно непосредне одбране. Као што је већ речено у ову групу оружја спадају пушке, пиштољи, митраљези. Поред тога се као стрелачко наоружање сматра и аутомат (пушка високог домета и брзине испаљивања неколико метака у минути), мада се њиме чешће користе полицијске него војне снаге, [2].

Пушка је индивидуално ватрено оружје састављено од цеви, механизма за опалјивање и кундака. Користи се како у војне и полицијске сврхе тако и за лов. На слици 2 приказана је пушка М70 стандард.



Слика 2: Пушка М70 стандард, [2].

Функција цеви је да усмери метак у правцу циља. Увођењем олуцавања (ожљебљавања) цеви постигнута је додатна прецизност јер се метак приликом испаљивања окреће око своје осе, [2].

Функција кундака је да се цев ослони на раме ради лакшег и прецизнијег гађања, али и да раме стрелца прими на себе ударац који се дешава приликом опалјивања.

Механизам за опалјивање увек има више делова, али увек постоји ударна игла, обарач и механизам који по испаљивању ручно или аутоматски избацује чауру метка.

На пушке се могу додавати разни додаци од бајонета преко додатка за испаљивање тромбона или граната. Додавањем оптичких система пушка се претвара у снајпер – пушку изузетне прецизности и домета, [1].

На слици 3 приказани су делови пушке.



Слика 3: Основни делови пушке, [2].

Пиштољ је назив за стрељачко оружје које се користи једном руком и најчешће служи за непосредну самоодбрану, а ређе за уништење непријатељске живе силе. Пиштољи се обично деле на, [2]:

- пиштоље са једним метком (који се данас најчешће употребљавају за спорт и лов),
- пиштоље са више цеви,
- револвере,
- полуаутоматске пиштоље и
- аутоматске пиштоље.

Пиштољ и његови основни делови су приказани на слици 4:



Слика 4: Пиштољ и основни делови, [2].

Пиштољ је спреман за паљбу када се у њега убади пун оквир, навлака повуче уназад, а затим пусти да оде унапред. При том кретању, навлака уноси метак из оквира у лежиште метка. Крајњи покрет навлаке врши брављење оружја. Може се гађати једноструком акцијом или двоструком акцијом. Након ручног репетирања метак је из оквира потиснут у лежиште. Повлачењем обарача ослобађа се запети ударач и долази до опаљења (једнострука акција). У случајевима када се пре окидања потисне полука за спуштање ударача, исти више није запет. У циљу окидања треба повући обарач. Тада се на првом делу пута обарача запиње ударач, а на другом делу пута обарача долази до окидања (двострука акција). При опаљењу ствара се екстремно високи притисак барутних гасова, који потискују пројектил. Жљебови унутар цеви дају пројектилу стабилизујућу ротацију, захваљујући којој пројектил има прецизну путању до циља. Реакциона сила потискује навлаку и цев уназад. Одбрављивање цеви и навлаке догађа се након пада притиска на безбедни ниво. Извлакач на навлаци повлачи празну чауру, која бива избачена кроз отвор на навлаци, [2].

Метак је назив за комбинацију пушчаног и пиштољског пројектила повезаних у једну целину уз помоћ чауре. Меци за стрелачко наоружање се убрајају у врсту муниције калибра од 4,3 mm до 20 mm. На слици 5 приказан је изглед метка и његови саставни делови.



1-пројектил, 2-чаура, 3-барутно пуњење, 4- део за извације из цеви,
5-метална капсула са иницијалним пуњењем

Слика 5: Метак и његови основни делови, [1].

Митраљез је назив за аутоматско стрелачко оружје које је у стању да у кратком периоду испали неколико узастопних хитаца. Митраљези се најчешће, с обзиром на тежину, дomet или калибар деле на, [2]:

- пушкомитраљезе,
- митраљезе опште намене,

- тешке митраљезе и
- супертешке, најчешће коришћене као противавионска артиљерија.

Посебну врсту митраљеза чине тенковски митраљези и авионски митраљези. На слици 6 приказан је MO2 митраљез који је познатији као Којот.



Слика 6: MO2 - Којот, [2]

Аутоматска пушка конструисана је на Калашњиков (принцип кога одликује висока поузданост брављења) принципу. Користи се у војним снагама широм света, јер је потврдила своју поузданост у свим климатским условима. На слици 7 приказан је изглед аутоматске пушке М70, [1].



Слика 7: Аутоматска пушка М70, [1]

2.2 Цев

Цев је основни елемент сваког оружја и представља топлотну машину у којој се одвијају динамички процеси претварања потенцијалне хемијске енергије барута у кинетичку и топлотну енергију у веома кратком интервалу. Сви процеси и појаве су импулсног карактера. У цеви се врши опаљење метка и лансирање пројектила са дефинисаном почетном брзином и правцем лета. Према конструктивном решењу, цев је дебелозидни цилиндар чија се унутрашња шупљина назива канал цеви. На слици 8 приказан је пресек цеви, [3].



Слика 8: Пресек цеви, [3]

Канал цеви се састоји од лежишта метка, прелазног конуса и усмеривача пројектила. Лежиште метка је део у коме се смешта метак. Прелазни конус спаја лежиште метка са усмеривачем пројектила. Усмеривач пројектила је предњи део цеви по коме се креће пројектил. Облик израде наведених елемената цеви зависи од пуњења и вођења пројектила у цеви. Зидови цеви такође могу бити различито изведени. По својој спољашњој конфигурацији поједини делови цеви могу бити само цилиндрични или конусни.

Цев је најважнији елемент ватреног оружја. У цеви се врши сагоревање барутног пуњења, а енергија чији су извор барутни гасови искоришћена је да саопшти пројектилу транслаторно кретање одређене брзине. Правац осе цеви даје правац лету пројектила. Код савременог ватреног оружја приликом опаљења омогућено је обртно кретање пројектила око осе цеви у циљу остваривања потребне стабилности.

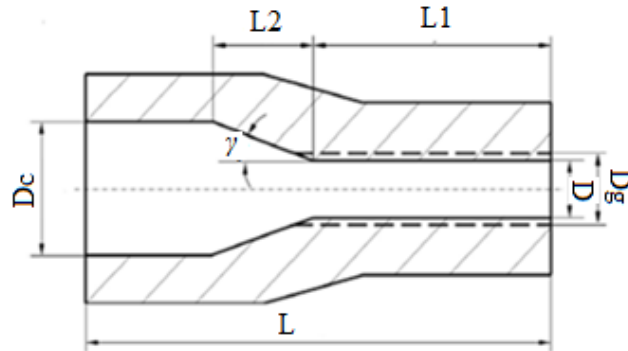
Код одређивања дебљине зидова цеви треба водити рачуна о, [3]:

- отпорности зидова на притисак барутних гасова,
- условима употребе,
- отпорности цеви на савијање услед случајних удара при паду оружја,
- утицају вибрација при гађању због прецизности оружја,
- загревању цеви при гађању.

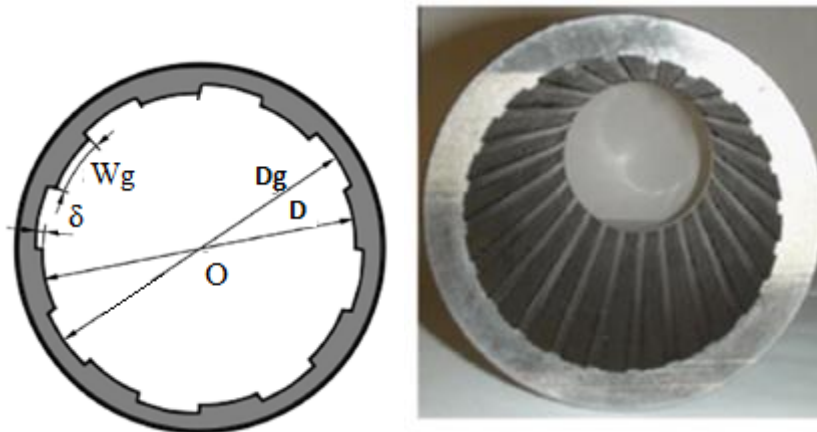
У зависности од начина израде цеви могу бити:

- глатке и
- ожљебљене.

На слици 9 приказана је цев са жљебом, као и кретање кроз ожљебљену цев.

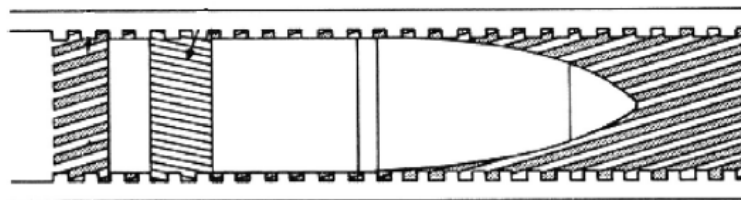


$L1$ – дужина ожљењбљеног дела цеви, $L2$ - дужина прелазног конуса, γ – угао прелазног конуса, L - дужина цеви, D - унутрашњи пречник цеви, Dc - пречник лежишта метка, Dg - пречник ожљебљења



Wg - ширина жљеба, D - унутрашњи пречник цеви, Dg - пречник ожљебљења, δ - дебљина жљеба

Ожљебљена цев

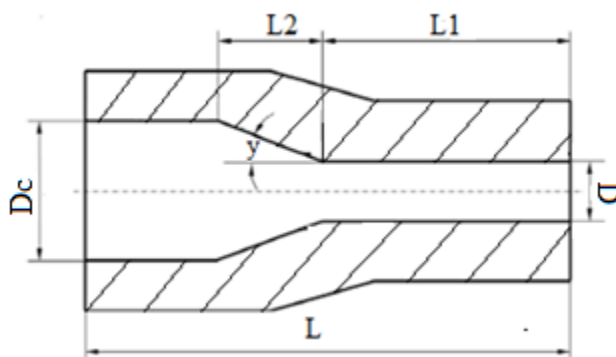


Кретање пројектила кроз цев са жлебом

Слика 9: Ожљебљена цев, кретање пројектила кроз цев, [3]

Зазор између чауре цеви и лежишта метка мора бити у границама тако да онемогућује пролажење гасова између чауре и лежишта, као и прскање чауре. Код аутоматског оружја метак се уноси у лежиште метка са извесном брзином при чему се његова кинетичка енергија апсорбује путем деформације чауре. Толеранција димензија чауре и лежишта метка треба да буде тако изабрана да буде обезбеђено лако улажење метка, извлачење празне чауре и да трајне деформације чауре буду у дозвољеним границама како би се избегла појава попречног и уздужног прскања чауре. При опадању притиска затварач се враћа у првобитно стање и притом сабија чауру у лежишту и уклињује је нарочито у задњем делу, па се услед тога отежава извлачење чауре. Да би се то избегло код неких модела оружја лежиште метка се израђује у облику цилиндра (глатка цев), [3].

На слици 10 приказан је изглед глатке цеви.



$L1$ – дужина глатког дела цеви, $L2$ - дужина прелазног конуса, y – угао прелазног конуса, L - дужина цеви, D - унутрашњи пречник цеви, Dc - пречник лежишта метка

Слика 10: Изглед глатке цеви, [3]

Први и основни захтев за цев као главни део оружја проистиче из његове намене – обезбеђења услова балистике (услов за обезбеђење домета пројектила испаљеног из ватреног оружја). Цеви задатог калибра (пречника у mm) d при опаљењу метка пројектилу (пројектил је једини део метка који долази у контакт са циљем) одређене масе m саопшти почетна брзина и обезбеди стабилност лета у потребном правцу. Из тога се види да је пре него што се приступи пројектовању цеви, неопходно имати елементе метка. Важно је напоменути да унутрашњи пречник цеви зависи првенствено од калибра који ће се користити у оружју. При гађању цев оружја врши осцилаторно кретање. Карактеристике осцилација цеви зависе од више фактора а то су, [4]:

- дужина цеви,
- попречне димензије,
- начин учвршћивања.

Ради олакшања анализе осцилаторних кретања узима се да цев има облик цилиндричног штапа са једним учвршћеним крајем. Све те осцилације врше се углавном у вертикалној равни. Оне утичу на прецизност гађања при јединичној и аутоматској паљби. Смањење утицаја осцилација цеви на прецизност гађања постиже се на следећи начин, [4]:

- рационалним избором дужине цеви који омогућује излажење метка из најпогодније фазе осциловања,
- смањење одступања у маси пуњења, маси пројектила, притиску барутних гасова који омогућавају добијање минималних одступања времена коришћења кретања метка кроз цев и фазе осциловања предњег зида цеви,
- рационалним избором дебљине зидова и расподеле масе уздуж цеви чиме се постиже умањење осцилаторних кретања.

2.3 Материјали и израда

За израду цеви оружја као најважнијег елемента оружја, најчешће се користе хром-никл-молибденски челици. Хром-никл-молибденски челици постижу најбоља својства од 350°C - 400°C , њихова чврстоћа и жилавост расту, а у цеви се достиже температура и до 400°C . Цев својим квалитетом мора задовољити све сложене експлоатацијске и технолошке захтеве који се пред њу постављају, а то су, [5]:

- висока чврстоћа и граница течења,
- добру жилавост,
- довољну тврдоћу и високу отпорност на ударна оптерећења и трење,
- високу отпорност на хемијско деловање продуката барутних гасова.

Пројектил је елемент који се креће дуж цеви и који лети кроз ваздух до циља. Језгро пројектила је обично од олова, а кошуљица од томбака- легуре бакра и цинка. Кошуљица служи за урезивање у жљебове цеви и за вођење пројектила дуж цеви. Карактеристике елемента у контакту дате су у табели 1. Хемијски састав материјала цеви и његова термичка обрада имају велики утицај на процес хабања цеви и зато су предмет детаљних и обимних студија, [6].

Табела 1: Карактеристике елемената у контакту, [6].

		Цев	Пројектил
1.	Материјал	Č4732 Č5730	Томбак
2.	Тврдоћа, HR _c	60	34
3.	Класа храпавости	Ra 0,8	Ra 1,6
4.	Релативно кретање елемената у контакту	Клизање	
5.	Напомена	Додир на површини	

Челици који се највише примењују за израду цеви стрелачког оружја су Č4732 и Č5730. Хемијски састав челика Č5730 приказан је у табели 2.

Табела 2: Хемијски састав челика, Č5730, [7].

Хемијски састав, %									
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	S	P	C	Cu
0,27- 0,34	0,30- 0,60	0,17- 0,37	2,0-2,4	0,60- 0,90	0,20- 0,30	0,10- 0,18	Max 0,025	Max 0,025	Max 0,25

Челици (Ћ4732 и Ћ5730) који се користе за израду цеви стрелачког наоружања морају да имају следеће вредности механичких својстава, [7]:

- напон на граници пропорционалности, $R_{p0,2}$ – од 930 до 1470 N/mm^2 ,
- затезна чврстоћа, R_m – од 1030 N/mm^2 до 1780 N/mm^2 ,
- истезање 8% до 20 %.

Цеви са наведеним својствима морају та својства задржати у врло широком температурном пољу, јер температура околине у којој оружје делује може бити и нижа од $-30^\circ C$, док се цев током гађања загрева на температури до неколико стотина $^\circ C$. Због тога се за израду цеви примењују челици за побољшање који каљењем и високим пропуштањем постижу наведена својства. Својства побољшаних челика морају бити једнака по целом пресеку цеви, [7].

Никал даје челику високу чврстоћу (отпорност да се одупре деловању унутрашњих сила) и ударну жилавост (способност пластичног деформисања), нарочито на сниженим температурама. Молибден такође повећава чврстоћу посебно при повишеним температурама. Хром као легирани елемент такође утиче на повећање чврстоће.

Челици за побољшање који се примењују за израду цеви, подвргавају се различитим поступцима за побољшање отпорности на абразијско хабање (губитак масе). Један од тих поступака је промена састава микроструктуре материјала, које се постиже побољшањем, нитрирањем и тврдим хромирањем, [7].

Побољшање челика је поступак топлотне обраде који се састоји од каљења и високог пропуштања (температура пропуштања изнад $400^\circ C$) с главном сврхом постизања високе границе течења и високе жилавости. Побољшање је поступак који се одвија континуално, односно то је поступак где се челик са високе температуре хлади до собне температуре. Нитрирање је поступак обогаћивања површинског слоја цеви. Нитрирање се врши на температури између $500^\circ C$ и $600^\circ C$. Хромирање је поступак наношења хрома на металну површину. Изводи се у електролиту (супстанци која садржи слободне јоне) чији су главни састојци хромтриоксид Cr_2O_3 и сумпорна киселина H_2SO_4 . Дебљина превлаке од хрома може бити од 0,001 mm до 0,5 mm . Која ће дебљина превлаке бити зависи од температуре купке и времена трајања овог процеса, [7].

У овом раду ће бити приказана упоредна испитивања челика Ћ4732, челика од којег се такође израђују цеви стрелачког наоружања и Велдокс челика V700 на трибометру $Tr-95$.

У табели 3 дат је хемијски састав челика Č4732.

Табела 3: Хемијски састав челика, Č4732, [7]

Ознака	Састав, %				Жарено- побољшано			
	С	Мп	Сг	Мо	Тврдоћа НВ	Граница развлачења N/mm ²	Затезна чврстоћа N/mm ²	Издужење %
Č4732	0,42	0,6	1,05	0,2	217	780	1000	11

Процеси термичке обраде за челик Č4732 дате су у табели 4.

Табела 4: Процеси термичке обраде челика, Č4732, [7]

Ознака	Термичка обрада				
	Ковање °C	Жарење °C	Нормализација °C	Каљење у води °C	Каљење у уљу °C
Č4732	1050-850	680-720	840-880	820-850	830-860

Č4732 је челик легиран са Сг (4) и Мо (7) и има редни број 32 (намењен за побољшање).

Ковање је поступак обраде материјала без одвајања честица, код које се промена облика и димензија врши ударцима чекића или бата по откивку. Жарење је топлотна обрада материјала којом се добијају мекше структуре челика. Нормализација је топлотна обрада која се састоји од аустенизације и хлађења на ваздуху. Каљење је поступак који се добија већа чврстоћа челика брзим хлађењем у води или уљу.

У табели 5 дат је хемијски састав челика V700.

Табела 5: Хемијски састав челика, V700, [8]

Ознака	Састав, %									
	Si	С	Мп	Р	S	Cr	Cu	Ni	Мо	В
V700	0,60	0,20	1,60	0,020	0,010	0,70	0,30	2,0	0,70	0,005

3.0 Триболошки процеси код стрељачког наоружања

Сви механички системи чија је функција непосредно везана за процесе триболошких интеракција површина у контакту које се релативно крећу једна по другој представљају тзв. трибомеханичке системе. Триболошки процеси који се при томе јављају доводе до низа негативних појава које утичу на функционисање и структуру трибомеханичких система као и целокупног механичког система. Ови процеси пре свега узрокују директне губитке енергије и материјала, смањење ефикасности, поузданости и века трајања, повећање трошкова одржавања и триболошки условљених инвестиција, што на глобалном нивоу доводи до расипања необновљивих материјалних и енергетских ресурса и еколошког одржавања животне средине, [9].

Из наведених разлога очигледан је значај проучавања и унапређивања трибомеханичких система. Унапређење трибомеханичких система доводи до смањења енергије утрошене на трења, смањења трошкова одржавања и продужења века трајања система, смањење трошкова кроз смањење застоја, смањење инвестиција кроз дужи век трајања трибомеханичких система, [9].

Унапређење трибомеханичких система у суштини је засновано на смањење интензитета триболошких интеракција и повећању отпорности контактних елемената на хабање. То је могуће пре свега постићи унапређењем целокупне структуре система. При томе се мисли на све елементе у структури, тј. на контактне елементе и мазиво и њихове триболошке карактеристике, [10].

У теорији система системом се назива целина у којој је ред елемената узајамно везан структурно и функционално међусобно одређеним релацијама. Таква дефинициона основа опредељује трибомеханичке системе као целине чије је функционално установљење везано са узајамним контактним деловањем површина у релативном кретању. Сам назив „трибомеханички систем“ упућује на присуство триболошких процеса у елементима система, али и на механичко успостављање функционалних структура, [10].

У техничким, а посебно у машинским системима функција система састоји се у преображају улазних и излазних величина. У апстрактном и јако упрошћеном опису, функција трибомеханичких система састоји се углавном у преображају улазних величина, на пример: кретање, механичка енергија и материјал, у корисне и употребљиве излазне величине. Последични однос између улаза и излаза праћен је губицима механичке енергије и материјала идентификованим као губици на трење и хабање, [10].

Користећи основну системску методу за истраживање непознатих или врло сложених динамичких система, трибомеханички систем се може разматрати као црна кутија са улазним и излазним величинама, [11].

Функција као једна од главних карактеристика трибомеханичког система често се може изразити као однос улазних и корисно излазних величина. Не могу сви улази бити пожељни као што ни сви излази нису пожељни. Поједини се могу разматрати као поремећаји који на излазу репродукују и стварају губитке, који не припадају увек истом типу величина као на улазу или корисном излазу, [11].

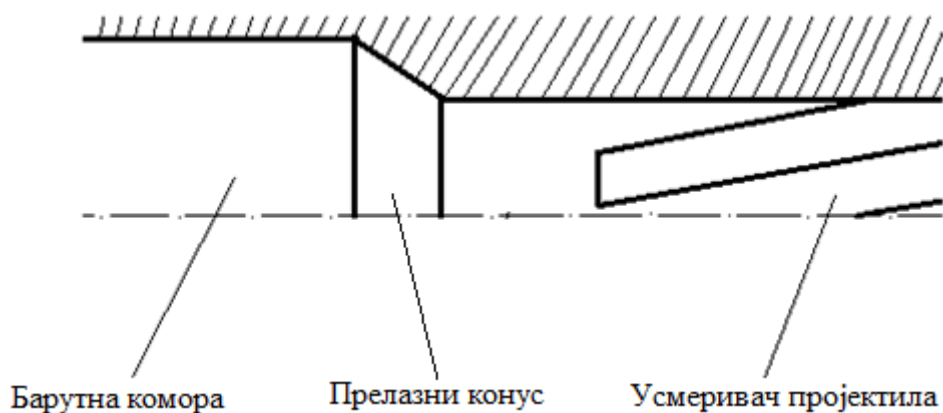
Кретање је најважнија улазна величина сваког трибомеханичког система. Кретање прати и пренос снаге, материјала или информација. У остваривању задатих елементарних функција, трибомеханички системи могу мењати брзину кретања или је потпуно искључити, [11].

У даљем тексту биће приказано хабање цеви до кога долази при сваком опаљењу пројектила, као и неки од поступака за продужење радног века цеви оружја.

Као што је већ речено, цев је најбитнији део оружја који представља елемент у коме се врши двострука трансформација енергије: хемијска енергија сагоревања барута се претвара у топлотну, а затим из топлотне у механичку енергију. Цев пројектилу омогућава потребну почетну брзину и правац полета (правац испаливања пројектила), а преко завојних жљебова, високу ротацију, потребну за стабилност при кретању до циља. Изложеност цеви комбинованом дејству топлоте, високих притисака, хемијском дејству барутних гасова и спољашњим утицајима, указује на нужност свеобухватног истраживања овог елемента оружја. Због тога треба примењивати одговарајуће триболошке мере за продужење радног века цеви стрелачког оружја, [12].

Основни појмови који дефинишу цев (слика 11) оружја су:

- барутна комора,
- прелазни конус и
- усмеривач пројектила.



Слика 11: Основни делови цеви, [12].

Барутна комора је простор у коме је смештено барутно пуњење пре опаљења. За конструкторе цеви, термин барутна комора подразумева целу унутрашњу неолучену запремину цеви, осим прелазног конуса, [12].

Прелазни конус је конични део цеви на који се наслања кошуљица пројектила. Он спаја ожљебљени део цеви и глатки део у који је смештена чаура, [12].

Водиште пројектила је предњи обично ожљебљени део цеви по којем се креће пројектил и који му одређује правилно кретање, [12].

Радни век ватреног оружја ограничен је услед комплексног процеса механичког и ерозионог хабања. Контактне површине тела у додиру, које чине трибомеханички систем цев - пројектил, састоје се од врхова и удубљења микрорељефа, контаминираних разним продукtima разлагања уља и адитива. При сагоревању барутних гасова унутрашња површина цеви оружја је изложена комбинованом механичком, термичком и хемијском деловању. Ови процеси доводе до оштећења унутрашње површине цеви и смањења балистичког живота цеви. Под балистичким животом цеви подразумева се број метака које цев може да испали, а да се у знатној мери прецизност и домет не умање. Долази до пада механичких карактеристика материјала цеви (појава напрезања и ерозије, повећања крутости површинског слоја). Ове промене су изражене ако су захтеви за повећањем домета, прецизности и брзине гађања оштрији. Изложеност цеви комбинованом дејству топлоте, високог притиска, хемијском дејству барутних гасова високоенергетских карактеристика спољашњим утицајима, указује на неопходност свеобухватног истраживања овог елемента стрелачког оружја. Узроци хабања цеви су многобројни, врло сложени и још увек недовољно испитани. Због тога није могуће унапред одредити колики ће бити радни век цеви, [5].

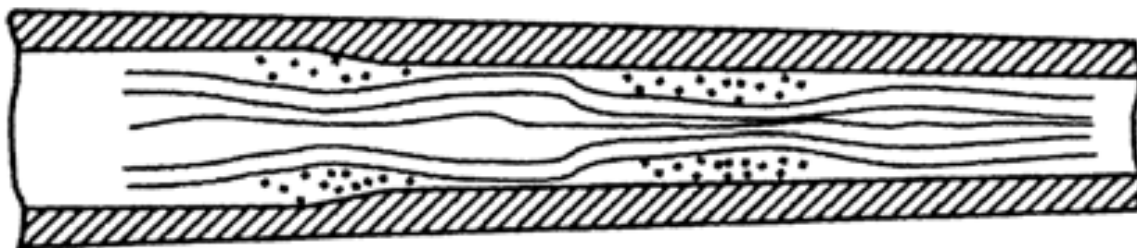
3.1 Хабање канала цеви и деформације

Хабање цеви се манифестује на више начина, али су три појаве карактеристичне код сваке цеви, [13].

- хабање,
- ерозија,
- појава прстена.

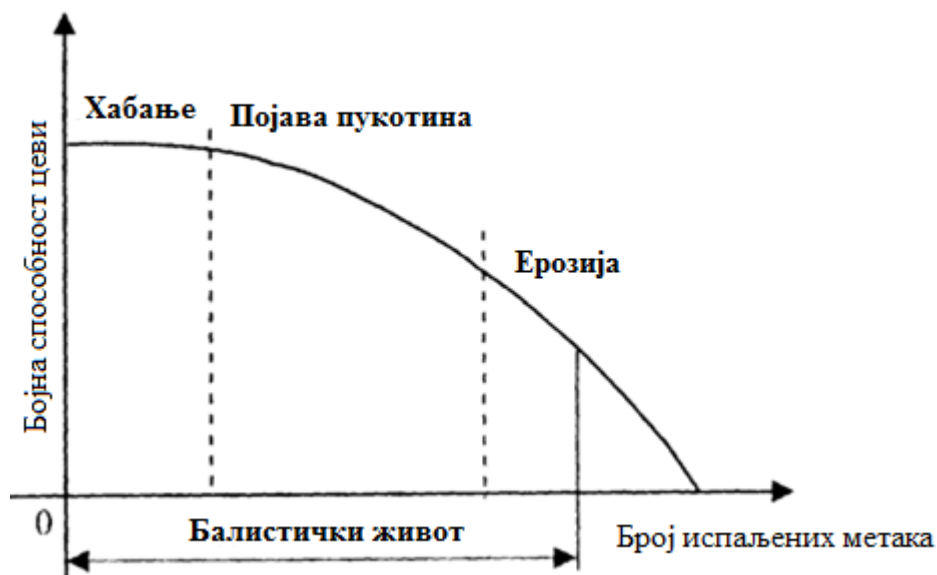
Хабање са једне стране настаје трењем клизања метка по површини цеви и нарочито је изражено на прелазном конусу. Са друге стране усијани барутни гасови, без обзира што процес траје само неколико хиљадитих делова секунде, делују на цев разорним притиском, температуром, брзином и хемијским саставом. Дејство барутних гасова утиче на пропадање цеви знатно више од трења. Способност цеви се умањује са повећањем броја испалених метака. Кретањем кроз цев, при изузетно великим брзинама и високим притисцима, пројектил носи са собом честице са унутрашње површине цеви, а такође и честице материјала са површине пројектила. Унутрашњи притисак се повећава а компресија се смањује, [13].

Барутни гасови улазе у пукотине на цеви, које настају после одређеног броја испалења, услед чега се хабање манифестује стварањем бразди и оштећења површине, што условљава смањење степена искоришћења оружја. Пошто се процес одиграва у веома кратком временском интервалу, може се представити динамичким ударима који на површини стварају слој различитих механичких особина у односу на основни материјал. Формирани површински слој се одликује повећаном тврдоћом, а самим тим и већом кртошћу и мањом еластичношћу. Под дејством наредних удара проласком следећих зрна у површинском слоју се јављају пукотине и долази до појаве љускања површине. Брзина барутних гасова, која зависи од притиска утиче како непосредним ударом гасова о површину, тако и трењем гасова. Рад трења је велики, мали део се троши на загревање, а већи на хабање загрејане површине. Хабање је израженије ако је температура цеви виша, а унутрашња траса храпавија. Велика брзина гасова у цеви изазива и друге појаве које се објашњавају стварањем ударних таласа у цеви. На слици 12 приказано је кретање барутних гасова унутар цеви, [6].



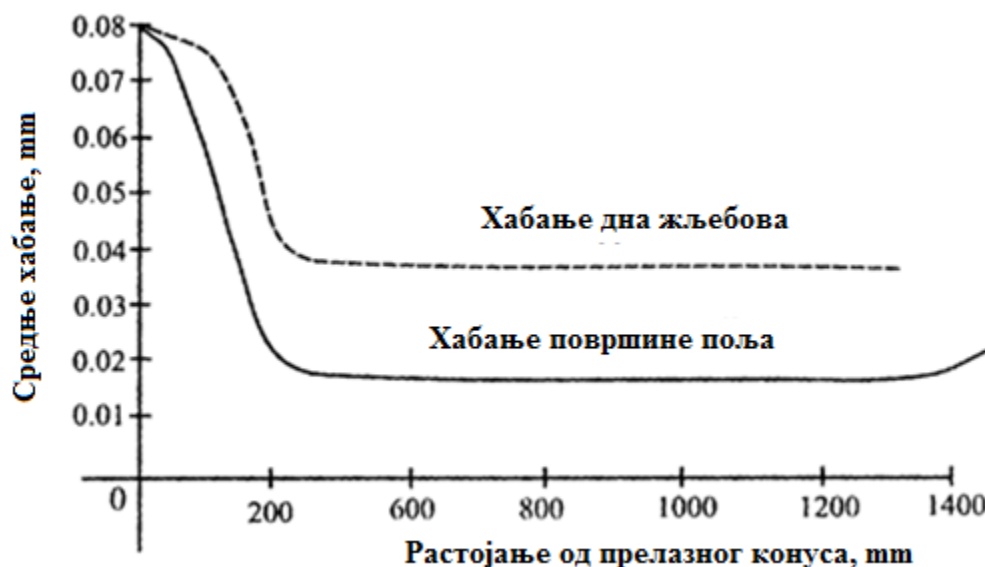
Слика 12: Кретање барутних гасова унутар цеви, [6]

Струјањем гасова може да се објасни и појава прстена у цеви. Повременим ширењем и струјањем млаза условљене су и његова минимална и максимална брзина. Како су таласна кретања код свих метака са истом величином пуњења иста, следи да таласи на местима где им је брзина најмања, скупљају честице метала, које су повукли са места где им је брзина највећа. На тај начин се на унутрашњој траси јављају удубљења и испупчене прстенасте површине, често видљиве голим оком. Због ових наведених узрока способност прецизног испаљивања цеви опада са бројем испаљених метака. Прво долази настанак ситних пукотина и на крају долази до ерозија цеви. На следећој слици приказано је опадање бојне способности цеви са порастом броја испаљених метака, [5].



Слика 13: Опадање бојне способности цеви, [5]

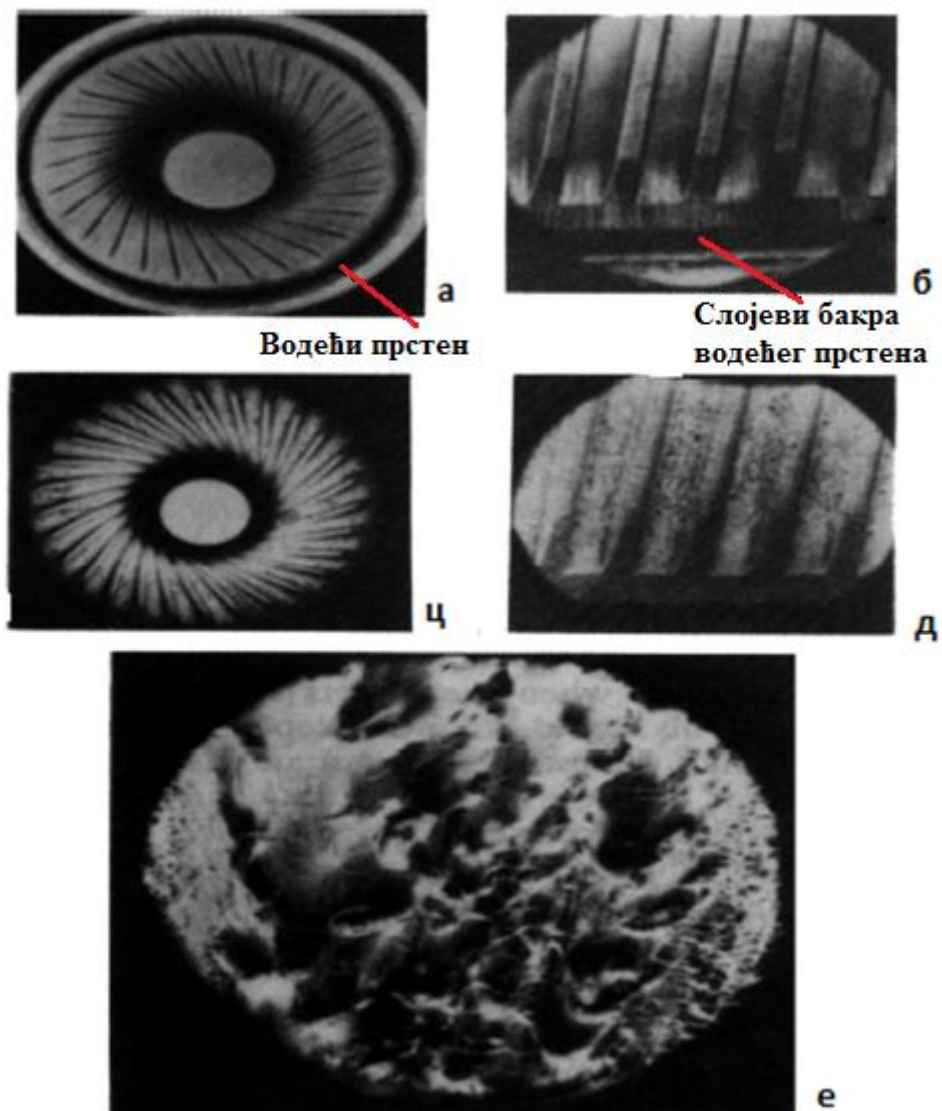
На слици 14 приказан је однос хабања дна цеви и површине поља, [12].



Слика 14: Однос хабања дна жлебове и површине поља, [12]

Ерозија цеви приказана је на слици 15 и може се дефинисати као прогресивно оштећење површине цеви и површине калибра услед нормалне експлоатације, која битно утиче на пад почетне брзине пројектила, тачност и степен искоришћења оружја. Живот цеви зависи од интензитета хабања, али и од раније прорачунски дефинисаног животног века цеви. Постоји и низ других појава и услова да се цев оружја забрањује за употребу, али нису везани за ерозију.

Постоји више теорија које објашњавају хабање цеви као што су топлотно, механичко и хемијско дејство барутних гасова и пројектила на унутрашње површине цеви. Установљено је да до хабања цеви долази истовременим дејством свих фактора који су узајамно повезани и врло сложени, па се у теоријском смислу не могу једнозначно одредити. Колики ће степен имати поједини фактори на процес хабања зависи од врсте система наоружања и услова експлоатације (интензитет и режим хлађења цеви, одржавање, услови чувања...), [12].



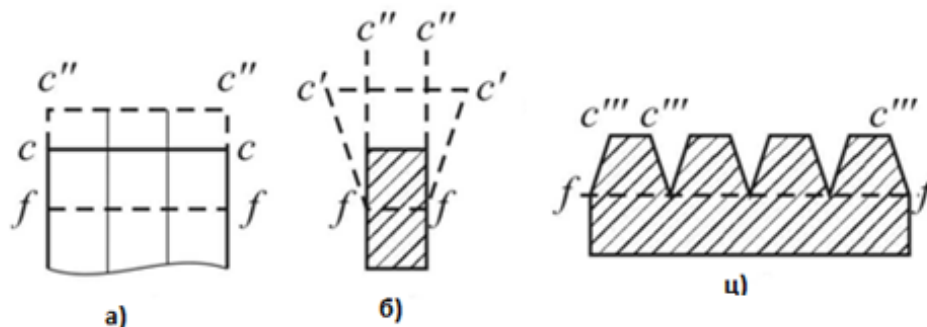
- а) изглед цеви после два опаљења,
б) увеличан поглед почетка ожљебљеног дела,
ц) изглед цеви после 702 опаљења,
д) увеличан поглед почетка ожљебљеног дела,
е) изглед цеви после 1744 опаљења.

Оштећења цеви оружја 7,62 mm M70

Слика 15: Ерозија цеви, [6]

Сматра се да је код стрелачког наоружања основни фактор хабања дејство пројектила на цев. Хабање цеви развија се постепено, уз одређене манифестације. Прво што се може приметити у каналу цеви је бакарисање њене површине. После неколико опаљења (слика 15а и 15б), јасно се виде слојеви бакра водећег прстена (прстен настао бакарисањем површине цеви после неколико опаљења, слика 15а) на радним боковима поља и у дну жљебова. На другим деловима канала бакарисање се мање примећује. Наношење материјала водећег прстена (бакра) на површине канала настаје услед дејства барутних гасова који продиру кроз најмање зазоре између водећег прстена и цеви. Честице бакра скидају се са прстена силама трења и таложе се у слојевима на површину канала цеви. После неколико десетина опаљења, бакарисане површине се све више увећавају, а у области прелазног конуса и почетка ожљебљења површина канала цеви поприма таман изглед. Прегледом матиране површине канала цеви могу се уочити различита посебна места или тачке и мали рисеви паралелно усмерени дуж цеви или по обиму његовог попречног пресека. После неколико стотина опаљења (слика 15ц и 15д) на почетку ожљебљења јасно се види мрежа кратких и плитких пукотина које се све више шире са продужењем гађања. Мрежа пукотине јавља се и у лежишту метка, поготово тамо где цев није заштићена чауrom. Дубина пукотине се нарочито брзо повећава у подножју поља са обе стране поља и може да достигне вредност до два милиметара, [6].

Процес образовања пукотине приказан је на слици 16.



Слика 16: Процес образовања пукотине, [5].

Ако се издвоји посебан прстенасти елемент слоја чији је уздужни пресек дат на слици 16б, и ако се издужују суседни елементи, површинске тачке c' , а постепеним хлађењем поново се враћају у почетни положај (тачка c). Истовремено суседни елементарни слојеви спречавају осну деформацију издвојеног слоја и повећавају радијалне деформације, због чега се тачка c при загревању површине цеви не премешта у тачку c' , него већ у тачку c'' . При томе материјал површинског слоја цеви трпи уздужне деформације које прелазе границу еластичности. У прекидима или застојима у току гађања, површински слој се хлади и тачка c'' се премешта у тачку c''' (слика 16ц),

изазивајући на тај начин после неког броја опаљења појаву пукотина, а затим деформацију цеви оружја (слика 17), [5].



Слика 17: Дефдормација цеви оружја, [1].

4.0 Методе за прорачун животног века цеви оружја

Животни век цеви може се обезбедити само програмираним гађањем, тј. одговарајућим избором одређене дужине паљбе и прекидима између опаљења. Принудно хлађење само незнатно дозвољава већу дужину рафалне паљбе и скраћење времена прекида гађања. Животни век цеви нагло пада са повећањем почетне брзине пројектила и при некој њеној вредности постаје недопустиво кратак. Посебно оштри захтеви постављају се у случају пројектовања артиљеријског система велике разорне моћи. Постоје два начина за повећање животног века цеви, а то су, [14]:

- прорачун животног века цеви класичним полуемпиријским методама,
- прорачун животног века цеви услед замора материјала.

4.1 Прорачун животног века цеви класичним полуемпиријским методама

Прва разматрања физичког модела хабања канала цеви показују да интензитет овог процеса зависи од, [15].

- температуре барутних гасова,
- масе пројектила,
- калибра цеви и
- почетне брзине пројектила.

Математички израз за одређивање допуштеног броја метака N који се може испалити из цеви оружја, се узима за меру животног века цеви. Јустова формула за одређивање допуштеног броја метака има следећи облик, [15]:

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

где су:

- $x = f_1(p_m, R, k) = 3$ емпиријска константа,
- $y = f_2(d, n) = 4,5$ емпиријска константа,
- d – калибар цеви,
- λ – дужина цеви,
- c_m – коефицијен масе пројектила,
- σ – напрезање материјала цеви,
- ε – релативна тангенцијална деформација зидова цеви,
- μ – коефицијент трења водећег прстена пројектила и

k_1 - отпорност на сабијање материјала водећег прстена,

v_0 – брзина пада животног века цеви (која зависи од услова експлоатације).

Линтеова формула за оцену веку трајања цеви по критеријуму пада v_0 , има следећи облик, [13]:

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

где су:

n_0 и n – прописани и стварни темпо гађања,

σ_e – граница еластичности материјала цеви,

Француски научник Габо поставио је релацију за живот цеви, блиску хипотези Шарбонијеа у облику, [15].

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

где су:

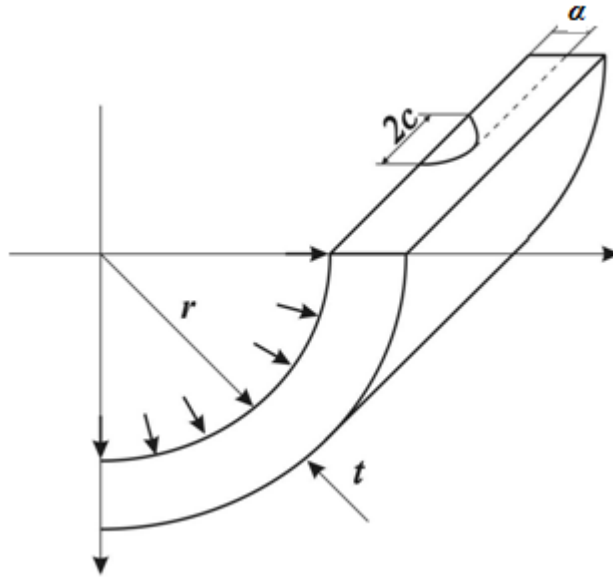
β – експонент,

N_0 , e – коефицијенти који зависи од својства метала, врсте барута и услова пуњења,

4.2 Прорачун животног века цеви услед замора материјала

У новије време се као други критеријум за оцену животног века цеви уводи замор материјала, јер је утврђено да се код цеви оружја дешавају распрскавања и хаварије иако су деформације при опаљењу биле у области линеарне еластичности, [15].

На цеви која није посебно површински третирана у случају када нема додатака за смањивање хабања, већ после првих операција на унутрашњем слоју цеви дебљине 60 микрометара, долази до структурних промена. У овом случају долази до сједињавања азота и угљеника и стварања мреже микроскопских прслина јаче изражених у пределу прелазног конуса. Истовремено, дејство високих механичких оптерећења и термичких оптерећења, ствара у најоптерећенијим зонама цеви цементни слој велике тврдоће. Разлика у механичким својствима цементираног слоја и основног материјала цеви доприноси, такође стварању и простирању прслина, што је приказано на слици 18, [15].



r -унутрашњи пречник цеви, $2c$ -ширина прслине, t -дебљина цеви,
 a -дубина прслине

Слика 18: Прслина на унутрашњој површини цеви [13].

Укупан број опаљења при којем ће се уздужна почетна прскотина дубине α повећати до критичне величине α_k након које долази до лома, тј. распрскавања цеви, одређује се применом методе механике лома према релацији, [15]:

$$N = \frac{1}{C p^m M^m} \frac{2}{m-2} \left(\frac{1}{\alpha_p^{m-1}} - \frac{1}{\alpha_k^{m-1}} \right) \quad (4)$$

где су:

C, m – константе које зависе од врсте материјала цеви и термичке обраде,
 M – коефицијент који зависи од облика пукотине и зида цеви где се она налази,
 p – притисак барутних гасова,
 α_k – критична величина прслине,
 α_p – величина пукотине.

5.0 Контрола хабања и продужетак животног века цеви оружја

На основу предходних разматрања може се закључити да су главни узроци хабања цеви и оружја, [3]:

- висока температура,
- висок притисак барутних гасова,
- хемијска интеракција барутних гасова у контакту са површином цеви,
- интеракција водећег прстена пројектила са површином цеви и
- непотпуно заптивање барутних гасова.

Адекватно томе, покушаји да се ерозија цеви смањи мора де се укључе следеће мере:

- смањење температуре површине цеви,
- коришћење такозваних хладних барута,
- примену мање ерозивних барутних пуњења,
- смањење величине напрезања водећег прстена и цеви конструкцијски бољим обликовањем водећег прстена и ожљебљења, као и коришћењем интерних материјала водећег прстена који обезбеђују потребну ротацију пројектила и поуздано заптивање барутних гасова дуж водишта цеви и
- коришћење побољшаних врста материјала цеви или употребу превлака и омотача цеви који су отпорни на три главна узрока ерозије [9].

За смањење температуре на површини цеви стрељачког наоружања, данас постоје четири методе, [3]:

- метода спољашњег хлађења цеви,
- метода Фиса протектора,
- метода коришћења аблатива и
- метода адитива у барутном пуњењу, које обезбеђује ламинарно хлађење површине цеви.

Прве три методе познате су још од другог светског рата. Спољашње хлађење цеви углавном је развијено за цеви авионских аутоматских топова. Код стрељачког наоружања овај метод није нашао већу примену, због додатног повећања масе оружја.

Фиса протектори састоје се од танког слоја меког челика који је превучен преко пројектила, тако да је задњи крај у додиру са чауром и пуњењем. Коришћење ових протектора експериментално је показало најбоље резултате у смањењу ерозије, [10].

Коришћење аблатива развијали су, Брацути, Марк и Браун у Енглеској и Сједињеним Америчким државама. Суштина методе јесте стварање термичке баријере између површине цеви и барутних гасова помоћу тзв. инертних уља. На пример силиконско уље смештено у капсулама смањило је температуру површине цеви за 302°C на почетку ожљебљеног дела цеви. Да би се остварио потпуни ефекат примене аблатива, потребно је да се развију такви облици барутних пуњења у које ће бити уграђена аблативна капсула уз минималну промену густине пуњења, [3].

Средином педесетих година прошлог века приказан је ламиларни омотач цеви са барутним гасовима дуж унутрашњости цеви за време опаљења. Дикенсон и Ленон предложили су коришћење полиуретанске пене за обезбеђење хлађења тела омотача. Ефекти полиуретанске пене на животни век услед ерозије за нека оруђа дата су у табели 6, [4].

Табела 6: Ефекти полиуретанске пене на животни век оружја, [4].

Калибар [mm]	Метак	Притисак [MPa]	Почетна брзина [m/s]	Животни век цеви (број пројектила)	
				Стандардна Муниција	Муниција са полиуретанском пеном
9	M318	358	914	700	1900
10,5	M392	379	1478	200	400
12	M358	372	1066	300	700

Главни допринос у смањењу хабања цеви помоћу хлађеног омотача цеви остварио је шведски научник Јакобсон. Он је предложио коришћење омотача који се састоји од 46% титан диоксида, 53% воска, 1% алкохола. Резултати за неколико врста испитиваних оружја дати су у табели 7. Наравно коришћење ових адитива не подразумева увек универзални успех.

Табела 7: Ефекти адитива на животни век цеви, [4].

Калибар [mm]	Метак	Притисак [MPa]	Почетна брзина [m/s]	Животни век цеви (број пројектила)	
				Стандардна Муниција	Муниција са адитивима
9	M431	365	1200	240	2100
9	M353	358	914	700	2100
10,5	M458	400	1173	125	1000

У случају муниције малих калибра било је доста тешко да се обезбеде омотачи са превлаком адитива. И поред тога забележени су одређени успеси. Тако је истраживач Федина објавио да се додатком 0,5% мешавине MoO_3 и $CaCO_3$ једнообразном барутном пуњењу које се користило код муниције 7,62 mm M80, повећао животни век цеви за око 7750 пројектила у односу на пројектовани који је износио 10420 пројектила. Федина је открио бројне механизме ових адитива који су укључени у смањење хабања цеви. Неки од његових механизма који су били примењени су, [4].

- органски састојци на бази кречњачких адитива и смањења температуре барутних гасова дуж канала цеви,
- органски састојци за реакцију са барутним пуњењем ради повећања односа CO/CO_2 у ламинарном омотачу, чинећи тако да барутни гасови буду мање хемијски ерозиони,
- неоргански састојци у адитивима утицали су на смањење турбуленције у близини зида цеви.

6.0 Триболошка испитивања материјала за израду цеви оружја

6.1 Опрема за испитивање материјала цеви оружја

Испитивање триболошких карактеристика челика $\check{C}4732$ који се користи за израду цеви оружја била су моделског типа и обављена су на унапређеном и компјутерски подржаном трибометру TR-95 са block-on-disc контактном геометријом у Центру за трибологију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (слика 19).



Слика 19: Трибометар TR-95

Трибометар TR-95 (слика 20) омогућава варирање услова контакта са аспекта облика, димензија и материјала контактних елемената, нормалног контактеног оптерећења и брзине клизања. Испитивања се могу вршити у условима са подмазивањем и без подмазивања. Основну конфигурацију трибометра чине: погонски систем, систем за оптерећење, систем за вођење, систем за подмазивање, систем за самоподешавање блока и мерни систем, [16].



Слика 20: Трибометар Тр-95

Погонски систем чини електромотор са ременицама, каишем и варијатором који омогућују варирање бројева обртаја од 100 °/min до 1200 °/min. На главном вратилу налази се ротациони диск. Систем за оптерећење помоћу тегова или навојним паром омогућује оптерећење контактних парова од 0 до 50 daN. Систем за вођење је реализован помоћу линеарних ваљкастих лежачева, код кога је преднапрезањем елиминисан зазор.

Систем за самоподешавање блока и диска има задатак да у сваком тренутку обезбеди преношење нормалног оптерећења у правцу осе диска и контакт целом дужином блока на диску. Овај систем је реализован конструкцијом специјалног ротирајућег носача блока (слика 21), [16].



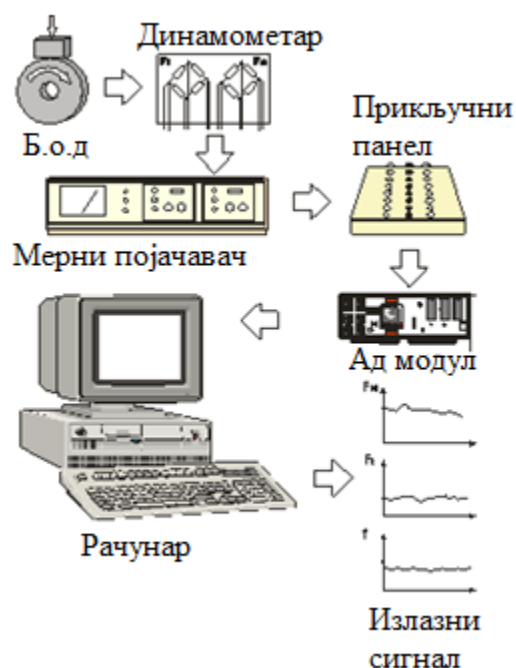
Слика 21: Носач блока,[14, 9]

За експериментално испитивање формиран је и одговарајући мерни систем, чија је шема дата на слици 22-а. Мерни систем се састоји од:

- динамометара (са мерним тракама повезаним у пун Винстонов мост),
- мерног појачавача,
- АД претварача и
- РС рачунара.

Изглед мерног система дат је на слици 22б. Овај мерни систем омогућава мерење нормалне силе и силе трења. Елиминисање утицаја тежине покретних елемената врши се посебним системом опруга. Мерни сигнали са давача сила се појачавају и уводе у рачунар помоћу двоканалног мерног моста - појачавача и А/Д конвертора.

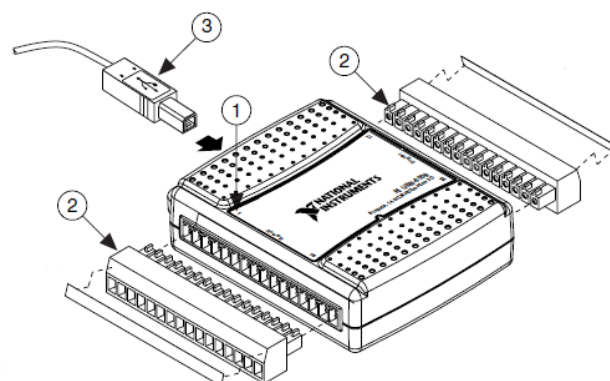
АД претварач поседује 8 аналогних улаза (12-bit, 10 kS/s), два аналогна излаза (12-bit, 150 S/s), односно 12 дигитално излазно/улазних канала и 32-битни бројач. Произвођач картице је National Instruments, ознаке 6008. На слици 23 приказана је картица са конекторима. Конектором 3 (USB каблом) остварује се конекција између рачунара и картице. Конекторима означеним бројем 2 на слици, остварује се аналогно/дигитална конекција са објектом управљања, [16, 9].



а) Шема мерног система [16].

б) изглед мерног система

Слика 22: Шема и изглед мерног система

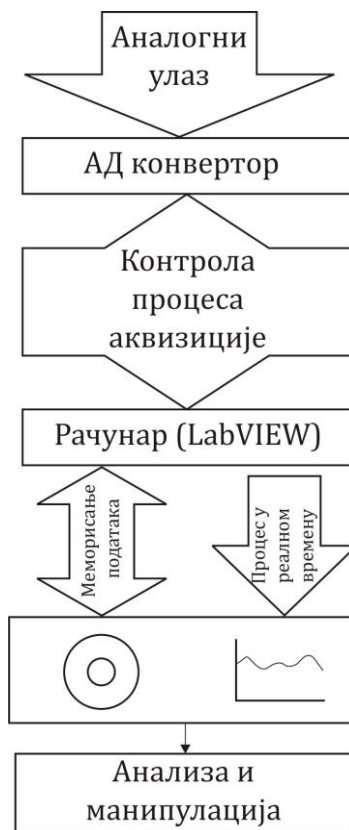


Слика 23: АД конвертор – претварач, [16].

Пре мерења било је потребно извршити калибрацију динамометара. Динамометри су оптерећивани теговима познате тежине, а одзив давача је регистрован у волтима за познате улазне величине (силе у daN).

Функционисање мерног система одвија се кроз процес АД конверзије и аквизиције сигнала нормалне силе F_n и тангенцијалне силе F_t , како би се добио рачунски сигнал

коефицијента трења. Одвијање АД конверзије, аквизиција података и њихове анализе, приказане су блок дијаграмом на слици 24.



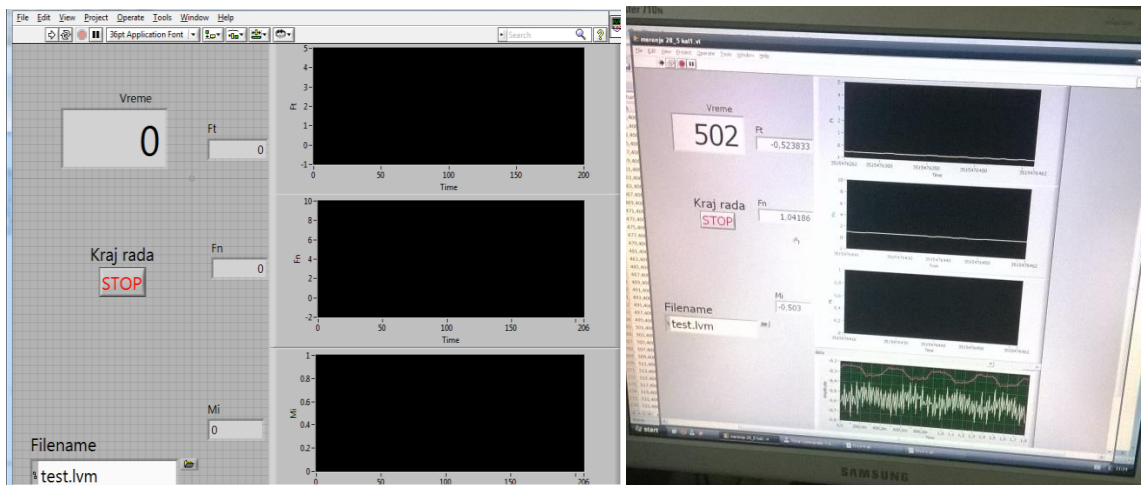
Слика 24: Блок дијаграм процеса аквизиције података

Аналогни сигнали сила F_n и F_t доводе се са динамометара (мерних давача), преко појачавача на прикључни панел који служи као интерфејс између уређаја и РС рачунара. Са прикључног панела сигнали се доводе на АД конвертор (претварач) који је израђен у виду модула (картице) и смештен је у слот РС рачунара, [16].

За аквизицију података коришћен је софтвер LabVIEW верзија 10.0. За праћење процеса и запис сигнала на диск рачунара, израђена је одговарајућа корисничка апликација, слика 25.

Ова апликација омогућава, [9]:

- прикупљање података са трибометра континуално у току времена,
- приказ (нумерички и графички) вредности мерених величина у реалном времену,
- калибрацију физичких величина које се мере на трибометру,
- креирање датотека са подацима мерених величина који се чувају на диску рачунара,
- приказ резултата мерења.

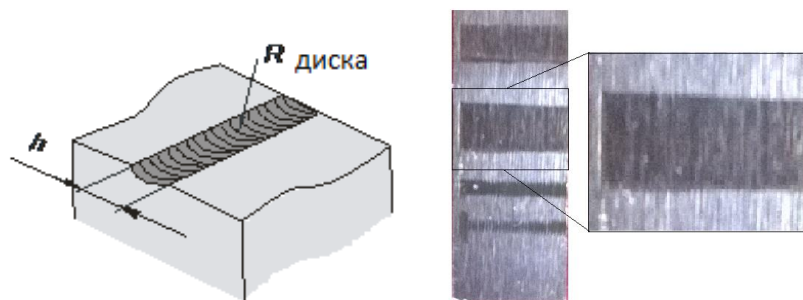


Слика 25: Корисничка апликација израђена у LabVIEW-у

Помоћу софтвера са А/Д конвертора прикупљају се подаци о вредностима мерених величина (нормална сила и сила трења). Софтвер омогућава да се врши креирање нових података на бази мерених вредности. Ова могућност је искоришћена за аутоматско генерисање коефицијента трења μ у реалном времену, коришћењем математичке операције дељења тренутних података силе трења и нормалног оптерећења. Поред тога, формиране су и средње вредности нормалне силе и силе трења $F_n(sr)$ и $F_t(sr)$ методом покретних средина

Квалитет софтвера се огледа у прегледном радном окружењу (мониторингу процеса испитивања), које пружа не само графички приказ сигнала мерене величине већ њену тренутну нумеричку вредност и осредњену вредност у одређеном временском интервалу, (слика 25 десно).

Као основни параметар хабања коришћена је ширина трага хабања на контактної површини блока, како је то приказано на слици 26.



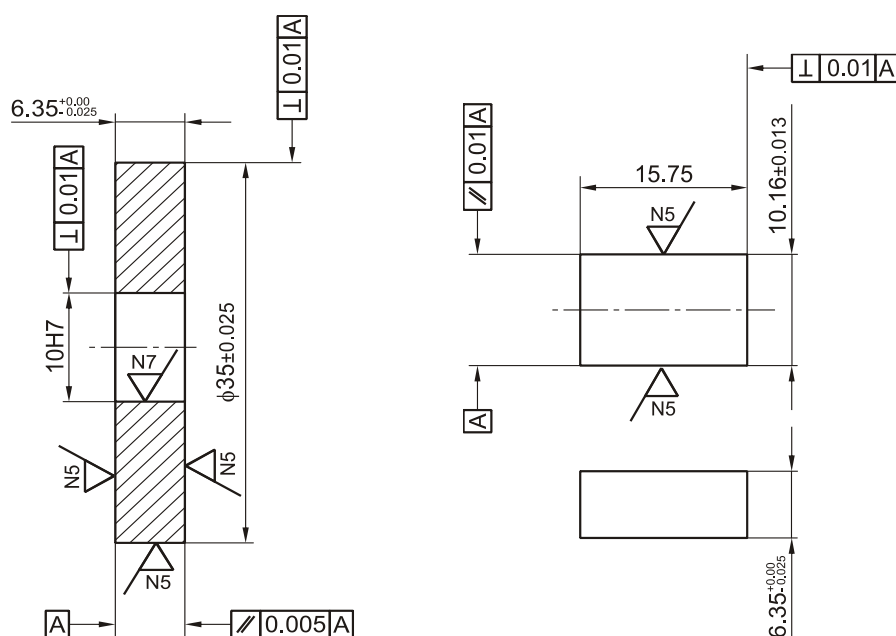
Слика 26: Ширина трага хабања на блоку (R -пречник диска, h - ширина хабања)

Мерење ширине трага хабања на контактним површинама блока вршена је на универзалном мерном микроскопу UIM-21, слика 27.



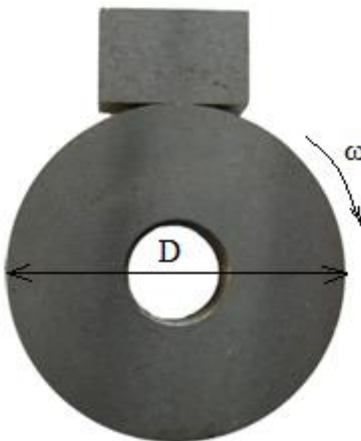
Слика 27: Универзални мерни микроскоп UIM-21

Контактни пар чине ротациони диск пречника $D_d=35\text{ mm}$ и ширине $b_d=6.35\text{ mm}$ и стационарни блок ширине $b_b=6.35\text{ mm}$, дужине $l_b=15.75\text{ mm}$ и висине $h_b=10.16\text{ mm}$ (слика 28), [16 и 9].



Слика 28: Димензије диска и блока, према ASTM G 77 стандарду [16, 9].

Дискови су израђени од челика $\check{C}3840$ тврдоће 62 - 64 HRC са брушеним површинама, храпавости $Ra=0,3 \mu m$, а блокови од челика $\check{C}4732$ и Велдох челика . Фотографски приказ блока и диска као и контактна геометрија, дати су на слици 29, [16].



Слика 29: Диск и блок, [16,9]

Током испитивања коришћен је и уређај за мерење температуре ST-8855, који је приказан на слици 30.



Слика 30: Уређај за мерење температуре ST-8855, [17]

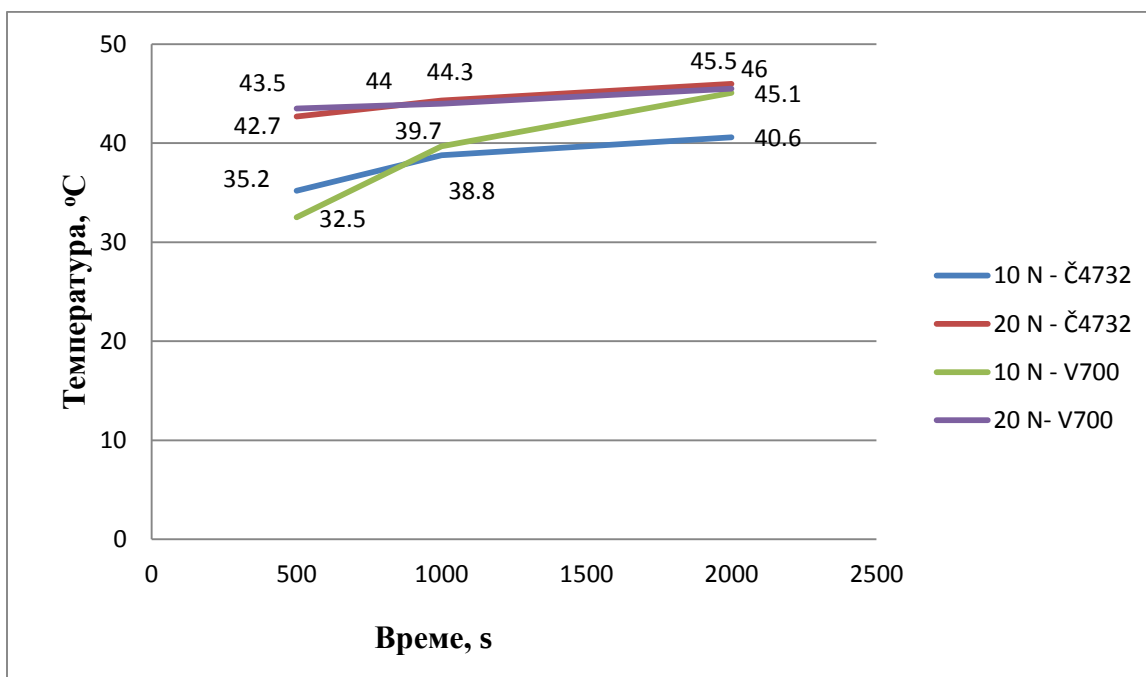
ST-8855 је уређај за мерење температуре помоћу инфра црвених зрака у опсегу од - 50° до 1050° C. Овај уређај карактерише једноставно руковање и висока прецизност при површинском мерењу температуре. Да би мерење било што тачније, објекат на коме се мери температура највише сме бити удаљен 1440mm од уређаја за мерење температуре.

Такође се препоручује и већи број мерења како би се добили што тачнији резултати. У експерименту температура је мерена на контактном пару. Средње вредности добијених резултата измерене температуре приказани су у табели 8.

Табела 8: Измерене вредности температуре

Температура, °C - Č4732					
1 m/s		0,5 m/s		0,25 m/s	
10 N	20 N	10 N	20 N	10 N	20 N
35,2	42,7	38,8	44,3	40,6	46
Температура, °C - V 700					
32,5	43,5	39,7	44	45,1	45,5

Из табеле се види да температура стално расте са порастом времена, што је и приказано на дијаграму 1.



Дијаграм 1: Измерене вредности температуре

За мерење броја обртаја каишног преносника коришћен је уређај UT-371, који је приказан на слици 31. Овај уређај карактерише опсег мерења од 10 до 99999 обртаја у минути. Тачност мерења се креће у опсегу од 0.04% до $\pm 2\%$, у зависности од удаљености објекта коме се мери број обртаја. Удаљеност од објекта се креће у опсегу од 50mm до 200 mm.



Слика 31: Уређај за мерење броја обртаја UT-371, [18]

Да би се извршило мерење овим уређајем, потребно је залепити трачицу на испитивани објекат ради тачнијег мерења броја обртаја. Уређај за мерење позиционирати и на дисплеју уређаја очитати број обртаја испитиваног објекта. Добијене вредности измерених бројева обртаја на каишном преноснику дате су у табели 9.

Табела 9: Измерене вредности бројева обртаја

Број обртаја, n°min					
Погонски каишник	Гоњени каишник	Погонски каишник	Гоњени каишник	Погонски каишник	Гоњени каишник
1656	555	790	265	425	143

На основу добијених вредности за бројеве обртаја, добијене су брзине:

$$V_1 = R\omega = \frac{D}{2} \omega = \frac{D}{2} \frac{n_0 \pi}{30} = \frac{17,5}{2} \frac{555 \pi}{30} = 1,01 \text{ m/s}$$

$$V_2 = R\omega = \frac{D}{2} \omega = \frac{D}{2} \frac{n_0 \pi}{30} = \frac{17,5}{2} \frac{265 \pi}{30} = 0,49 \text{ m/s}$$

$$V_3 = R\omega = \frac{D}{2} \omega = \frac{D}{2} \frac{n_0 \pi}{30} = \frac{17,5}{2} \frac{143 \pi}{30} = 0,26 \text{ m/s}$$

6.2 План триболошких испитивања и приказ добијених резултата

Испитивање триболошких карактеристика материјала за израду цеви стрелачког наоружања (Ћ4732) и упоредног материјала (Велдох челика 700) извршено је на трибометру TR-95 са block-on-disc контактним паром за различита нормална оптерећења, брзине клизања, путеве клизања 500 m и без подмазивања. Наиме, план триболошких испитивања се базира на варирању два различита нормална оптерећења од 10 N и 20 N и три различите брзине од 0,26 m/s, 0,49 m/s и 1,01 m/s . При томе се врши мерење коефицијента трења и ширине трага хабања за различите дужине клизања без подмазивања. Одређивање коефицијента трења и ширине трага хабања вршено је за пређени пут од 500 m. У табелама 10 и 11 дате су добијене вредности горе наведених величина.

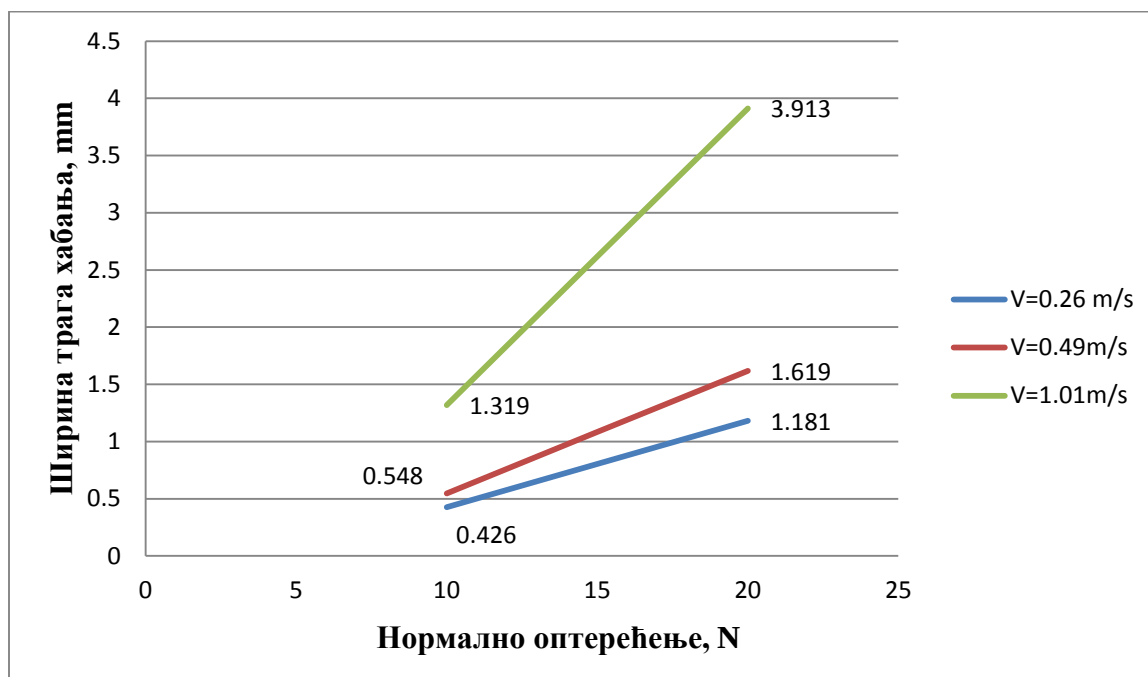
Табела 10: Добијене вредности за челик Ћ4732

Услови клизања	Без подмазивања					
Пут клизања, m	500					
Брзина клизања, m/s	0,26		0,49		1,01	
Нормално оптерећење, N	10	20	10	20	10	20
Коефицијент тррења, μ	0,460	0,459	0,476	0,710	0,482	0,758
Ширина трага хабања, mm	0,426	1,181	0,548	1,619	1,319	3,913

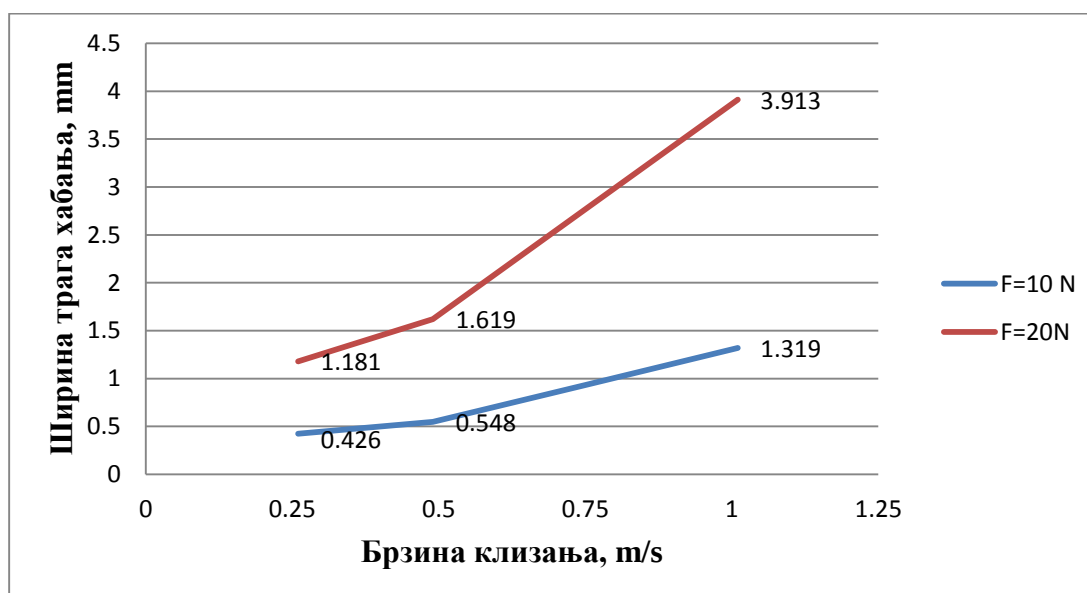
Табела 11: Добијене вредности за челик Велдокс 700

Услови клизања	Без подмазивања					
Пут клизања, m	500					
Брзина клизања, m/s	0,26		0,49		1,01	
Нормално оптерећење, N	10	20	10	20	10	20
Коефицијент тррења, μ	0,652	0,597	0,697	0,665	0,715	0,681
Ширина трага хабања, mm	2,051	2,505	2,248	3,503	2,531	4,404

На основу добијених резултата ширина трагова хабања (за челик Š4732) нацртане су криве хабања, које су приказане на дијаграму 2 и 3. На дијаграмима је приказана зависност ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења. Дијаграмски прикази добијени су за пут клизања од 500 метара.

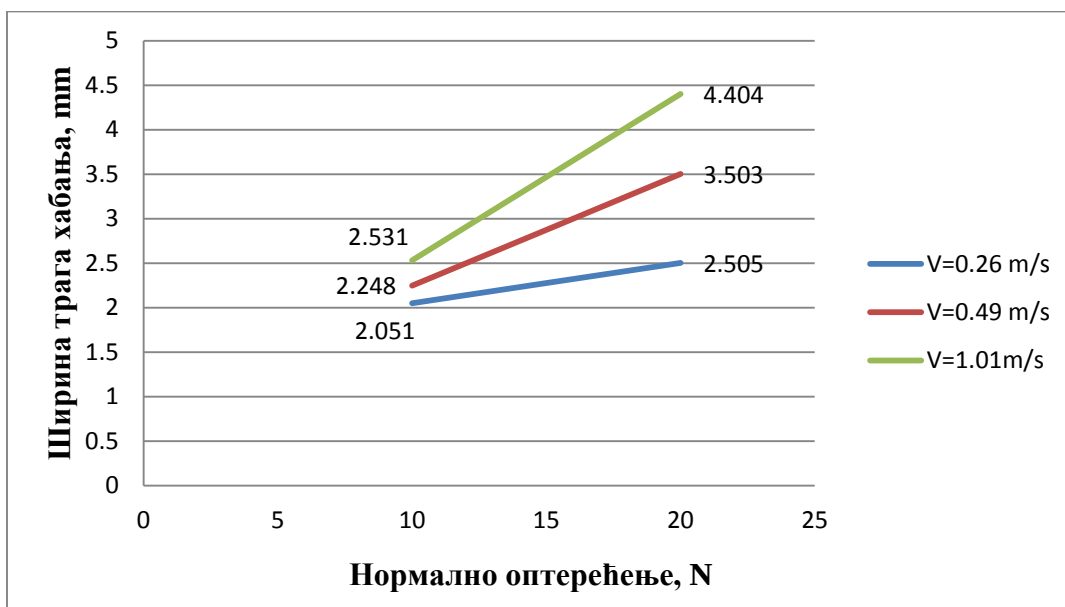


Дијаграм 2: Ширина трага хабања у зависности од нормалног оптерећења за челик Š4732

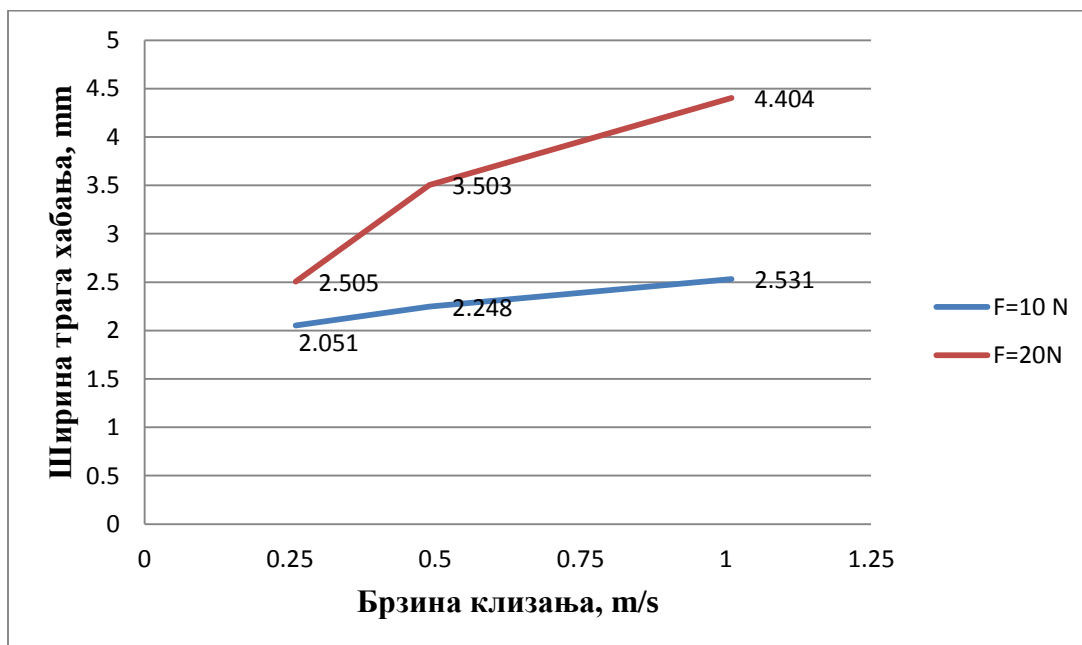


Дијаграм 3: Ширина трага хабања у зависности од брзине клизања за Š4732

На основу добијених резултата ширина трагова хабања (за челик V700) нацртане су криве хабања, које су приказане на дијаграму 4 и 5. На дијаграмима је приказана зависност ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења. Дијаграмски прикази добијени су за пут клизања од 500 метара.



Дијаграм 4: Ширина трага хабања у зависности од нормалног оптерећења за челик Велдокс 700



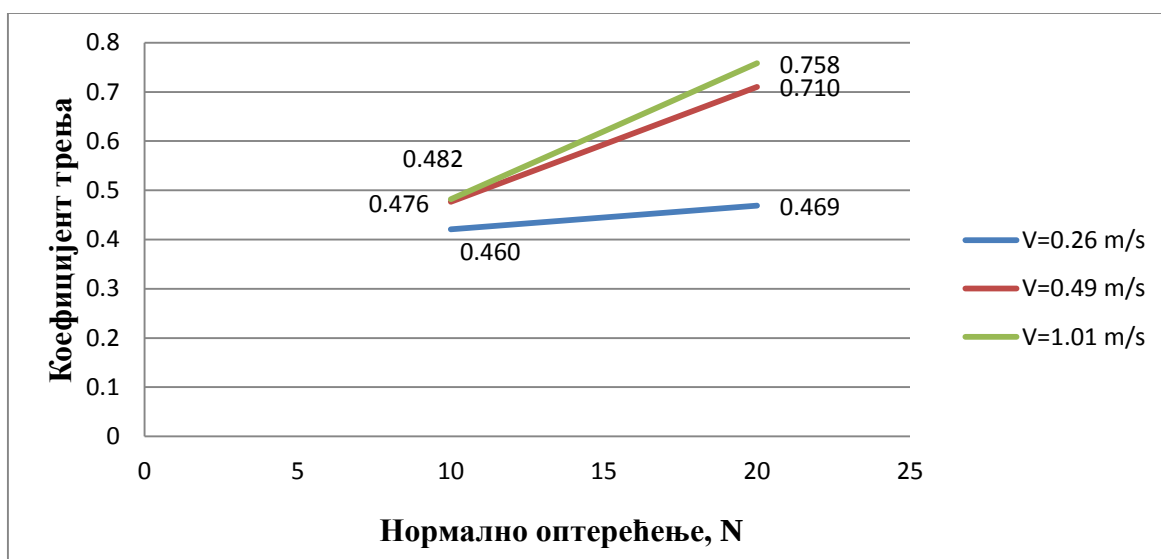
Дијаграм 5: Ширина трага хабања у зависности од брзине клизања за Велдокс челик 700

На дијаграмима 3, 4, 5 и 6 је приказана зависност ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења. Дијаграмски прикази добијени су за пут клизања од 500 метара.

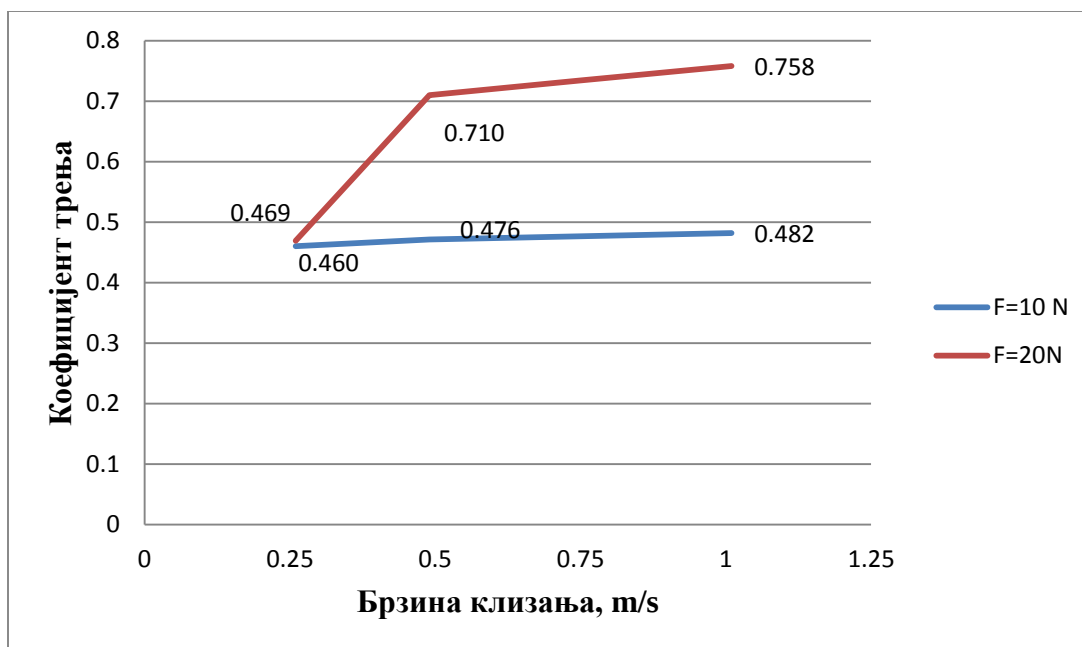
Са порастом оптерећења стварна површина контакта расте за оба испитивана материјала, што се резултује повећањем коефицијента трења између две клизне површине. Повећан коефицијент трење, сила и реална површина контакта изазивају и веће хабање. То значи да се смицајна сила и трење повећавају са порастом оптерећења.

Зависност ширине трага хабања и брзине клизања за испитиване материјале су приказане на дијаграмима 5 и 3. Добијени резултати показују да хабање варира у зависности од брзине клизања. Са порастом брзина клизања, ширина трага хабања расте за оба испитивана материјала, што показује да је за већу брзину већи и коефицијент трења.

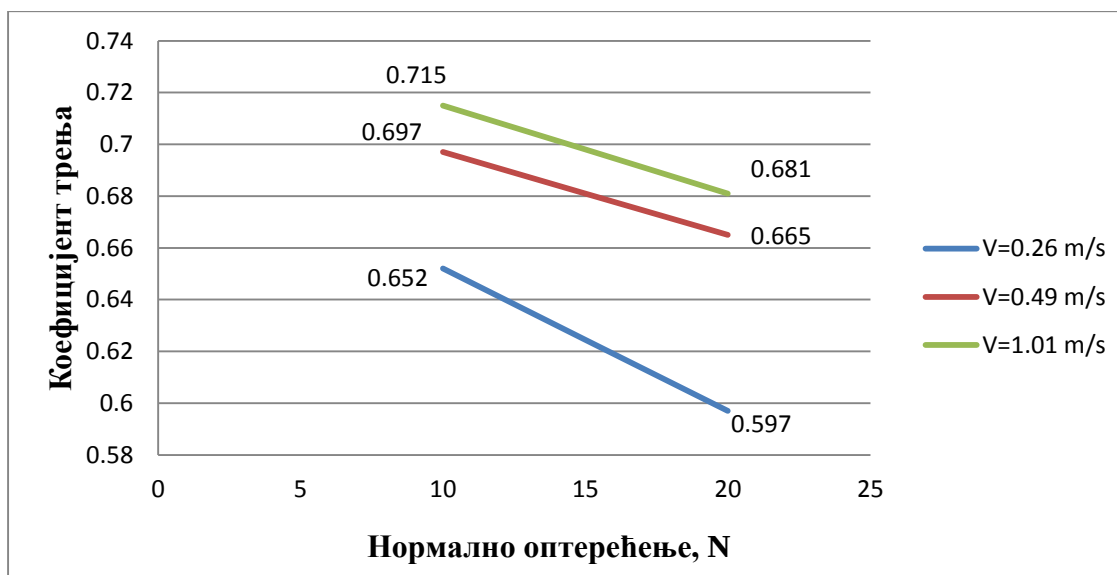
На дијаграмима 6, 7, 8 и 9 приказане су вредности коефицијента трења за испитиване материјале и њихове зависности од брзине клизања и нормалног оптерећења. Добијене вредности коефицијента трења су приказане за пут клизања од 500 метара.



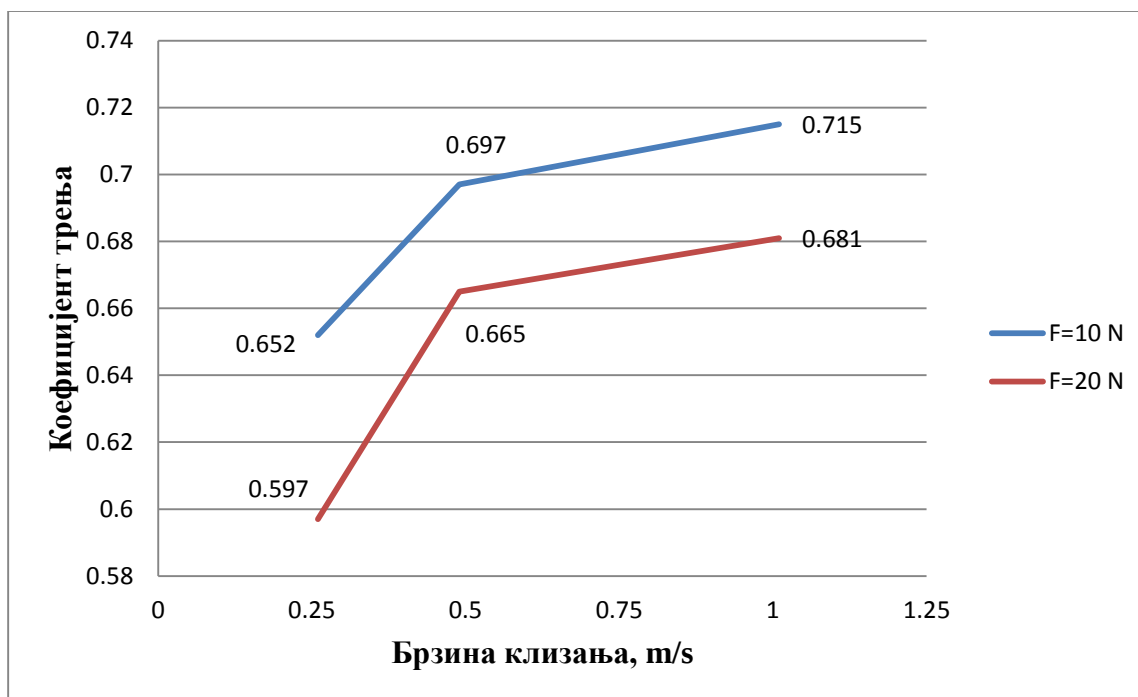
Дијаграм 6: Коефицијент трења у зависности од нормалног оптерећења за челик Č4732



Дијаграм 7: Коефицијент трења у зависности од брзине клизања за Č4732



Дијаграм 8: Коефицијент трења у зависности од нормалног оптерећења за Велдокс челик V700



Дијаграм 9: Коефицијент трења у зависности од брзине клизања за Велдокс челик V 700

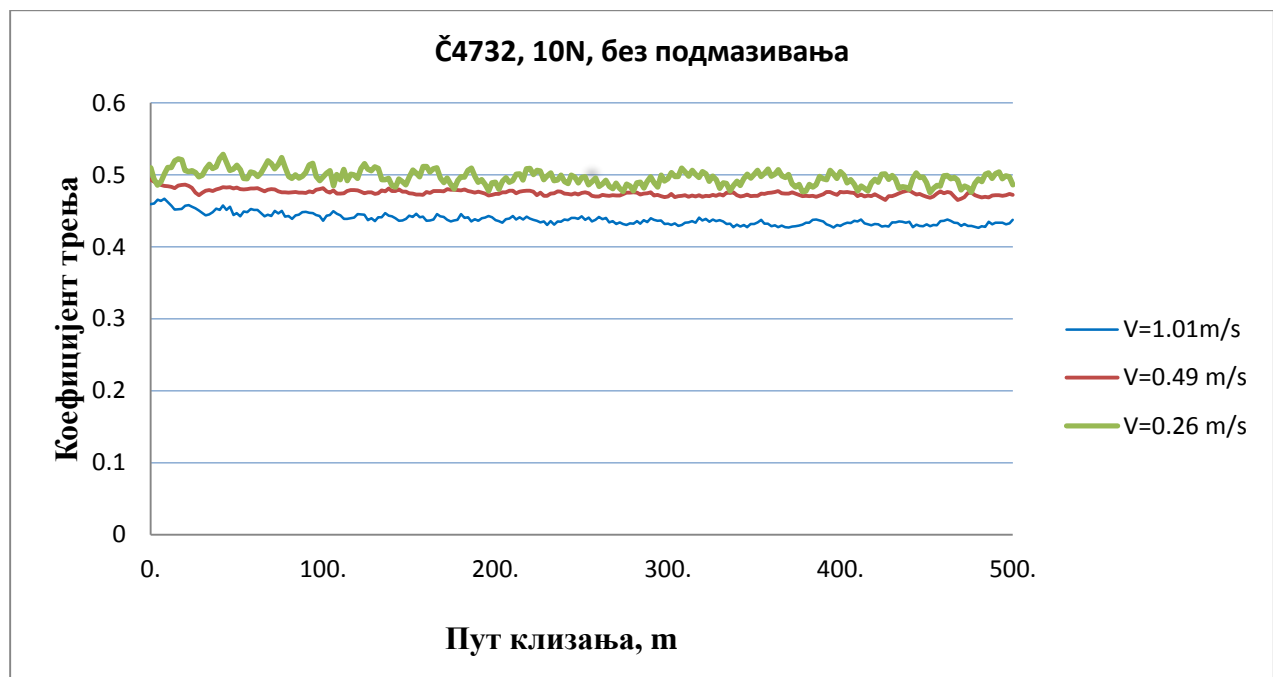
Присуство нормалног оптерећења и брзине клизања, значајно утиче на силу трења. У посматраном опсегу вредност коефицијента трења се повећава са порастом нормалног оптерећења и брзине клизања за челик $\check{C}4732$ (дијаграм 6), а за челик V700 опада (дијаграм 8). Са дијаграма 9 и 7 плава крива показује вредност коефицијента трења за нормалну силу од 10 N. Види се да коефицијент трења за челик $\check{C}4732$ у почетку има вредност 0,460 и постепено расте до 0,482 (дијаграм 7), а за челик V700 креће од 0,652 и постепено расте до 0,715 (дијаграм 9). У почетној фази коефицијент трења је низак због присуства слоја стварног материјала површине диска. Након хабања почетног слоја долази до стварног контакта диска и испитиваног узорка, што се манифестује повећаним трењем између клизних површина. Сила трења расте са временом трајања хабања. Црвена крива показује вредност коефицијента трења за нормално оптерећење од 20 N. И црвена и плава крива показују да се стабилан ниво коефицијента трења постиже за већа оптерећења за краћи временски период.

Вредност коефицијента трења за челик $\check{C}4732$ расте (дијаграм 6) са порастом оптерећења а, за челик V700 вредност коефицијента трења опада због хомогеније структуре материјала челика V700 (дијаграм 8)

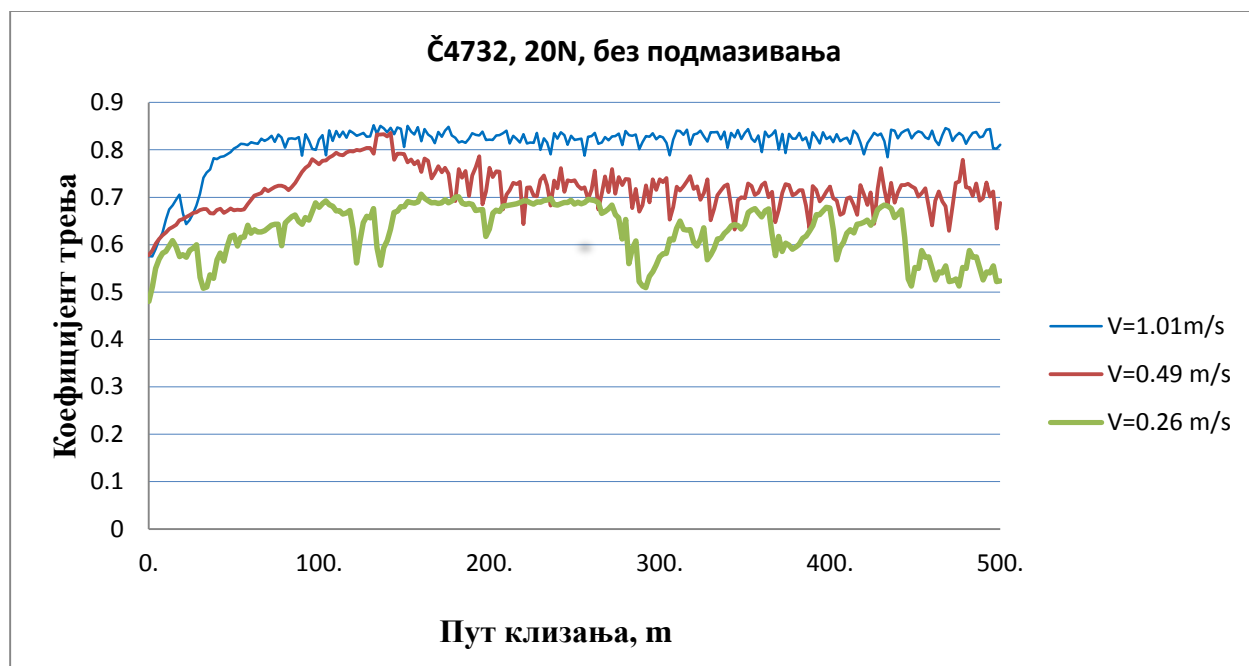
6.3 Анализа добијених резултата

Током експерименталних испитивања према описаној процедури континуално је праћен коефицијент трења, који је меморисан у виду временских серија. Вредности коефицијента трења добијене на овај начин биле су меродовне за даљу анализу.

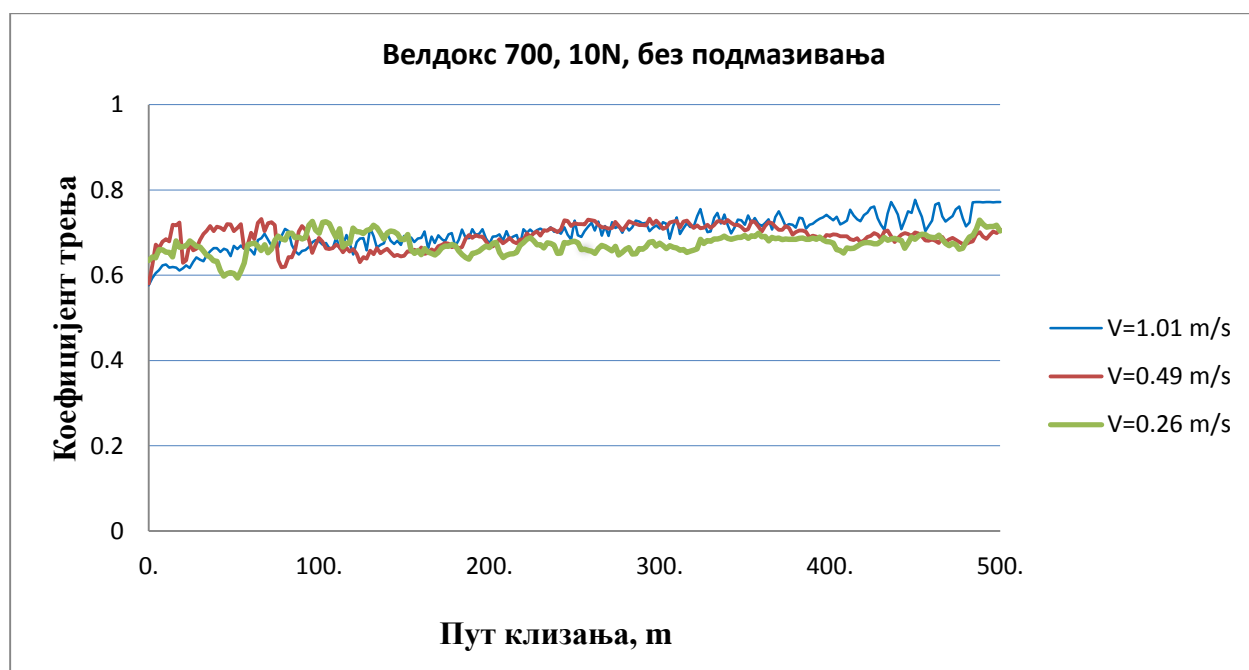
Упоредни приказ промене коефицијента трења са пређеним путем, како за Š4732 тако и за велдокс челик (700) за брзине 0.26, 0.49 и 1.01 m/s и за нормална оптерећења од 10 N и 20 N у условима без подмазивања приказани су на дијаграмима 10,11,12 и 13.



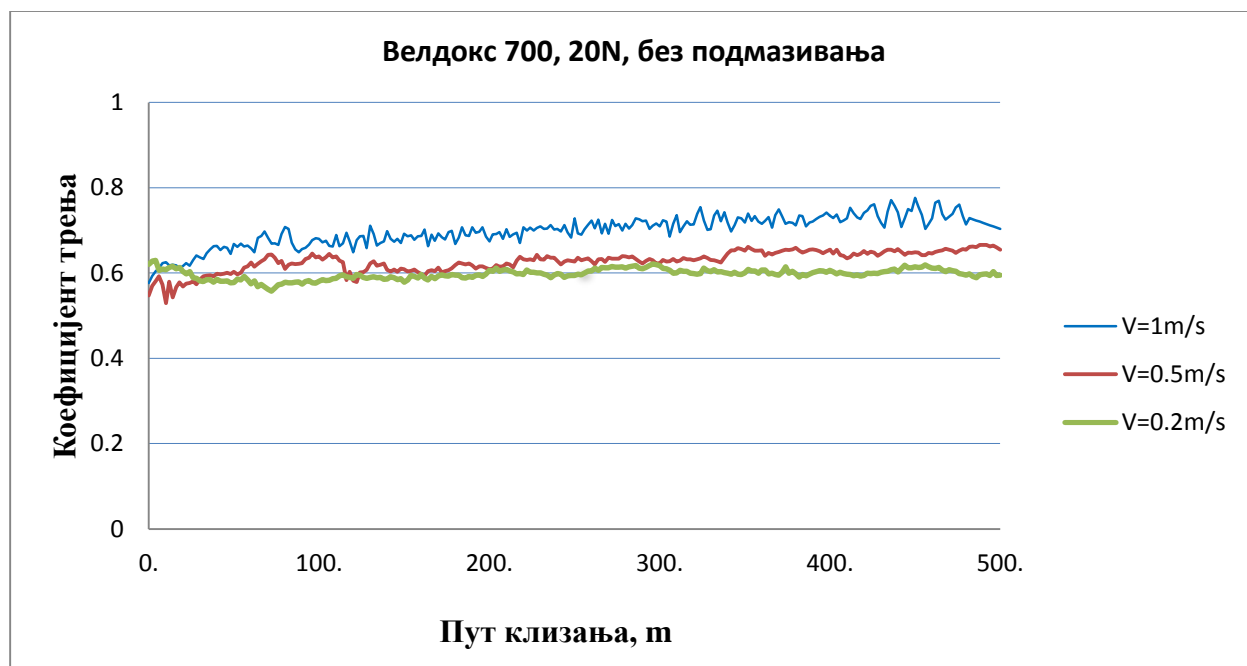
Дијаграм 10: Коефицијент трења челика Š4732 при оптерећењу од 10 N



Дијаграм 11: Коефицијент трења челика Č4732 при оптерећењу од 20 N



Дијаграм 12: Коефицијент трења Велдокс челика при оптерећењу од 10 N



Дијаграм 13: Коефицијент трења Велдокс челика при оптерећењу од 20 N

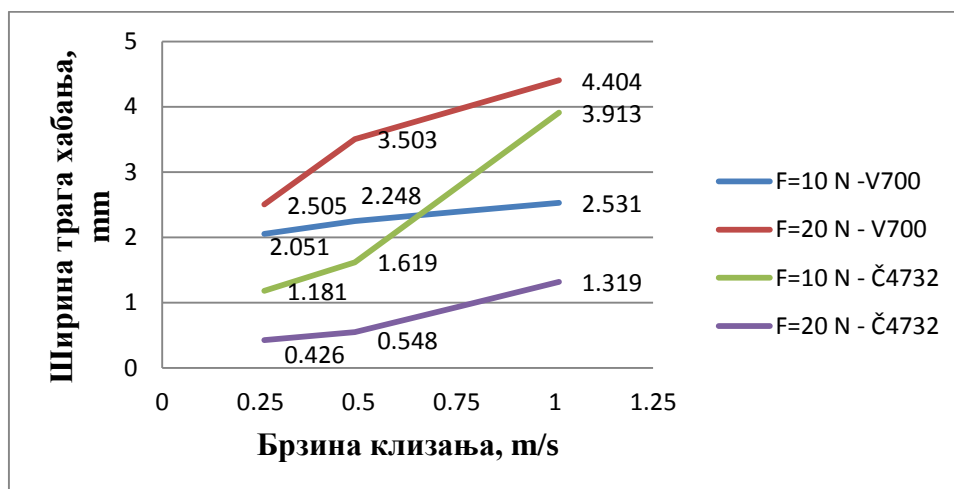
На дијаграму 10 се примећује благи пад вредности коефицијента трења без изразитих одступања. Оваква природа коефицијента трења последица је промене контактне геометрије која се мења од линијске на самом почетку процеса трења, па са развојем процеса хабања прелази у површински контакт. Види се да се коефицијент трења смањује скоро линеарно за време пређеног пута од 500 m. Са дијаграма 11 се види да коефицијент трења у почетку има нешто нижу вредност. У почетној фази коефицијент трења је низак због присуства слоја стварног материјала површине диска. Након хабања почетног слоја долази до стварног контакта диска и испитиваног узорка, што се манифестује повећаним трењем између клизних површина. Сила трења расте све до тренутка када се успостави стабилан ниво коефицијента трења (пређени пут од 200 метара), а затим има благи ниво опадања. Повећање коефицијента трења може да буде повезано са појавом неравнина на површини диска, услед чега вредност коефицијента трења варира.

Са дијаграма 12 и 13 се види да вредност коефицијента трења скоро линеарно расте, због хомогеније структуре материјала челика V700. Вредност коефицијента трења у краћем временском периоду постиже стабилан ниво уз благи тренд раста за оба оптерећења. Са дијаграма се види да вредност коефицијента трења благо расте са порастом брзине клизања и пређеног пута.

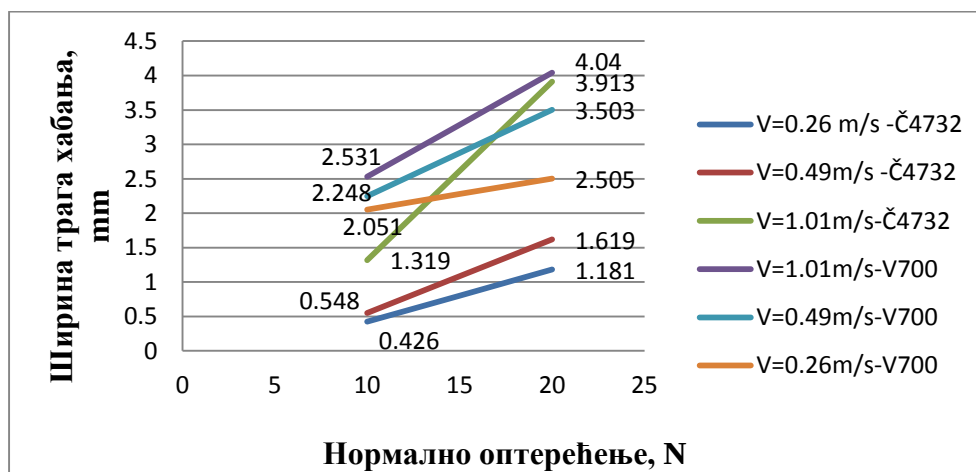
При испитивању Велдокс челика уочава се пораст коефицијента трења са временом. и за силу од 10 N и за силу од 20 N. Тренд пораста коефицијента трења овог материјала је најнижи уз релативно слабу изражену динамику процеса.

Са предходних дијаграма (10, 11, 12 и 13) се могу уочити боље карактеристике коефицијента трења Велдокс челика, због благог тренда раста коефицијента трења са временом, а и због хомогеније структуре материјала.

На дијаграмима 14, 15, 16 и 17 приказане су упоредне вредности коефицијента трења и ширине трага хабања у зависности од нормалног оптерећења и брзине клизања за оба материјала.

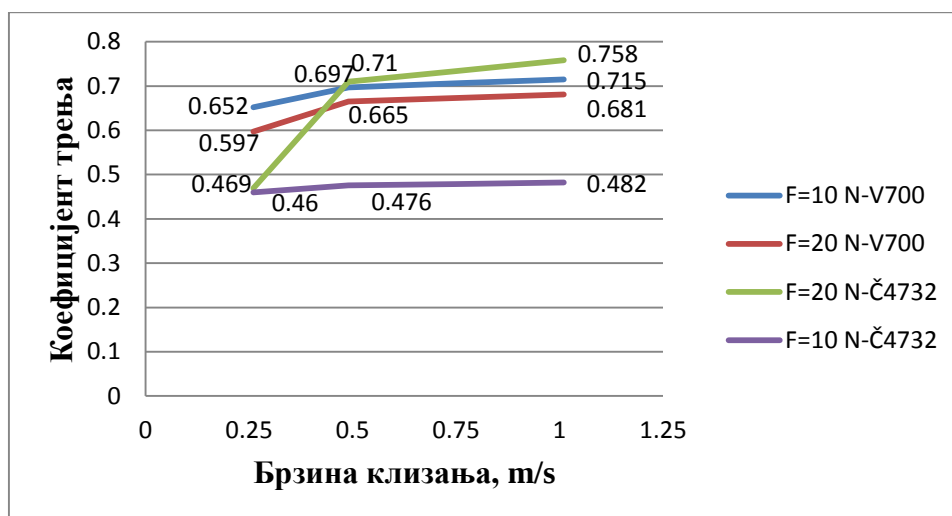


Дијаграм 14: Упоредни дијаграм ширине трага хабања у зависности од брзине клизања

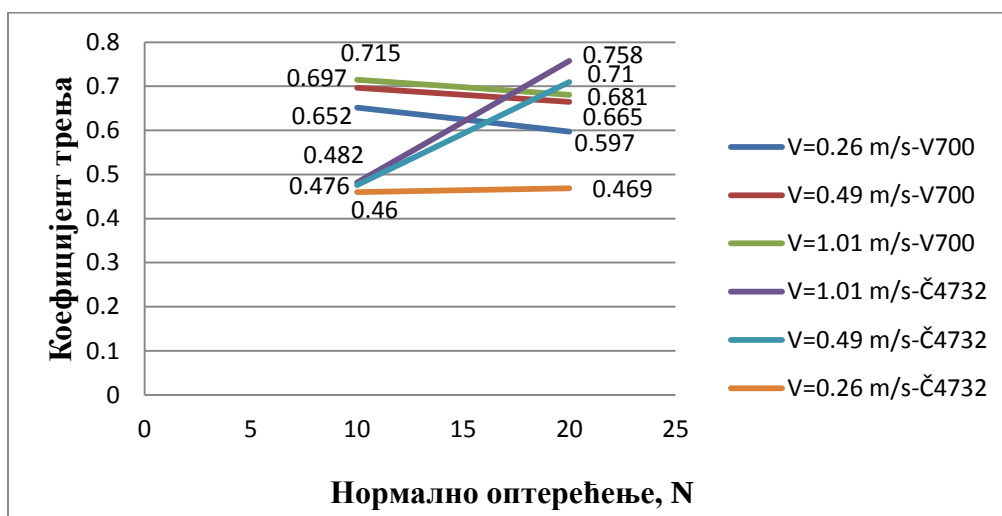


Дијаграм 15: Упоредни дијаграм ширине трага хабања у зависности од нормалног оптерећења

Са дијаграма 14 и 15 се види да ширина трага хабања расте са повећањем брзине клизања и са повећањем оптерећења за оба материјала. То значи да ширина трага хабања директно зависи и од брзине клизања и од нормалног оптерећења. Са порастом брзине клизања и нормалног оптерећења стварна површина контакта се повећава за оба материјала, док коефицијент трења код челика Č4732 расте, а код челика V700 се смањује, што је узрок хомогене структуре материјала. Повећан коефицијент трење, сила и реална површина контакта изазивају и веће хабање. То значи да се смицајна сила и трење повећавају са порастом оптерећења.



Дијаграм 16: Упоредни дијаграм коефицијента трења у зависности од брзине клизања



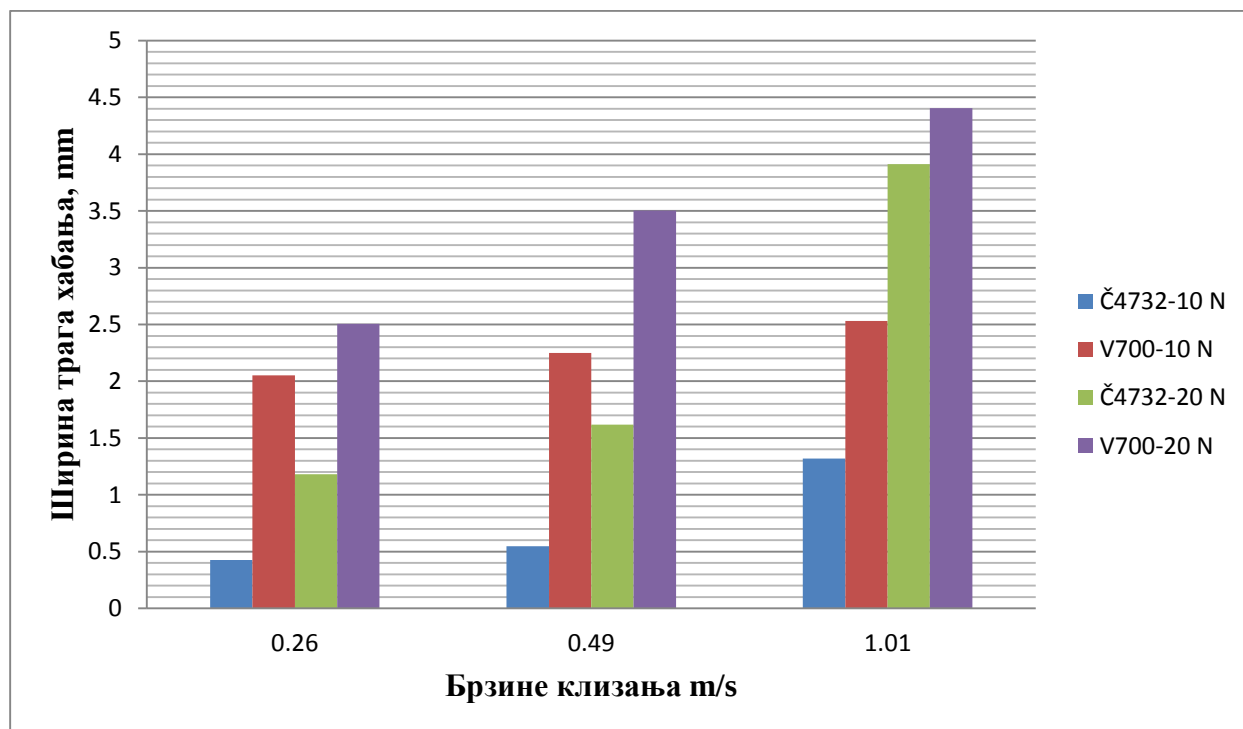
Дијаграм 17: Упоредни дијаграм коефицијента трења у зависности од нормалног оптерећења

Са дијаграма се 16 и 17 се види да коефицијент трења директно зависи од брзине клизања и од нормалног оптерећења. Коефицијент трења код челика Š4732 расте, а код челика V700 опада, што је већ речено последица хомогене структуре материјала. Након хабања површинског слоја материјала долази до стварног контакта диска и испитиваног узорка што се код челика Š4732 манифестује повећаним трењем, а код челика V700 се манифестује смањеним коефицијентом трења због већ поменутих узрока.

7.0 Закључак

Нормално оптерећење и брзина клизања значајно утичу на коефицијент трења. У посматраном опсегу вредност коефицијента трења се повећава са порастом брзине клизања за оба челика. Коефицијент трења варира у зависности од времена трајања хабања. Код челика Č4732 вредност коефицијента трења се повећава са повећањем оптерећења, а код челика V700 се са повећањем оптерећења смањује што је последица хомогене структуре материјала.

На дијаграму 18 где је приказана ширина трага хабања за оба материјала и различите брзине клизања при нормалној сили од 10 N и 20 N, без подмазивања.



Дијаграм 18: Ширина трага хабања у зависности од брзине клизања

Са порастом нормалног оптерећења и брзине клизања ширина трагова хабања расте, па се највеће вредности уочавају при највећим брзинама и највећим оптерећењима. Такође се може закључити да је челик Č4732 погоднији за израду цеви стрелачког наоружања због мањег хабања самог материјала. Челик V700 није погодан за израду цеви стрелачког наоружања, чијим би се хабањем пореметила прецизност и стабилност при испаливању метка.

8.0 Литература

- [1] <http://www.zastava-arms.rs>
- [2] Д. Дамјановић: ИЗВЕШТАЈ СА СТРУЧНЕ ПРАКСЕ 2, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2015.
- [3] Н. Христов, Г. Јовичић: ОДРЕЂИВАЊЕ ЖИВОТНОГ ВЕКА ЦЕВИ ОРУЖЈА, Одељење за логистику Београд, 2012.
- [4] С. Јарамаз, Д. Мићковић: СИМУЛАЦИЈА ЕРОЗИЈЕ ЦЕВИ ОРУЂА, Војнотехнички институт Београд, 1990.
- [5] М. Пинтарић: ОДРЖАВАЊЕ ТОПНИЧКОГ ОРУЖЈА, Факултет стројарства и бродоградње Загреб, 2012.
- [6] М. Јакопчић, К. Грилец: УТИЦАЈ ПРЕГРЕВАЊА ЦЕВИ ТОПОВСКОГ ОРУЖЈА НА ОТПОРНОСТ ПРЕМА АБРАЗИСКОМ ХАБАЊУ, 2011.
- [7] В. Лазић, Н. Ратковић: МАШИНСКИ МАТЕРИЈАЛИ, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2003.
- [8] <http://www.ssab.com/en/Brands/Weldox/Products/Weldox-700/>
- [9] М. Бабић, С. Митровић: ТРИБОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КОМПОЗИТА НА БАЗИ ZnAl легура, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2007.
- [10] С. Танасијевић: ТРИБОЛОШКИ ИСПРАВНО КОНСТРУИСАЊЕ, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2004.
- [11] С. Танасијевић: ОСНОВИ ТРИБОЛОГИЈЕ МАШИНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА, Војнотехнички институт Београд, 1989.
- [12] С. Илић, Г. Марјановић: ФЕНОМЕН ЕРОЗИЈЕ ЦЕВИ НАОРУЖАЊА, Војно технички институт Београд, 2009.
- [13] Д. Јовановић, Б. Недић: РЕГЕНЕРАЦИЈА ПОВРШИНА УНУТРАШЊЕ ТРАСЕ ЦЕВИ СТРЕЉАЧКОГ ОРУЖЈА Крагујевац, 2006.
- [14] Д. Јовановић, Б. Хедић: ХАБАЊЕ УНУТРАШЊЕ ТРАСЕ ЦЕВИ СТЕЉАЧКОГ ОРУЖЈА, Застава оружје Крагујевац, 2007.

- [15] М. Васиљевић: ПРЕДВИЂАЊЕ РАДНОГ ВЕКА И ТРАЈАЊЕ ЦЕВИ ОРУЂА И ОРУЖЈА У ОДНОСУ НА ЗАМОР МАТЕРИЈАЛА ЦЕВИ, Војнотехнички институт Београд, 1990.
- [16] Б. Стојановић: ТРИБОЛОШКО ПОНАШАЊЕ ХИБРИДНИХ КОМПОЗИТА СА А356, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2013.
- [17] <http://www.tagor.rs/online-katalog/Infra-crveni-meraci-temperature-178-cat.htm>
- [18] <http://uni-trend.com/UT371.html>