Utjecaj mikrostrukture na tribomehanička svojstva čelika

Žnidarec, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2009

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:220863

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-03**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

TOMISLAV ŽNIDAREC

Zagreb, 2009

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor

Doc.dr.sc. VERA REDE **TOMISLAV ŽNIDAREC**

Zagreb, 2009

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Žnidarec** Mat. br.: 0035139191

Naslov: **Utjecaj mikrostrukture na tribomehanička svojstva čelika**

Opis zadatka:

U diplomskom zadatku potrebno je istražiti kako različita mikrostruktura površine istog materijala (čelik za poboljšavanje), dobivena različitim toplinskim i toplinsko kemijskim obradama, utječe na mehanička i tribološka svojstva materijala.
U tu svrhu potrebno je napraviti sljedeće:

1. Opisati pripremu uzoraka za predviđena ispitivanja,
2. Napraviti mikrostrukturnu analizu materijala,
3. Izmjeriti makro i mikrotvrdoću,
4. Ispitati otpornost na adhezijsko trošenje
5. Analizirati dobivene rezultate i izvesti zaključak

Zadatak zadan: 10. rujna 2009.

Rok predaje rada: 12. studenog 2009.

Predviđeni datum obrane: 18. – 20. studenog 2009.

Zadatak zadala:

Rede

Doc. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SAŽETAK

U ovom radu je dan kratak pregled osnovnih mehanizama trošenja s posebnim naglaskom na adhezijsko trošenje. Opisan je rad plinskih amortizera (opruga) s posebnim osvrtom na karakteristiku radne sile amortizera i na mehanizme dotrajavanja plinskih amortizera. Utvrdilo se da je najčešći razlog dotrajavanja plinskih amortizera oštećenje ili trošenje gumenih oringa uzrokovano lošim stanjem površine klipnjača. Problem se može riješiti primjenom odgovarajućih postupaka toplinsko kemijske obrade odnosno odgovarajućim modifikacijama površinskog sloja klipnjače. Iz tog razloga u radu je dan pregled toplinsko kemijskih obrada s posebnim naglaskom na obrade koje će se provesti u istraživanju. U istraživanju su se vršila ispitivanja mikrotvrdoće i makrotvrdoće toplinsko kemijski obrađenih uzoraka. Napravila se i analiza mikrostrukture uzoraka. Na kraju je napravljeno i ispitivanje opornosti na adhezijsko trošenje površinskih slojeva nastalih toplinsko kemijskim obradama. U analizi rezultata dan je odgovor na pitanje koja se toplinsko kemijska obrada pokazala kao optimalna tribološka mjera u cilju povećanja otpornosti na adhezijsko trošenje.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. MEHANIZMI TROŠENJA 3
2.1. ABRAZIJA, UMOR POVRŠINE, TRIBOKOROZIJA 6
2.1.1. Abrazija 6
2.1.2. Umor površine 8
2.1.3. Tribokorozija 9
2.1.4. Srodni oblici trošenja 10
2.2. ADHEZIJSKO TROŠENJE 11
2.2.1. Trenje klizanja 11
2.2.2. Definicija adhezijskog trošenja 14
2.2.3. Jedinični događaj adhezije 15
2.2.4. Otpornost na adhezijsko trošenje 16
2.2.5. Metode ispitivanja na adhezijsko trošenje 19
3. PLINSKI AMORTIZERI (OPRUGE) 26
3.1. OPIS RADA PLINSKOG AMORTIZERA 27
3.1.1. Sastavni dijelovi 27
3.1.2. Osnovni princip rada 27
3.2. RADNA SILA PLINSKOG AMORTIZERA 28
3.2.1. Karakteristika sile plinskog amortizera 29
3.2.2. Utjecaj temperature na iznos radne sile plinskog amortizera 31
3.3. MEHANIZMI DOTRAJAVANJA PLINSKOG AMORTIZERA 32
4. TOPLINSKO KEMIJSKA OBRADA 35
4.1. TOPLINSKI POSTUPCI PREVLAČENJA 35
4.2. DIFUZIJSKI POSTUPCI 36
4.2.1. Nitriranje 38
4.2.1.1. Nitriranje u plinskoj atmosferi 39
4.2.1.2. Nitriranje u kupci (tekućoj sredini) 40
4.2.1.3. Nitriranje u ioniziranoj plinskoj (plazma) atmosferi 41
4.2.2. Nitrokarburiranje 42
4.2.2.1. Tenifer nitrokarburiranje Q, QP, QPQ 43
4.2.2.2. Sastav nitrokarburiranog sloja 46
4.2.3. Oksidiranje (bruniranje) 48
5. EKSPERIMENTALNI DIO 50

5.1 CILJ RADA I PROVOĐENJE ISTRAŽIVANJA 50
5.2 OSNOVNI MATERIJAL 51
5.3. POSTUPCI TOPLINSKO KEMIJSKE OBRADE UZORAKA 53
5.3.1. Oprema Laboratorija za toplinsku obradu 53
5.3.2. Priprema uzoraka 55
5.3.3. Toplinsko kemijska obrada uzoraka 55
5.4. REZANJE UZORAKA ZA PREDVIĐENA ISPITIVANJA 61
5.5. METALOGRAFSKO ISPITIVANJE UZORAKA 62
5.5.1. Priprema uzoraka za analizu mokrostrukture 62
5.5.1.1. Ulijevanje uzoraka u kalup 62
5.5.1.2. Brušenje uzoraka 64
5.5.1.3. Poliranje uzoraka 65
5.5.2. Analiza mikrostrukture 66
5.5.3. Analiza mikrotvrdoće 72
5.5.3.1. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće jezgre uzoraka 74
5.5.3.2. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri, HV 0.05 75
5.5.4. Analiza makrotvrdoće 80
5.5.4.1. Rezultati mjerenja makrotvrdoće 81
5.6. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE 83
5.6.1. Izrada gumenog prstena potrebnog za ispitivanje 83
5.6.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje 85
6. ANALIZA REZULTATA 88
7. ZAKLJUČAK 96
8. LITERATURA 97
9. PRILOG 99
9.1 REZULTATI ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE 99

POPIS SLIKA

Slika 1: Klipnjača plinskog amortizera (opruge)....2
Slika 2: Istrošenost unutarnjeg i vanjskog prstena valjčanog ležaja, [4]....3
Slika 3: Brušenje, [5]....4
Slika 4: Osnovni mehanizmi trošenja....5
Slika 5: Jedinični događaj abrazije, [1]....6
Slika 6: abrazija između dvaju tijela, [7]....7
Slika 7: abrazija između triju tijela, [7]....7
Slika 8: Jedinični događaj umora površine, [1]....8
Slika 9: Jedinični događaj tribokorozije, [1]....9
Slika 10: Erozijsko trošenje, [7]....10
Slika 11: Trenje klizanja, [1]....11
Slika 12: Jedinični događaj procesa klizanja, [1]....12
Slika 13: Vrste adhezijskih veza, [1]....13
Slika 14: Adhezijsko trošenje, [7]....14
Slika 15: Jedinični događaj adhezije, [1]....15
Slika 16: Čestice adhezijom spontano “navarene”na površinu, [1]....16
Slika 17: RABINOWITZ - ova karta tribološke kompatbilnosti, [1]....17
Slika 18: Tribološka kompatibilnost na osnovi kristalne strukture, [1]....18
Slika 19: Prikaz uređaja za ispitivanje metodom 4 kuglice, [8]....20
Slika 20: Rezultat testa 4 kuglice, [8]....21
Slika 21: Skica testa BALL ON FLAT, [8]....21
Slika 22: Prikaz uređaja za ispitivanje pin on disc, [8]....22
Slika 23: Prikaz uređaja za ispitivanje bloc on ring, [8]....23
Slika 24: Prikaz uređaja za ispitivanje bloc on pin, [8]....24
Slika 25: Plinski amortizer (opruga), [9]....26
Slika 26: Primjena plinskog amortizera (opruge), [10]....26
Slika 27:Sastavni dijelovi plinskog amortizera, [11]....27
Slika 28: Presjek plinskog amortizera, [12]....28
Slika 29: Dijagram karakteristike sile, [13]....29
Slika 30: Dijagram sila-hod, [13]....30
Slika 31: Dijagram utjecaja temperature okoline na silu amortizera, [12]....31
Slika 32: Primjer mehaničkog oštećenja klipnjače....33
Slika 33: Primjer istrošenosti klipnjače....33
Slika 34: Podjela toplinsko kemijskih postupaka....37

Slika 35: Nitrirani sloj, [14].....39
Slika 36: Proces nitriranja u plinskoj atmosferi , [16].....40
Slika 37: mikrostruktura i raspored tvrdoće poprečnog presjeka nitriranog čelika [14].....41
Slika 38: Strojni dijelovi u komori za ionsko nitriranje, [17].....42
Slika 39: Pregled postupaka nitrokarburiranja, [22].....43
Slika 40: Prikaz osnovnih reakcija u solnoj kupci TF1,[23] 44
Slika 41: Tenifer nitrokarburiranje, [19] 45
Slika 42: Dijagram stanja željezo – dušik, [24].....46
Slika 43: Mikrostruktura čelika C45E obrađena Tenifer nitrokarburiranjem 46
Slika 44: Rezultati rentgenske difrakcije površina nitrokarburiranogi oksidiranog uzorka [25] ..47
Slika 45: Oružje obrađeno oksidiranjem, [18] 49
Slika 46: Peć za nitriranje Tenifer postupkom, [20].....54
Slika 47: Peć za oksidiranje.....54
Slika 48: Uzorci vezani čeličnom žicom.....55
Slika 49: Oksidacija u solnoj kupci AB1 56
Slika 51: postupak poliranja 58
Slika 52: Nitrokarburiranje Tenifer QPQ.....58
Slika 53: Nitrokarburiranje Tenifer.....59
Slika 54: Nitrokarburiranja poduzeća Laverna d.o.o.....60
Slika 55: Uzorci nakon toplinsko kemijske obrade.....61
Slika 56: Detalji rezanja uzoraka na tokarilici 61
Slika 57: Primjer izrezanih uzoraka 62
Slika 58: Ulijevanje akrilne mase u kalup s uzorkom,[21] 63
Slika 59: Ulijevanje uzoraka u kalup.....63
Slika 60: Izgled uzoraka nakon vađenja iz kalupa 64
Slika 61: Uređaj za brušenje i poliranje, [20].....65
Slika 62: Svjetlosni mikroskop Olympus – GX51 66
Slika 63: Mikrostruktura uzorka 1- površina i jezgra.....67
Slika 64: Mikrostruktura uzorka 2 – površina i jezgra.....67
Slika 65: Mikrostruktura uzorka 3- površina i jezga.....68
Slika 66: Mikrostruktura uzorka 4 – površina i jezgra.....69
Slika 67: Mikrostruktura uzorka 5 – površina i jezgra.....70
Slika 68: Mikrostruktura uzorka 6 – površina i jezgra.....71
Slika 69: Mjerenje mikrotvrdoće.....72
Sika 70: Mjerenje tvrdoće po Vickers – u, [26] 73

Slika 71: Otisak dijamantnog penetratora 73
Slika 72: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće jezgre uzoraka 75
Slika 73: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 2 76
Slika 74: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 3 77
Slika 75: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 4 78
Slika 76: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 5 79
Slika 77: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 6 80
Slika 78: Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC metodi,[27] 80
Slika 79: Mjerenje makrotvrdoće 81
Slika 80: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće površine uzoraka 82
Slika 81: Detalji izrade gumenog prstena.....84
Slika 82: Gumeni prsteni 85
Slika 83: Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje 85
Slika 84: Mjerenje otpornosti na adhezijsko trošenje.....86
Slika 85: Usporedba srednjih vrijednosti koeficijenata trenja uzoraka 87
Slika 86: Prikaz srednjih vrijednosti rezultata mjerenja mikrotvrdoće jezgre 90
Slika 87: Prikaz vrijednosti rezultata mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri 91
Slika 88: Prikaz vrijednosti rezultata mjerenja mikrotvrdoće zone spojeva 92
Slika 89: Prikaz vrijednosti rezultata mjerenja makrotvrdoće površina uzoraka 93
Slika 90: Usporedba vrijednosti sile trenja uzoraka 95
Slika 91: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 1 100
Slika 92: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 2 102
Slika 93: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 3 104
Slika 94: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 4 106
Slika 95: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 5 108
Slika 96: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 6 110

POPIS TABLICA

Tablica 1: Koeficijenti trenja suhog klizanja između materijala (1) i (2), [1] 13
Tablica 2: Karakteristike ispitivanja 4 kuglice [8] 20
Tablica 3: Karakteristike ispitivanja 4 kuglice [8] 22
Tablica 4: Karakteristike ispitivanja pin on disc, [8] 23
Tablica 5: Karakteristike ispitivanja bloc on ring, [8] 24
Tablica 6: Karakteristike ispitivanja bloc on pin, [8] 25
Tablica 7: Kemijski sastav čelika C45E, % 51
Tablica 8: Mehanička svojstva u popuštenom i normaliziranom stanju 51
Tablica 9: Mehanička svojstva u popuštenom i kaljenom stanju 52
Tablica 10: Zahtjevi za toplinsku obradu 52
Tablica 11: Oznake uzoraka 53
Tablica 12: Parametri brušenja 64
Tablica 13: Parametri poliranja 65
Tablica 14: Prikaz izmjerenih tvrdoća jezgre 74
Tablica 15: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 2 75
Tablica 16: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 3 76
Tablica 17: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 4 77
Tablica 18: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 5 78
Tablica 19: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 6 79
Tablica 20: Prikaz izmjerenih tvrdoća površine 82
Tablica 21: Fizičko-mehaničke karakteristike gume prije starenja 83
Tablica 22: Fizičko-mehaničke karakteristike gume nakon starenja od 7 dana, pri 70°C 84
Tablica 23: Prikaz srednjih vrijednosti izmjerenih koeficijenata trenja uzoraka 87
Tablica 24: Sastav i debljina sloja obrađenih uzoraka 88
Tablica 25: Vrijednosti sile trenja uzoraka 94
Tablica 26: Dobiveni rezultati istraživanja 96
Tablica 27: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 1 99
Tablica 28: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 1 99
Tablica 29: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 1 100
Tablica 30: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 2 101
Tablica 31: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 2 101
Tablica 32: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 2 102
Tablica 33: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 3 103
Tablica 34: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 3 103

Tablica 35: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 3 104
Tablica 36: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 4 105
Tablica 37: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 4 105
Tablica 38: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 4 106
Tablica 39: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 5 107
Tablica 40: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 5 107
Tablica 41: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 5 108
Tablica 42: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 6 109
Tablica 43: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 6 109
Tablica 44: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 6 110

POPIS OZNAKA I KRATICA

$\mathbf{A}$	toplinsko istezanje [%]
$\mathbf{A_C}$	poprečni presjek cilindra [mm^2]
$\mathbf{A_K}$	poprečni presjek klipnjače [mm^2]
$\boldsymbol{d}$	dijagonala penetratora [mm]
$\boldsymbol{F_N}$	normalna komponenta sile [N]
$\boldsymbol{F_T}$	tangencijalna komponenta sile, sila trenja [N]
$\boldsymbol{F_1}$	sila otpora na kidanje adhezijskih veza [N]
$\boldsymbol{F_2}$	sila otpora na plastičnu deformaciju [N]
$\boldsymbol{F_3}$	sila otpora na brazdanje [N]
$\boldsymbol{F_4}$	sila otpora na elastičnu deformaciju [N]
$\boldsymbol{f}$	faktor trenja klizanja
$\boldsymbol{H}$	tvrdoća mekšeg materijala u paru
$\mathbf{h}$	razina dubine [μm]
$\boldsymbol{k}$	Archardova konstanta
$\Delta \boldsymbol{l}$	progib opruge [mm]
$\mathbf{n}$	broj okretaja [°/min]
$\boldsymbol{p}$	tlak [N/mm^2]
$\boldsymbol{R_e}$	granica razvlačenja [N/mm^2]
$\boldsymbol{R_m}$	vlačna čvrstoća [N/mm^2]
$\boldsymbol{T}$	temperatura [°C]
$\boldsymbol{T_0}$	sobna temperatura [°C]
$\boldsymbol{v}$	brzina [m/s]
$\Delta \boldsymbol{V}$	promjena volumena [m^3]

Grčka slova

ε	nitridi
γ'	nitridi
ϕ	promjer
μ	koeficijent trenja

Kratice

HV	tvrdoća prema Vickersu
HRC	tvrdoća prema Rockwellu
KV	udarna radnja loma [J]

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad na temu "**Utjecaj mikrostrukture na tribomehanička svojstva čelika"** izradio samostalno, uz nadzor i stručne savjete mentora doc.dr.sc. Vera Rede, koristeći se navedenom literaturom, uređajima za ispitivanje te znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Tomislav Žnidarec

ZAHVALA

Zahvaljujem se na stručnoj pomoći, savjetima, ustupljenoj literaturi i utrošenom vremenu svome mentoru, doc.dr.sc. Veri Rede koja me strpljivo usmjeravala i savjetovala u mome radu.

Također se zahvaljujem doc.dr.sc. Krešimiru Grilecu, laborantima Nadi Varga i Željku Kostanjski, djelatnicima poduzeća GO-MA d.o.o., djelatnicima poduzeća M.G. Žnidarec d.o.o., koji su mi pomogli kod eksperimentalnog dijela ovoga rada.

Najveću zahvalu želim izraziti svojim roditeljima i sestri koji su bili uz mene i podržavali me tokom cijelog trajanja studija i bez čije pomoći, razumijevanja i strpljivosti ne bih uspio. Također se zahvaljujem i svojoj djevojci koja me bodrila do kraja studija i bila uz mene.

I na kraju hvala svim mojim prijateljima i kolegama na suradnji, susretljivosti i nesebičnosti, te uistinu nezaboravnim trenucima i lijepim uspomenama tokom trajanja studija.

1. UVOD

Znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja naziva se tribologija. “Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju i o pratećim aktivnostima”, [1].

Zanimljiva je činjenica da mnogi, često i vrlo obrazovani ljudi, ne znaju što znači riječ tribologija i što se pod tim pojmom uopće misli iako dobro razumiju koliko veliku ulogu imaju trenje i trošenje za svijet kakav poznajemo.

Još u najstarije doba, kada je čovjek počeo upotrebljavati predmete iz okoline počeo je i upravljati procesima trenja i trošenja. Među najstarijim dokazima tome su lučne naprave kojima se toplina dobivena trenjem koristila za paljenje vatre. Isto tako čovjek je izradom i upotrebom prvih drvenih kola ubrzo uočio da se podmazivanjem metalnih osovina i dijelova kotača životinjskim mastima njegova kola lakše kreću, da se osovine kotača manje zagrijavaju i da duže traju. Odnosno uočio je da je jedan od načina smanjenja trenja, a time i trošenja, podmazivanje. Nešto kasnije razvitkom visokih peći i postupaka toplinskih obrada metalnih materijala, čovjek je otkrio kako može različitim toplinskim obradama postići različite mikrostrukture, a samim time i različita mehanička, fizička i kemijska svojstva metala koja zajedno doprinose povećanju otpornosti trošenju. Razvitkom toplinskih obrada ubrzo su se razvili i postupci toplinsko kemijske obrade, kojima se u površinskom sloju metalnih materijala mijenja kemijski sastav i mikrostruktura, što je rezultiralo dobivanjem površina metalnih materijala različite hrapavosti i otpornosti prema trošenju.

Iz ovih primjera vidi se da procesi trenja i trošenja prate čovjeka od njegova postanka, u nekim stvarima na korist, a u nekima na štetu. Kao što je to bilo nekad, tako i danas, prilikom konstruiranja, inžinjeri se susreću s problemima postizanja zadovoljavajućeg trenja i trošenja što je i osnovna zadaća tribologije. Izazovi tribologije kao znanosti i područja djelovanja mogu se svrstati u smanjenje trošenja na najmanju moguću mjeru i produženje vijeka trajanja pojedinih strojeva i uređaja, te korištenje, što je više moguće, ekološki prihvatljivijih goriva, maziva ili postupaka toplinsko kemijskih obrada. Udovoljavanje svim ovim izazovima nije niti jednostavno niti jeftino. Uglavnom cilj tribologije odnosno tribologa jest da primjenom odgovarajućih triboloških mjera izbjegne pojavu opasnijih mehanizama trošenja ili ih dovoljno vremenski odgodi. Jedan od četiri mehanizama trošenja je i adhezija.

U ovom radu se istražuje kako različita mikrostruktura površine čelika Č1531.5, dobivena različitim toplinskim i toplinsko kemijskim obradama, utječe na mehanička i tribološka svojstva samog materijala. Odnosno istražuje se koja toplinska obrada će se pokazati kao optimalna tribološka mjera u vidu otpornosti na adhezijsko trošenje. Čelik Č1531.5 koristi se za izradu

klipnjača plinskog amortizera (opruge), od kojih se traži da im površina bude povišene tvrdoće, otporna na koroziju, te prije svega bude glatka i otporna na adhezijsko trošenje, budući da se radi o kliznom elementu plinskog amortizera (opruge), slika 1.

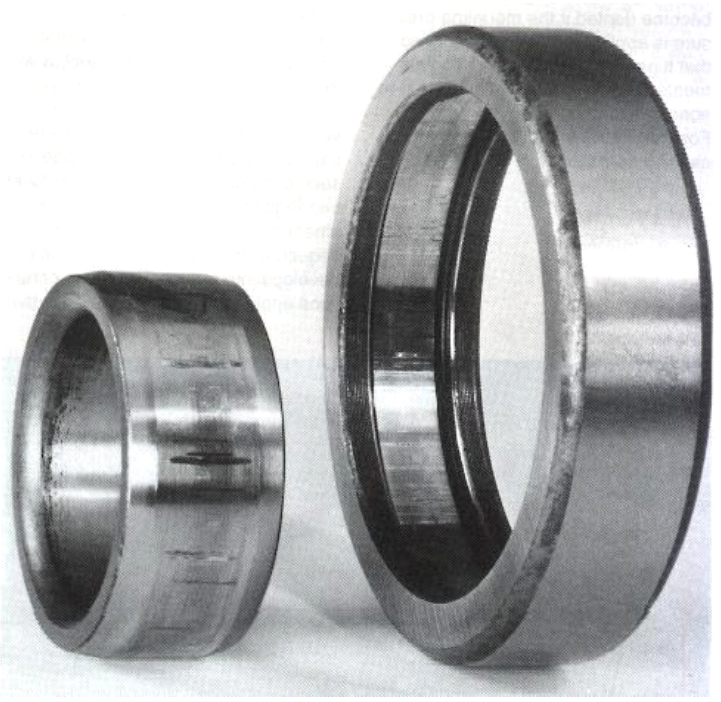
Slika 1: Klipnjača plinskog amortizera (opruge)

Tribologija kao znanost i tehnologija koja proučava pojave na i između površina koje su u međusobnom gibanju, u današnje vrijeme igra sve veću ulogu u mnogim područjima suvremenog života. U prvim godinama moderne tribologije, stručnjaci su, u pravilu, svoja saznanja crpili iz prakse i iskustva u radu. Danas se tribološkim problemima bave visokoobrazovani strojarski, kemijski, tehnološki, fizikalni, matematički i mnogi drugi stručnjaci i znanstvenici. Već danas, a u doglednoj budućnosti svakako još i više, tribologijom će se baviti informatičari, metalurzi, stručnjaci koji se bave nanotehnologijama, monomolekularnim slojevima u proučavanju temeljnog mehanizma graničnih podmazivanja i mnogi drugi. Tribologija je kompleksan pojam, koji predstavlja velik broj područja i istraživačkih interesa, koji, u pravilu, imaju vrlo velik utjecaj na nacionalne ekonomije i svekoliki razvoj čovječanstva.

2. MEHANIZMI TROŠENJA

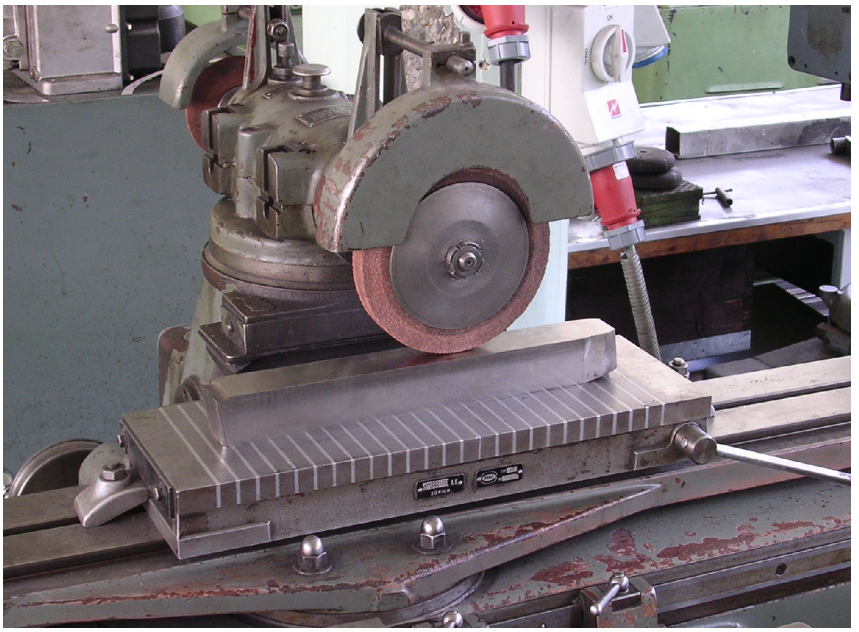
Čovjek iz iskustva zna da kad god se površine kreću jedna po drugoj, dolazi do pojave trošenja - oštećenja na jednoj ili obje površine koje najčešće podrazumijeva i progresivan gubitak materijala. Prema tome vrijedi definicija: “Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama”,[3].

U većini slučajeva, trošenje je štetno,; uzrokuje povećanu zračnost između pomičnih komponenti, neželjenu slobodu kretanja, gubitak preciznosti, često vibracije, povećano mehaničko opterećenje i još brže trošenje, te ponekad i zamor materijala. Gubitak relativno male količine materijala može biti dovoljan uzrok zatajenja rada velikih i kompleksnih strojeva. Slika 2 prikazuje istrošenost valjčanog ležaja uslijed vibracija, što je vrlo česti tribološki problem i uzrok većine zastoja strojeva u industriji.



Slika 2: Istrošenost unutarnjeg i vanjskog prstena valjčanog ležaja, [4]

Ipak, ponekad su (kao kod trenja) velika trošenja poželjna - npr. brušenje, mljevenje i poliranje koriste pojavu trenja za brzo odstranjivanje materijala u kontroliranim uvjetima, a niska razina trenja ponekad je i poželjna kod nekih procesa uhodavanja mehanizma. Slika 3 prikazuje postupak brušenja, postupak obrade odvajanjem čestica koji zahtijeva kontrolirano trošenje.



Slika 3: Brušenje, [5]

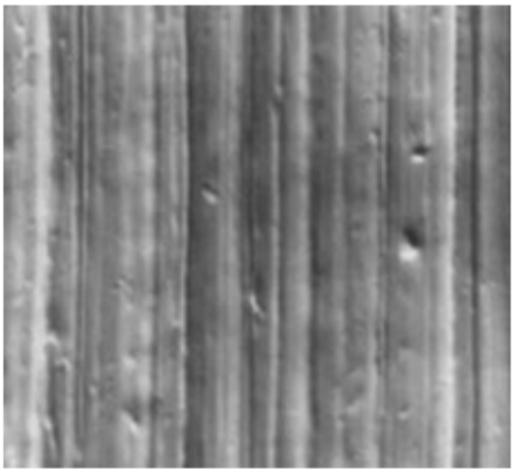
Između trenja i trošenja u jednom tribosustavu nema jednoznačne veze. U većini slučajeva povećanje trenja popraćeno je intenzivnijim trošenjem ali može biti i obrnuto. Postoje razni oblici trošenja kao posljedica raznovrsnosti uvjeta kontakata (stanje površine, način i brzina relativnog gibanja, temperatura...) tako da otpornost trošenju ne predstavlja jedinstveno svojstvo već naziv za grupu svojstava.

Premda postoji neizbrojno veliki broj slučajeva trošenja, većina je autora suglasna da su samo **četiri osnovna mehanizma trošenja**:

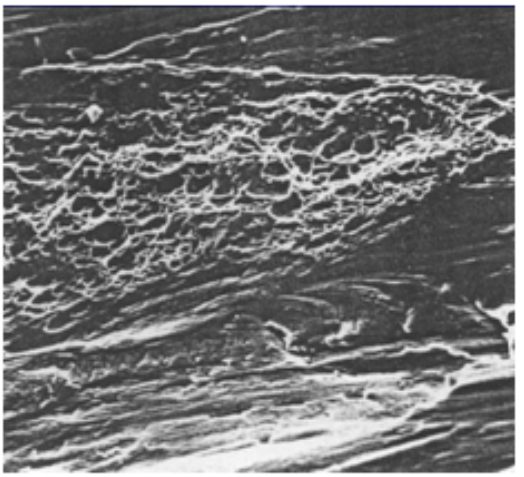
- **Abrazija**
- **Adhezija**
- **Umor površine**
- **Tribokorozija**

Trošenje se obično može podijeliti na trošenje klizanja, koje se javlja bez prisustva tvrdih čestica, i abrazijsko trošenje, koje se zbiva uz njihovo prisustvo. U određenim uvjetima trošenje klizanjem može proizvesti krhotine koje uzrokuju daljnje abrazijsko trošenje. Upravo zbog toga se treba imati na umu da granica između različitih vrsta trošenja često ne može biti jednoznačno određena.

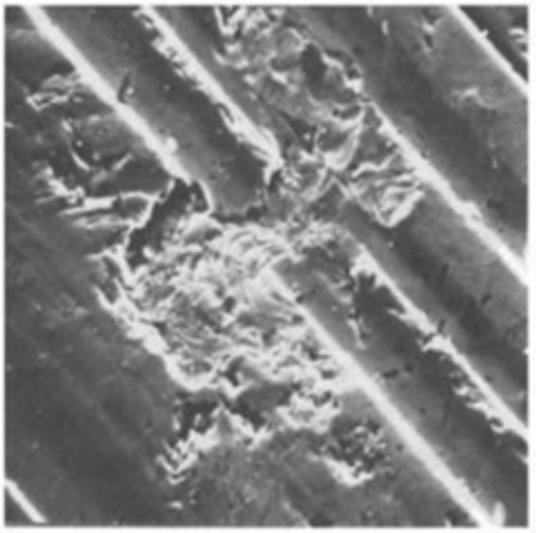
Izgled trošenih površina i oblik čestica trošenja osnovni su pokazatelji za indetifikaciju mehanizama trošenja, što je prikazano slikom 4.



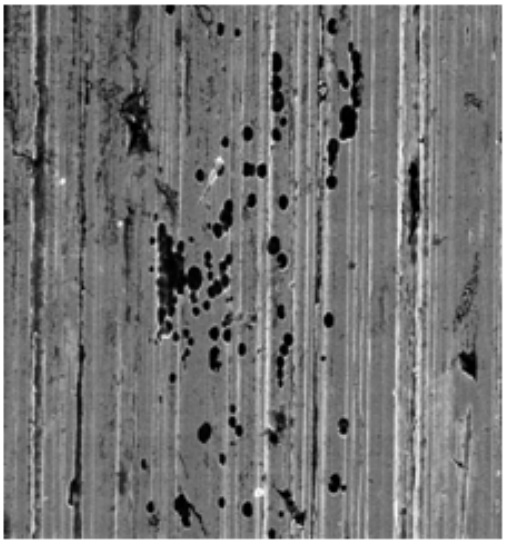
Abrazija, [1]



Adhezija, [1]



Umor površine, [1]



Tribokorozija, [6]

Slika 4: Osnovni mehanizmi trošenja

U daljnjem izlaganju dan je kratak opis abrazije, umora površine i tribokorozije dok je adhezijsko trošenje posebno obrađeno, iz razloga što ovaj rad istražuje koja toplinska obrada će se pokazati kao optimalna tribološka mjera u vidu otpornosti klipnjače plinskog amortizera (opruge) na adhezijsko trošenje.

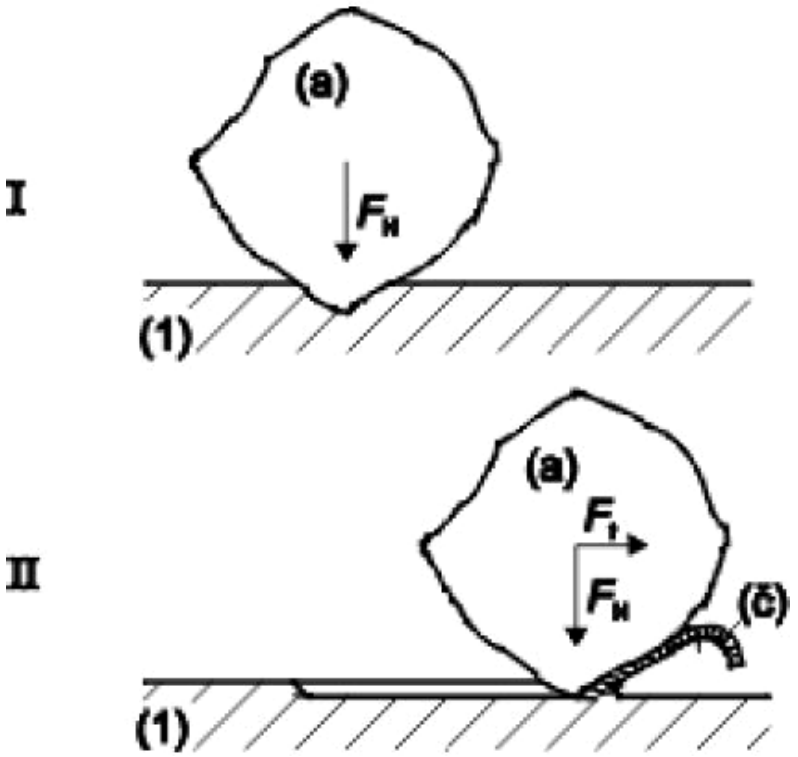
2.1. ABRAZIJA, UMOR POVRŠINE, TRIBOKOROZIJA

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina.

2.1.1. Abrazija

To je najučestalije trošenje u industriji. Nastaje kad hrapava površina tvrđeg materijala kliže po površini mekšeg materijala. Stvaraju se pritom brazde na površini i odvojene čestice mekšeg materijala. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, što je prikazano slikom 5.

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze od kojih je prva prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (I) pod utjecajem normalne komponente opterećenja $\boldsymbol{F_N}$. Druga faza je istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja $\boldsymbol{F_T}$ (II), što se sve vidi na slici 5.

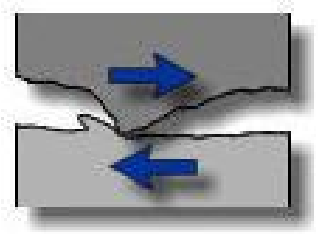


Slika 5: Jedinični događaj abrazije, [1]

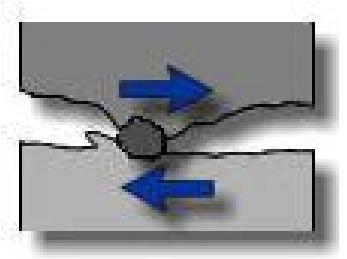
Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja, [1]:

1. Čista abrazija - djeluje kada je čvrstoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1).
2. Selektivna abrazija - djeluje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva.
3. Nulta abrazija - nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva.

Abrazivno sredstvo može biti na primjer proizvod tipa: ugljen, cement, kamen, staklo, keramika i sl. Trošenje se stoga na primjer javlja prilikom kopanja rudače, drobljenja, izvlačenja i otpremanja. Strojni dijelovi su tada izloženi visokim naprezanjima i tzv. abraziji između dva tijela (Two-Body Abrasion)što je prikazano sl. 6. Abrazija između tri tijela (Three- Body Abrasion), prikazana slikom 7, javlja se kod uređaja kao što su na primjer pumpe ili ventili kada se abrazivno sredstvo zaglavi između površina u trenju (npr. ležajevi). I ovdje se zbog visokih naprezanja moraju koristiti čvrsti i otporni materijali.



Slika 6: abrazija između dvaju tijela, [7]



Slika 7: abrazija između triju tijela, [7]

Uglavnom se može zaključiti da je otpornost na abraziju povezana s međusobnim odnosom tvrdoća abraziva i materijala trošene podloge odnosno njegovih strukturnih konstituenata, jer je taj odnos odlučujući za prvu fazu jediničnog događaja abrazije (sl. 5), tj. prodiranje, koje je preduvjet za nastanak početne pukotine, čijim napredovanjem će nastati čestica trošenja.

Neki od načini smanjenja abrazijskog trošenja su:

- Izbor parova materijala otpornih na abrazijsko trošenje
- Odgovarajuća obrada površinskih slojeva
- Razdvajanje površina slojem fluida- maziva.

2.1.2. Umor površine

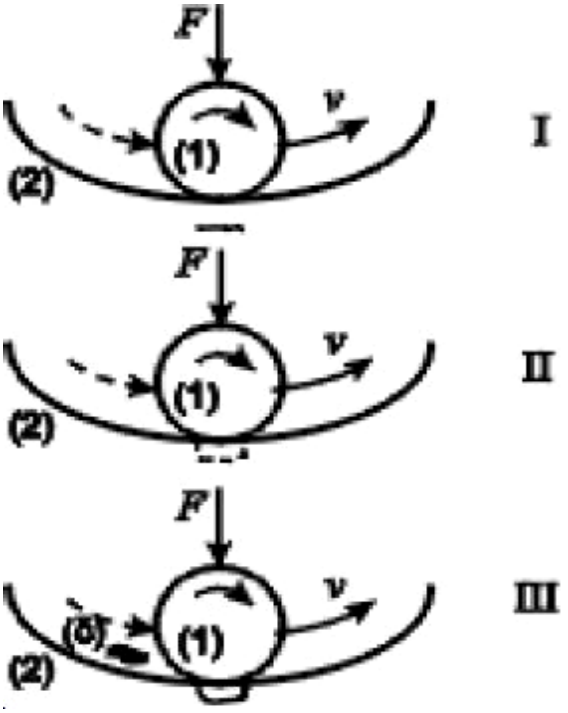
Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja. Nastaje pri ponavljajućem klizanju ili kotrljanju po istom tragu površina dvaju materijala. Površinske ili unutarnje pukotine materijala uzrokuju odvajanje dijelova površine.

Jedinični događaj umora površine prikazan je slikom 8, a sastoji se od sljedećih faza.

Faza I - stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine

Faza II - napredovanje mikropukotine

Faza III - Ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka



Slika 8: Jedinični događaj umora površine, [1]

Budući da je stvaranje početnih pukotina kod umora površine povezano s procesom gibanja dislokacija, otpornost materijala na umor površine ovisit će o otporu gibanja dislokacija, a na to utječe jako veliki broj čimbenika:

a) Podpovršinski koncetratori naprezanja
b) Površinska obilježja
c) Površinske pogreške
d) Diskontinuiteti u geometriji dodira
e) Raspodjela opterećenja u ležaju
f) Elastohidrodinamika
g) Tangencijalne sile

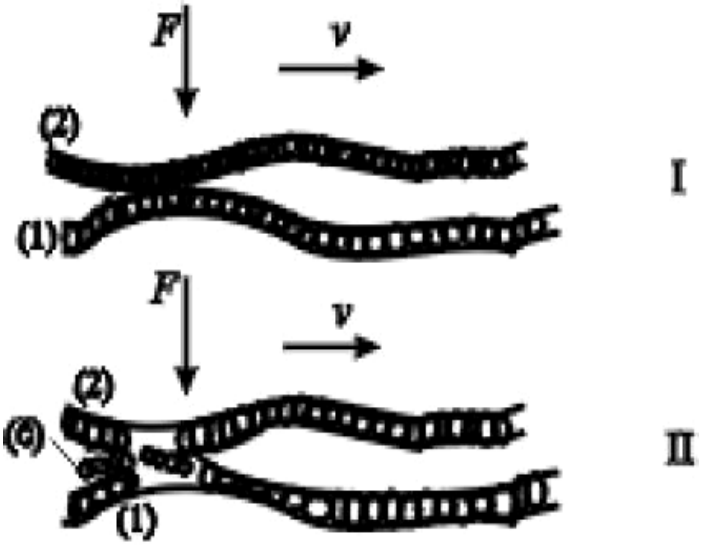
Otpornost na umor površine naziva se dinamička izdržljivost površine. Ovo svojstvo može se utvrditi samo pokusima.

2.1.3. Tribokorozija

Tribokorozija nastaje pri klizanju dviju površina u korozivnom okolišu, pa se trošenju pridodaje i kemijska degradacija svojstava materijala. Odnosno, “Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem”, [1]. Jedinični događaj tribokorozije prikazan je slikom 9 koji se sastoji od dvije faze:

I – stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije

II – mjestimično razaranje sloja produkata korozije



Slika 9: Jedinični događaj tribokorozije, [1]

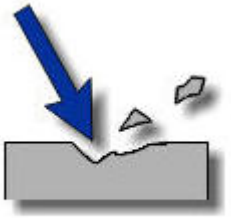
Izgled površina izloženih tribokoroziji ovisi o intenzivnosti odnošenja stvorenih čestica trošenja. Pri maloj intenzivnosti na površini se pojavljuju proizvodi korozije, a kod veće intenzivnosti odnošenja površina je naizgled polirana. Čestice trošenja su praškastog oblika, uglavnom oksidne. Tribokorozija je slabo intenzivan mehanizam trošenja. Premda se tribokorozija ubraja u osnovne mehanizme trošenja to je ipak kombinacija između kemijskih reakcija na površini triboelementa i jednog od osnovnih mehanizama trošenja tj. abrazije, adhezije ili umora površine.

Za orijentacijsko procjenjivanje otpornosti materijala na tribokoroziju mogu poslužiti tablice s podacima o otpornosti pojedinih materijala u različitim sredstvima. Treba međutim voditi računa o tome da slojevi proizvoda korozije zaštićuju metalne površine od neposrednog dodira metal/metal, pa se često i namjerno izazivaju u svrhu zaštite. Pojedini oblici tribokorozije mogu ipak biti problem, npr. u sprezi s vibracijama, visokim temperaturama ili vlažnim okolišem. Posebno je ozbiljan problem tribokorozija u kapljevitom kisiku ili u kapljevitom fluoru.

2.1.4. Srodni oblici trošenja

Osim ovih osnovnih, valja još napomenuti i srodne oblike trošenja materijala, koji se znaju često pojaviti, a zapravo su kombinacija osnovnih mehanizama trošenja:

a) **Erozija -** (.at. erodere izjesti, izglodati, izlokati) ova vrsta trošenja nastaje uslijed djelovanja djelića fluida (sa ili bez krutih čestica nošenih fluidom) koji velikim brzinama udaraju o površinu tijela, prikazano slikom 10.



Slika 10: Erozijsko trošenje, [7]

Jačina erozije najvećim dijelom ovisi o brzini i kutu udara čestica, te njihovoj tvrdoći.

Neki od načini smanjenja erozijskog trošenja su:

- Eliminacija krutih čestica iz fluida
- Promjena kuta udara fluida o površinu
- Smanjenje relativne brzine fluida
- Izbor pogodnog materijala
- Dodatne izmjene površine materijala u cilju poboljšanja njegovih karakteristika.

Erozija zapravo spada u područje abrazivnog trošenja

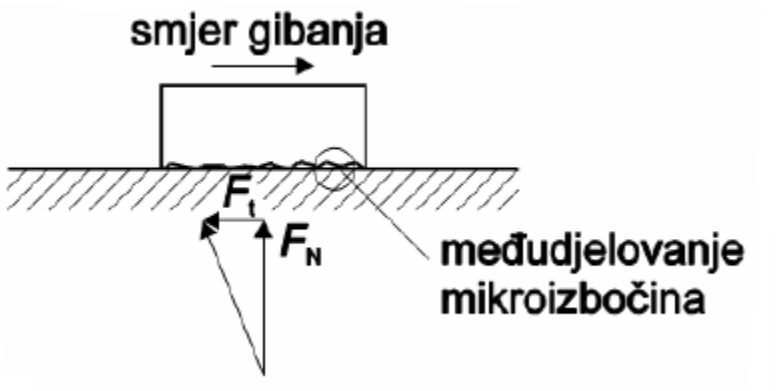
b) Kavitacija - (lat. cavus šupalj, prazan) uključuje oštećenje površine materijala, uronjenog u tekućinu, zbog udara mjehurića isparene tekućine u površinu. Kavitacijsko trošenje je ustvari podvrsta tribokorozijskog trošenja. Javlja se kada se tlak u tekućini snizi na vrijednost tlaka isparavanja te dolazi do pojave mjehurića pare. Oni bivaju nošeni u područje višeg tlaka gdje implodiraju (vraćaju se u kapljevitu fazu). Ako se implozija mjehurića pare događa u blizini čvrste stijenke, dolazi do njenog oštećenja. Sama pojava popraćena je vibracijama i bukom.

2.2. ADHEZIJSKO TROŠENJE

Adhezijsko trošenje uzrokuju sile koje se javljaju kod trenja klizanja, koje mogu biti veličinom različite, od slabih sekundarnih do jakih primarnih. Ako su te sile jače od kohezijskih sila u materijalu, dolazi do trošenja. Adhezijsko trošenje je posljedica djelovanja međuatomskih/međumolekularnih sila u točkama dodira tijela i formiranje mikrozavara, koji se raskidaju pri uzajamnom gibanju tijela uz "preraspodjelu materijala". Adhezijska se trošenja mogu smanjiti izborom parova materijala otpornih na adhezijsko trošenje (tribološka kompatibilnost), obradom površinskih slojeva termokemijskim postupcima, kao i spriječiti razdvajanjem površina slojem fluida – maziva.

2.2.1. Trenje klizanja

Trenje klizanja nastaje između dva elementa tribosustava, kao što je prikazano slikom 11.



Slika 11: Trenje klizanja, [1]

Pri tome vrijedi:

1) Sila trenja djeluje suprotno smjeru relativnog gibanja
2) Kod suhog dodira sila trenja proporcionalna je normalnom opterećenju,

$$F_t = f \cdot F_N$$

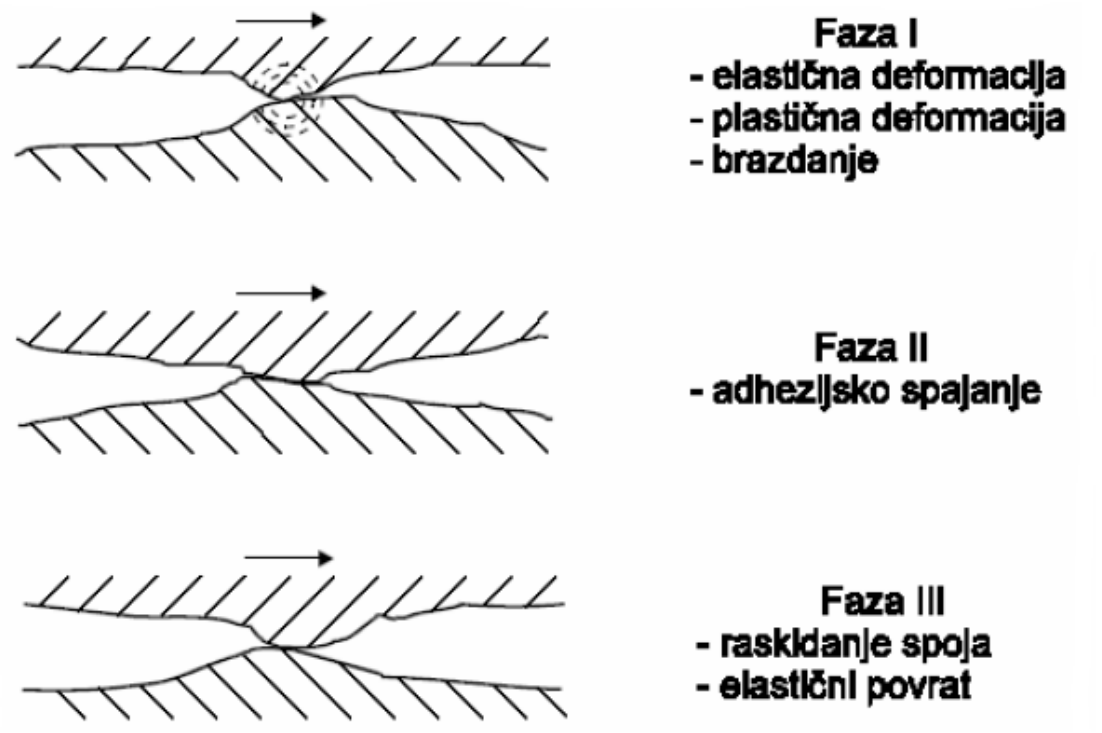
Ovim izrazom definiranj je: koeficijent, odnosno, faktor trenja klizanja,

$$f = \frac{F_t}{F_N}$$

3) Sila trenja ne ovisi o nominalnoj dodirnoj površini

Valja imati na umu da ova pravila vrijede ograničeno. Brojni su primjeri nekonstantnosti koeficijenta trenja, što posebno vrijedi kod podmazanih površina, ali vrlo često i za suho trenje.

Porijeklo sile trenja klizanja prikazano je slikom 12, koja prikazuje jedinični događaj procesa klizanja tj. slijed zbivanja od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina.



Slika 12: Jedinični događaj procesa klizanja, [1]

Sila trenja klizanja sastoji se od zbroja četiriju komponenata koje su i same zbroj pojedinačnih komponenata koje djeluju na svakom dodiru mikroizbočina.

$$F_t = \sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4$$

$\sum F_1$ - otpor na elastičnu deformaciju

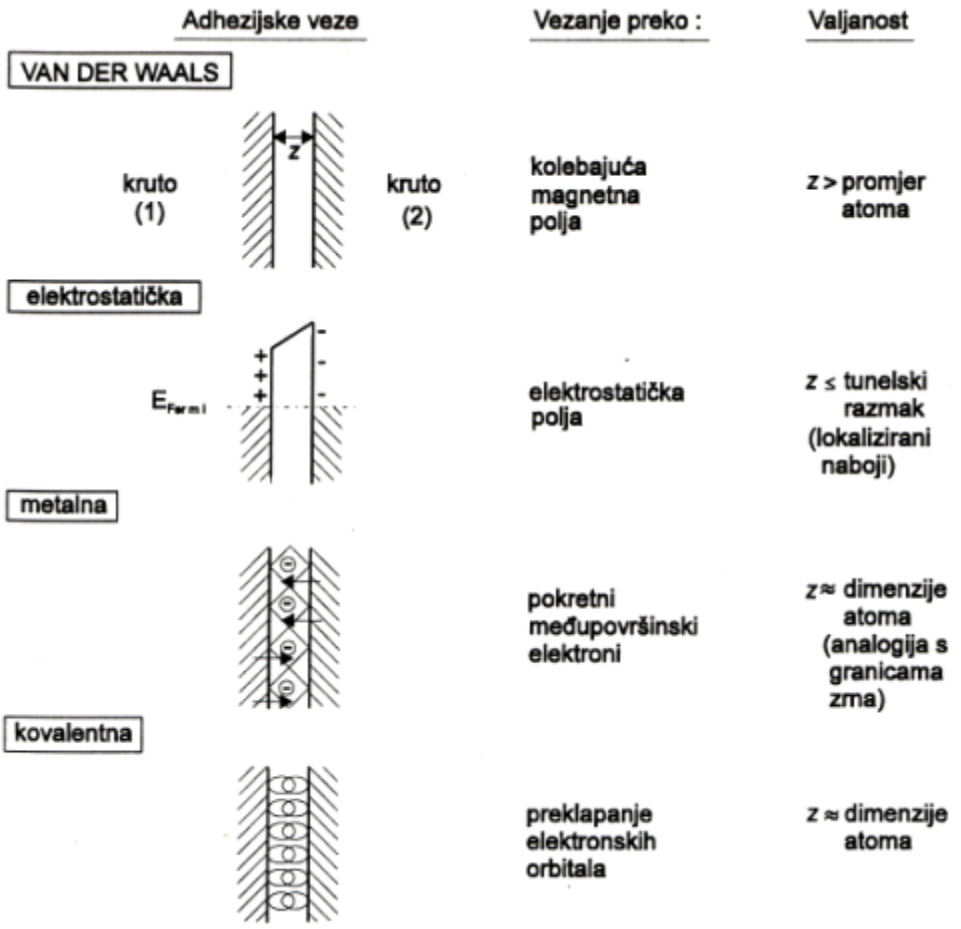
$\sum F_2$ - otpor na plastičnu deformaciju

$\sum F_3$ - otpor na brazdanje

$\sum F_4$ - otpor na kidanje adhezijskih veza

Otpor na elastičnu deformaciju proporcionalan je modulima elastičnosti materijala tarnog para. Otpor na plastičnu deformaciju ovisi o njihovim granicama tečenja. Otpor na brazdanje ovisi

o njihovim duktilnostima i o brzini relativnog gibanja. Otpor na kidanje adhezijskih veza ovisi o jačini adhezijske veze uspostavljene između materijala tarnog para. Vrste adhezijskih veza prikazane su na slici 13.



Slika 13: Vrste adhezijskih veza, [1]

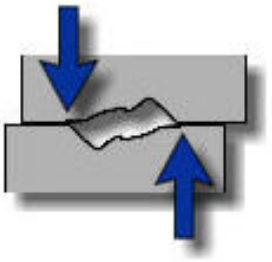
Primarne veze zahtijevaju mnogo veće sile za raskidanje spojeva na mikroizbočinama što rezultira mnogo većim koeficijentom trenja nego što bi bio u slučaju da su uspostavljene veze samo sekundarne. Tablica 1 prikazuje koeficijente trenja suhog klizanja između materijala.

Tablica 1: Koeficijenti trenja suhog klizanja između materijala (1) i (2), [1]

(1)	(2)	f
Č4130	Č4130	0,8
Č4130	Olovna bronca	0,2
Č4130	Bijela kovina (Pb)	0,5
Č4130	Bijela kovina (Sn)	0,8
Č4130	Fosforna bronca	0,3
Č4130	Mjed (30% Zn)	0,5
Č4130	Sivi lijev	0,4
Č4145	Č4145	0,7
Č4574	Č4574	1,0
Sivi lijev	Sivi lijev	0,4

2.2.2. Definicija adhezijskog trošenja

Adhezijsko trošenje nastaje kao posljedica djelovanja međumolekularnih sila u točkama dodira tijela, a manifestira se kroz „preraspodjelu“ materijala s jedne na suprotnu površinu. To često u praksi dovodi do puknuća i hladnog zavarivanja radnih dijelova. Slika 14 prikazuje skicu adhezijskog trošenja.



Slika 14: Adhezijsko trošenje, [7]

U situaciji kada dvije metalne površine dođu u kontakt, pojavljuju se adhezijske sile koje mogu dovesti do mjestimičnog mikrozavarivanja u točkama stvarnog kontakta dviju površina. Ukoliko se radi o dva dijela nekog tehničkog sustava, koji se istovremeno dodiruju i gibaju, jedan u odnosu na drugi, kao rezultat raskidanja mikrozavarenih spojeva pojavljuje se trošenje.

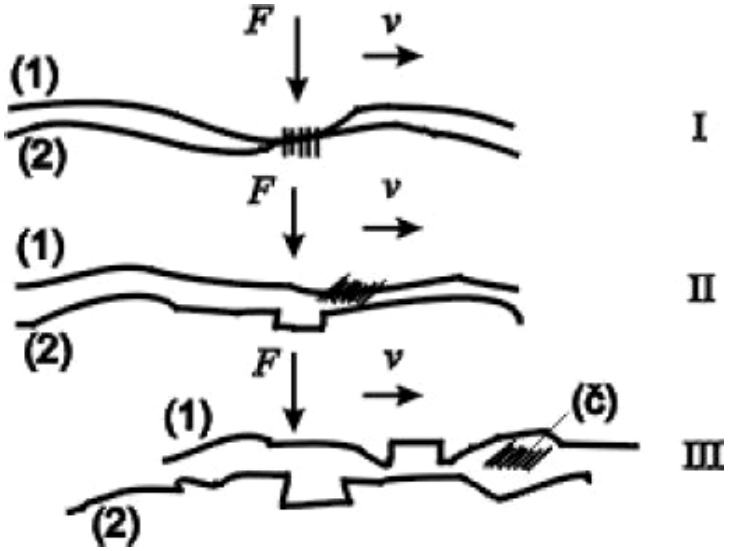
Adhezijsko trošenje predstavlja najveći problem kod tehničkih sustava koji, iz razloga ekonomičnosti (ušteda prostora, materijala, energije), ne mogu biti dimenzionirani tako da se već niskom razinom naprezanja izbjegne pojava mikrozavarivanja tarnog para. U takve sustave spadaju i npr. zupčasti prijenosnici motornih vozila kod kojih, uz visoke specifične pritiske u nominalno kotrljajućem kontaktu, postoji i klizno relativno gibanje između elemenata u paru.

Adhezijske sile ovise o kristalnoj i elektronskoj strukturi površina u kontaktu. Sklonost ne stvaranju mikrozavarenih spojeva naziva se tribološka kompatibilnost i ona je najveća kod metalnih površina koje su čiste od produkata nastalih u interakciji s okolinom i koje imaju HCP kristalnu strukturu.

Eksperimetalno određivanje tribološke kompatibilnosti odnosno inkompatibilnosti stvara dosta poteškoća, najviše zbog problema koje stvaraju reakcije metalnih površina s okolinom. Na realnim metalnim površinama uvijek postoje produkti interakcija s okolinom. Iz tog razloga opteretivost nekog tehničkog sustava može se povećati npr. termokemijskim obradama kao što je npr. nitriranje, kojim se na površini metala stvaraju slojevi daleko otporniji nego spontano nastali oksidni slojevi. Inače u praksi trenutak nastajanja adhezijskog trošenja obično se označava kao početak zaribavanja.

2.2.3. Jedinični događaj adhezije

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne tarne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza, stoga se jedinični događaj adhezije može opisati u tri faze, kako je prikazano slikom 15.



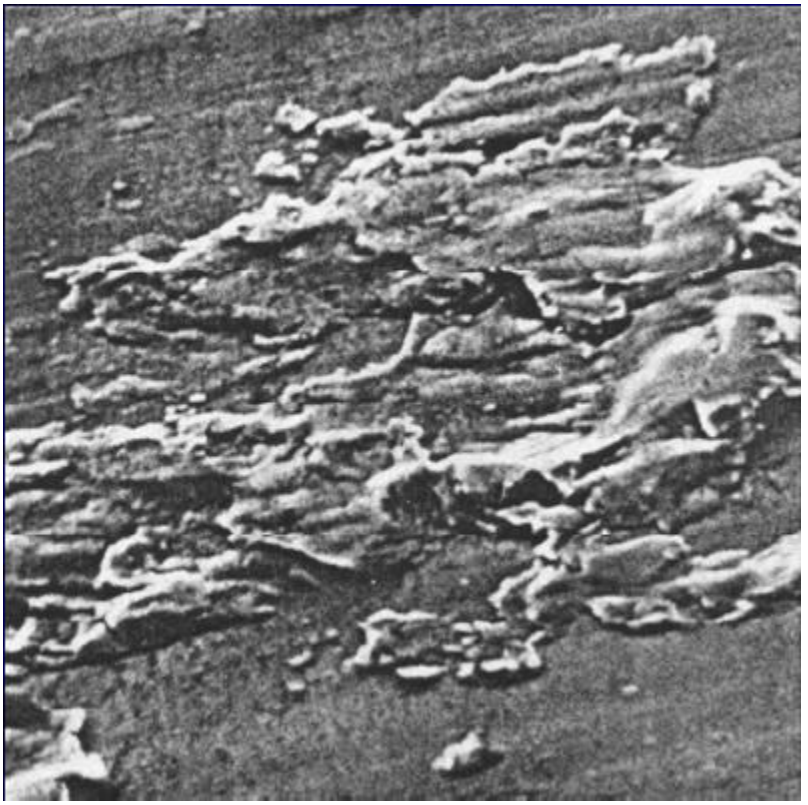
Slika 15: Jedinični događaj adhezije, [1]

Faza I - Nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina

Faza II - Raskidanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano ”nalijepljena” na jednom članku kliznog para.

Faza III - Otkidanje čestice (eventualno). Oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast.

Čestice iščupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno ”nalijepljene” odnosno navarene na drugu tarnu površinu, što je prikazano slikom 16.



Slika 16: Čestice adhezijom spontano "navarene"na površinu, [1]

2.2.4. Otpornost na adhezijsko trošenje

Prema jediničnom događaju adhezije, vidi se da u prvoj fazi adhezijskog mehanizma trošenja uspostavljaju mikrozavareni spojevi, te će prema tome sklonost stvaranju tih spojeva i jakost uspostavljenih adhezijskih veza određivati otpornost na adhezijsko trošenje, uvijek za tarni par, a ne za pojedinačni materijal. Kao što je već navedeno, materijali koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru su tribološki kompatibilni tj. prikladni za rad u paru. Znači može se zaključiti da je tribološka kompatibilnost određenog tribopara osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala. Tribološka kompatibilnost je suprotna metalurškoj kompatibilnosti tj. uzajamnoj topivosti metala u krutom stanju, što se vidi iz RABINOWITZ - ove karte kompatibilnosti, koja je prikazana slikom 17.

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Tl	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb
In				2	2				1	2	2	1	1	4	2	1	1	1	1
Pb	3	3	4	4	4	4	4	1	1	1	4	3	2	4	4	2	2	1	
Sn	2		4	2	2	3	2	1	2	1	2	1	1	3	2	3	1		
Cd			2	2	3	3		1	1	2	2	1	1	4	1	1			
Mg		2		2	3	3	3		1	3	1	1	1	1	2				
Zn		2	1	1	1	1	3	1	3	2	1	1	1	1					
Al	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1						
Ag	4	3	4	4	4	4	3	1	2	1	2	1							
Au	1	2	1	2	1	1		1	1	2	1								
Cu	3	4	4	1	1	2	3	1	1	2									
Ti	1	1	1	2	1	1	1	1	1										
Zr	2	1	2	1	2	3	1	2											
Pt	1	1	1	1	1	1	1												
Nb	1	1	1	1	1	1													
Fe	1	1	1	1	1														
Ni	1	1	1	1															
Co	1	1	1																
Cr	1	1																	
Mo	1																		

4 - Dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1%

3 - Dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju veća od 0,1%, ili jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1%

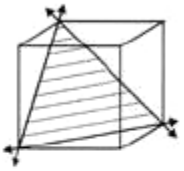
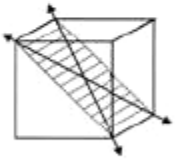
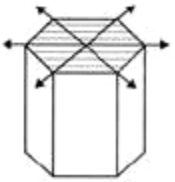
2 - Jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju između 0,1 i 1%

1 - Jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju preko 1%

Kompatibilnost		Adhezija
najbolja	4	najslabija
dobra	3	slaba
loša	2	jaka
najlošija	1	najjača

Slika 17: RABINOWITZ - ova karta tribološke kompatbilnosti, [1]

Kao što se vidi sa slike 18, na tribološku kompatibilnost također povoljno djeluje smanjenje broja kliznih sustava.

Rešetka	Element	Klizne ravnine	Klizni pravci	Broj kliznih sustava	Kompatibilnost[2)]
FCC 	Cu Al Ni Pb Au Ag γ Fe . . .	4 {111}	3 ⟨110⟩	4*3 = 12	1
BCC 	W Mo α Fe . . .	6 {110}[1)]	2 ⟨111⟩	6*2 = 12	2
HCP 	Cd Zn Mg Co . . .	1 {0001}	3 ⟨1120⟩	1*3 = 3	4

[1)] Sekundarne klizne ravnine

[2)] 1- najlošija kompatibilnost: FCC/FCC
2- loša kompatibilnost: BCC/BCC, BCC/FCC
4 - najbolja kompatibilnost: HCP/HCP

Slika 18: Tribološka kompatibilnost na osnovi kristalne strukture, [1]

Vidi se da su slikama 17 i 18 obuhvaćeni samo čisti metali odnosno njihove kristalne rešetke, iz tog razloga ti podaci mogu poslužiti samo za orijentacijsku procjenu tribološke kompatibilnosti. Za tarni par u realnim uvjetima tribološka kompatibilnost može se utvrditi samo pokusima ili procijeniti na osnovi zabilježenih prethodnih rezultata ispitivanja.

2.2.5. Metode ispitivanja na adhezijsko trošenje

Promjena volumena materijala koji je izložen adhezijskom trošenju može se odrediti jednadžbom adhezijskog trošenja (Archard).

$$\Delta V = k \frac{F \cdot v}{H}$$

F – sila

v – brzina

H – tvrdoća mekšeg materijala u paru

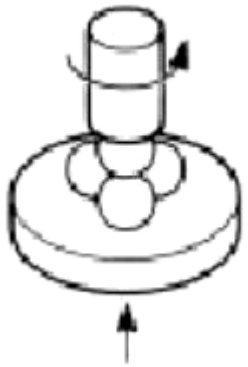
k – Archardova konstanta, koeficijent trošenja
određuje se eksperimentalno
od 10-3 (neprihvatljivo trošenje) do ~ do 10-7

Ispitivanje na adhezijsko trošenje se provodi međunarodno normiranim (propisanim) metodama ispitivanja. Budući da ih ima više, ovdje su navedene samo neke, koje se obično češće provode:

a) Klizno isptivanje metodom 4 kuglice (IP 239)
b) Klizno trošenje BALL ON FLAT (ASTM G 133)
c) PIN ON DISC (ASTM G99)
d) BLOC - ON - RING (ASTM G77)
e) BLOC - ON - PIN (Pin on Vee Block, FALEX)

a) Klizno ispitivanje metodom 4 kuglice (IP 239)

Slika 19 prikazuje uređaj za ispitivanje metodom 4kuglice.



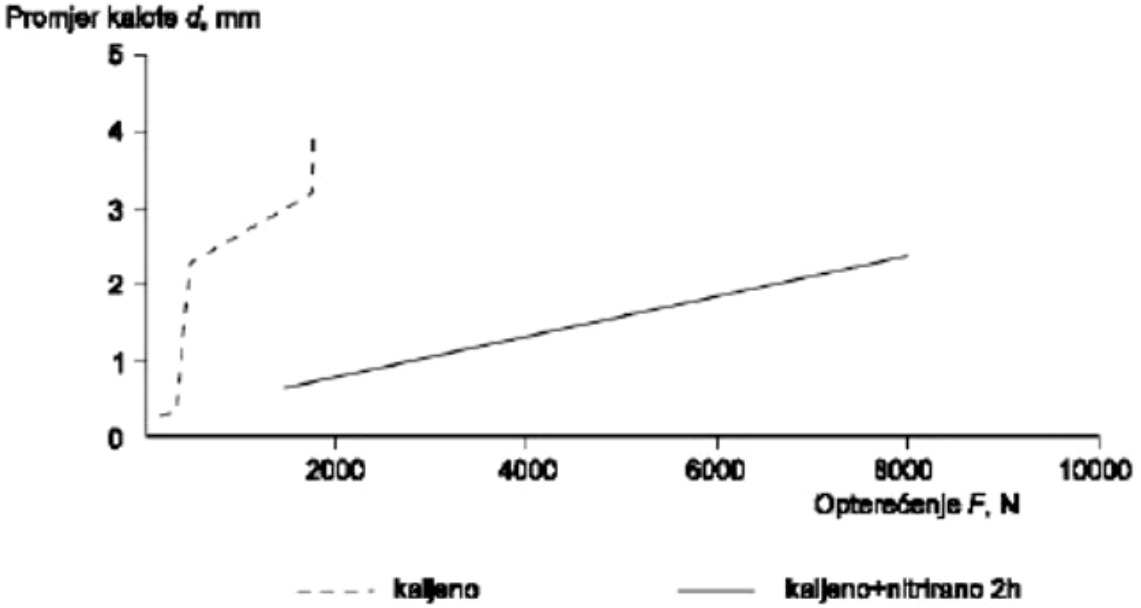
Slika 19: Prikaz uređaja za ispitivanje metodom 4 kuglice, [8]

Karakteristike ispitivanja dane su u tablici 2.

Tablica 2: Karakteristike ispitivanja 4 kuglice [8]

Svrha ispitivanja	Određivanje otprnosti na adhezijsko trošenje
Uzorci	Tri donje fiksne kuglice po kojima kliže gornja rotirajuća kuglica
Uvjeti ispitivanja	- promjer kuglice: 12,7 mm - brzina rotacije: 1800-20000 okr/min - opterećenje 3000-8000 N
Mjerenje	- točka zavarivanja
Vrsta trošenja	Adhezijsko trošenje

Rezultat testa 4 kuglice prikazan je slikom 20.

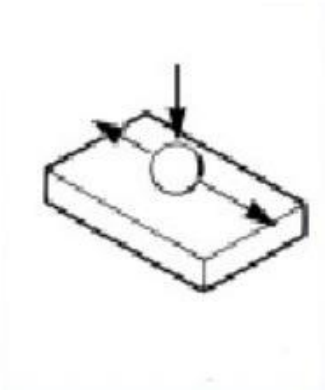


Slika 20: Rezultat testa 4 kuglice, [8]

Iz prikazanog rezultata testa vidi se da se opteretivost nekog tehničkog sustava može značajno povećati određenim termokemijskim obradama, kojima se na površini metala stvaraju slojevi daleko otporniji nego spontano nastali oksidni slojevi. U tehničkoj praksi nitriranje se pokazalo kao vrlo efikasan način zaštite metalnih površina od adhezijskog trošenja. Ta velika sposobnost opteretivosti nitriranih čeličnih površina u kliznom kontaktu objašnjena je zaštitnim djelovanjem nitriranog sloja koji sprječava direktan kontakt metal – metal.

b) Klizno trošenje BALL ON FLAT (ASTM G 133)

Za ovo ispitivanje možemo uptrijebiti isti uređaj kao i za ispitivanje metodom 4 kuglice, slika 19. Skica testa prikazana je slikom 21.



Slika 21: Skica testa BALL ON FLAT, [8]

Karakteristike ispitivanja dane su u tablici 3.

Tablica 3: Karakteristike ispitivanja 4 kuglice [8]

Svrha ispitivanja	Određivanje iznosa trošenja i koeficijenta trenja kod malog opterećenja i male brzine te na malim uzorcima
Uzorci	Kuglica (promjera 9,525 mm) ili valjčić u kontaktu s ravnom pločom
Uvjeti ispitivanja	Frekvencija klizanja: 5 ili 10 Hz - Put: 10 mm - Opterećenje: 25 ili 200 N - Temperatura: sobna ili 150°C - Trajanje: 16 min 40 s ili 30 min 20 s - Uzorak može biti suh ili uronjen u mazivo
Mjerenje	- Gubitak mase ploče. - Smanjenje promjera kuglice - Profil traga trošenja - Analiza kuglice u području trošenja - Sila trenja
Vrsta trošenja	Blago adhezijsko trošenje pogodno za ispitivanje triboloških prevlaka.

c) PIN ON DISC (ASTM G99)

Slika 22 prikazuje uređaj za ispitivanje PIN ON DISC.

Slika 22: Prikaz uređaja za ispitivanje pin on disc, [8]

Karakteristike ispitivanja dane su u tablici 4.

Tablica 4: Karakteristike ispitivanja pin on disc, [8]

Svrha ispitivanja	Određivanje iznosa kliznog trošenja i koeficijenta trenja
Uzorci	Kuglica (promjera 9,525 mm) ili valjčić u kontaktu s rotirajućim diskom.
Uvjeti ispitivanja	- Nije posebno specificirano (dan je prijedlog mogućih uvjeta) - Brzina klizanja: 0,1 m/s - Opterećenje: 10 N - Put: 1 km - Temperatura: 23° C - Relativna vlažnost: 50%
Mjerenje	- Smanjenje duljine valjčića - Profil traga trošenja - Analiza kuglice u području trošenja - Sila trenja
Vrsta trošenja	Blago i grubo adhezijsko trošenje pogodno za ispitivanje triboloških prevlaka

d) BLOC - ON - RING (ASTM G77)

Slika 23 prikazuje uređaj za ispitivanje BLOC ON RING.

Slika 23: Prikaz uređaja za ispitivanje bloc on ring, [8]

Karakteristike ispitivanja dane su u tablici 5.

Tablica 5: Karakteristike ispitivanja bloc on ring, [8]

Svrha ispitivanja	Određivanje iznosa adhezijskog trošenja materijala
Uzorci	Rotirajući čelični prsten (promjer 35 mm, širina 8,7 mm) u kontaktu s stacionarnom prizmom (6,35×10,2×15,8 mm)
Uvjeti ispitivanja	Nije posebno specificirano (dan je prijedlog mogućih uvjeta) - Brzina rotacije prstena: 180 okr/min - Opterećenje: 134 N - Vrijeme: 30 min - Uzorak može biti suh ili uronjen u ulje ili neku drugu tekućinu
Mjerenje	- Gubitak mase ispitne prizme - Širina traga trošenja - Gubitak mase prstena - Sila trenja - Izdržljivost mazivog filma
Vrsta trošenja	Blago adhezijsko trošenje pogodno za ispitivanje triboloških prevlaka

e) BLOC - ON - PIN (Pin on Vee Block, FALEX)

Slika 24 prikazuje uređaj za ispitivanje BLOC ON PIN.

Slika 24: Prikaz uređaja za ispitivanje bloc on pin, [8]

Karakteristike ispitivanja dane su u tablici 6.

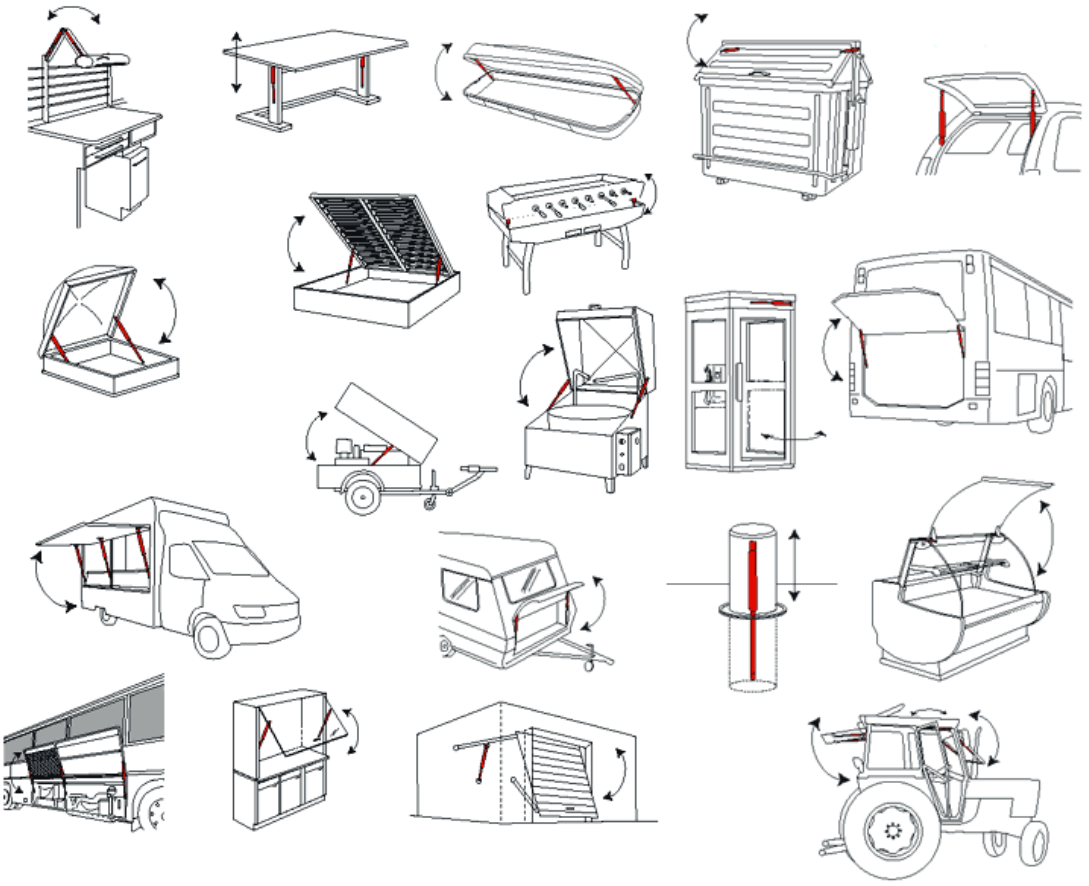
Tablica 6: Karakteristike ispitivanja bloc on pin, [8]

Svrha ispitivanja	Određivanje iznosa trošenja, izdržljivost i koeficijent trenja kliznog kontakta
Uzorci	Cilindrična osovina promjera 6,35 mm rotira između dva stacionarna V-bloka u četverolinijskom kontaktu.
Uvjeti ispitivanja	- Brzina rotacije osovine: 290 okr/min - Brzina klizanja: 0,1 m/s - Opterećenje (konst. ili rastuće): 89-20000 N Uzorak može biti suh ili uronjen u ulje ili neku drugu tekućinu
Mjerenje	- Gubitak mase ispitne prizme - Širina traga trošenja - Gubitak mase prstena - Sila trenja - Izdržljivost mazivog filma
Vrsta trošenja	Blago i grubo adhezijsko trošenje, trošenje uz podmazivanje.

3. PLINSKI AMORTIZERI (OPRUGE)

Plinski amortizeri se mogu koristiti u svim slučajevima gdje se određeni pomični element neke konstrukcije, koji ima svoju težinu, mora pomaknuti, podignuti, spustiti, povući ili pozicionirati u određeni položaj. Za razliku od klasičnih mehaničkih opruga, plinski amortizeri pružaju mogućnost kontrole brzine prigušenja, različitu brzinu prigušenja na kraju hoda pomičnog elementa, jednostavniju ugradnju, kompaktne dimenzije, te široki raspon dostupnih veličina radnih sila (max 1300N) i hodova. Sila, hod, prigušenje i način pričvršćenja mogu se prilično slobodno kombinirati i prilagoditi točno određenom slučaju primjene, kao što je prikazano slikama 25 i 26.

Slika 25: Plinski amortizer (opruga), [9]



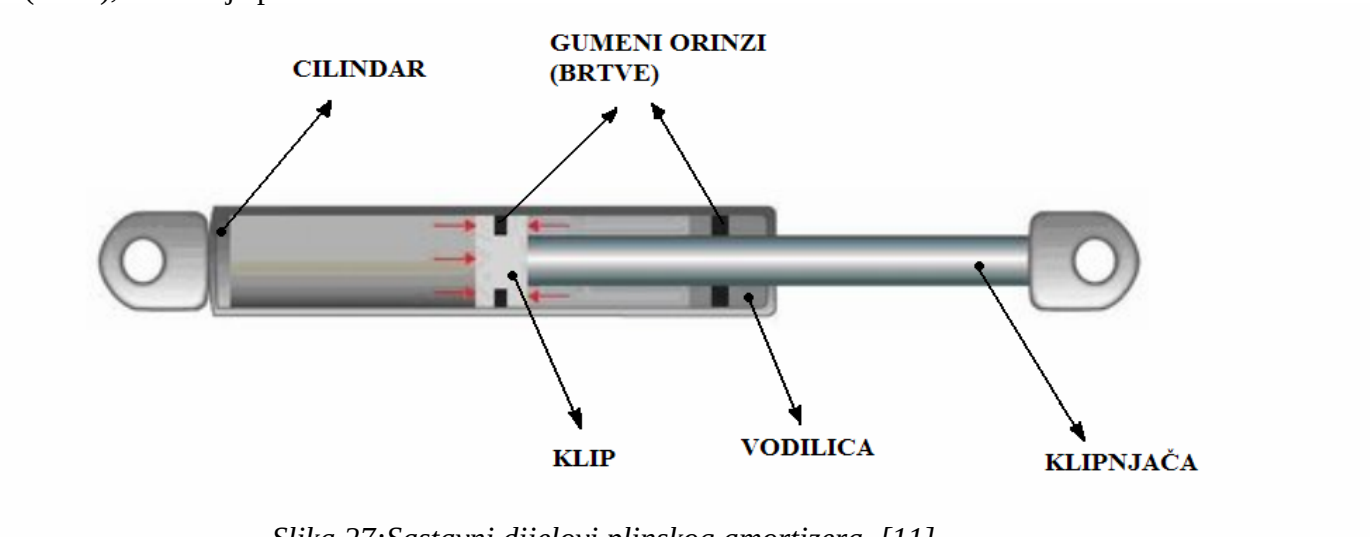
Slika 26: Primjena plinskog amortizera (opruge), [10]

3.1. OPIS RADA PLINSKOG AMORTIZERA

Objašnjenje rada plinskog amortizera je pojednostavljeno i uglavnom se sve bazira na idealnom modelu plinskog amortizera (opruge).

3.1.1. Sastavni dijelovi

Sastavni dijelovi plinskog amortizera su cilindar, klip, klipnjača, vodilica te gumeni orinzi (brtve), kao što je prikazano na slici 27.



Slika 27:Sastavni dijelovi plinskog amortizera, [11]

Cilindar plinskog amortizera je napunjen komprimiranim dušikom i hidrauličnim uljem. Rad plinskog amortizera se bazira na potencionalnoj energiji komprimiranog dušika. Hidraulično ulje je tu primarno iz razloga samopodmazivanja amortizera. Osim toga služi i za smanjenje brzine hoda klipa pri kraju ekspanzije, odnosno kao dodatni prigušivač za izbjegavanje neugodnog udaranja klipa u vodilicu, jer bi se taj udarac prenosio i na samu konstrukciju na kojoj plinski amortizer radi.

3.1.2. Osnovni princip rada

Plinski amortizeri, s obzirom na način rada, mogu biti izvedeni kao:

a) TLAČNI

b) VLAČNI

c) TLAČNI S EFEKTOM BLOKIRANJA
(mogućnost blokiranja klipnjače u traženom trenutku ekspanzije)

Klipnjača, na koju djeluje vanjska sila **F** poprečnog presjeka $\mathbf{A_K}$ je teleskopski umetnuta u cilindar poprečnog presjeka $\mathbf{A_C}$, kao što je prikazano na slici 29. Klip ima ugrađenu sapnicu

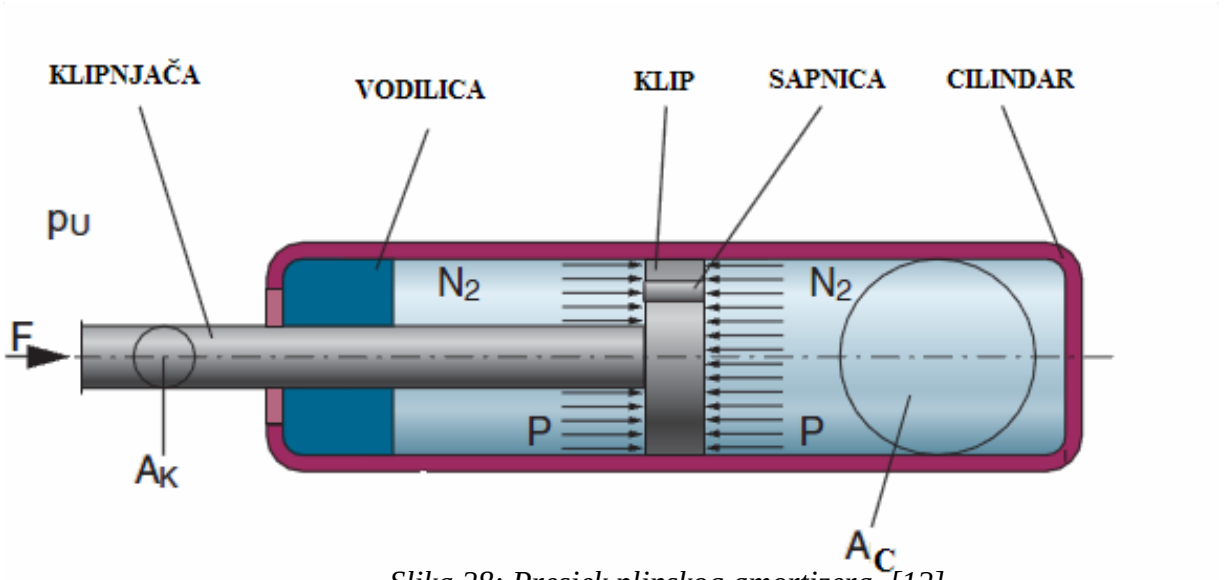
kojom je osiguran jednaki tlak **p** na obje strane klipa. Prema tome, zbroj sila koje djeluju na obje strane klipa, u bilo kojem položaju klipnjače, jednak je:

$$F + p \cdot (A_C - A_K) - p \cdot A_C = 0$$

iz toga se, nakon sređivanja dobiva radna (nominalna) sila plinskog amortizera, kao produkt unutarnjeg tlaka i poprečnog presjeka klipnjače:

$$F = p \cdot A_K$$

Ova radna sila dobivena je na idealnom modelu plinskog amortizera, koji je prikazan na slici 28 i ona ne vrijedi u realnim uvjetima, iz razloga što je matematički opis rada plinskog amortizera maksimalno pojednostavljen, ne uzimajući u obzir utjecaj trenja, protoka, viskoznosti, temperature i drugih utjecajnih faktora. Kad bi se uzelo u obzir sve utjecajne faktore izračun bi bio daleko kompliciraniji.



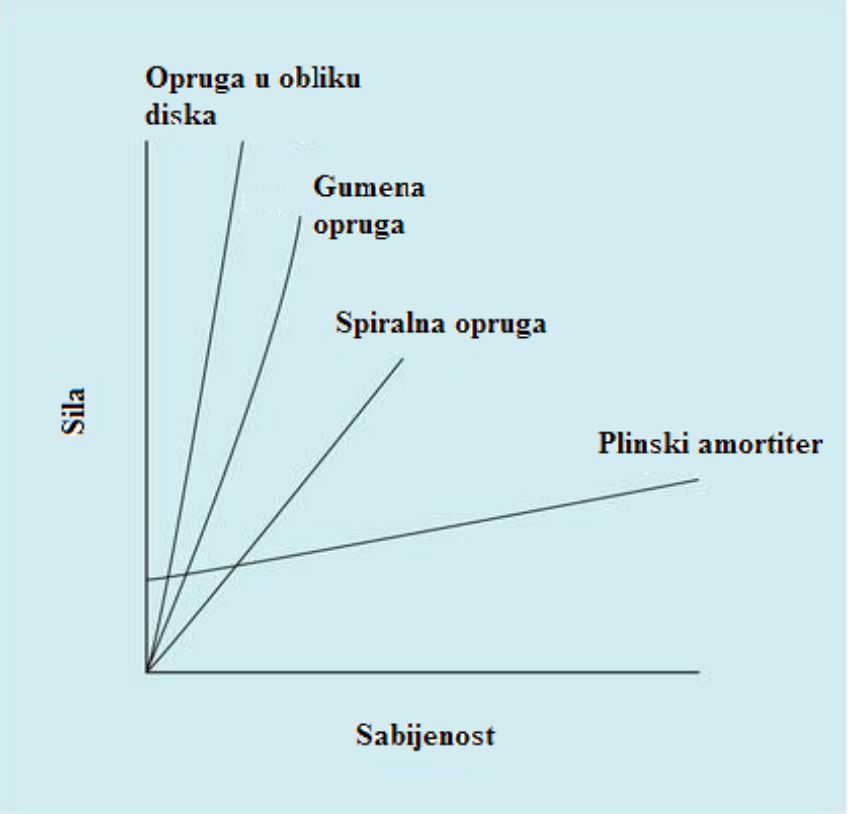
Slika 28: Presjek plinskog amortizera, [12]

3.2. RADNA SILA PLINSKOG AMORTIZERA

Kod svake radnje koja uključuje podizanje ili spuštanje, npr. otvaranje vrata neke konstrukcije, prisutna je masa u gibanju koja ima svoju kinetičku energiju. Ako se tom kinetičkom energijom ne upravlja na pravilan način, ona predstavlja opasnost, kako za čovjeka tako i za samu konstrukciju. Radnu silu, koju nam daje na raspolaganje plinski amortizer, koristimo za upravljanje tom kinetičkom energijom mase u gibanju.

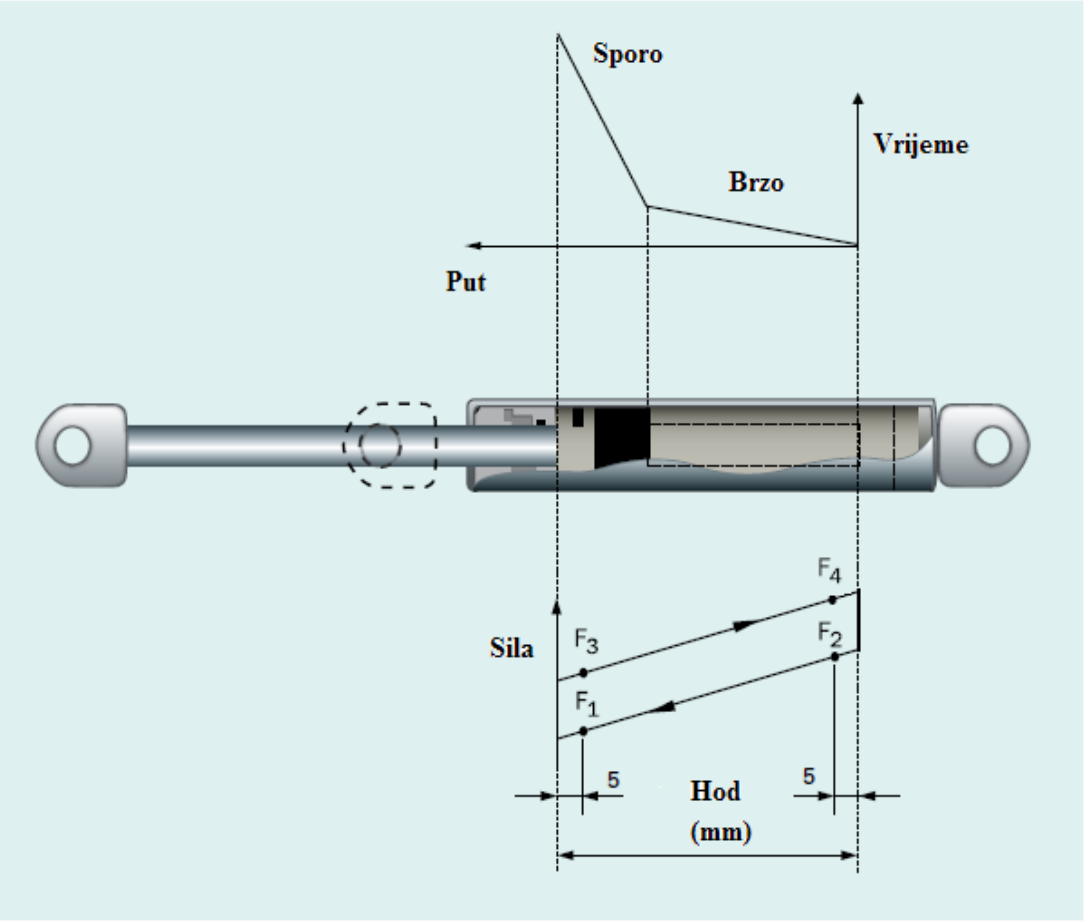
3.2.1. Karakteristika sile plinskog amortizera

Prema dijagramu na slici 29, vidi se da plinski amortizer, za razliku od klasičnih opruga, ima u nesabijenom, početnom položaju, određenu nominalnu silu i znatno položeniju karakteristiku sile. To znači da je mala razlika u veličini sile između početnog nesabijenog i krajnjeg sabijenog položaja klipnjače plinskog amortizera, čime imamo veću kontrolu radne sile tokom cijelog hoda amortizera. Uglavnom, kako se sabijanjem amortizera, klipnjača uvlači u cilindar, volumen u cilindru se smanjuje i pritisak se povećava, što rezultira povećanjem radne sile. Kod standardnih izvedbi plinskih amortizera to povećanje radne sile ne prelazi 30% u krajnjem sabijenom položaju amortizera. Položenija karakteristika sile znači i uglađeniji rad plinskog amortizera u odnosu na klasične opruge. To se najbolje očituje kada se plinski amortizer koristi na primjer za otvaranje vrata nekog automobila, gdje nam ta mala razlika u povećanju sile osigurava da se vrata otvaraju gotovo jednakom brzinom od početnog do krajnjeg položaja otvaranja, što bi bilo nemoguće postići kada bi se koristile klasične opruge. Naravno treba imati na umu da je dijagram na slici 29 idealiziran.



Slika 29: Dijagram karakteristike sile, [13]

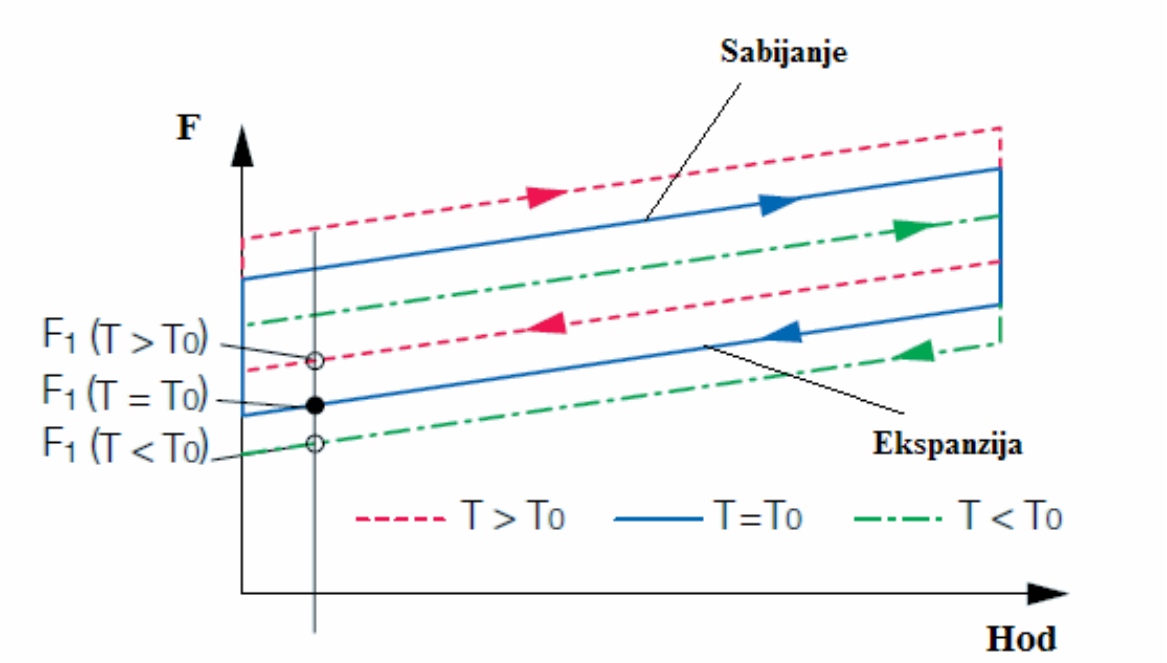
Dijagram na slici 30 prikazuje, na pojednostavljeni način, vrijednosti sile F_3, F_4, F_2 i F_1 u točkama hoda, kad je amortizer potpuno sabijen i razvučen. Sila F_1 predstavlja silu u trenutku kad je klipnjača plinskog amortizera krajnje izvučena. Inače, kada se govori o radnoj (nominalnoj) sili plinskog amortizera onda se misli na silu F_1. Razlika između parova sila F_1 / F_3 i para sila F_4 / F_2 varira u ovisnosti o iznosu trenja.



Slika 30: Dijagram sila-hod, [13]

3.2.2. Utjecaj temperature na iznos radne sile plinskog amortizera

Vrijednost radne (nominalne) sile F_1 odnosi se na izmjerenu vrijednost pri temperaturi od $T_0 = 20°C$ **(293K)**. Na toj temperaturi se i vrši punjenje amortizera dušikom. Treba znati da se sa promjenom temperature okoline, tijekom eksploatacije, mijenja i nominalna sila plinskog amortizera, u ovisnosti o promjeni tlaka u cilindru. Vrijednost nominalne sile amortizera približno raste ili pada za 3.5% za svakih 10°C, u ovisnosti o tome dali temperatura okoline raste ili pada. Predviđena temperatura okoline na kojoj plinski amortizer još uvijek zadržava svoju funkciju kreće se u rasponu od -30°C (243K) pa sve do + 80°C (353K). Karakteristika sile amortizera pri temperaturama $T = T_0$, $T > T_0$ i $T < T_0$ je prikazana u dijagramu na slici 31.



Slika 31: Dijagram utjecaja temperature okoline na silu amortizera, [12]

3.3. MEHANIZMI DOTRAJAVANJA PLINSKOG AMORTIZERA

Životni vijek plinskog amortizera ovisi o više faktora ali uglavnom ovisi o prirodi konstrukcije na kojoj se koristi. Plinski amortizeri su konstruirani tako da im maksimalni gubitak sile iznosi približno 10% nakon 40 000 ciklusa potpunog sabijanja i otpuštanja amortizera, pri taktu od maksimalno pet ciklusa po minuti te pri sobnoj temperaturi od 20°C (293K) i pri idealnom načinu ugradnje. Pod pojmom "idealni način ugradnje" misli se na sljedeće:

a) Svi učvrščivaći i zglobovi amortizera moraju biti u mogućnosti izdržati barem dvostruku silu od nazivne sile amortizera.
b) Pričvrsni elementi ne smiju biti napregnuti.
c) Amortizer smije biti opterećen samo aksijalno. Ne smije biti opterećen bočnim silama.
d) Klipnjača, kod potpune sabijenosti amortizera, ne smije nikada potpuno biti uvučena u cilindar. Minimalno 5mm klipnjača mora ostati van cilindra.
e) Amortizer mora biti postavljen u vertikalnom položaju, tako da je klipnjača usmjerena prema dolje.

Isto tako svaki plinski amortizer ima i svoj životni vijek skladištenja na polici, koji uglavnom ovisi o svojstvima starenja materijala gumenih oringa (brtvila).

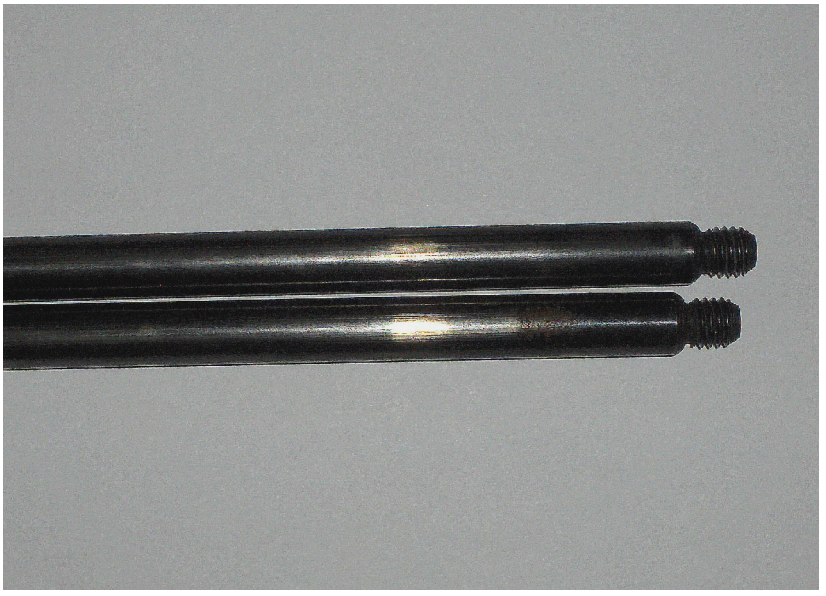
Kao što je već navedeno više faktora utječe na životni vijek plinskog amortizera u eksploataciji. Vanjski faktori kao što je učestala promjena temperature okoline i drugi fizikalni utjecaji, uglavnom najviše traga ostave na gumenim orinzima (brtvilima). To su najosjetljiviji dijelovi amortizera, koji promjenom temperature imaju znatniju tendenciju promjeni volumena od ostalih dijelova amortizera, što u konačnici rezultira ubrzanjem procesa gubitka radne sile uzrokovano curenjem plina. Sljedeći utjecajni faktor, koji igra veliku ulogu, je način ugradnje amortizera. Ako je plinski amortizer ugrađen tako da mu je tijekom rada klipnjača usmjerena prema dolje gumeni orinzi i sama klipnjača će imati pravilnije samopodmazivanje. U tom položaju tokom rada omogućeno je i lakše samoćišćenje klipnjače i oringa od prašine i drugih čestica. To će u konačnici minimalizirati trošenje klipnjače i oringa a samim time i curenje plina. Plinski amortizer će isto tako dulje trajati ako u toku rada nije podvrgnut vibracijama i djelovanju bočnih sila. I sama konstrukcija amortizera igra veliku ulogu, pa se tako od konstruktora traži da izabere amortizer sa što većim volumenom cilindra koji može dobiti od proizvođača za traženu silu.

Iz svega dosad navedenog jasno je da plinski amortizer gubi svoju funkciju kad dođe do curenja plina iz cilindra. Do curenja plina iz cilindra može doći na dva načina. Prvi način je ako dođe do oštećenja ili trošenja gumenih oringa (brtvila), čime amortizer, u toku sabijanja klipnjače, nema pravilno brtvljenje. Drugi način je mehaničko oštećenje samog cilindra, koje se obično javlja prilikom nepravilnog rukovanja i koje dovodi do curenja plina

Glavni razlog nepravilnog brtvljenja, oštećenja ili prevelikog trošenja gumenih oringa leži u stanju površine klipnjače. Površina klipnjače mora biti čista od abrazivnih čestica i glatka, jer u suprotnom klipnjača može poderati gumeni oring. Isto tako površina klipnjače na sebi ne smije imati mehanička oštećenja jer to dovodi do nepravilnog brtvljenja, a samim time i do bržeg trošenja gumenog oringa. Na slici 32 prikazan je primjer mehaničkog oštećenja klipnjače uzrokovanog nepravilnim rukovanjem plinskim amortizerom.

Slika 32: Primjer mehaničkog oštećenja klipnjače

Na slici 33 prikazan je primjer istrošenosti klipnjače uzrokovane uslijed djelovanja adhezijskog trošenja.



Slika 33: Primjer istrošenosti klipnjače

Iz svega navedenog slijedi, da je problem u tome na koji način će se dovesti površina čelika Č1531.5 u takovo stanje da površina klipnjače bude glatka, otporna na adhezijske mehanizme trošenja i odgovarajuće tvrdoće, kako bi se osiguralo pravilno brtvljenje i neometan rad amortizera uz istodobno zadržavanje prihvatljivog životnog vijeka samog plinskog amortizera.

Jedno od rješenja problema jest da čelik Č1531.5 podvrgnemo odgovarajućim postupcima toplinsko kemijske obrade i na taj način napravimo odgovarajuću modifikaciju površinskog sloja.

Smanjenje trenja i trošenja putem modifikacije površina trenutno je jedno od glavnih pravaca triboloških istraživanja u svijetu. Tehnologije modifikacije površina intenzivno se razvijaju, a njihovo vrednovanje i racionalna primjena nemogući su bez poznavanja kemijskih, strukturnih i triboloških karakteristika površinskih slojeva.

4. TOPLINSKO KEMIJSKA OBRADA

Toplinsko kemijska obrada je takva obrada pri kojoj se toplinskim i kemijskim djelovanjem mijenjaju kemijski sastav i struktura materijala, a time i poboljšavaju neka uporabna svojstva, najčešće otpornost prema trošenju. Toplinsko kemijska obrada predstavlja proces zagrijavanja čelika do određene temperature u krutoj, tekućoj ili plinovitoj sredini, pri čemu dolazi do obogaćivanja površinskog sloja elementima kao što su C, N, Al, Si, Cr, B i dr., uglavnom putem difuzije njihovih atoma.

Toplinsko kemijski postupci mogu se podijeliti na:

a) difuzijske postupke

b) toplinske postupke prevlačenja

U nastavku rada će se ukratko nešto reći o toplinskim postupcima prevlačenja, a zatim će se ukratko obraditi samo difuzijski postupci toplinsko kemijske obrade koji će se kasnije primijeniti u eksperimentalnom istraživanju.

4.1. TOPLINSKI POSTUPCI PREVLAČENJA

Kod prevlačenja se primjenjuju različiti postupci koji se prema temeljnom mehanizmu (toplinski, mehanički, kemijski ili u kombinaciji) mogu podijeliti u sljedeće skupine:

- Toplinska prevlačenja
- Mehanička prevlačenja
- Toplinsko mehaničko prevlačenje
- Kemijsko prevlačenje
- Elektrokemijsko prevlačenje (galvanizacija)
- Prevlačenje u parnoj fazi

Neki strojni dijelovi, najčešće alati, se nakon toplinske obrade kaljenja i popuštanja te završne strojne obrade toplinski prevlače tankim, ali vrlo tvrdim slojevima u svrhu povišenja otpornosti na trošenje a time i produljenja njihove trajnosti, [14]. Prevlake najčešće čine slojevi oksidnih keramičkih spojeva (Al_2O_3), neoksidni keramički spojevi (TiC, TiN, TiCN), a u najnovije vrijeme i slojevi dijamanta. Površinski sloj nastaje kristaliziranjem dodatnog materijala,

primjenom topline za rastaljivanje, na površini osnovnog metalnog materijala koji se obrađuje. Na taj način se nanose metalni slojevi postupcima navarivanja i postupcima uranjanja u rastaljeni metal. Navarivanje se provodi u cilju povećanja otpornosti strojnog dijela na trošenje kao i za povećanje otpornosti prema kemijskom utjecaju. Obično su to deblji slojevi, širokog polja tolerancija dimenzija i koji se nakon istrošenja daju regeneracijom obnoviti. Tijekom postupka navarivanja, dio materijala podloge se tali i miješa zajedno s materijalom prevlake, te se postiže dobro vezivanje prevlake i podloge. Uranjanje u rastaljeni metal primjenjuje se uglavnom za povećanje otpornosti prema koroziji i kemijskom djelovanju.

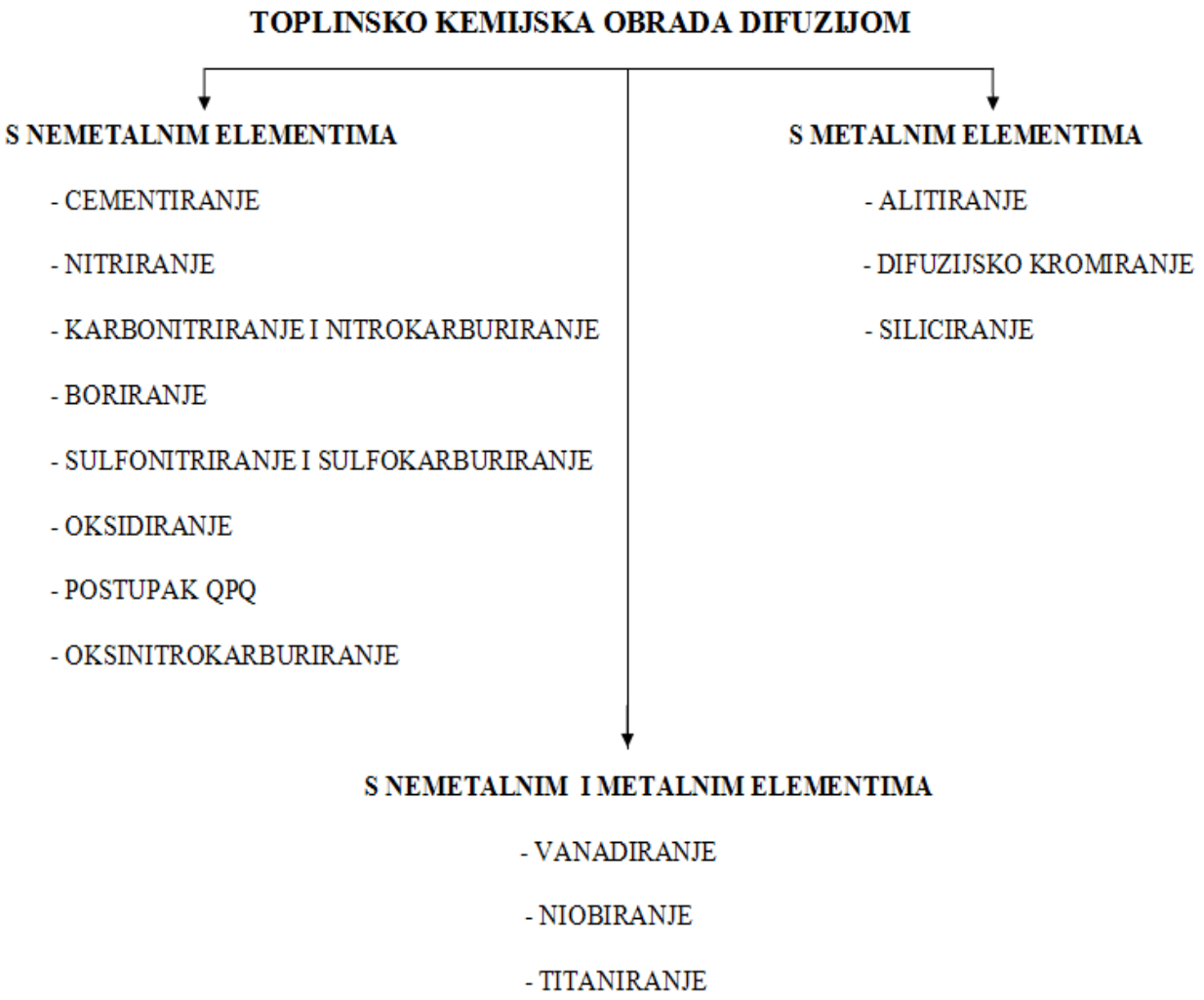
Postoje još i postupci kemijskog prevlačenja iz parne faze, tzv. CVD – postupci, koji se izvode pri temperaturama od oko 900°C (1173K) i primjenjuju se najčešće za sinterirane tvrde metale. Budući da je prethodno sinteriranje provedeno pri višim temperaturama, pri postupku CVD ne nastaju promjene mikrostrukture i dimenzija. Prevlačenje alatnih čelika po ovom postupku povezano je s tehnološkim poteškoćama koje su vezane uz potrebu naknadnog kaljenja osnovnog materijala ispod prevlake, pri čemu se dešavaju promjene dimenzija a nužna je i primjena vakuumskih peći.

Postupci fizikalnog prevlačenja iz parne faze, tzv. PVD – postupci izvode se pri temperaturama od oko 500°C (773K), što omogućuje prevlačenje alata koji su izrađeni od brzoreznih čelika i alatnih čelika za topli rad koji su prethodno kaljeni i popušteni (iznad 500 °C) te obrađeni na konačne dimenzije. Alati za obradbu metala rezanjem (glodala, svrdla,..) alati za oblikovanje deformacijom (trnovi, matrice,...), alati za tlačno lijevanje metala (cilindri, kokile,...) kao i alati za oblikovanje polimernih proizvoda (napose s abrazivnim punilima) najčešći su primjeri primjene postupaka prevlačenja tribološkim slojevima.

4.2. DIFUZIJSKI POSTUPCI

U ovu podskupinu spadaju postupci u kojima se, osim unošenja toplinske energije, unošenjem drugih kemijskih elemenata mijenja kemijski sastav a time i mikrostruktura i svojstva površinskih slojeva. Kod difuzijskih postupaka, pri toplinsko kemijskoj obradi atomi supstancije sadržane u okolini pri visokim temperaturama difundiraju kroz granični sloj u površinu osnovnog materijala obratka. Površina obratka i nakon toplinsko kemijske obrade ima visok sadržaj osnovnog materijala dok sadržaj difundirane supstancije brzo opada od vanjske površine k unutrašnjosti komada.

U ovisnosti o elementu koji difundira u površinski sloj, razlikujemo više procesa toplinsko kemijskih obrada, kako je prikazano na slici 34.



Slika 34: Podjela toplinsko kemijskih postupaka

Nemetalni se elementi mehanizmom difuzije unose u površinski sloj metalnog materijala. U industriji strojogradnje često se primjenjuju postupci pougljičavanja, nitriranja te kombinirani postupci istovremene difuzije ugljika i dušika (karbonitriranje i nitrokarburiranje) kao i varijante sa sumporom ili s kisikom. Postupci se obično nazivaju prema vrsti nemetalnog elementa koji difundira u površinski sloj. Obrađeni čelični strojni dijelovi imaju veliku otpornost na mehanizme trošenja te visoku tvrdoću površinskih slojeva. Nekim postupcima moguće je postići i otpornost na udarna opterećenja jezgre strojnog dijela, a da pritom površinski slojevi zadrže visoku tvrdoću.

Metalni elementi pri povišenim temperaturama reagiraju sa željezom iz željeznih legura (čelici, lijevovi) čime nastaju intermetalni spojevi. Sredstva koja sadržavaju takve metalne elemente rastopljena su na povišenim temperaturama te se tako dobivaju rastaljene metalne kupke. Čelični

strojni dijelovi uranjaju se u rastaljenu metalnu kupku i drže toliko vremena dok se ne postigne željena debljina novonastalog površinskog sloja intermetalnog spoja. Temperatura metalne kupke jest znatno ispod temperature tališta čeličnih strojnih dijelova. Postupci se obično nazivaju prema metalu koji sa željezom stvara intermetalne spojeve. Obrađeni čelični strojni dijelovi imaju veliku otprnost na oksidaciju pri povišenim temperaturama.

Difuzijom metalnih i nemetalnih elemenata pri visokim temperaturama nastaju jaki karbidotvorci koji se na površini čelika spajaju s ugljikom iz čelika pri čemu nastaju vrlo tvrdi specijalni karbidi, koji su otporni prema trošenju. Postupci se obično nazivaju prema vrsti karbidotvornog elementa.

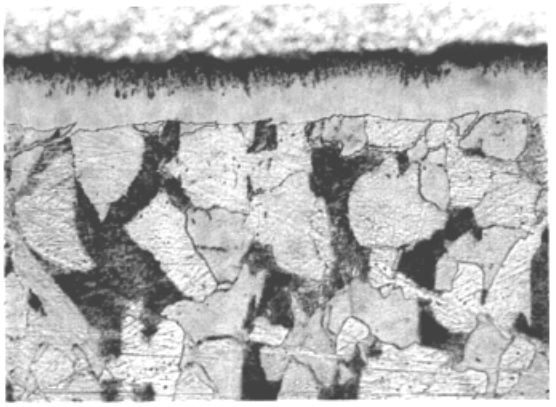
4.2.1. Nitriranje

Nitriranje je difuziono zasićenje površine čelika dušikom u plinovitoj, tekućoj ili ioniziranoj plinskoj atmosferi, pri čemu se stvara površinski sloj, koji sadrži tvrde nitride legirajućih elemenata, koji je otporan na adhezijsko trošenje. Proces se provodi na temperaturama između 500 - 600°C (773 – 873K) u trajanju od nekoliko sati. Ispod sloja nitrida dušik je dijelom otopljen u osnovnom materijalu što također doprinosi povišenju tvrdoće. Pri nitriranju nema strukturnih pretvorbi, pa su i zaostale napetosti i deformacije manje u usporedbi s drugim postupcima.

Postupci nitriranja danas su u širokoj primjeni. Postoji veliki broj postupaka i tehnologija u solnim kupkama, plinskim i ioniziranim atmosferama. U površinskom sloju čelika postiže se relativno tanka “zona spojeva” nitrida odnosno karbonitrida tipa Fe_4N (γ') ili $Fe_{2-3}N$ (ε) koja daje visoku otpornost površine prema adhezijskom mehanizmu trošenja. Ispod zone spojeva je difuzijska zona u kojoj je dušik otopljen u osnovnom materijalu što doprinosi povećanju otpornosti na mehanizam umora površine. Budući da se postupci provode pri temperaturama do oko 580°C (853K) , promjene dimenzija su relativno male, što omogućava izradbu dijelova s uskim tolerancijama dimenzija pri čemu je nitriranje završna obradba.

Novije tehnologije nitriranja primjenjuju nove senzore za kontrolu plinske atmosfere i mikroprocesorske postupke upravljanja koji se temelje na matematičkim modelima za opis procesa .

Nitrirani sloj, slika 35, ima osim visoke otpornosti prema adhezijskom mehanizmu trošenja i povećanu otpornost prema koroziji. U primjeni su najčešće postupci dodatne obradbe u solnim kupkama (QPQ) i u plinskim atmosferama (EPILOX). Nitriranje ima primjenu kod dijelova kompliciranog oblika zbog izbjegavanja deformacija, a od kojih se očekuje veća otpornost na trošenje i koroziju. Tvrdoća površinskog sloja može postići vrijednosti između 700 HV (nelegirani čelici) i 1200 HV (legirani čelici).



Slika 35: Nitrirani sloj, [14]

4.2.1.1. Nitriranje u plinskoj atmosferi

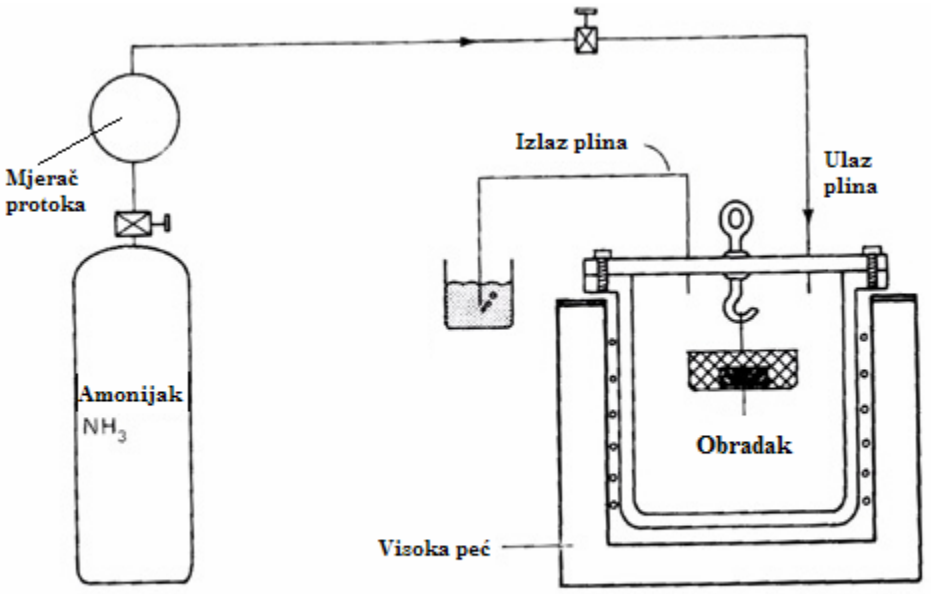
Tijekom plinskog nitriranja površina metala reagira s atmosferom koja sadrži dušik N_2 dobiven iz amonijaka (NH_3), na temperaturi 500 - 600 °C (773 – 873K) . Sastav atmosfere je mješavina plinova sastava: NH_3+N_2

Dušik difundira u površinske slojeve čelika i s odgovarajućim legirajućim elementima stvara nitride. Strojne dijelove namijenjene za nitriranje potrebno je prethodno površinski i toplinski obraditi (kaljenjem i popuštanjem). Tako obrađeni dijelovi stavljaju se u hermetički zatvorene komorne električne peći, u koje se dovodi amonijak iz boce. Plinski se nitriraju dijelovi automobilskih i avionskih motora, uglavnom osovinice klipova, koljenasta vratila, dijelovi vodene pumpe i pumpe za gorivo. Sadržaj ugljika kod čelika za nitriranje se kreće od 0.3 do 0.4%. Da bi se na površini stvorio sloj sa tvrdim nitridima, čelici za nitriranje legiraju se elementima koji stvaraju tvrde nitride. Najčešće se koristi kombinacija Al, V, Cr kao i Mo.

Povećavanjem temperature procesa raste dubina difuzije dušika, ali opada tvrdoća nitriranog sloja. Proces nitriranja traje između 24 – 60 sati.

U cilju smanjenja vremena trajanja procesa, nitriranje se izvodi u dva stupnja. Prvi stupanj na temperaturi 500 – 520°C (773 – 793K) u trajanju od 10 – 15 sati i ima za cilj dobivanje visoke tvrdoće 1200 HV. Drugi stupanj je zagrijavanje na 550 – 600°C (823 – 873K) u trajanju 10 – 20 sati, sa ciljem povećavanja dubine bez smanjenja tvrdoće u površinskom sloju formirane u prvom stupnju. Dubina nitriranog sloja je najčešće u granicama 0,3–0,6 mm.

Poslije nitriranja nije potrebna nikakva naknadna toplinska obrada. Nitrirane površine su čiste i nije potrebna dodatna strojna obrada. Slika 36 prikazuje proces nitriranja u plinskoj atmosferi.



Slika 36: Proces nitriranja u plinskoj atmosferi , [16]

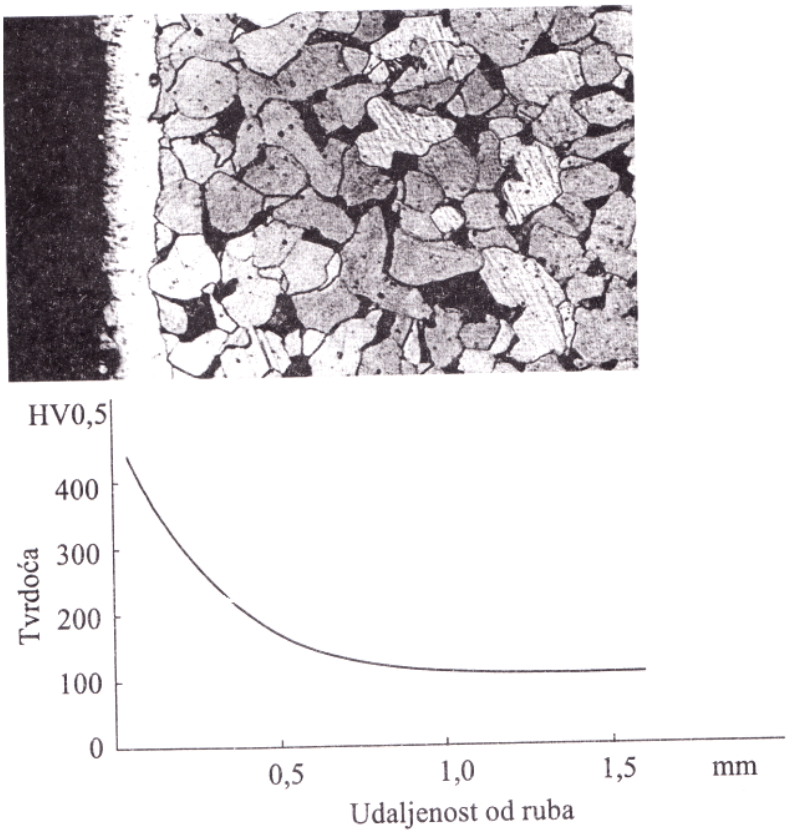
Površine koje treba zaštiti od nitriranja, odnosno dijelovi radnog komada za koje ne želimo da budu nitrirani, prethodno treba prevući slojem kositra ili ih elektrolitčki poniklati. Istina, kositar se topi na temperaturi nitriranja, ali kao zaštita ipak ostaje tanak kositreni film.

4.2.1.2. Nitriranje u kupci (tekućoj sredini)

Postupak je poznat pod imenom Tenifer postupak i provodi se u smjesi rastopljenih cijanida (NaCN) i kristalne soli (Na_2CO_3) pri temperaturi oko 560°C (833K). Iz ove smjese izdvajaju se atomi N i C, a u površinske slojeve čelika difundira uglavnom dušik, jer je za difuziju ugljika potrebna viša temperatura oko 950°C (1223K).

Otpornost na trošenje nitriranih alata za obradu rezanjem povećava se ne samo zbog porasta tvrdoće već i zbog smanjenja koeficijenta trenja. Zato se u kupci nitriraju uglavnom alati kao što su nareznice, glodala i sl. Budući da se češće zahtjevaju tanji slojevi (0.05 mm), proces tada ne traje duže od 30 minuta.

Tvrdoća nitriranog sloja kod ugljičnih čelika dostiže vrijednost 300 – 350 HV, a kod legiranih čelika 600 – 1100 HV. Nitriranjem u tekućoj sredini ne dolazi do promjena dimenzija strojnih dijelova, kao ni do pojave deformacija. Pored ovog načina nitriranja u industriji se koriste i drugi patentirani postupci nitriranja u tekućoj sredini. Na slici 37 prikazana je mikrostruktura i raspored tvrdoće poprečnog presjeka nitriranog čeličnog predmeta.



Slika 37: mikrostruktura i raspored tvrdoće poprečnog presjeka nitriranog čelika [14]

4.2.1.3. Nitriranje u ioniziranoj plinskoj (plazma) atmosferi

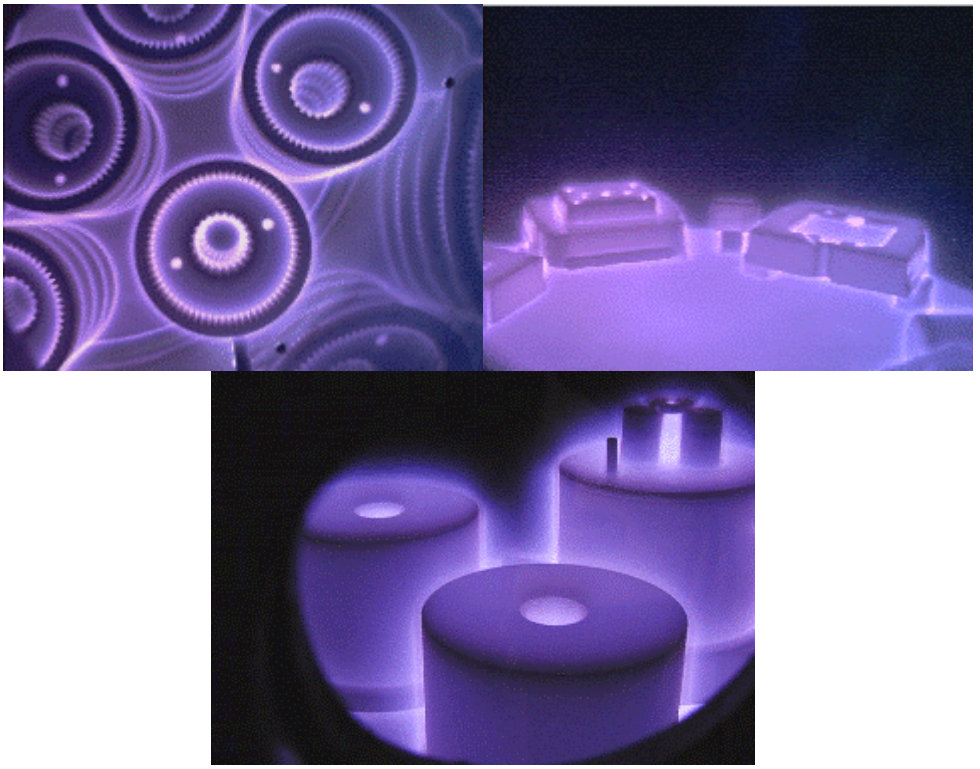
Ovaj postupak nitriranja ima najširu primjenu i daje najbolja svojstva površinskog sloja. Postupak se provodi u komori koja sadrži plinove NH_3 i N_2, strojni dio koji se nitrira veže se za negativan pol izvora struje (katodu), a zid komore za pozitivan pol (anodu). Pozitivni ioni plina "bombardiraju" komad (katodu) i zagrijavaju ga do potrebne temperature. Sam proces se odvija u tri faze:

- u prvoj nastaje čišćenje površine,
- u drugoj difuzija atoma dušika,
- u trećoj hlađenje strojnih dijelova u vakuumu

Na površini obratka nalazi se sloj nitrida koje dušik tvori sa prisutnim elementima (Al, Cr, Mo, V), a difundirani sloj predstavlja čvrsta otopina dušika u α-Fe .

Cjelokupan proces ionskog nitriranja traje l – 24 sata. Nakon ionskog nitriranja, površine strojnih dijelova su čiste i nije potrebna nikakva naknadna strojna ili toplinska obrada. Ionskim nitriranjem mogu se obrađivati čelici i ljevano željezo. Nelegirani čelici i ljevano željezo imaju

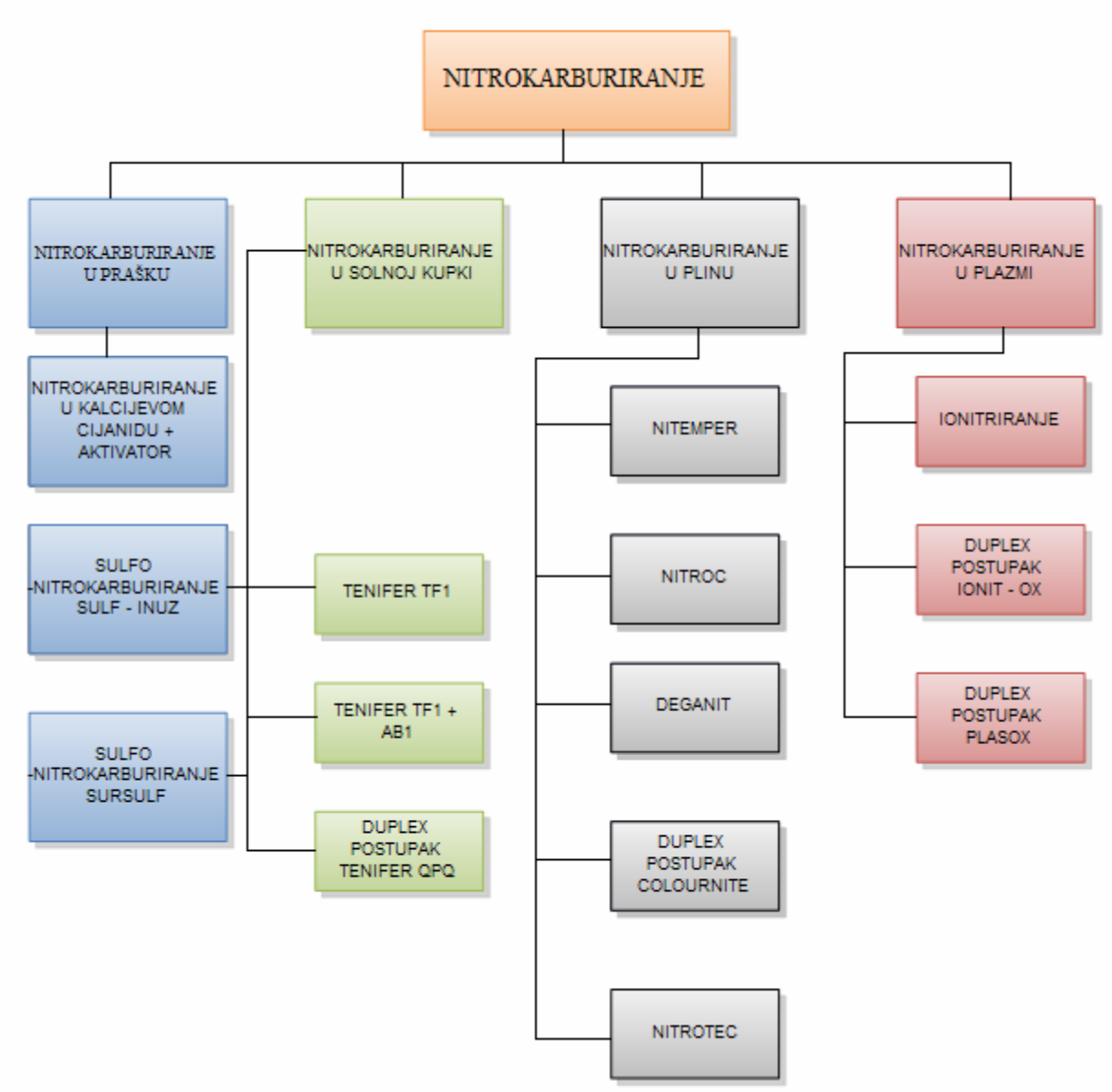
relativno malu tvrdoću površinskog sloja 350 –550 $HV_{0,3}$, dok visoko legirani čelici za nitriranje, alatni i nehrđajući čelici postižu tvrdoću od 1000 $HV_{0,3}$. Slika 38 prikazuje strojne dijelove u komori u toku ionskog nitriranja.



Slika 38: Strojni dijelovi u komori za ionsko nitriranje, [17]

4.2.2. Nitrokarburiranje

Nitrokarburiranje je toplinsko kemijski postupak kojim se površina metalnih materijala pretežito obogaćuje dušikom, a istovremeno u manjoj mjeri i ugljikom. Postupkom dolazi do povećanja tvrdoće površinskih slojeva radnog komada, što u konačnici pozitivno djeluje na zaštitu od trošenja i zamora materijalate te na zaštitu od korozije. Prednost je i u tome što se postupak može primijeniti na istim materijalima koji se mogu i nitrirati, a osim toga primjenjiv je i za većinu nelegiranih materijala. Unatoč povišenoj temperaturi samog postupka prisutna je vrlo mala distorzija radnog komada. Nitrokarburiranje je relativno jeftin postupak ako ga usporedimo sa cijenom karbonitriranja ili cijenom drugih procesa otvrdnjavanja površinskih slojeva. Uglavnom se primjenjuje za obradu zupčanika, osovina, koljenastih vratila, opruga itd. Podjelu postupaka nitrokarburiranja s komercijalnim nazivima pojedinih proizvođača prikazuje slika 39. Postupak Tenifer QPQ je još poznat pod nazivom Tufftride QPQ, dok je u SAD-u ovaj postupak poznat pod nazivom Melonite QPQ.



Slika 39: Pregled postupaka nitrokarburiranja, [22]

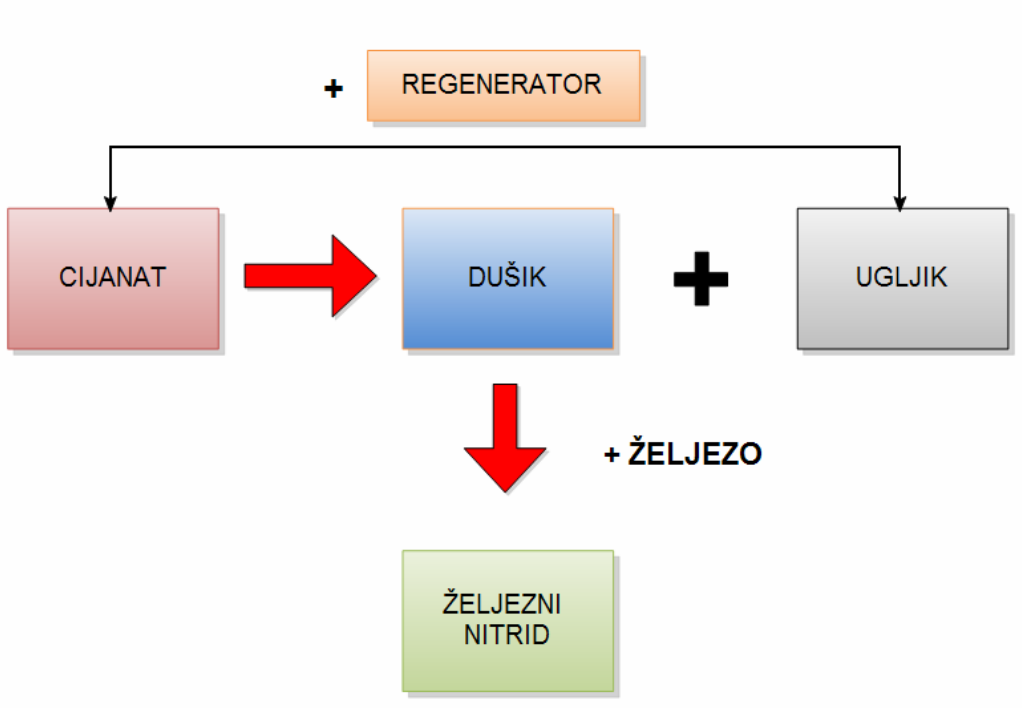
4.2.2.1. Tenifer nitrokarburiranje Q, QP, QPQ

Postupak Tenifer nitrokarburiranje u solnoj kupci je jedan od najpopularnijh postupaka nitrokarburiranja i koristi se u širokom rasponu u industrijama diljem svijeta. Provođenje postupka je relativno jednostavno, uz zadržavanje niskih troškova. Koristi se za poboljšavanje otpornosti na trošenje i zamor materijala te posebno u kombinaciji s oksidacijskim hlađenjem, za poboljšanje otpornosti na koroziju. Postupak se primjenjuje za razne čelike, lijevano željezo i sinterirane metalne materijale. Vrlo često Tenifer postupak se koristi kao alternativa za druge postupke

toplinske obrade kao što su na primjer kaljenje, galvaniziranje, plazma ili plinsko nitrokarburiranje i slični postupci.

Tijek postupka

Obradak se najprije zagrijava na zraku do temperature 350°C (623K). Zatim nastupa nitrokarburiranje u takozvanoj TF1 kupci na temperaturi 480 - 630°C (753 – 903K), standardna temperatura je 580°C (853K). TF1 kupka sadrži alkalijeve cijanate(Na_2CO_3/K_2CO_3) i alkalijeve karbonate (NaOCN/KOCN). Aktivni sastojak u TF1 kupci jest alkalni cijanatni ion CNO^- . Tokom procesa dolazi do reakcije između površine radnog komada i alkalnog cijanata, što rezultira formiranjem alkalnih karbonata CO_3^{2-} . Dodavanjem u kupku određene količine sintetičkog regeneratora REG1, nitridni aktivni sastojci opet tvore otopinu soli te je na taj način aktivnost kupke TF1 očuvana, slika 40. Kupka TF1 ne sadrži toksične elemente te samim time nije opasna za okoliš, što pojednostavljuje njezino skladištenje.



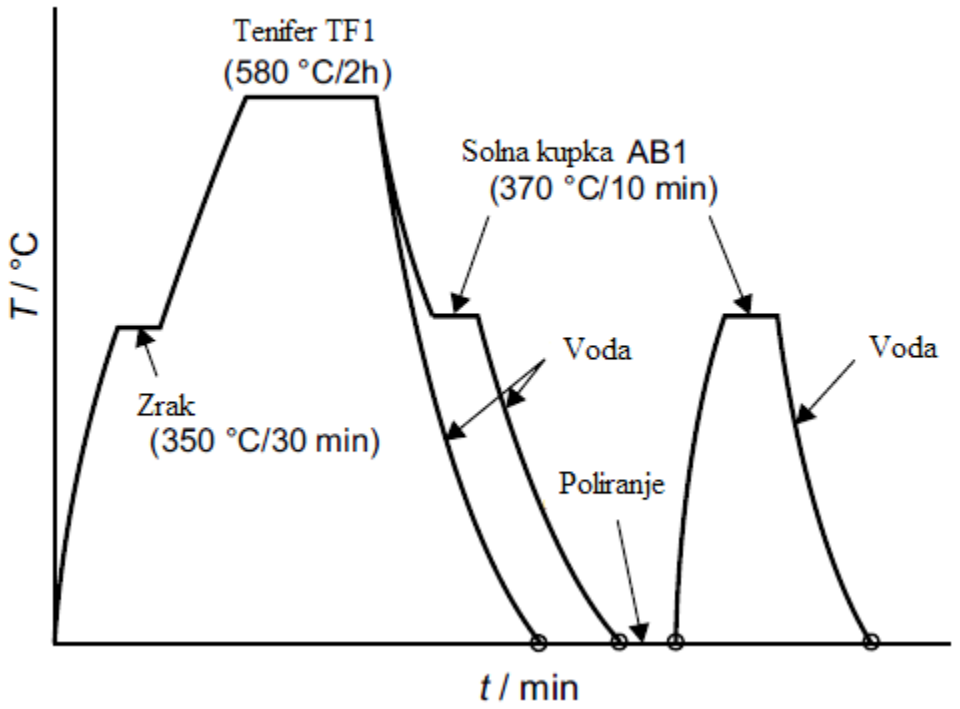
Slika 40: Prikaz osnovnih reakcija u solnoj kupci TF1,[23]

Nakon nitrokarburiranja obratci se mogu hladiti u vodi odnosno zraku. Cijeli postupak proveden do ovog stadija naziva se **Tenifer** postupak.

Tenifer Q postupak nema hlađenje u vodi već u specijalno razvijenoj solnoj kupci za hlađenje AB1, koja se koristi radi oksidacije nakon nitrokarburiranja. Tijekom ovog postupka na površini radnog komada dolazi do stvaranja crnog oksidnog sloja magnetita Fe_3O_4 , koji uvelike poboljšava otpornost na koroziju. Temperatura kupke za hlađenje AB1 se kreće između 370 - 420°C (643 – 693K). Osim oksidacijskog učinka kupka AB1, zbog relativno niske temperature,

ima pozitivan utjecaj na dimenzijsku stabilnost hlađenog obratka. Nakon toga obradak se vadi iz kupke AB1 te se hladi na sobnu temperaturu, na zraku ili u vodi, a zatim se ispire u toploj vodi kako bi se uklonili eventualni ostaci soli.

Ako završetkom ovog procesa tražena površina radnog komada nije dovoljno glatka za određenu primjenu, raznovrsnim metodama poliranja se može smanjiti hrapavost. Poliranjem skidamo otprilike 2 – 3 μm poroznog površinskog sloja. Postupak proveden do ovog stadija naziva se **Tenifer QP** postupak. Međutim naknadna mehanička obrada poliranja obično djelomično reducira prethodno dobiveni površinski sloj, što automatski rezultira smanjenjem otprnosti na koroziju. Iz tog razloga obradak se nakon poliranja ponovo podvrgava oksidaciji u solnoj kupci AB1 kako bi se površinski sloj obnovio. Ovako upotpunjeni postupak se naziva **Tenifer QPQ.** Kompletan postupak je prikazan dijagramom na slici 41.



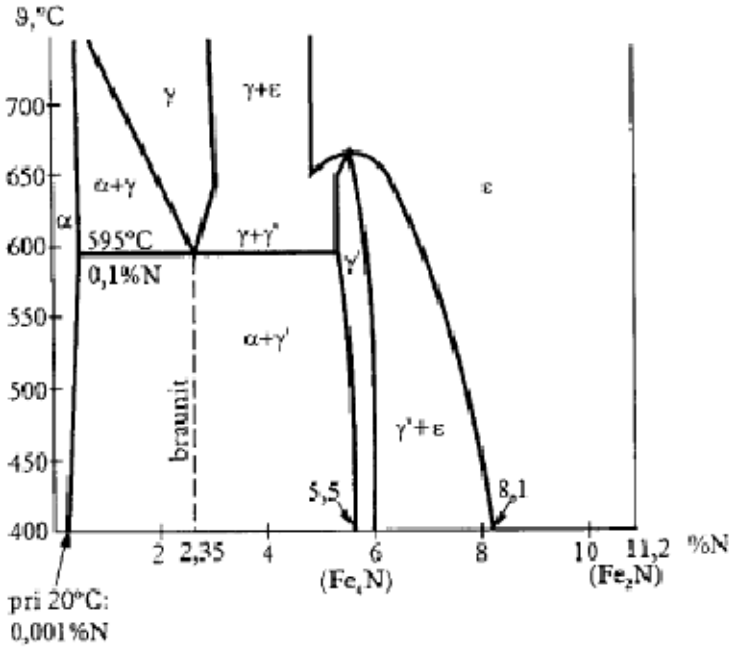
Slika 41: Tenifer nitrokarburiranje, [19]

Osobine QPQ postupka:

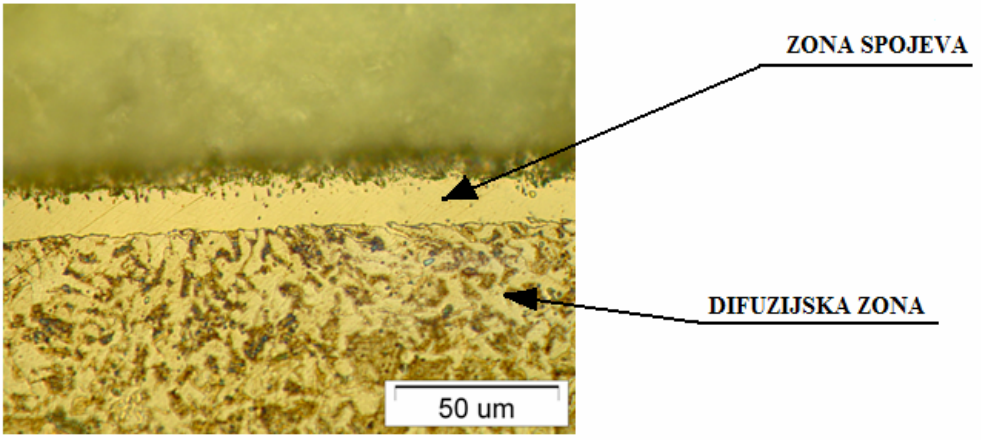
- otpornost prema trošenju
- antikorozivna zaštita
- otpornost prema zamoru materijala
- dobar izgled površine
- ekonomičnost
- ne zagađuje okoliš

4.2.2.2. Sastav nitrokarburiranog sloja

Nitrokarburirani sloj se sastoji, gledajući od površine prema jezgri, od zone spojeva (debljine 5 do 20 μm) i difuzijske zone. U zoni spojeva zbog visokog sadržaja dušika nastaju karbonitridi i/ili nitridi (Fe_4N, $Fe_{2\text{-}3}N$, $Fe_x(C,N)$). Nastanak i vrste nitrida ovise o aktivitetu solne kupke i koncentraciji dušika u kupci, prema ravnotežnom dijagramu stanja Fe-N koji je prikazan na slici 42. Nitrokarburirani sloj nazivamo još i „bijeli sloj“ čije je ime dobio po pogledu ispod optičkog mikroskopa, slika 43. Difuzijska zona nastavlja se na zonu spojeva i sadrži elemenate N,C,O. Osim njih sadrži još i nitride u čvrstom ili djelomično precipitiranom stanju, dovedene u materijal tijekom nitrokarburiranja.

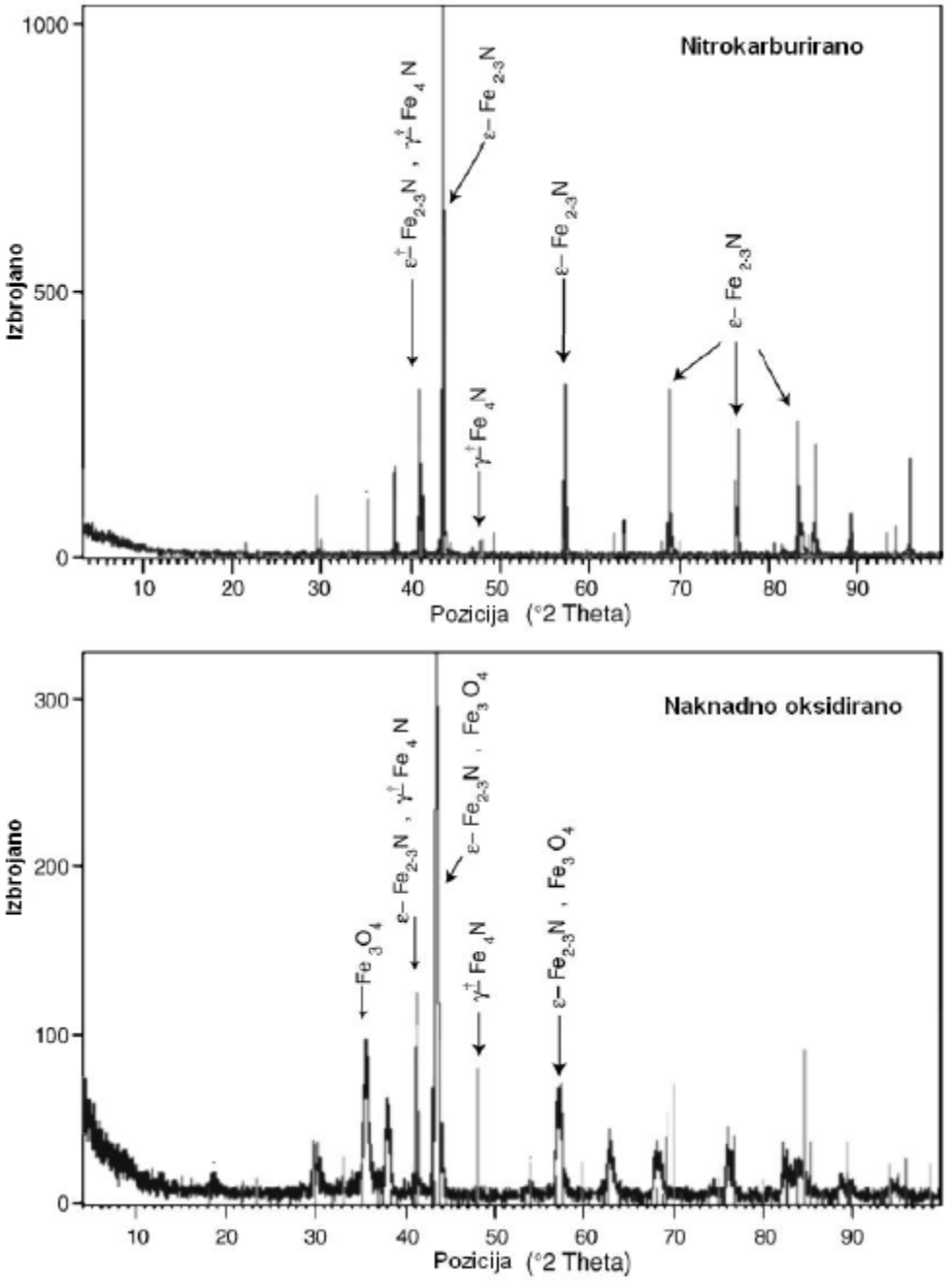


Slika 42: Dijagram stanja željezo – dušik, [24]



Slika 43: Mikrostruktura čelika C45E obrađena Tenifer nitrokarburiranjem

Optimalnim izborom paramatara rada, kupka AB1 na zoni spojeva stvorit će željezni oksid tipa Fe_3O_4 magnetit, kao što to pokazuju difraktogrami na slici 44. Ispod sloja Fe_3O_4, nalaze se željezni nitridi tipa ε-$Fe_{2\text{-}3}N$ i γ'-Fe_4N. Kod uzoraka koji su samo nitrokarburirani u zoni spojeva nastaju samo ε i γ′ nitridi bez prisustva željeznih oksida.



Slika 44: Rezultati rentgenske difrakcije površina nitrokarburiranog i oksidiranog uzorka [25]

4.2.3. Oksidiranje (bruniranje)

Oksidiranje je toplinsko kemijski postupak dobivanja zaštitnog sloja oksidnih prevlaka na površini radnog komada. Reakcijom željeza iz željezne legure i vruće oksidne kupke na površini radnog komada stvara se crni oksidni sloj, koji se sastoji od magnetita Fe_3O_4. Obrada se provodi u vrelim lužnatim otopinama natrijevog hidroksida NaOH, koje sadrže i oksidanse kao što su nitrati i nitridi, uz postepeno dodavanje destilirane vode. Obrada se može provoditi i u plinskoj atmosferi.

Postoji više postupaka oksidiranja, različitog sastava kupke i temperature obrade te je većina njih patentirana i tretira se kao poslovna tajna gotovo svakog poduzeća koje se bavi uslugama oksidiranja strojnih dijelova. Neka poduzeća se samo bave proizvodnjom smjesa za kupke zaštićenog sastava. Oksidiranje je moguće provesti i na sobnoj temperaturi uz upotrebu odgovarajućih kupki ili premaza. Na internetu ima mnogo dobrih amaterskih postupaka koje ljudi izvode u svojim garažama, na sobnoj temperaturi.

Uglavnom većinom poznate kupke se mogu podijeliti u tri klase:

a) Klasa 1 – kupka je koncetrat otopine natrijevog hidroksida i natrijevog nitrata.

b) Klasa 2 – kupka je rastopljena dikromatna sol, najčešće Kalijev dikromat ($K_2Cr_2O_7$)

c) Klasa 4 – kupka je koncetrat otopine natrijevog hidroksida i patentiranog sumpornog spoja koji tvori oksidno-sumpornu prevlaku.

U različitim klasama kupke susrećemo različita stanja oksidacijskog procesa. Isto tako svaka klasa je za drugi tip čelika. Klasa 1 je naprimjer primjenjiva za obradu strojnih dijelova od nelegiranih ugljičnih čelika, većine slabo legiranih čelika te od kovanog željeza, pri temperaturi kupke između 140 - 143°C (413- 416K). Krom nehrđajući čelici se obrađuju u kupkama klase 3 pri temperaturama između 440 - 455°C (713 – 728K). Kupke klase 4 se koriste ze obradu korozijski postojanih legura, koje se oksidiraju na temperaturi između 121 - 127°C (394 – 400K).

Oksidacija vrlo često ne ispadne savršena na pojedinim mjestima površine obratka. Razlog tomu su pojava malih pukotina koje se stvaraju tijekom hlađenja obratka u vodi ili nakon obrade, pore zaštitnog sloja na površini nisu u potpunosti popunjene magnetitom Fe_3O_4. Strojni dijelovi se zato nakon obrade vrlo često moraju impregnirati s antikorozivnim uljem radi popunjavanja pora te samim time postizanja bolje zaštite od korozije Isto tako, na nekim mjestima zaštitnog površinskog sloja, vrlo često zna doći do stvaranja neželjenog hematita

Fe_2O_3 koji je porozan i ne pruža gotovo nikakvu antikorozivnu zaštitu, što znači da se prije obrade treba obratiti pozornost na stanje i sastav površine radnog komada koji se obrađuje.

Prevlaka apsorbira svijetlo te se postupak često primjenjuje za obradu oružja i dijelova optičkih aparata, slika 45.

Slika 45: Oružje obrađeno oksidiranjem, [18]

Prednosti oksidiranih površina:

- dobra antikorozivna zaštita
- dimenzijska stabilnost strojnih dijelova
- prevlaka apsorbira svjetlo
- tamna, crna boja površine
- zadržavanje dobre električne vodljivosti
- dobra zavarljivost

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1 CILJ RADA I PROVOĐENJE ISTRAŽIVANJA

U eksperimentalnom dijelu rada želi se pokazati kako različita mikrostruktura površine čelika za poboljšavanje Č.1531.5 (C45E) dobivena toplinsko kemijskim obradama, utječe na mehanička i tribološka svojstva materijala. Čelik Č.1531.5 (C45E) koristi se za izradu klipnjača plinskog amortizera, a kako je klipnjača klizni element amortizera, od površine se traži da bude povišene tvrdoće te prije svega da bude glatka i otporna na adhezijsko trošenje. Na temelju ispitivanja, rezultata mjerenja i njihove analize istražuje se koja toplinsko kemijska obrada će se pokazati kao optimalna tribološka mjera u vidu otpornosti na adhezijsko trošenje.

U okviru planiranog istraživanja provedeno je sljedeće:

- Toplinsko kemijska obrada uzorka
- Metalografsko ispitivanje uzoraka, kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture.
- Ispitivanje tvrdoće površine.
- Ispitivanje opornosti na adhezijsko trošenje obrađenih površina.

Toplinsko kemijska obrada četiri uzorka klipnjača provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu, Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu, dok je jedan uzorak obrađen u poduzeću Laverna d.o.o., Nad gramoznico 19 Slovenija.

Poliranje jednog uzorka klipnjače provedeno je u poduzeću M.G. Žnidarec d.o.o. u Samoboru, iz razloga što je poliranje jedan od koraka procesa kod Tenifer QPQ postupka toplinsko kemijske obrade.

Strojno rezanje obrađenih klipnjača je isto provedeno u poduzeću M.G. Žnidarec d.o.o., na dimenzije prikladne za predstojeća laboratorijska ispitivanja.

Metalografsko ispitivanje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju, Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu, u svrhu otkrivanja i vrednovanja mikrostrukture osnovnog materijala klipnjače i zaštitnog sloja dobivenog toplinsko kemijskom obradom.

Ispitivanje tvrdoće površine obrađenih klipnjača po Rockwell – u provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu.

Izrada i priprema gumenih prstenova provedeno je u poduzeću GO-MA d.o.o. u Sv. Nedjelji, koji će se kasnije uptrijebiti za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje klipnjača.

Ispitivanje opornosti na adhezijsko trošenje obrađenih površina klipnjača provedeno je u Laboratoriju za tribologiju, Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu.

5.2 OSNOVNI MATERIJAL

Osnovni materijal za izradu klipnjača plinskog amortizera jest čelik za poboljšavanje oznake Č1531.5 (C45E) hladno vučeni u toleranciji h9, koji se isporučuje kao čelični profil okrugle šipke promjera $\phi 8$.

Kemijski sastav čelika naveden je u tablici 7, a njegova mehanička svojstva u različitim stanjima toplinske obrade u tablicama 8 i 9.

Tablica 7: Kemijski sastav čelika C45E, %

Kemijski element	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr max.	Mo max.	Ni max.	Cr+Mo+Ni max.	
% mase	0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	0,40	0,10	0,40	0,63	-
Dozvoljeno odstupanje	± 0,02	+ 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	+ 0,05	+ 0,03	+ 0,05		-

Prema preporuci proizvođača čelika elementi aluminij, titan, vanadij i niobij smiju se dodavati pojedinačno ili u kombinaciji samo radi kontrole veličine zrna. Elementi koji nisu navedeni u tablici ne smiju biti dodani čeliku bez suglasnosti kupca, samo ako nije u pitanju završna obrada šarže.

Mehanička svojstva čelika u različitim stanjima toplinske obrade dane su u tablicama 8 i 9.

Tablica 8: Mehanička svojstva u popuštenom i normaliziranom stanju

Debljina profila t_R					
Dimenzija u mm		$t_R \leq 100$mm	$100 < t_R \leq 250$mm	$250 < t_R \leq 500$mm	$500 < t_R \leq 1000$mm
R_e min (N/mm^2)		305	275	240	230
R_m min (N/mm^2)		580	560	540	530
A % min.	l-longitudinal	16	16	16	15
	tr - transverse	-	12	12	11
KV min (J)	l-longitudinal	-	18	15	12
	tr - transverse	-	10	10	10

Tablica 9: Mehanička svojstva u popuštenom i kaljenom stanju

Debljina profila t_R				
Dimenzija u mm		$t_R \leq 70$mm	$70 < t_R \leq 160$mm	$1600 < t_R \leq 330$mm
R_e min (N/mm^2)		370	340	320
R_m min (N/mm^2)		630	590	540
A % min.	l-longitudinal	17	18	17
	tr - transverse	-	12	11
KV min (J)	l-longitudinal	25	22	20
	tr - transverse	-	15	12

Tablica 10: Zahtjevi za toplinsku obradu

Temperatura kaljenja , ^0C	Hlađenje u	Temperatura popuštanja ^0C	Temperatura normalizacije, ^0C
820 to 860	Voda ili ulje	550 to 660	840 to 880

Osovine i vratila promjera do 80 mm mogu se dobiti izvlačenjem čeličnih šipki na hladno, pri čemu se postižu tolerancije h8...h11, tako da naknadno tokarenje više nije potrebno.

5.3. POSTUPCI TOPLINSKO KEMIJSKE OBRADE UZORAKA

Za potrebe predviđenog istraživanja četiri su uzorka obrađena toplinsko kemijski u Laboratoriju za toplinsku obradu. Jedan uzorak je toplinski obrađen u poduzeću Laverna d.o.o., dok je jedan uzorak ostavljen potpuno neobrađen. Uzorci su numerirani kao što pokazuje tablica 11. U istoj tablici navedeni su i parametri toplinske obrade

Tablica 11: Oznake uzoraka

OZNAKA UZORKA	NAZIV POSTUPKA	RADNI MEDIJ	TEMPERATURA IZVOĐENJA	MJESTO IZVOĐENJA
1	Neobrađen	----------	----------	----------
2	Oksidacija	Solna kupka AB1	370°C (643K)	FSB Zagreb
3	Tenifer Q	Solne kupke TF1+ AB1	580°C (853K)	FSB Zagreb
4	Tenifer QPQ	Solne kupke TF1+ AB1	580°C (853K)	FSB Zagreb
5	Tenifer	Solna kupka TF1	580°C (853K)	FSB Zagreb
6	Nitriranje + Oksidacija	Nepoznat (Zaštićen)	570°C (843K)	Laverna d.o.o. Slovenija

5.3.1. Oprema Laboratorija za toplinsku obradu

Ovdje su navedene samo peći koje su se koristile u eksperimentu.

a) Peć za nitrokarburiranje u solnoj kupci TF1 postupcima Tenifer, slika 46

Korisne dimenzije lonca: - Promjer 600mm

- Dubina 900mm

Nitriranje postupkom Tenifer na temperaturi 580°C (853K)
Ohlađivanje nakon nitriranja: u vodi, u ulju ili na zraku; ovisno o materijalu i obliku obradaka.

Slika 46: Peć za nitriranje Tenifer postupkom, [20]

b) Peć za oksidiranje u solnoj kupci AB1, slika 47

Korisne dimenzije lonca: - Promjer 150mm
- Dubina 300mm

Oksidiranje na temperaturi 370°C (643K)

Slika 47: Peć za oksidiranje

5.3.2. Priprema uzoraka

Uzorci prije nego što dođu u laboratorij na obradu, prethodno se strojno fino bruse, čiste i odmašćuju. Na njima prethodno nije izvršena nikakva toplinska obrada, osim one koja se vrši tokom proizvodnje gotovog profila od strane proizvođača. Uzorci su promjera 8mm, dok sama duljina u ovom istraživanju nije bila važna. Bitno je samo da duljina uzoraka nije premala za daljnja ispitivanja. Znači može se reći da su uzorci okrugli čelični profili promjera 8mm dobiveni hladnim vučenjem iz čelika za poboljšavanje Č1531.5. Da bi se lakše rukovalo uzorcima tokom obrade, vežu se čeličnom žicom, kako ne bi bilo problema prilikom vađenja uzoraka iz peći, kao što je prikazano na slici 48.

Slika 48: Uzorci vezani čeličnom žicom

5.3.3. Toplinsko kemijska obrada uzoraka

Uzorak 1

- toplinski se ne obrađuje

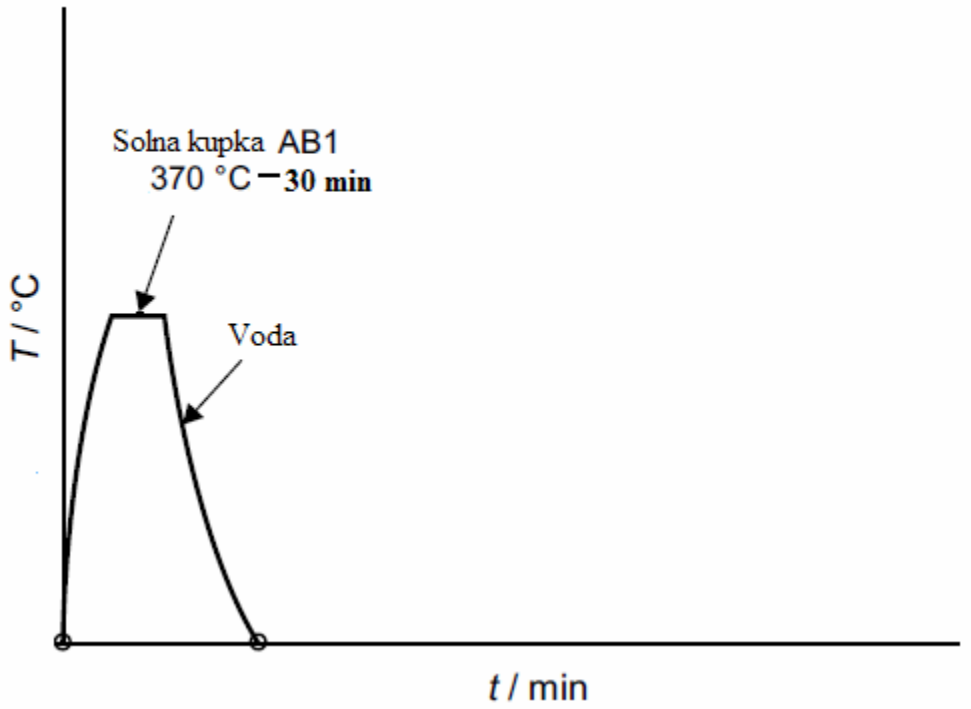
Uzorak 2

- **oksidacija** u solnoj kupki **AB1** – otopina soli koja se sastoji od lužnatih nitrata, lužnatih hidrooksida te lužnatih karbonata.

  Temperatura = 370°C (643K)
  Vrijeme = 30min

- nakon oksidacije nastupa hlađenje u vodi na sobnoj temperaturi.

Slika 49 prikazuje dijagram postupka oksidacije u solnoj kupci AB1



Slika 49: Oksidacija u solnoj kupci AB1

Uzorak 3

- nitrokarburiranje **Tenifer Q** postupkom

- Radni komad se najprije zagrijava na zraku

  Temperatura = 350°C (623K)

  Vrijeme = 30min
- Nitrokarburiranje u solnoj kupki TF1 - otopina soli koja se sastoji od lužnatih cijanata i lužnatih karbonata.

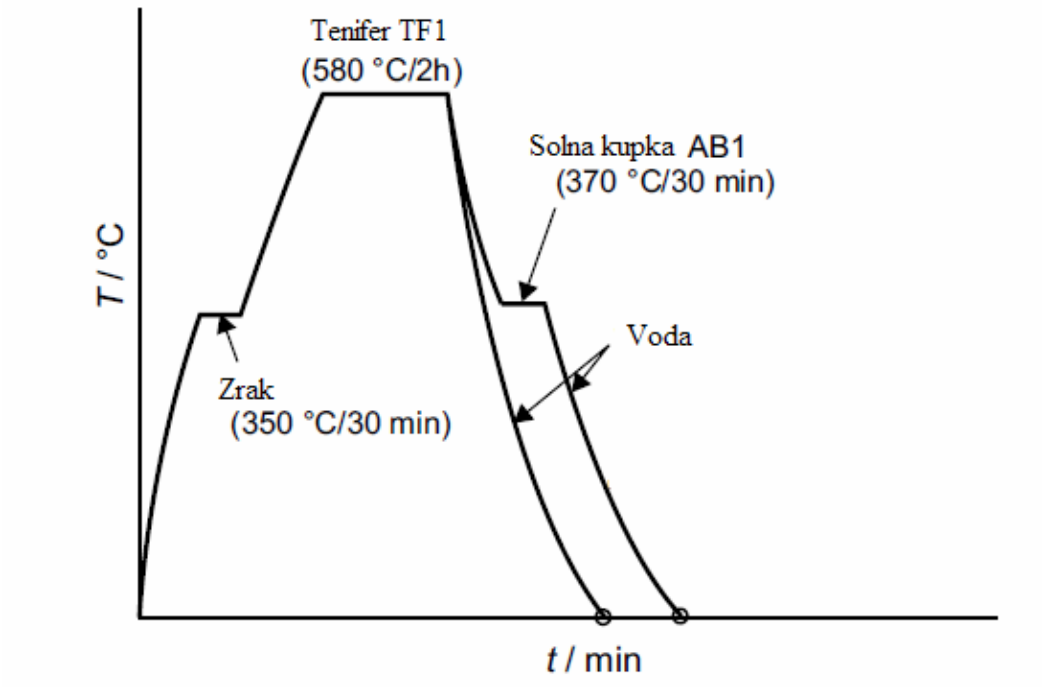
  Temperatura = 580°C (853K)

  Vrijeme = 2h
- Oksidacija u solnoj kupki AB1 – otopina soli koja se sastoji od lužnatih nitrata, lužnatih hidrooksida te lužnatih karbonata.

  Temperatura = 370°C (643K)

  Vrijeme = 30min
- Hlađenje u vodi na sobnu temperaturu.

Slika 50 prikazuje dijagram postupka nitrokarburiranja Tenifer Q postupkom



Slika: 50 Nitrokarburiranje Tenifer Q

Uzorak 4

- nitrokarburiranje **Tenifer QPQ** postupkom

- Radni komad se najprije zagrijava na zraku

  Temperatura = 350°C (623K)

  Vrijeme = 30min

- Nitrokarburiranje u solnoj kupki TF1 - otopina soli koja se sastoji od lužnatih cijanata i lužnatih karbonata.

  Temperatura = 580°C (853K)

  Vrijeme = 2h

- Oksidacija u solnoj kupki AB1 – otopina soli koja se sastoji od lužnatih nitrata, lužnatih hidrooksida te lužnatih karbonata.

  Temperatura = 370°C (643K)

  Vrijeme = 30min

- Hlađenje u vodi na sobnu temperaturu.
- Poliranje
- Oksidacija u solnoj kupki AB1 – otopina soli koja se sastoji od lužnatih nitrata, lužnatih hidrooksida te lužnatih karbonata.

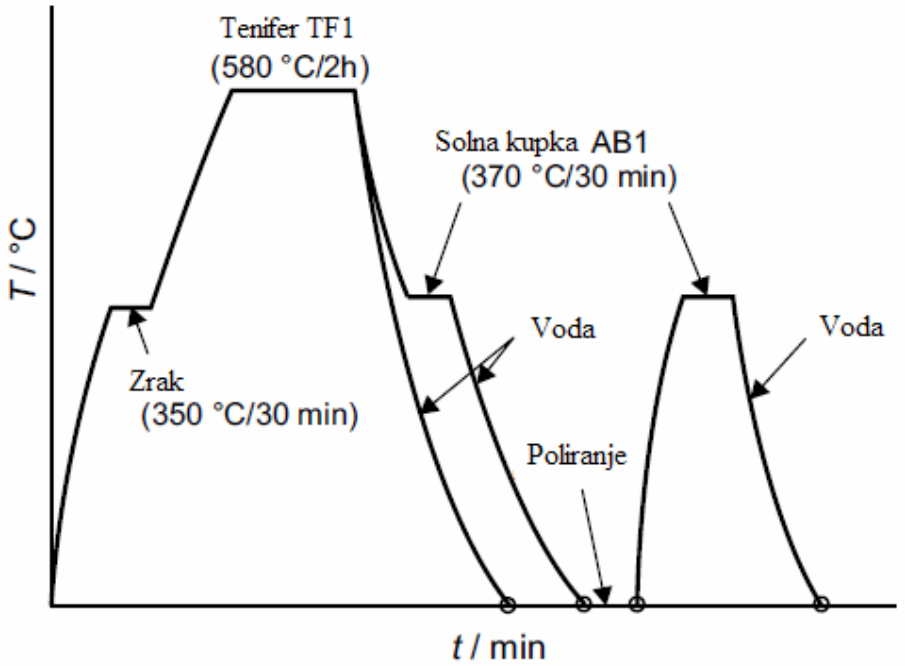
  Temperatura = 370°C (643K)

  Vrijeme = 30min

Postupak poliranja se provodi kako bi se smanjila hrapavost obrađene površine. Međutim naknadna mehanička obrada poliranja obično djelomično reducira prethodno dobiveni površinski sloj magnetita, što automatski rezultira smanjenjem otprnosti na koroziju. Iz tog razloga radni komad se nakon poliranja ponovo podvrgava oksidaciji u solnoj kupci AB1 kako bi se površinski sloj magnetita obnovio. Poliranje se vrši mekanom krpicom i polirnom pastom marke "PUROL UNIVERZAL", na za ovaj postupak modificiranom poluautomatu "KIUŠIK", kao što je prikazano na slici 51.

Slika 51: postupak poliranja

Slika 52 prikazuje dijagram postupka nitrokarburiranja Tenifer QPQ postupkom



Slika 52: Nitrokarburiranje Tenifer QPQ

Uzorak 5

- nitrokarburiranje **Tenifer** postupkom

- Radni komad se najprije zagrijava na zraku

  Temperatura = 350°C (623K)

  Vrijeme = 30min

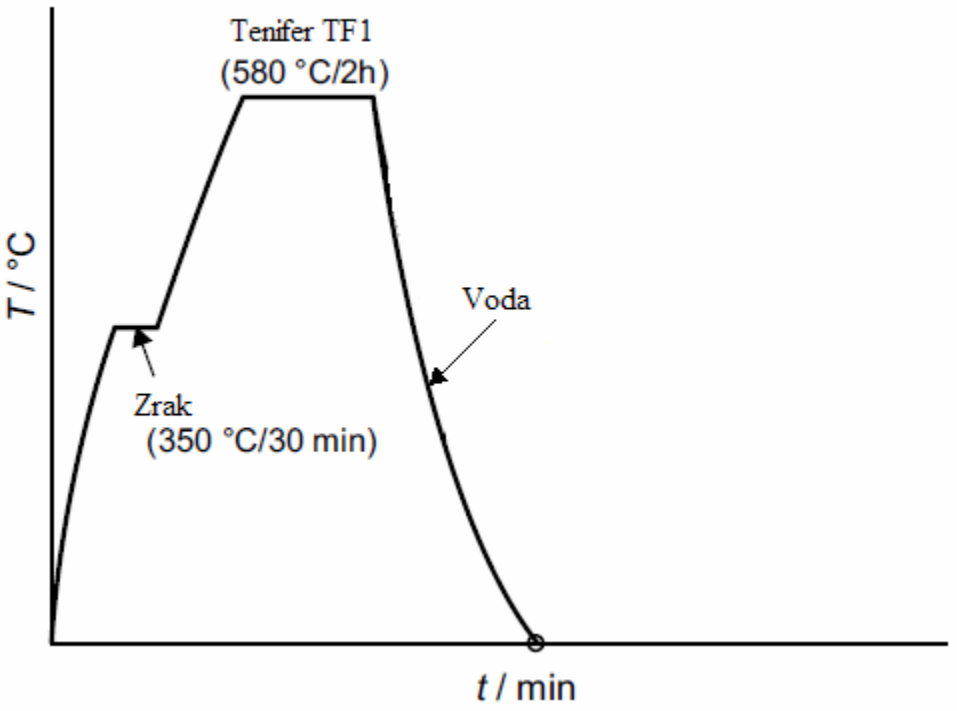
- Nitrokarburiranje u solnoj kupki TF1 - otopina soli koja se sastoji od lužnatih cijanata i lužnatih karbonata.

  Temperatura = 580°C (853K)

  Vrijeme = 2h

- Hlađenje u vodi na sobnu temperaturu.

Slika 53 prikazuje dijagram postupka nitrokarburiranja Tenifer postupkom



Slika 53: Nitrokarburiranje Tenifer

Uzorak 6

Uzorak 6 je toplinsko kemijski obrađen u poduzeću Laverna d.o.o., sastav radnog medija (solne kupke) nije poznat zbog zaštite prava proizvođača.

Postupak je sljedeći:

- Nitrokarburiranje u solnoj kupci

  Temperatura = 570°C (843K)

  Vrijeme = 5h
- Hlađenje u zaštitnoj atmosferi na sobnu temperaturu

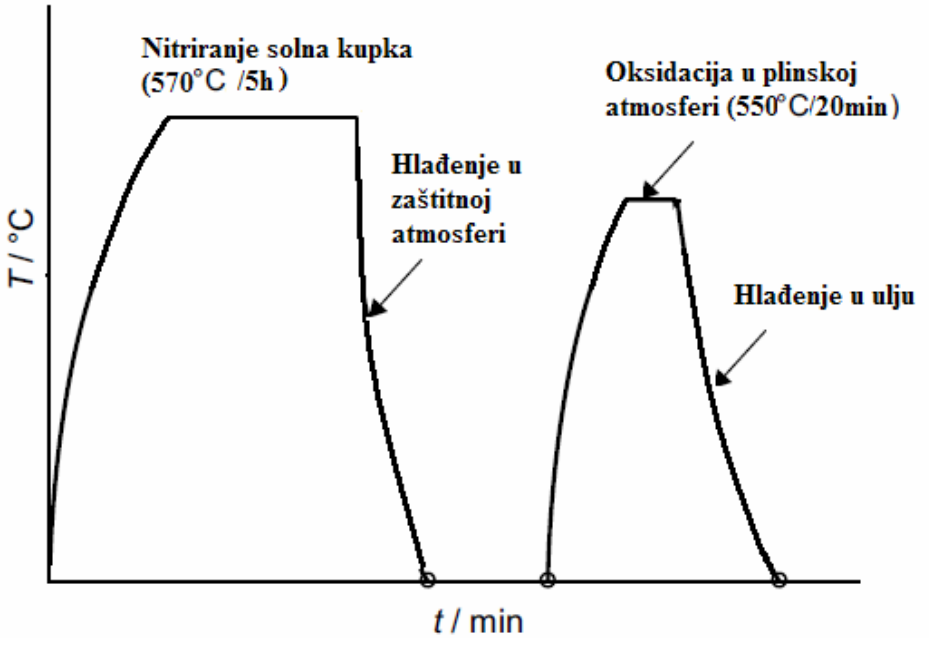
  Vrijeme = 2h
- Oksidacija u plinskoj atmosferi (sastav medija nepoznat)

  Temperatura = 550°C (823K)

  Vrijeme = 20min

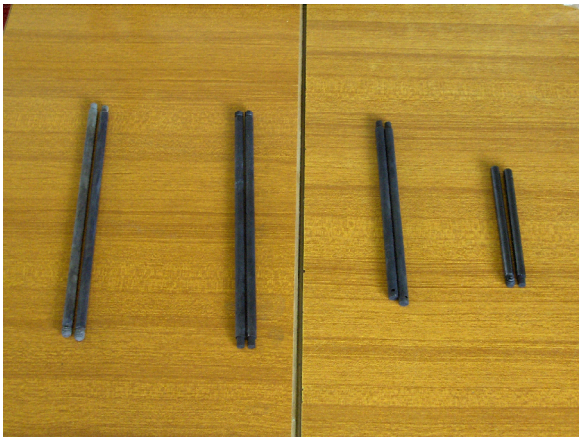
  - oksidacijam se na površini radnog komada stvaraju se oksidi željeza s većim oksidacijskim brojem od uobičajenog (+2,+3)
- Hlađenje u ulju

Slika 54 prikazuje dijagram postupka nitrokarburiranja poduzeća Laverna d.o.o.



Slika 54: Nitrokarburiranja poduzeća Laverna d.o.o.

Na slici 55 prikazani su uzorci koji su toplinsko kemijski obrađeni u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu.

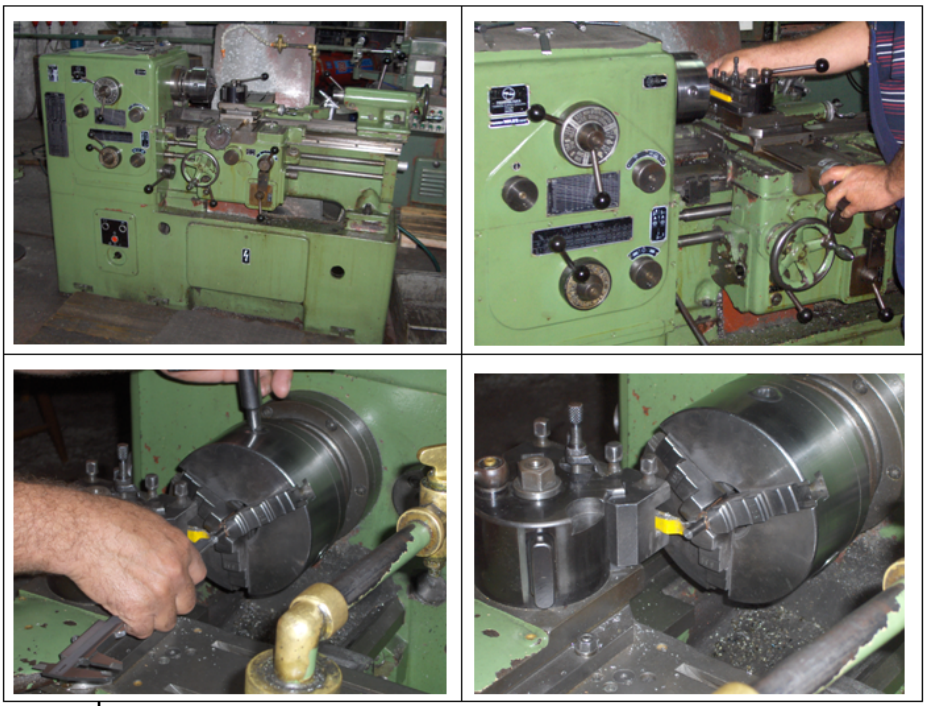


Slika 55: Uzorci nakon toplinsko kemijske obrade

5.4. REZANJE UZORAKA ZA PREDVIĐENA ISPITIVANJA

Nakon toplinske obrade uzorci se režu na dimenzije prikladne za daljnja laboratorijska ispitivanja. Uzorci se mogu rezati na razne načine obrade odvajanjem čestica, ali je bitno koristiti metodu rezanja pri kojoj neće doći do jačeg zagrijavanja materijala, kako bi se spriječile toplinske deformacije i promjena mikrostrukture koje se mogu pojaviti na površini u blizini zone reza.

Uzorci su izrezani u poduzeću M.G.Žnidarec d.o.o. na tokarilici “Prvomajska TNP-145-500“ , slika 56. Parametri obrade su pažljivo odabrani da se spriječi dodatno zagrijavanje uzoraka.

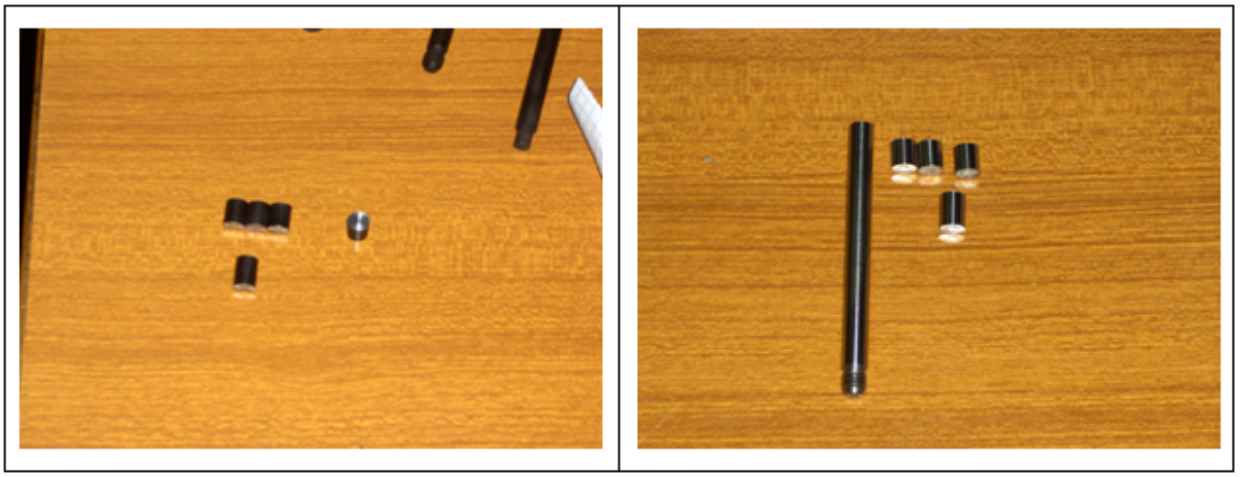


Slika 56: Detalji rezanja uzoraka na tokarilici

Uzorci se izrezuju na sljedeće dimenzije:

- 3 uzorka duljine 15mm za ispitivanje otpornosti na adheziju
- 1 uzorak duljine 12mm za metalografsku analizu materijala
- Ostatak će se iskoristiti za ispitivanje makrotvrdoće

Na slici 57 su prikazani primjeri izrezanih uzoraka



Slika 57: Primjer izrezanih uzoraka

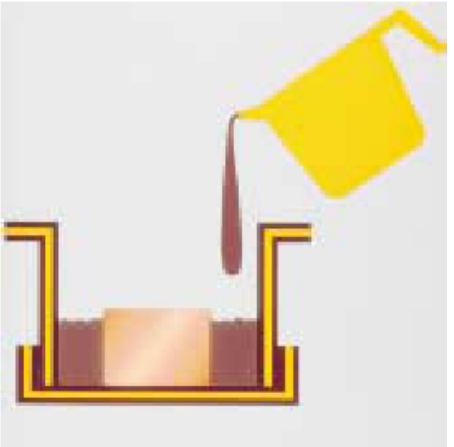
5.5. METALOGRAFSKO ISPITIVANJE UZORAKA

5.5.1. Priprema uzoraka za analizu mokrostrukture

Osnovni uvjet za uspješnu analizu strukture materijala i ispravne rezultate je da analizirani uzorak bude reprezentativan i dobro pripremljen. Priprema uzoraka se sastoji od ulijevanja uzoraka u kalup, brušenja, poliranja i nagrizanja. Cijela priprema uzoraka se provodi prema uputama za pripremu “STRUERS Metalog Guide” brušenjem i poliranjem.

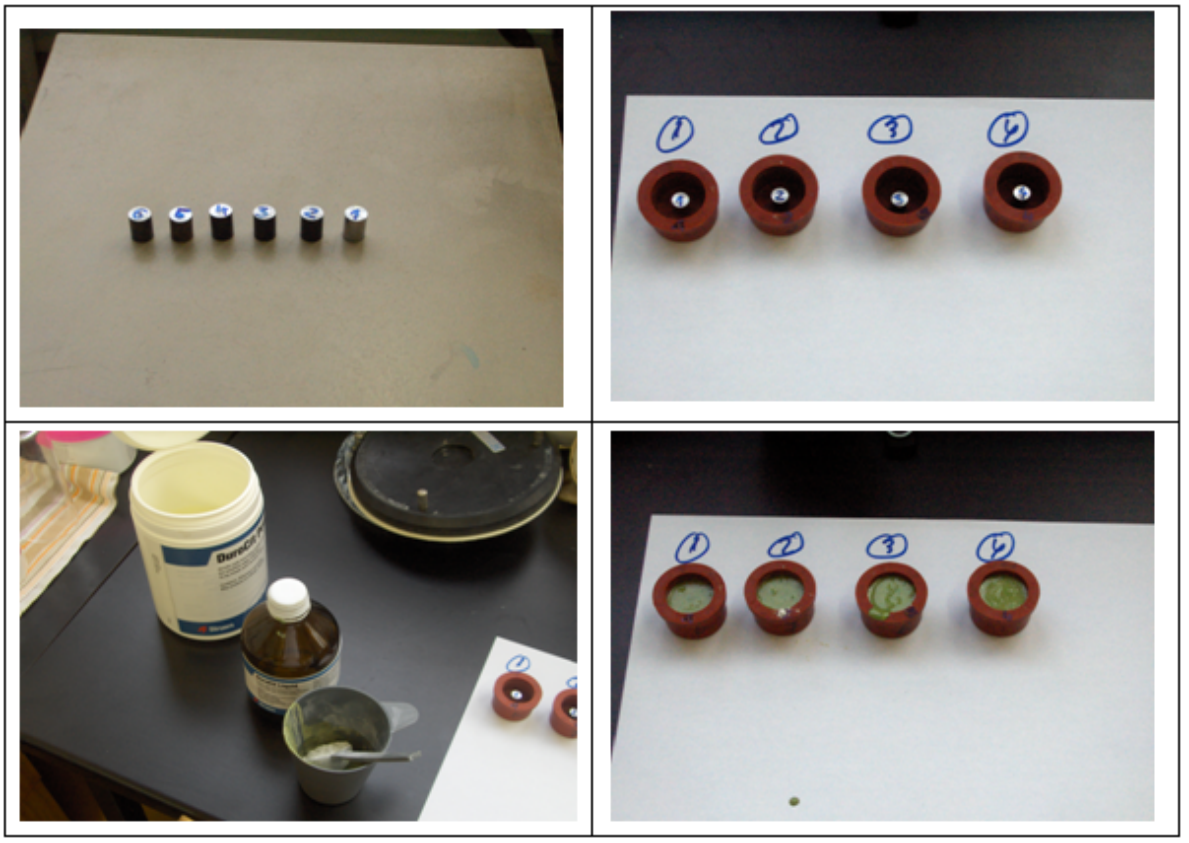
5.5.1.1. Ulijevanje uzoraka u kalup

Ulijevanje uzoraka u kalup vrši se na hladno. Akrilna masa se ulijeva u kalup oko uzorka kao što je prikazano na slici 58. Svrha ulijevanja u kalup je zaštita uzorka, lakše rukovanje uzorkom prilikom analize te mogućnost analize rubova.



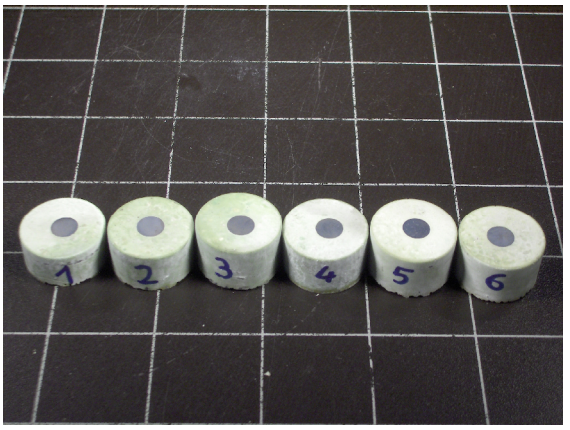
Slika 58: Ulijevanje akrilne mase u kalup s uzorkom,[21]

Prema “Struers“ uputama uzorci se lijevaju na hladno, DUROFIX – 2 KIT akrilnom masom koja se sastoji od praška i tekućine, a čiji sastav je tvornička tajna. Detalji ulijevanja uzoraka u kalup prikazani su na slici 59.



Slika 59: Ulijevanje uzoraka u kalup

Na slici 60 su prikazani gotovi uzorci nakon vađenja iz kalupa.



Slika 60: Izgled uzoraka nakon vađenja iz kalupa

5.5.1.2. Brušenje uzoraka

Brušenjem se otklanjaju tragovi rezanja i mogućih prethodnih brušenja. Grubim brušenjem se otklanjaju tragovi rezanja, a finim brušenjem se skida deformirani površinski sloj i mogući tragovi grubog brušenja. Izbor brusnog papira ovisi o materijalu koji se brusi, prema “Struers“ vodiču.

Postupak brušenja se provodi u četiri koraka, odnosno sa četiri vrste brusnih papira različite veličine zrna. Što je broj brusnog papira veći to su zrna sitnija, a samim time je i brušenje finije. Nakon svakog koraka potrebno je uzorak isprati u vodi kako bi se odstranile odvojene čestice. Uzorak se za svaki idući korak brušenja mora okrenuti za 90 stupnjeva kako bi se uklonili tragovi prethodnog koraka brušenja. Parametri brušenja dani su u tablici 12.

Tablica 12: Parametri brušenja

Korak	I	II	III	IV
Podloga	Brusni papir			
Finoća zrna	120	220	320	600
Abraziv	SiC			
Hlađenje i podmazivanje	Voda			
Brzina [°/min]	300			
Sila pritiska	ručno			
Vrijeme [min]	Dok se ne uklone tragovi prethodnog stupnja brušenja			

Na slici 61 je prikazan uređaj za brušenje i poliranje.

Slika 61: Uređaj za brušenje i poliranje, [20]

5.5.1.3. Poliranje uzoraka

Nakon brušenja, slijedi poliranje uzoraka. Poliranje je puno finiji postupak odnošenja materijala sa površine uzoraka. Uzorci su polirani u jednom koraku, na uređaju za poliranje. Parametri poliranja dani su tablici 13.

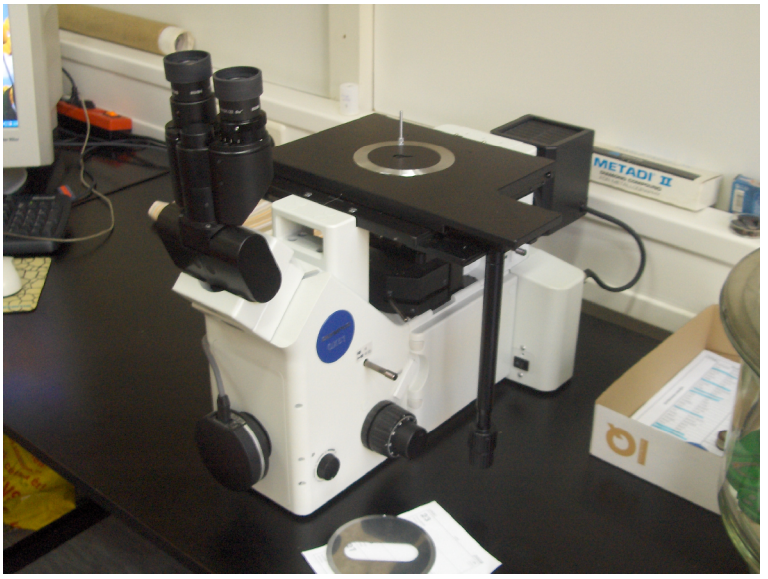
Tablica 13: Parametri poliranja

Podloga	MD-Plus
Abrazivne čestice	Dijamant
Finoća	3μm
Sredstvo za hlađenje	Green/Blue
Brzina okretaja [°/min]	150
Sila [N]	180
Vrijeme [min]	4

Nakon poliranja uzorci se čiste uranjanjem u etilni alkohol, brišu te suše u struji toplog zraka.

5.5.2. Analiza mikrostrukture

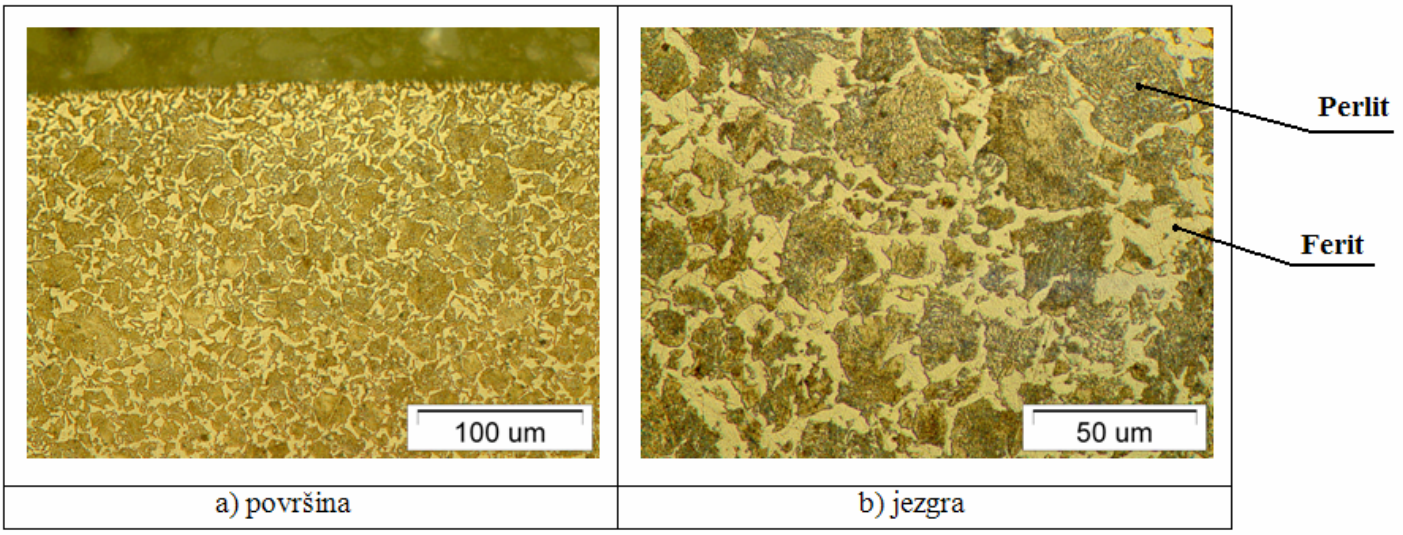
Mikrostrukturna analiza uzoraka provedena je na uzorcima u poliranom i nagriženom stanju. Uzorci se kemijski nagrizaju u 3% - tnoj otopini dušične kiseline (HNO_3) u etilnom alkoholu. Kemijskim se nagrizanjem postiže da se glatka, zrcalno sjajna površina uzorka učini vidljivom. S nagrizane površine svjetlo se različito reflektira što u okularu mikroskopa daje sliku zrna, faza itd. U nastavku su dane slike ispitivanih uzoraka pri povećanjima **200x, 500x, 1000x**. Fotografije su slikane na svjetlosnom mikroskopu Olympus - GX51, slika 62.



Slika 62: Svjetlosni mikroskop Olympus – GX51

<u>Uzorak 1</u>

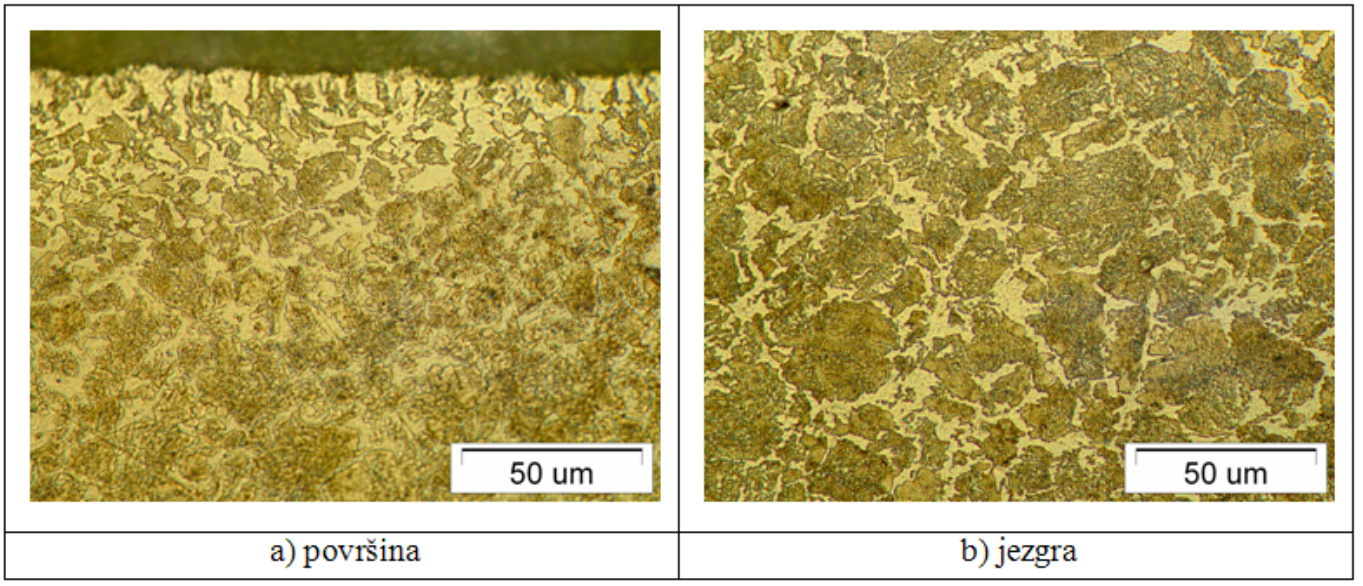
Uzorak 1 je toplinski neobrađen, Č1531.5 (C45E), u hladno vučenom stanju i služi kao referentni uzorak. Mikrostruktura uzorka 1 sastoji se od ferita (svijetlo) i perlita (tamno zrno). U mikrostrukturi prevladava perlit. Rub uzorka u odnosu na jezgru ima sitnije zrno (zbog ugnječenja) i viši udio ferita zbog razugljičenja površine. Ovaj uzorak nije podvrgnut nikakvoj toplinskoj obradi i na površini nema sloja. Fotografije mikrostrukture uzorka 1 prikazane su na slici 63.



Slika 63: Mikrostruktura uzorka 1- površina i jezgra

Uzorak 2

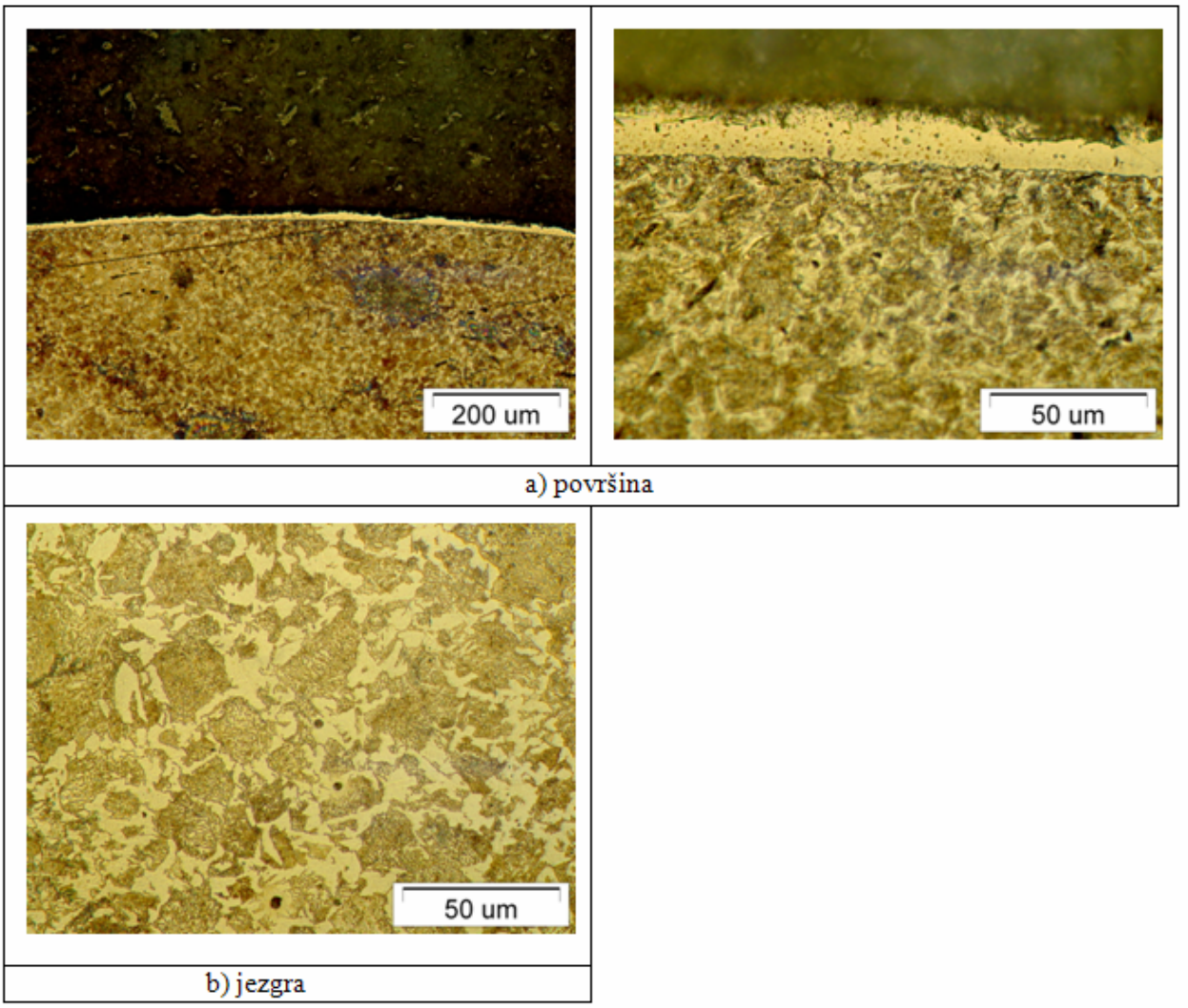
Uzorak 2 je podvrgnut oksidaciji u solnoj kupki AB1 pri temperaturi od 370°C (643K) u vremenu od 30min. Mikrostruktura uzorka 2 sastoji se od ferita (svijetlo) i perlita (tamno zrno), isto kao i kod prethodnog uzorka. U mikrostrukturi prevladava perlit. Na površini obratka golim okom vidljiv je sloj koji je rezultat 30 minutne oksidacije. To je crni oksidni sloj, koji se sastoji od magnetita Fe_3O_4. Sloj je jako tanak i ne vidi se niti pri maksimalnom povećanju od 1000x. Fotografije mikrostrukture uzorka 2 prikazane su na slici 64.



Slika 64: Mikrostruktura uzorka 2 – površina i jezgra

Uzorak 3

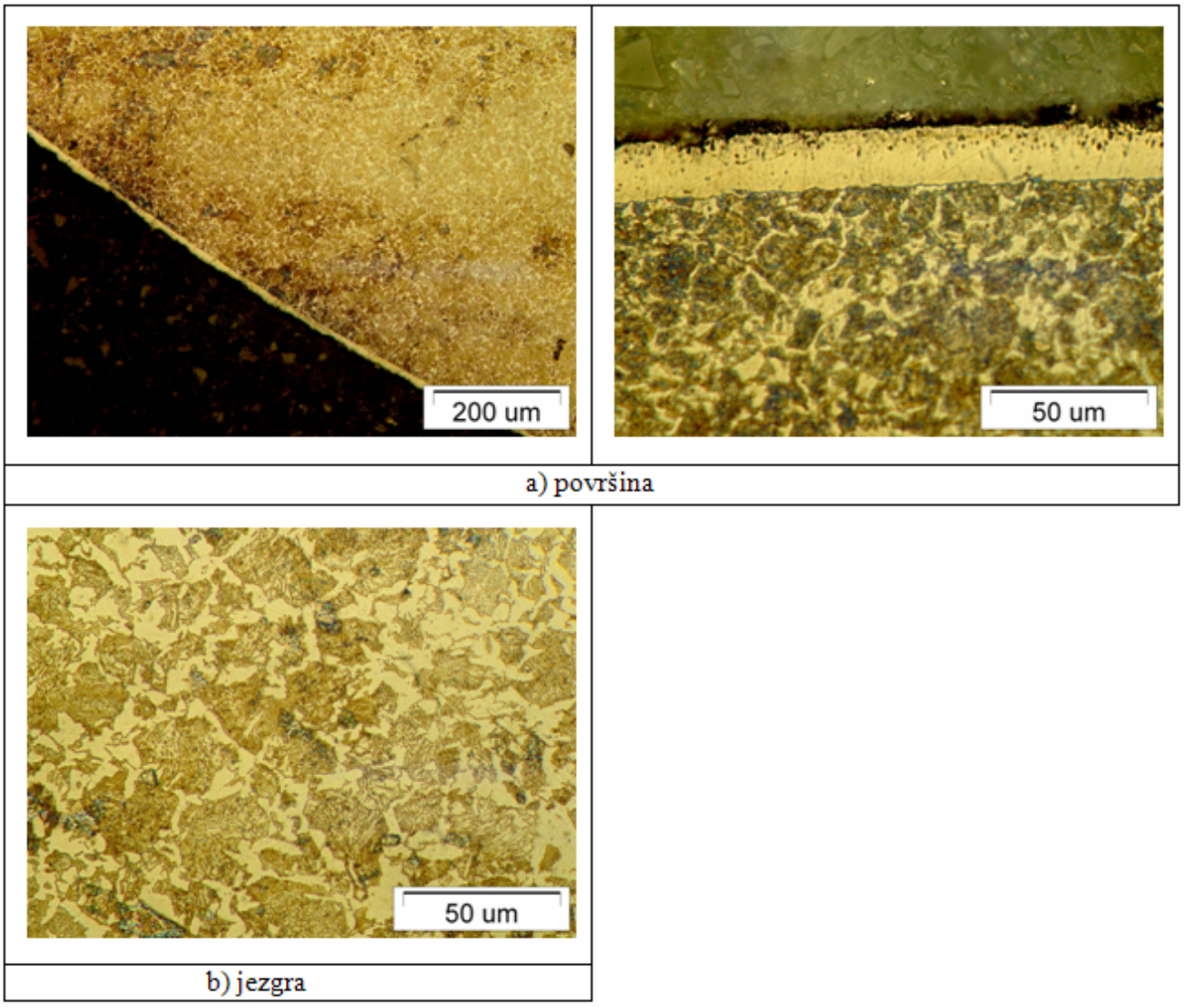
Uzorak 3 je podvrgnut nitrokarburiranju **Tenifer Q** postupkom (TF1/580 ºC /2h/AB1/370ºC/ 30 min/voda). Mikrostruktura uzorka 3 sastoji se od ferita (svijetlo) i perlita (tamno zrno), isto kao i kod prethodnih uzoraka. Na površini uzorka vidljiv je sloj koji je rezultat nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom. Sloj se sastoji od željeznih oksida tipa Fe_3O_4 magnetit, nastalih oksidacijom, a ispod sloja Fe_3O_4 nalaze se željezni nitridi tipa ε-$Fe_{2\text{-}3}N$ i γ'-Fe_4N koji su nastali nitrokarburiranjem. Sloj je kontinuiran, porozan te valovit. Direktnim mjerenjem izmjerena je debljina sloja od 22 µm. Fotografije mikrostrukture uzorka 3 prikazane su na slici 65.



Slika 65: Mikrostruktura uzorka 3- površina i jezga

Uzorak 4

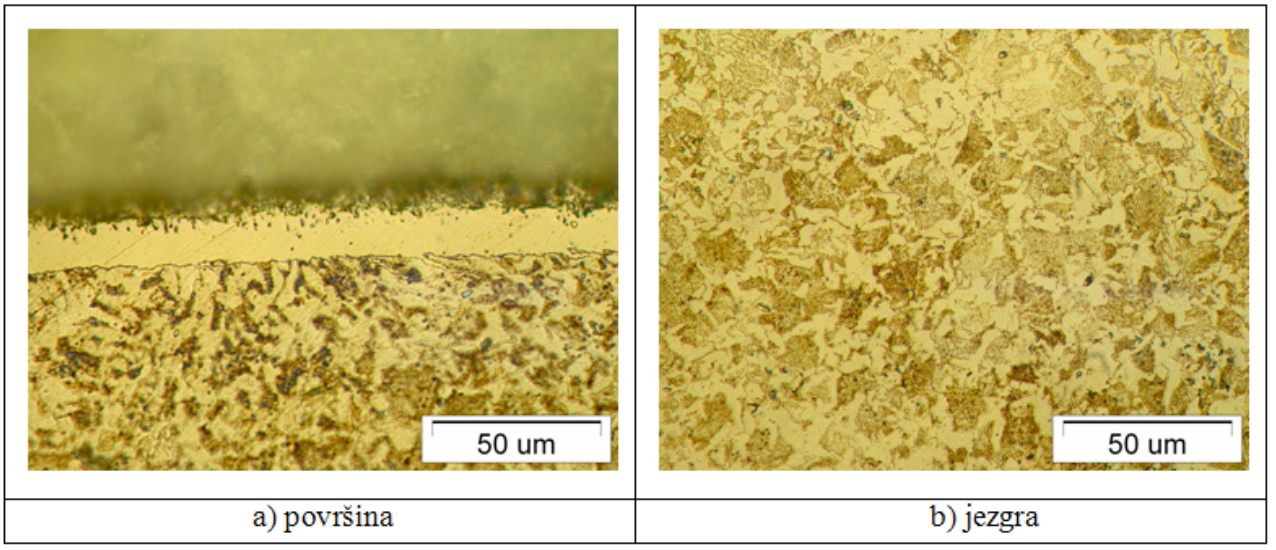
Uzorak 4 je podvrgnut nitrokarburiranju **Tenifer QPQ** postupkom (TF1/580ºC /2h/AB1/370ºC/30min/voda/poliranje/ AB1/370ºC/ 30 min/voda). Mikrostruktura uzorka 4 sastoji se od ferita (svijetlo) i perlita (tamno zrno), isto kao i kod prethodnih uzoraka. Na površini uzorka vidljiv je sloj koji je rezultat nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom. Sloj se sastoji od željeznih oksida tipa Fe_3O_4 magnetit, nastalih oksidacijom, a ispod sloja Fe_3O_4, nalaze se željezni nitridi tipa ε-$Fe_{2\text{-}3}N$ i γ'-Fe_4N koji su nastali nitrokarburiranjem. Sloj je kontinuiran te blago porozan bez pukotina. Pore nisu u potpunosti popunjene ni nakon naknadne oksidacije. Uočava se da sloj nije valovit što znači da je površina male hrapavosti. Direktnim mjerenjem izmjerena je debljina sloja od 20 µm. Fotografije mikrostrukture uzorka 4 prikazane su na slici 66.



Slika 66: Mikrostruktura uzorka 4 – površina i jezgra

Uzorak 5

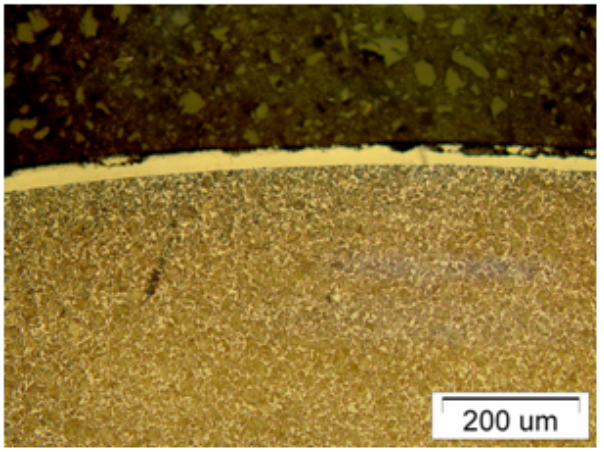
Uzorak 5 je podvrgnut nitrokarburiranju običnim **Tenifer** postupkom (TF1/580 ºC /2h/voda). Mikrostruktura uzorka 5 sastoji se od ferita (svijetlo) i perlita (tamno zrno), Na površini uzorka vidljiv je sloj koji je rezultat nitrokarburiranja, a koji se sastoji od željeznih nitrida tipa ε-$Fe_{2-3}N$ i γ'-Fe_4N. Uočava se da je sloj porozan u 1/3 debljine što je uobičajeno za nitrokarburiranje postupkom TENIFER. Sloj je kontinuiran bez pukotina ali valovit, što znači da je površina hrapava. Direktnim mjerenjem izmjerena je debljina sloja od 17µm. Fotografije mikrostrukture uzorka 5 prikazane su na slici 67.

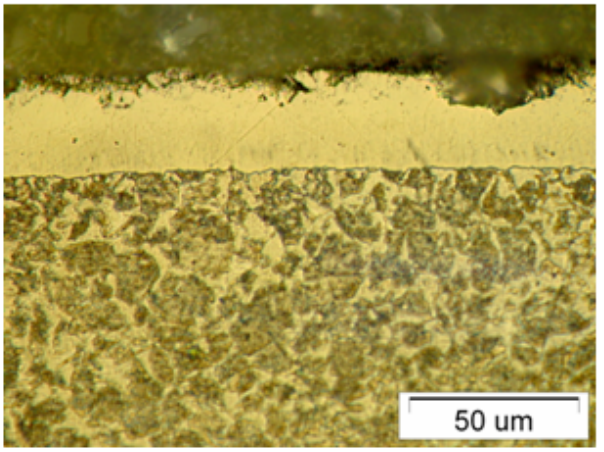


Slika 67: Mikrostruktura uzorka 5 – površina i jezgra

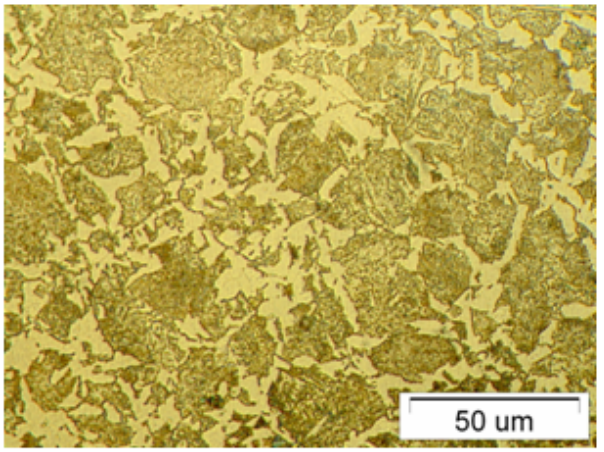
Uzorak 6

Uzorak 6 je podvrgnut nitriranju (570°C/5h), zatim hlađenju u zaštitnoj atmosferi te oksidaciji u plinskoj atmosferi (550°C/20min) i na kraju hlađenju u ulju. Mikrostruktura uzorka 6 sastoji se od ferita (svijetlo) i perlita (tamno zrno), isto kao i kod prethodnih uzoraka. Nitrokarburiranjem sa naknadnom oksidacijom stvoren je sloj nitrida i oksidacijski sloj. Sloj je bez poroznosti i bez pukotina. Pore su u potpunosti popunjene. Sloj je relativno kontinuiran, na nekim mjestima je došlo do manjeg lomljenja sloja. Direktnim mjerenjem izmjerena je debljina sloja od 32µm. Fotografije mikrostrukture uzorka 6 prikazane su na slici 68.





a) površina

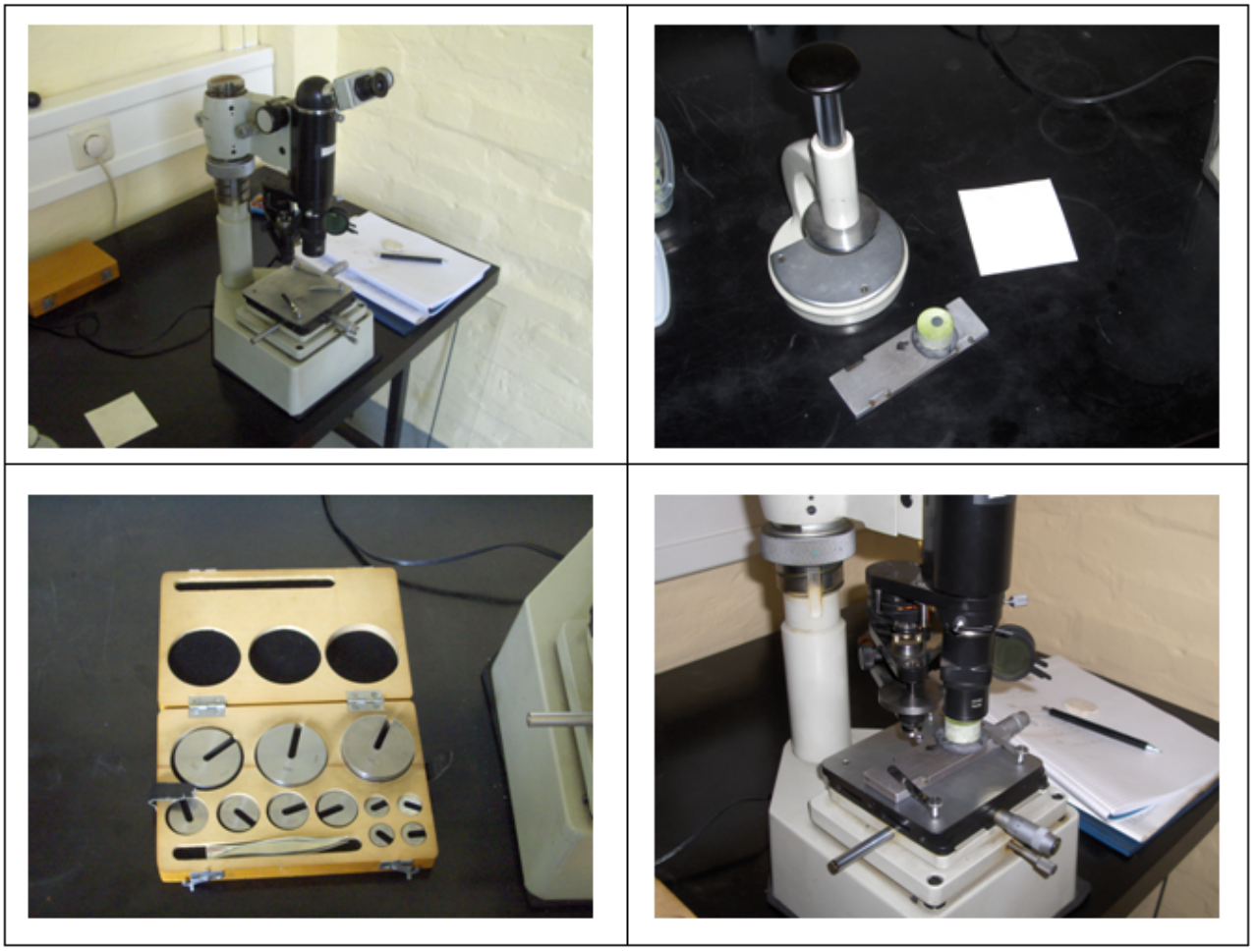


b) jezgra

Slika 68: Mikrostruktura uzorka 6 – površina i jezgra

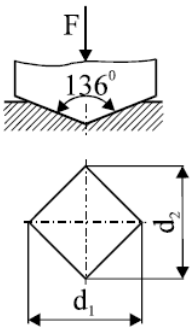
5.5.3. Analiza mikrotvrdoće

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je metodom po Vickersu (HV0.1 i HV0.05) u Laboratoriju za materijalografiju, Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu. Provedeno je na tvrdomjeru PMT – 3, ruskog proizvođača. Tvrdomjer PMT – 3 sastoji se iz tri osnovna dijela, a to su: radni stol, sustav za opterećivanje i mjerni sustav za očitanje veličine otiska (mikroskop). Radni stol ima mogućnost zakretanja te služi za postavljanje uzorka i njegovo pozicioniranje. Sustav za opterećivanje i mikroskop spojeni su u jednu cjelinu vezanu za stup te ih je moguće pomicati gore-dolje odnosno lijevo-desno, što je bitno kod opterećivanja uzorka i mjerenja veličine dijagonale. Opterećenje se direktno primjenjuje kombinacijom utega različitih masa. Ovisno o potrebnom opterećenju, utezi se postavljaju na cilindar koji je povezan sa ručicom za opterećivanje. Detalji mjerenja mikrotvrdoće kao i sam uređaj prikazani su slikom 69.



Slika 69: Mjerenje mikrotvrdoće

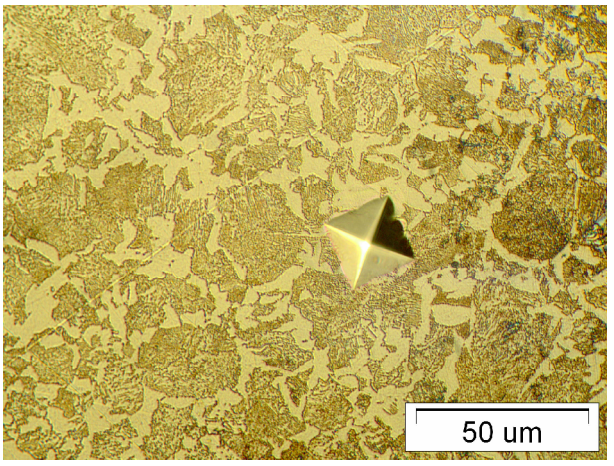
Tvrdoća jezgre i tvrdoća od površine prema jezgri mjerena je na svih 6 uzoraka metodom po **VICKERS- u.** Metoda Vickers HV 0.1 korištena je za mjerenje tvrdoće jezgre, dok je HV 0.05 korištena za mjernje tvrdoće od površine prema jezgri. Kao penetrator služi dijamantna četverostrana piramida s kutem između stranica od 136°, slika 70.



$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Sika 70: Mjerenje tvrdoće po Vickers – u, [26]

Sila utiskivanja ***F*** iznosi 0,9807 N za HV 0,1 i 0.4903 N za HV 0,05. Trajanje opterećenja iznosi od 13 do 15s. Prilikom ispitivanja razmak između otisaka mora biti veći od 2,5 dijagonale otiska, kako bi se izbjegao utjecaj hladnog očvrsnuća na područjima na kojima je izvršeno mjerenje. Slika 71 prikazuje otisak dijamantnog penetratora na uzorku.



Slika 71: Otisak dijamantnog penetratora

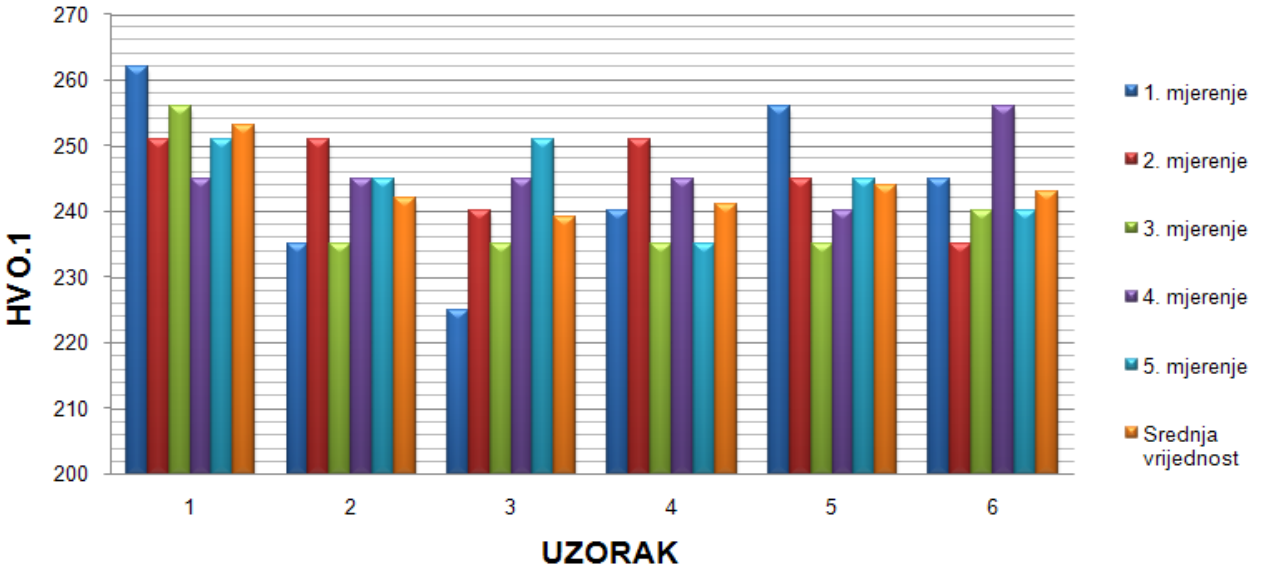
Rezultati mikrotvrdoće prema dobivenim duljinama dijagonala očitani su iz tablica za zadano opterećenje HV 0,1 i HV 0,05.

5.5.3.1. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće jezgre uzoraka

Na svakom uzorku provedeno je 5 mjerenja tvrdoće jezgre prema Vickers HV 0.1. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće jezgre prikazani su u tablici 14 i na slici 72.

Tablica 14: Prikaz izmjerenih tvrdoća jezgre

Uzorak	Redni broj mjerenja	HV 0.1	X̄ HV 0.1
1	1	262	253
	2	251	
	3	256	
	4	245	
	5	251	
2	1	235	242
	2	251	
	3	235	
	4	245	
	5	245	
3	1	225	239
	2	240	
	3	235	
	4	245	
	5	251	
4	1	240	241
	2	251	
	3	235	
	4	245	
	5	235	
5	1	256	244
	2	245	
	3	235	
	4	240	
	5	245	
6	1	245	243
	2	235	
	3	240	
	4	256	
	5	240	



Slika 72: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće jezgre uzoraka

5.5.3.2. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri, HV 0.05

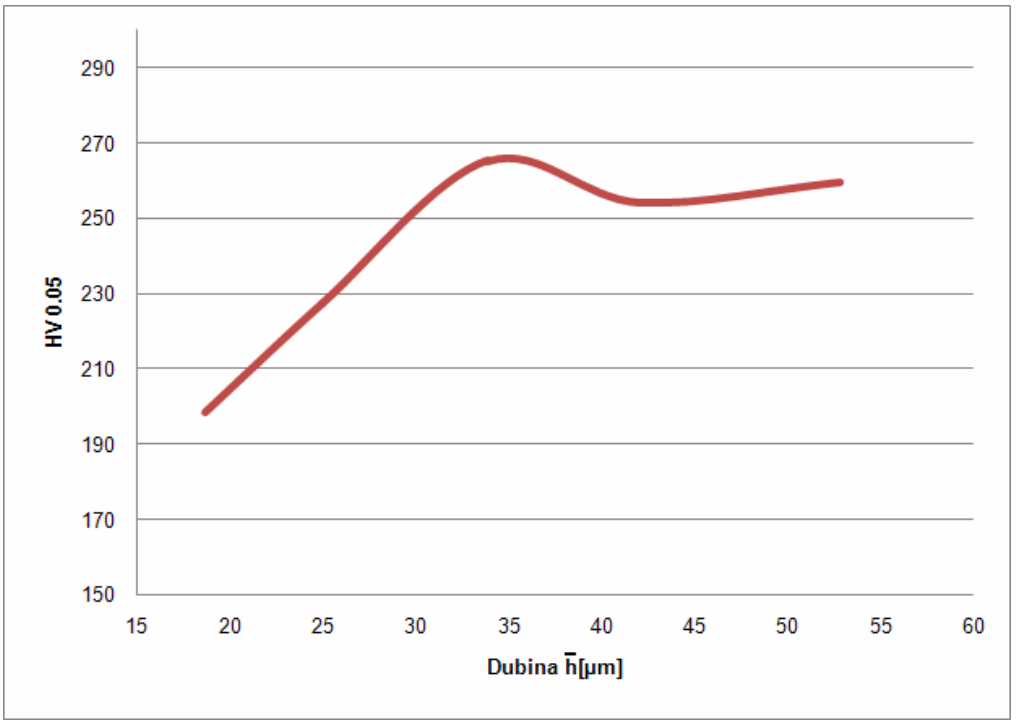
Na uzorcima je provedeno po 3 mjerenja na 5 različitih razina dubine od površine prema jezgri. Mjereno je utegom mase 50g. Na uzorku 1 nije provedeno mjerenje jer je toplinski neobrađen.

Uzorak 2

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri za uzorak 2 prikazani su u tablici 15 i na slici 73.

Tablica 15: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 2

Razina dubine	Dubina h [µm]	HV 0.05	$\bar{h}$ [µm]	$\bar{X}$ HV 0.05
1	17.36	202	18.67	198.67
	19.18	197		
	19.46	197		
2	24.46	234	25	227.33
	25.37	227		
	25.18	221		
3	33.18	257	33.9	265.33
	33.16	274		
	35.36	265		
4	43.66	257	42.06	254.33
	40.80	257		
	41.73	249		
5	52.08	257	52.8	259.66
	53.45	257		
	52.86	265		



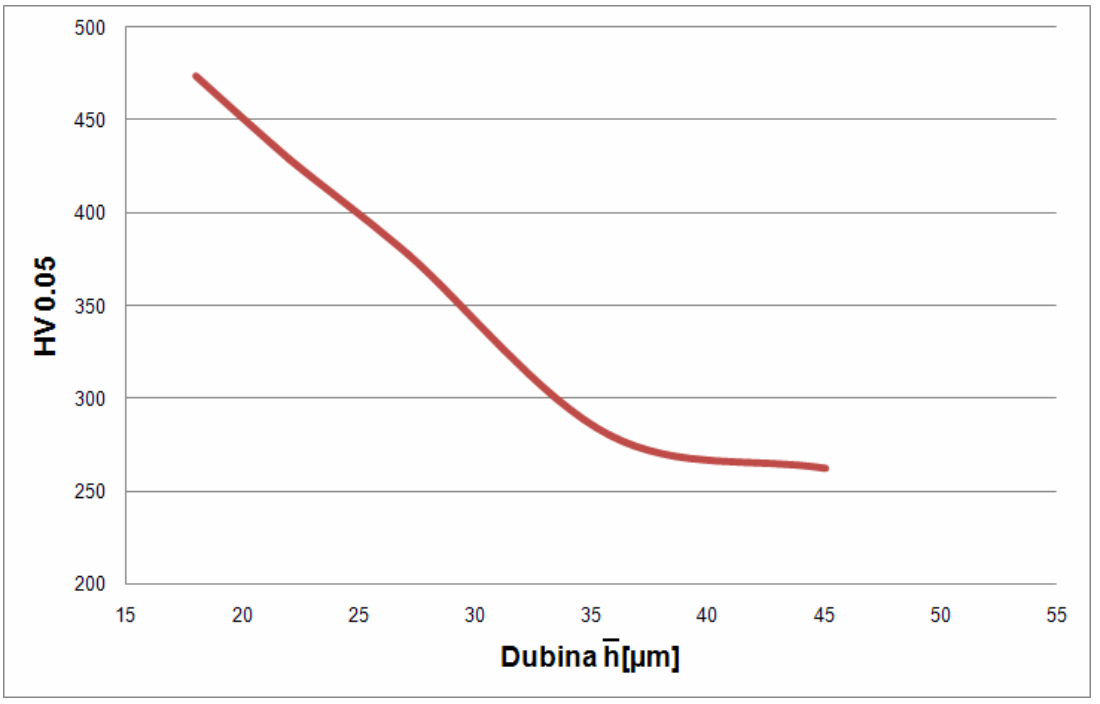
Slika 73: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 2

Uzorak 3

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri za uzorak 3 prikazani su u tablici 16 i na slici 74.

Tablica 16: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 3

Razina dubine	Dubina h [µm]	HV 0.05	$\bar{h}$ [µm]	$\bar{X}$ HV 0.05
1	19.66	460	18	473.33
	16.22	480		
	18.12	480		
2	22.40	423	22.07	429
	21.44	441		
	22.36	423		
3	26.99	407	27.13	377
	27.18	362		
	27.22	362		
4	36.03	274	35.76	280
	35.82	283		
	35.44	283		
5	45.57	257	45.07	262.33
	44.84	265		
	44,80	265		



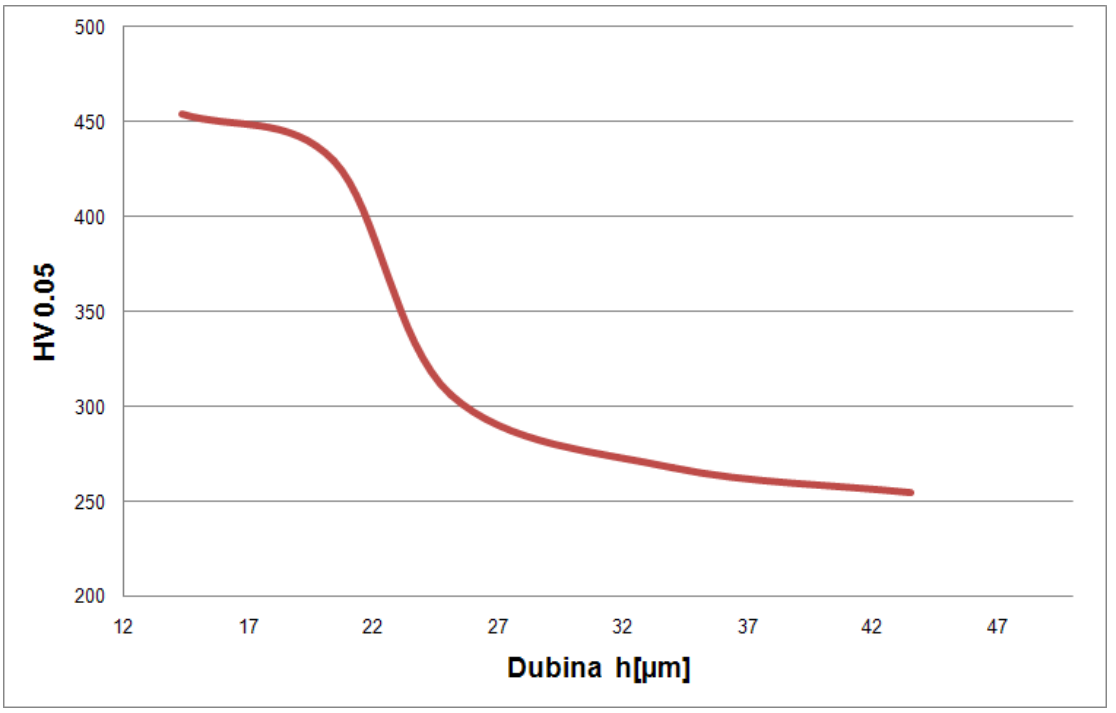
Slika 74: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 3

Uzorak 4

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri za uzorak 4 prikazani su u tablici 17 i na slici 75.

Tablica 17: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 4

Razina dubine	Dubina h [µm]	HV 0.05	$\bar{h}$ [µm]	$\bar{X}$ HV 0.05
1	14.34	460	14.32	453.67
	14.50	460		
	14.12	441		
2	20.93	423	20.39	429
	20.26	423		
	19.98	441		
3	24.88	303	25.09	306.33
	25.16	313		
	25.24	303		
4	33.92	274	33.99	268
	33.86	265		
	34.19	265		
5	43.64	257	43.5	254.33
	43.24	249		
	43.61	257		



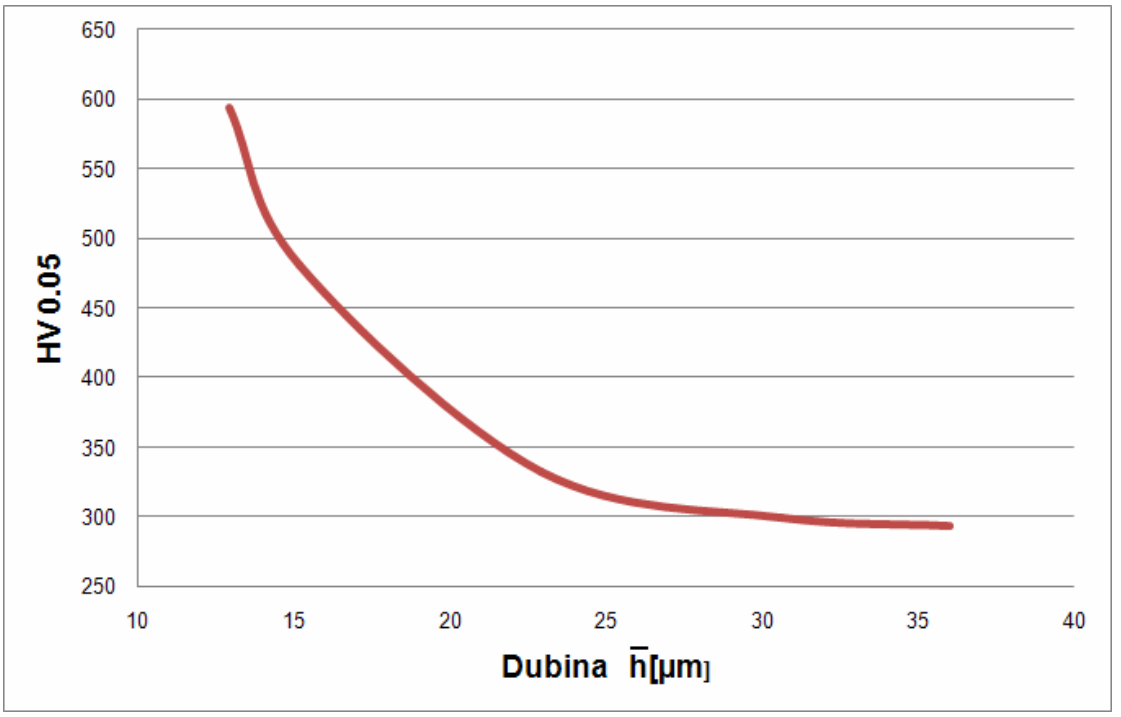
Slika 75: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 4

Uzorak 5

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri za uzorak 5 prikazani su u tablici 18 i na slici 76.

Tablica 18: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 5

Razina dubine	Dubina h [µm]	HV 0.05	$\bar{h}$ [µm]	$\bar{X}$ HV 0.05
1	12.71	603	12.92	593.67
	13.26	603		
	12.80	575		
2	15.09	480	15.17	480.33
	15.15	460		
	15.26	501		
3	22.88	313	22.92	332.67
	23.12	349		
	22.77	336		
4	29.77	283	30.6	299.67
	31.11	303		
	30.93	313		
5	35.69	283	36.01	293
	36.11	293		
	36.22	303		



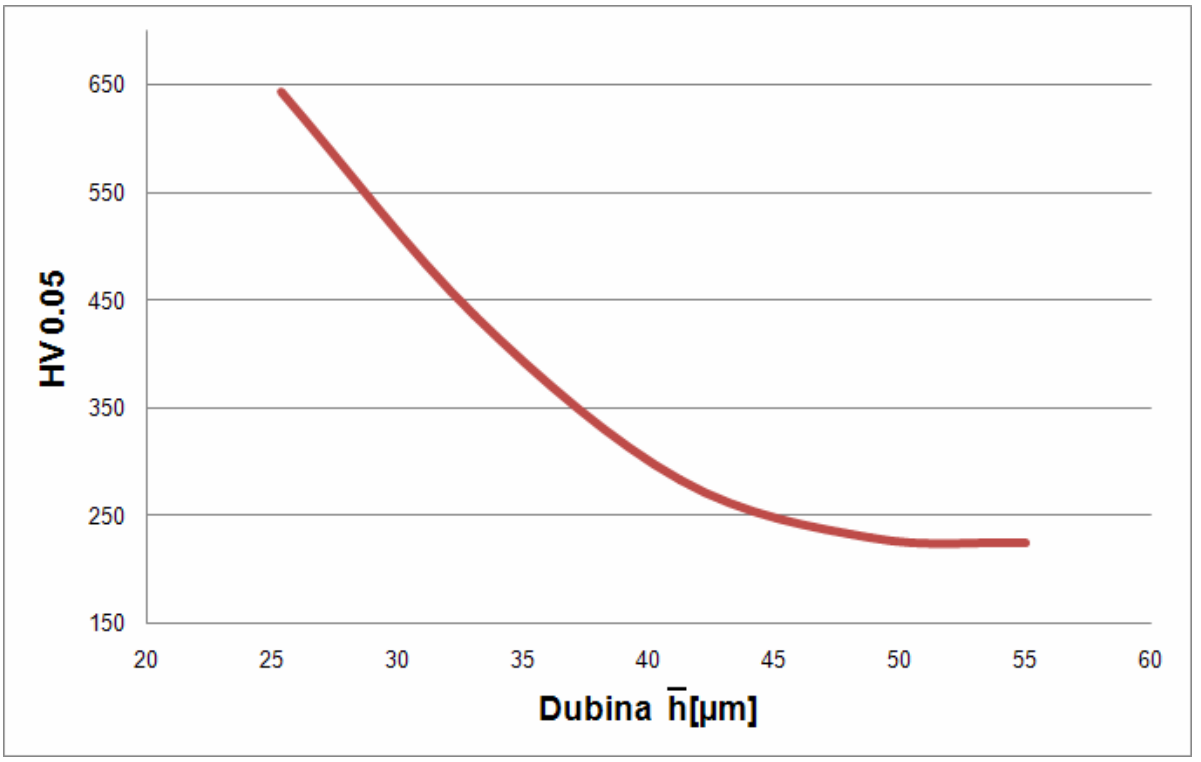
Slika 76: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 5

Uzorak 6

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri za uzorak 6 prikazani su u tablici 19 i na slici 77.

Tablica 19: Prikaz izmjerenih rezultata tvrdoće za uzorak 6

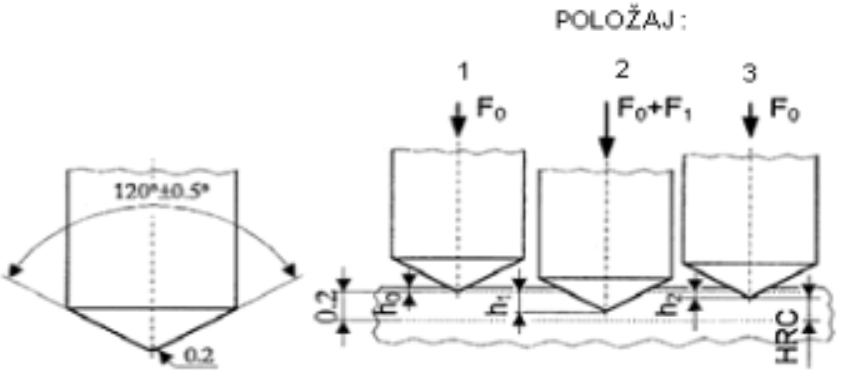
Razina dubine	Dubina h [µm]	HV 0.05	$\bar{h}$ [µm]	$\bar{X}$ HV 0.05
1	26.26	633	25.33	644
	24.01	666		
	25.73	633		
2	33.94	441	33.07	435
	32.25	423		
	33.01	441		
3	39.44	283	41.21	283.33
	42.19	274		
	42.02	293		
4	48.44	221	48.83	229.67
	49.11	234		
	48.93	234		
5	54.59	227	55.01	225
	55.31	227		
	55.13	221		



Slika 77: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće od površine prema jezgri uzorka 6

5.5.4. Analiza makrotvrdoće

Ispitivanje tvrdoće površine obrađenih uzoraka provedeno je po HRC Rockwell metodi, na uređaju AVK, vrste KV – 1, mađarske proizvodnje, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Kod ove metode se u metal (po ovoj metodi se mjeri tvrdoća samo metalnih materijala) utiskuje dijamantni stožac (engl. "cone" - HRC metoda). Stožac ima vršni kut od 120°, kao što je prikazano na slici 78. Kod Rockwellove metode se, za razliku od Brinellove i Vickersove, mjeri dubina prodiranja penetratora, a ne veličina otiska.



Slika 78: Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC metodi,[27]

Tvrdoća se po HRC metodi mjeri na slijedeći način:

U položaju 1 penetrator se predopterećuje silom F=98 N što za posljedicu ima prodiranje penetratora ispod površine uzorka. Ta točka je i početni položaj za mjerenje dubine prodiranja. Ukupna moguća dubina prodiranja iznosi 0,2 mm i podijeljena je na 100 dijelova. Jedna podjela iznosi prema tome 0,002 mm, i predstavlja jedan stupanj tvrdoće po HRC metodi. Skala je okrenuta naopako, pa početnom položaju pripada vrijednost 100, a najvećoj mogućoj dubini prodiranja 0. Razlog tomu je činjenica da se manjoj dubini prodiranja (tvrđi materijali) pridružuje veći broj koji karakterizira veću tvrdoću, i obrnuto.

Nakon predopterećenja (F=98 N) slijedi glavno opterećenje (F=1373 N) pa je u položaju 2 penetrator opterećen s ukupno 1471 N. Taj položaj ne predstavlja tvrdoću po HRC-u jer je penetrator opterećen ukupnom silom (1471 N). Slijedi rasterećenje glavnog opterećenja (F=1373 N), ostaje samo predopterećenje (F=98 N), a penetrator se uslijed elastičnosti materijala vrati u položaj 3. Ova dubina predstavlja tvrdoću, tj. u ovom položaju se očitava tvrdoća na skali tvrdomjera. Detalj mjerenja makrotvrdoće kao i sam uređaj prikazani su slikom 79.

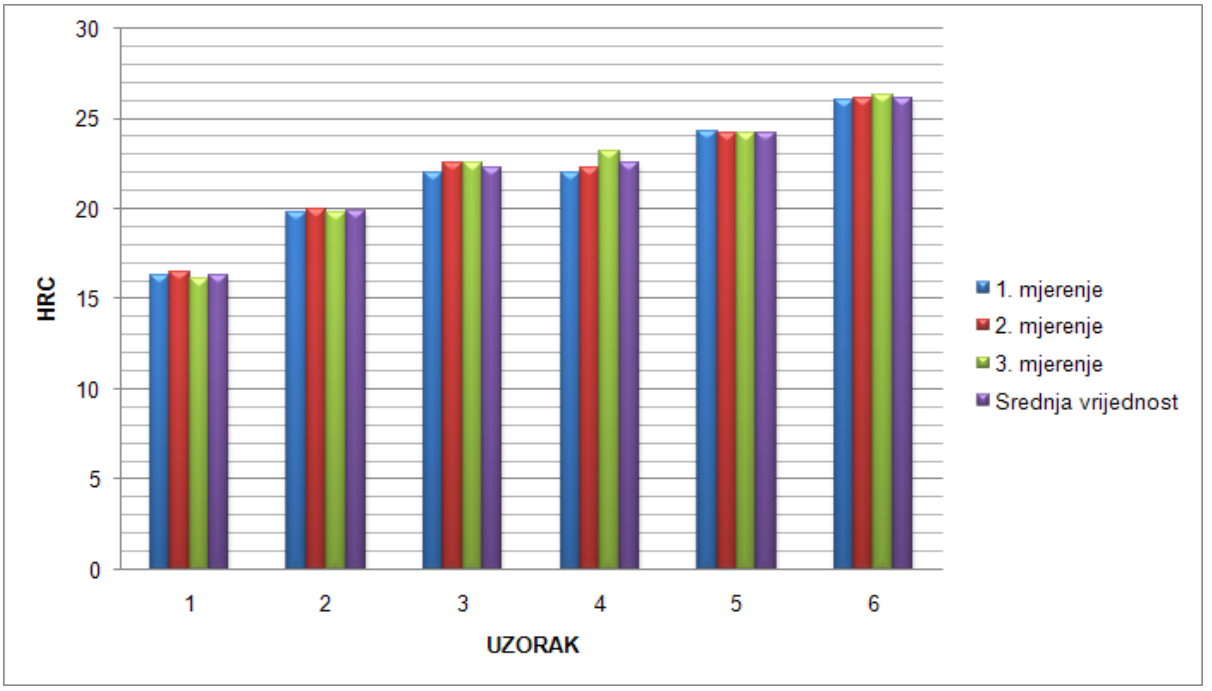
Slika 79: Mjerenje makrotvrdoće

5.5.4.1. Rezultati mjerenja makrotvrdoće

Na svakom uzorku provedeno je 3 mjerenja tvrdoće površine prema Rockwell HRC metodi. Rezultati mjerenja makrotvrdoće prikazani su u tablici 20 i na slici 80.

Tablica 20: Prikaz izmjerenih tvrdoća površine

Uzorak	Redni broj mjerenja	HRC	$\bar{X}$ HRC
1	1	16.3	**16.3**
	2	16.5	
	3	16.1	
2	1	19.8	**19.9**
	2	20	
	3	19.8	
3	1	22	**22.3**
	2	22.5	
	3	22.5	
4	1	22	**22.5**
	2	22.3	
	3	23.2	
5	1	24.3	**24.2**
	2	24.2	
	3	24.2	
6	1	26	**26.1**
	2	26.1	
	3	26.3	



Slika 80: Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće površine uzoraka

5.6. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE

5.6.1. Izrada gumenog prstena potrebnog za ispitivanje

Tijekom rada amortizera čelična klipnjača je u stalnom dodiru sa gumenim oringom (brtvom) radi brtvljenja. Prema tome, glavni razlog nepravilnog brtvljenja, oštećenja ili prevelikog trošenja gumenih oringa leži u stanju površine klipnjače. Tarni par kod ispitivanja je čelik – guma. Za potrebe ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje, potrebno je napraviti gumene prstene, od istog materijala kakvog su i gumeni orinzi na plinskim amortizerima U tablici 21 dani su tehnički podaci smjese za gumu, dobiveni od proizvođača.

Osnova smjese jest poliizoprenski prirodni kaučuk koji ima fizičko-mehanička svojstva navedena u tablica 21 i 22.

Tablica 21: Fizičko-mehaničke karakteristike gume prije starenja

KARAKTERISITKE GUME	
TVRDOĆA (°*ShA*)	**70**
PREKIDNA ČVRSTOĆA (Mpa)	**18,7**
ISTEZANJE (%)	**420**
TRAJNA DEFORMACIJA (%) KOD 25% SABIJANJA OD 22h/70°C	**18**
TRAJNA DEFORMACIJA (%) 70h/100°C	**21**
OTPORNOST NA NISKE TEMPERATURE (°C)	**- 35**

Tablica 22: Fizičko-mehaničke karakteristike gume nakon starenja od 7 dana, pri 70°C

KARAKTERISTIKE GUME	
TVRDOĆA (°*ShA*)	**73**
PREKIDNA ČVRSTOĆA (Mpa)	**18,9**
ISTEZANJE (%)	**390**

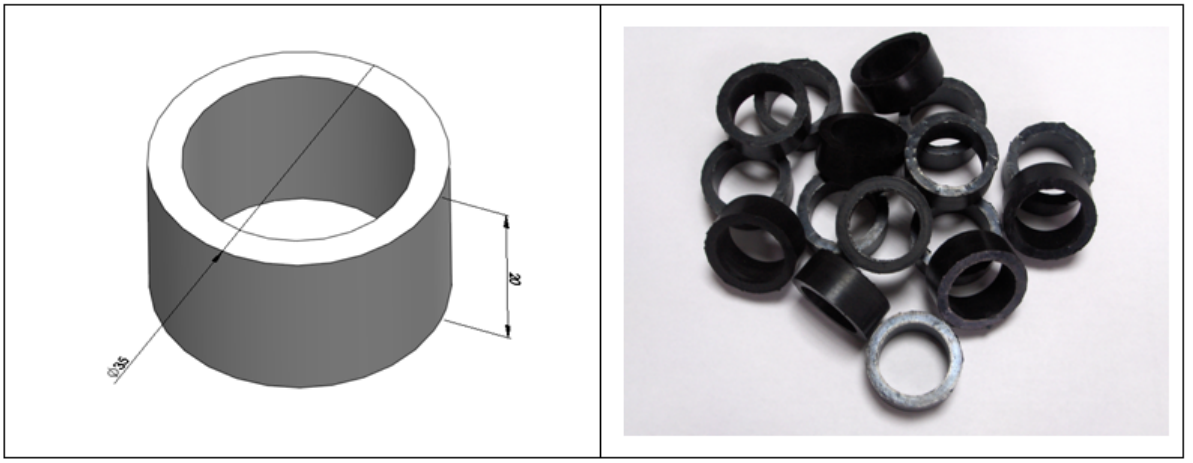
Izrada i priprema gumenih prstenova provedena je u poduzeću GO-MA d.o.o. u Sv. Nedjelji. Tehnološki proces izrade prstena sastoji se od:

- izrade kalupa ili alata
- punjenja kalupa sirovom gumenom smjesom
- vulkanizacije po propisanom tehnološkom postupku (temperatura, tlak...)
- završna obrada i dorada

Detalji izrade gumenog prstena prikazani su slikom 81.

Slika 81: Detalji izrade gumenog prstena

Slika 82 prikazuje gotove gumene prstene izvađene iz preše za pečenje



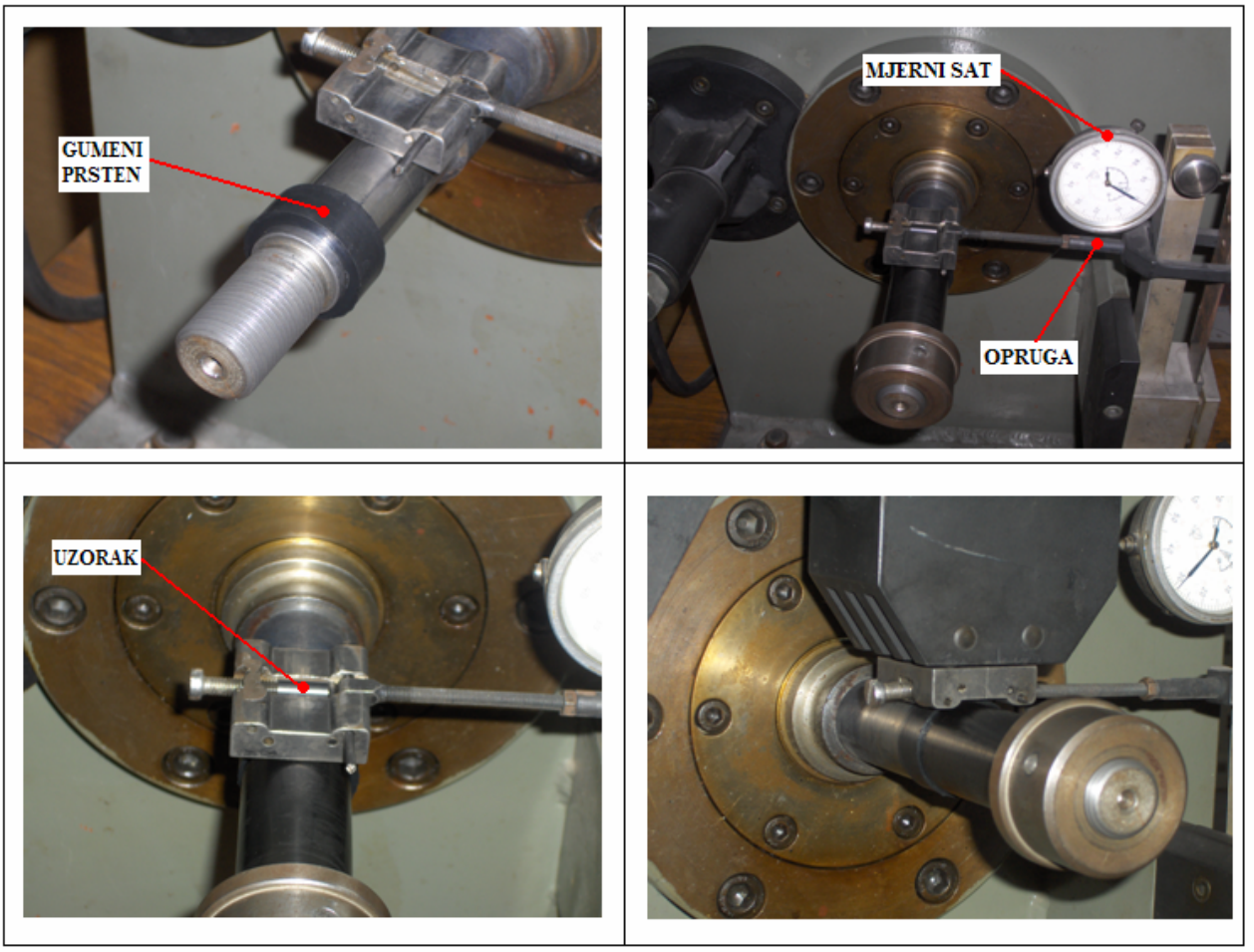
Slika 82: Gumeni prsteni

5.6.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje

Ispitivanje je provedeno na uređaju za ispitivanje faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje, slika 83. Na svakom uzorku provedena su 3 mjerenja u trajanju od 180s. Na uređaju se preko mjernog sata očitava progib opruge. Točnost mjernog sata je 0.01mm. Pri pokretanju uređaja očitava se početni progib opruge, a zatim se svakih 30s bilježi maksimalni i minimalni progib, koji je ostvaren u tom vremenskom periodu. Na taj način na kraju imamo sedam očitanja u svakom mjerenju. Razlog takvom načinu mjerenja je taj što kazaljka mjernog sata tijekom ispitivanja gotovo nikad ne miruje, nego stalno varira između maksimalne i minimalne vrijednosti. Progib elastične opruge mijenja se zavisno od tangencijalne sile koja se pojavljuje u tarnom paru: ispitni uzorak – gumeni prsten, slika 84. Prema očitanom progibu opruge određujemo tangencijalnu silu F_t. Normalna sila F_N je ostvarena preko utega, konstantna je i iznosi 50N. Faktor trenja se računa prema izrazu $\mu = \frac{F_t}{F_N}$.

Slika 83: Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Detalji mjerenja otpornosti na adhezijsko trošenje su prikazani slikom 84.



Slika 84: Mjerenje otpornosti na adhezijsko trošenje

Parametri ispitivanja:

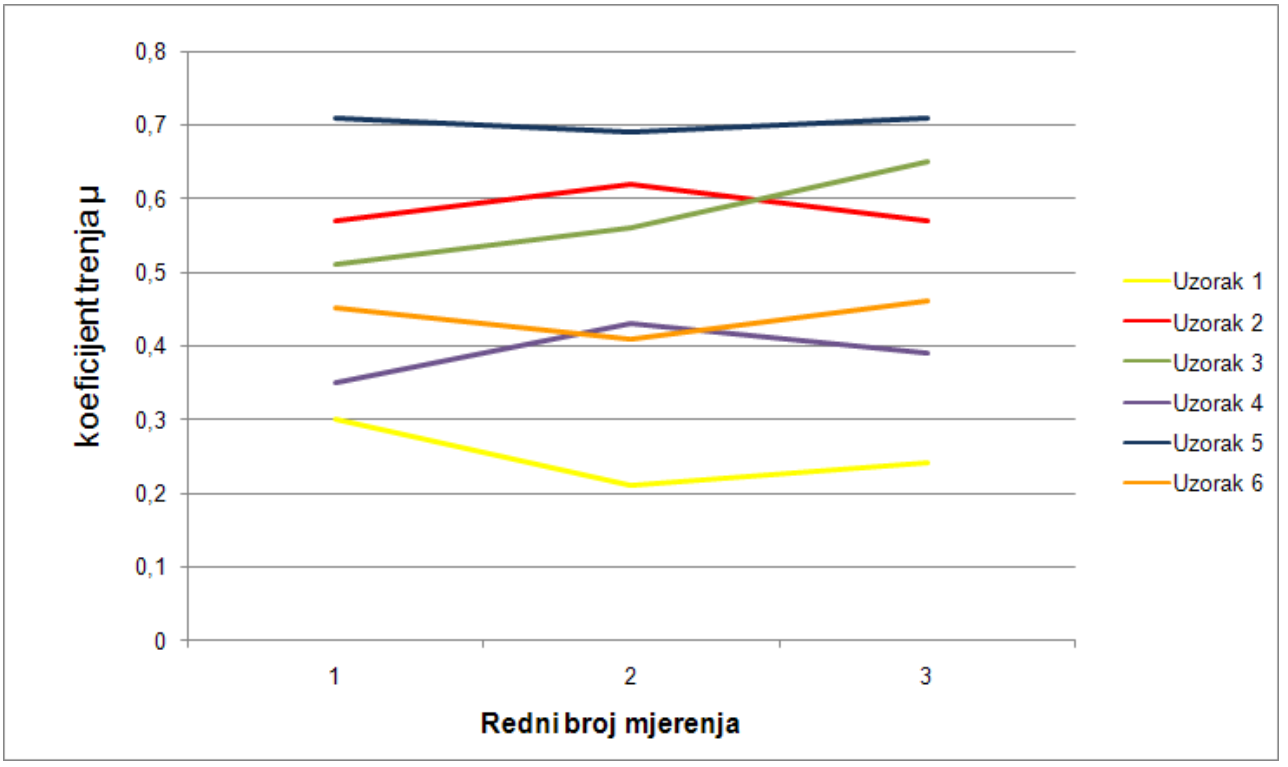
- broj okretaja n = 1.5 okr/min
- promjer prstena d = 35 mm
- t = 180 s
- v = 0.00275 m/s

Srednje vrijednosti dobivenih rezultata prikazani su u tablici 23 a rezultati svih pojedinačnih mjerenja nalaze se u **Prilogu 9.1**

Tablica 23: Prikaz srednjih vrijednosti izmjerenih koeficijenata trenja uzoraka

UZORAK	koeficijent trenja $\bar{\mu}$		
	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
1	0.3	0.21	0.24
2	0.57	0.62	0.57
3	0.51	0.56	0.65
4	0.35	0.43	0.39
5	0.71	0.69	0.71
6	0.45	0.41	0.46

Slika 85 prikazuje usporedbu srednjih vrijednosti dobivenih rezultata koeficijenata trenja, za svaki uzorak po mjerenju.



Slika 85: Usporedba srednjih vrijednosti koeficijenata trenja uzoraka

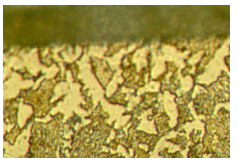
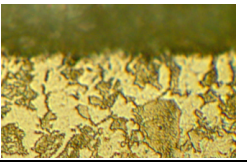
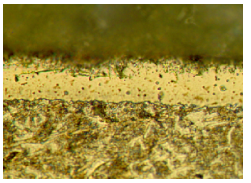
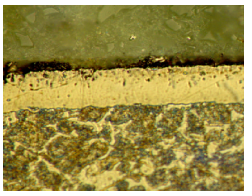
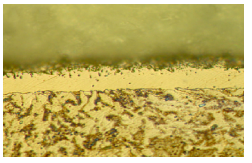
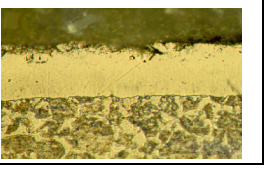
6. ANALIZA REZULTATA

Kako različita toplinsko kemijska obrada površine čelika za poboljšavanje Č1531.5 (C45E) utječe na mikrostrukturu materijala te na mehanička i tribološka svojstva površine pokazuju rezultati obavljenih laboratorijskih ispitivanja:

- **Osvrt na analizu mikrostrukture**

U tablici 24 prikazan je dobiveni sastav i debljina sloja obrađenih uzoraka

Tablica 24: Sastav i debljina sloja obrađenih uzoraka

Uzorak	Toplinska obrada	Sloj		Slika
		Debljina	Sastav	
1.	Neobrađen	--------	----------	
2.	Oksidacija AB1	Sloj je vrlo tanak i vidljiv je samo površinski.	Željezni oksidi Fe_3O_4 magnetit	
3.	Tenifer Q	22 µm	Željezni oksidi Fe_3O_4 magnetit + Željezni nitridi ε-$Fe_{2-3}N$ i γ'-Fe_4N	
4.	Tenifer QPQ	20 µm	Željezni oksidi Fe_3O_4 magnetit + Željezni nitridi ε-$Fe_{2-3}N$ i γ'-Fe_4N	
5.	Tenifer	17µm	Željezni nitridi ε-$Fe_{2-3}N$ i γ'-Fe_4N	
6.	Nitriranje + Oksidacija	32µm	Oksidacijski sloj + Sloj nitrida	

Analizom mikrostrukture je utvrđeno da je mikrostruktura jezgre svih uzoraka nakon provedene toplinsko kemijske obrade ostala nepromijenjena i jednaka referentnom uzorku 1 koji nije toplinski obrađen. Jezgra svih uzoraka sastoji se od ferita i perlita, gdje ipak prevladava perlit.

Rub uzorka 1, u odnosu na njegovu jezgru, ima sitnije zrno zbog nagnječenja, koje je nastalo uslijed proizvodnje čelika gdje je podvrgnut obradi hladnog vučenja. Isto tako vidi se da je udio ferita viši nego što je u jezgri, zbog djelomičnog razugljičenja.

Na površini uzorka 2 vidljiv je golim okom crni oksidni sloj magnetita Fe_3O_4 koji je nastao kao rezultat 30 minutne oksidacije. Sloj je jako tanak i ne vidi se niti pri maksimalnom povećanju svjetlosnog mikroskopa od 1000x. Isto tako vidi se da je, uz rub, udio ferita viši od udjela perlita. Razlog tomu je razugljičenje površine nastalo oksidacijom.

Na površini uzorka 3 vidljiv je golim okom crni sloj koji je nastao kao rezultat nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom. Sloj se sastoji od željeznih oksida tipa Fe_3O_4 magnetit, nastalih oksidacijom, a ispod sloja Fe_3O_4 nalaze se željezni nitridi ε i γ koji su nastali nitrokarburiranjem. Pod mikroskopom se vidi da je dobiveni sloj kontinuiran po cijeloj površini uzorka, dosta je porozan, ali bez pukotina. Sloj je i valovit što znači da je površina uzorka relativno hrapava.

Na površini uzorka 4 vidljiv je isto tako golim okom crni sloj, istog sastava kao i kod uzorka 3. Sloj je također dobiven nitrokarburiranjem ali se u ovom slučaju naknadna oksidacija provodila 2 puta. Prvi put nakon nitrokarburiranja, a drugi put nakon poliranja površine. Pod mikroskopom se vidi da je sloj kontinuiran te blago porozan i bez pukotina. Uočava se da sloj nije valovit što znači da je površina male hrapavosti, a to se od obrađene površine i traži.

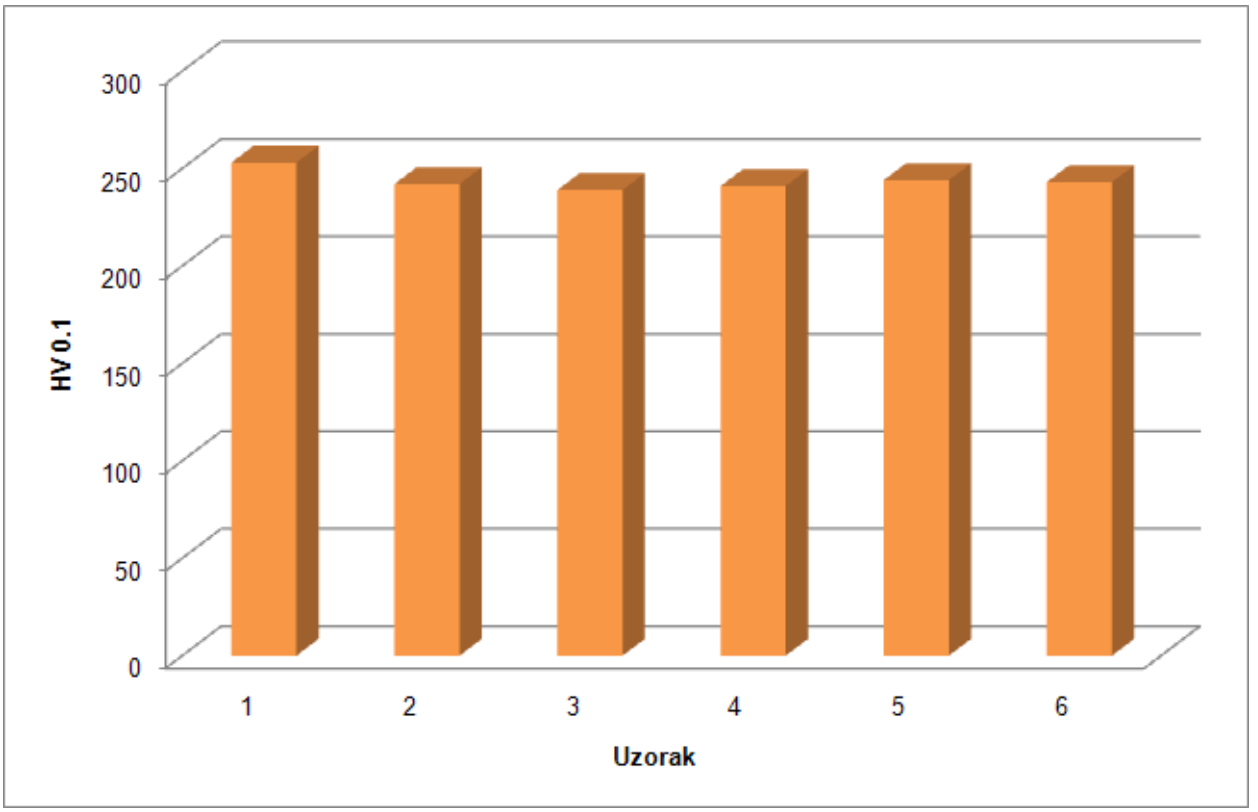
Na površini uzorka 5 je golim okom također vidljiv crni sloj. Ovaj sloj je dobiven nitrokarburiranjem bez naknadne oksidacije i poliranja. Sloj se sastoji od željeznih nitrida ε i γ. Pod mikroskopom se uočava da je sloj porozan u 1/3 debljine uz površinu, što je uobičajeno za nitrokarburiranje postupkom TENIFER. Sloj je kontinuiran i bez pukotina ali valovit, što znači da je površina hrapava. Primjećuje se i da je odmah ispod sloja prisutan viši udio ferita u odnosu na udio u jezgri.

Uzorak 6 je nitriran i oksidiran u kupkama čiji sastav nije poznat (pravno zaštićen), stoga je i točan sastav sloja nepoznat. Smatra se da je na površini sloj oksida željeza s većim oksidacijskim brojem od uobičajenog (+2,+3) koji su dobiveni oksidiranjem u plinskoj atmosferi, a ispod tog sloja da su prisutni željezni nitridi ε i γ koji su dobiveni nitriranjem. Pod mikroskopom se vidi da je sloj u potpunosti neporozan, bez pukotina. Sloj je relativno kontinuiran i potpuno prekriva površinu osnovnog materijala. Ovaj sloj je i najdeblji, a uzrok tomu je vjerojatno dugo

nitrokarburiranje u trajanju od 5h. Mjestimice se uočavaju mala otkrhnuća na vanjskoj površini sloja.

- **Osvrt na analizu mikrotvrdoće jezgre uzorka**

Mjerenjem mikrotvrdoće jezgre uzoraka željelo se pokazati kako pojedina toplinsko kemijska obrada djeluje na mehanička svojstva jezgre uzoraka u odnosu na referentni toplinsko neobrađeni uzorak 1. Prema analizi mikrostrukture vidi se da nije došlo do promjene mikrostrukture jezgre te se očekuje da nema većih razlika u tvrdoći jezgre uzoraka. Slika 86 prikazuje srednje vrijednosti mjerenja mikrotvrdoće uzoraka prema Vickers HV 0.1

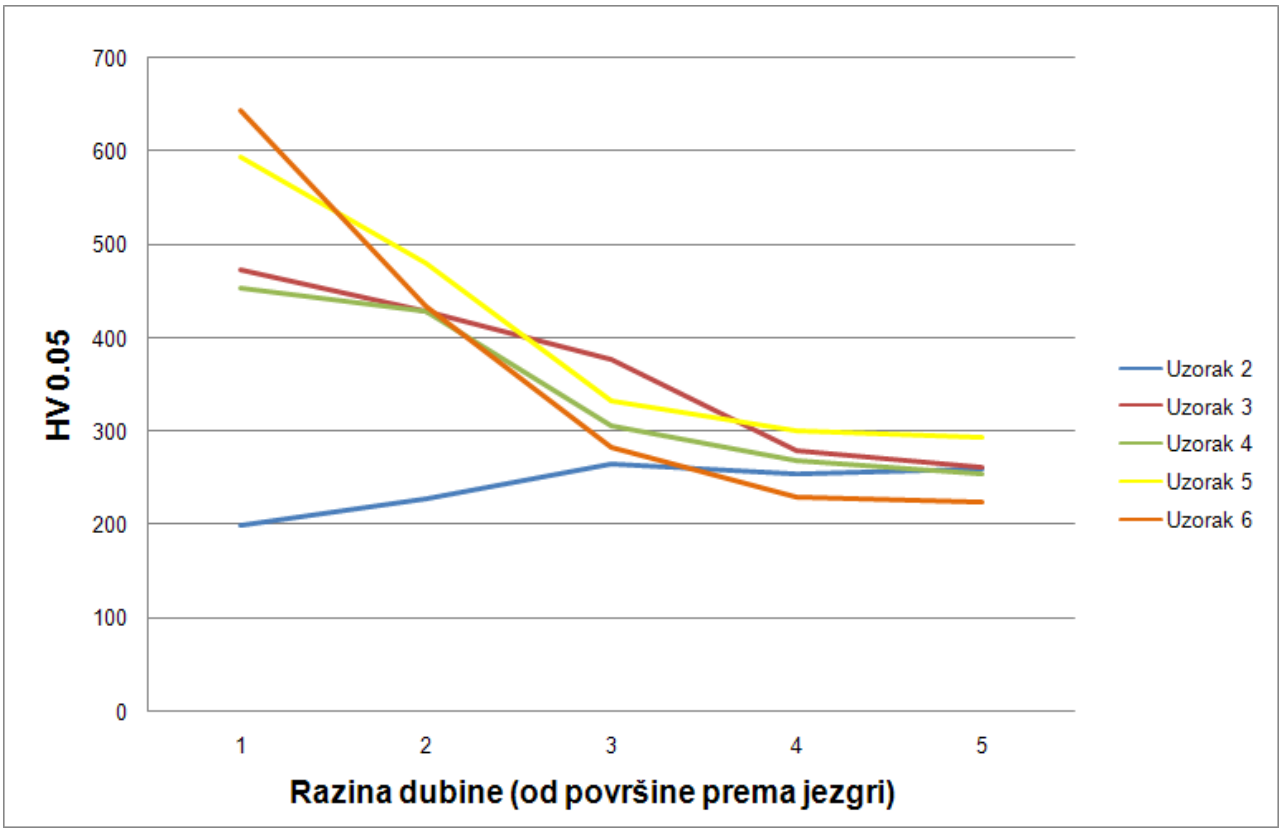


Slika 86: Prikaz srednjih vrijednosti rezultata mjerenja mikrotvrdoće jezgre

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da sve toplinsko kemijske obrade koje su provedene neznatno smanjuju tvrdoću jezgre uzoraka. Razlog tomu je taj što je temperatura toplinsko kemijske obrade niža od temperature strukturne pretvorbe čelika Č1531.5.

- **Osvrt na analizu mikrotvrdoće od površine prema jezgri**

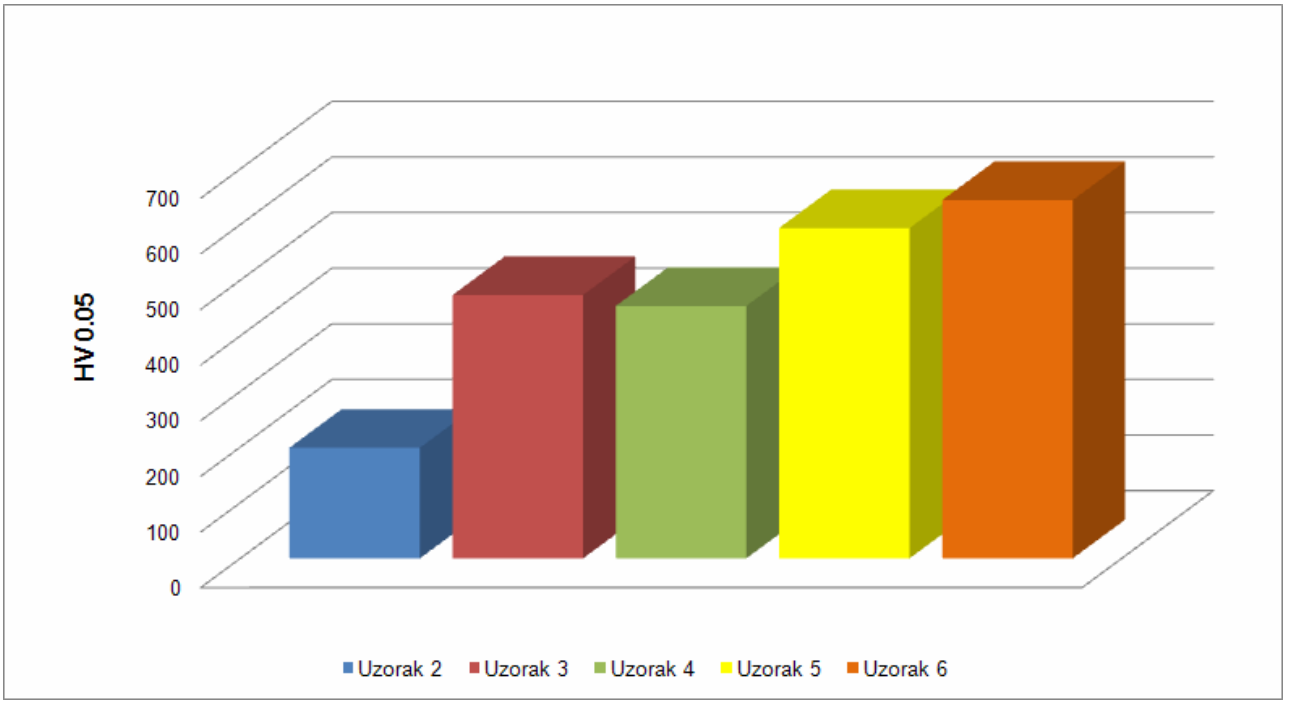
Slika 87 prikazuje kako se kreću vrijednosti mikrotvrdoće svih uzoraka od površine prema jezgri.



Slika 87: Prikaz vrijednosti rezultata mjerenja mikrotvrdoće od površine prema jezgri

Svim toplinski obrađenim uzorcima, osim uzorku 2, tvrdoća površine je znatno viša od tvrdoće jezgre. Uzorku 2 tvrdoća uz površinu je vrlo niska i ona raste od površine prema jezgri. Razlog tomu je razugljičenje površine uzorka uslijed oksidacije. Ostali uzorci podvrgnuti su i toplinsko kemijskom obradi nitrokarburiranja kojom se površina metalnih materijala pretežito obogaćuje dušikom, a istovremeno u manjoj mjeri i ugljikom što u konačnici dovodi do povećanja tvrdoće površinskih slojeva. Vidi se da tvrdoća uzorka 6 (nitriranje + oksidacija) od površine prema jezgri najbrže pada, ali uzorak 6 ima i najveću tvrdoću površinskog sloja. Uzorak 5 koji je podvrgnut postupku Tenifer nitrokarburiranja bez naknadne oksidacije ima približno istu mikrotvrdoću kao i uzorak 6, ali pad njegove tvrdoće od površine prema jezgri nije tako strm kao kod uzorka 6. Razlog tomu je taj što je uzorak 6 nitriran u trajanju od 5h što je dovelo do difuzije većeg udjela ugljika iz difuzijske zone u zonu spoja (vidjeti sliku 43 na str. 46).

Slika 88 prikazuje vrijednosti mikrotvrdoće za zonu spojeva površinskih slojeva toplinsko kemijski obrađenih uzoraka.



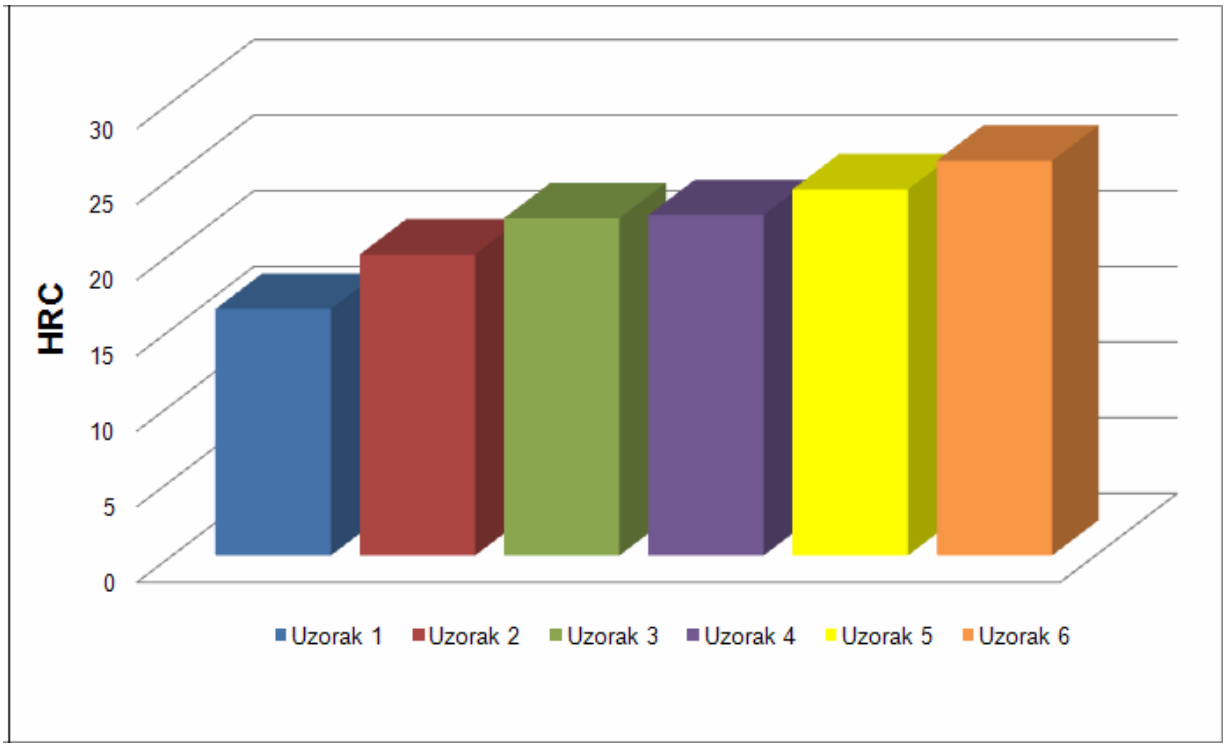
Slika 88: Prikaz vrijednosti rezultata mjerenja mikrotvrdoće zone spojeva

Na slici 88 se vidi da najveću mikrotvrdoću toplinsko kemijski dobivenog sloja ima uzorak 6, a najmanju uzorak 2. Uzorak 4 ima nižu tvrdoću od uzorka 3 iz razloga što se kod uzorka 4 postupak oksidacije provodi dva puta, a kod uzorka 3 samo jednom. Oksidacijom se stvaraju željezni oksidi koji su otporni na koroziju i koji ujedno imaju i manju tvrdoću od željeznih nitrida koji nastaju nitrokarburiranjem.

- **Osvrt na analizu makrotvrdoće površine uzoraka, HRC**

Rezultati mjerenja makrotvrdoće površine uzoraka prema Rockwell HRC metodi pokazuju kako pojedina toplinsko kemijska obrada utječe na tvrdoću površine uzoraka u odnosu na referentni toplinski neobrađeni uzorak 1.

Slika 89 prikazuje srednje vrijednosti makrotvrdoće površine uzoraka.



Slika 89: Prikaz vrijednosti rezultata mjerenja makrotvrdoće površina uzoraka

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da sve toplinsko kemijske obrade koje su provedene povećavaju tvrdoću površine uzoraka, što je bilo i za očekivati prema rezultatima dobivenima analizom mikrotvrdoće površinskih slojeva. Iz slike se vidi da najveće povećanje tvrdoće površine ima uzorak 6, a najmanje povećanje uzorak 2 koji je toplinski obrađen samo oksidacijom. Uzorak 4 ima podjednaku tvrdoću površine kao uzorak 3 iako je uzorak 4 dva puta naknadno oksidiran, dok je uzorak 3 jednom. Uzorak 5 ima veću tvrdoću od uzoraka 3 i 4. Budući da je uzorak 5 obrađen postupkom nitrokarburiranja pod istim uvjetima kao i uzorci 3 i 4 ali bez naknadne oksidacije, dade se zaključiti da oksidacija smanjuje površinsku tvrdoću. Velika tvrdoća uzorka 6 najvjerojatnije leži u tome što je uzorak 6 podvrgnut nitriranju u trajanju od 5h što je dovelo do difuzije većeg udjela ugljika u površinski sloj.

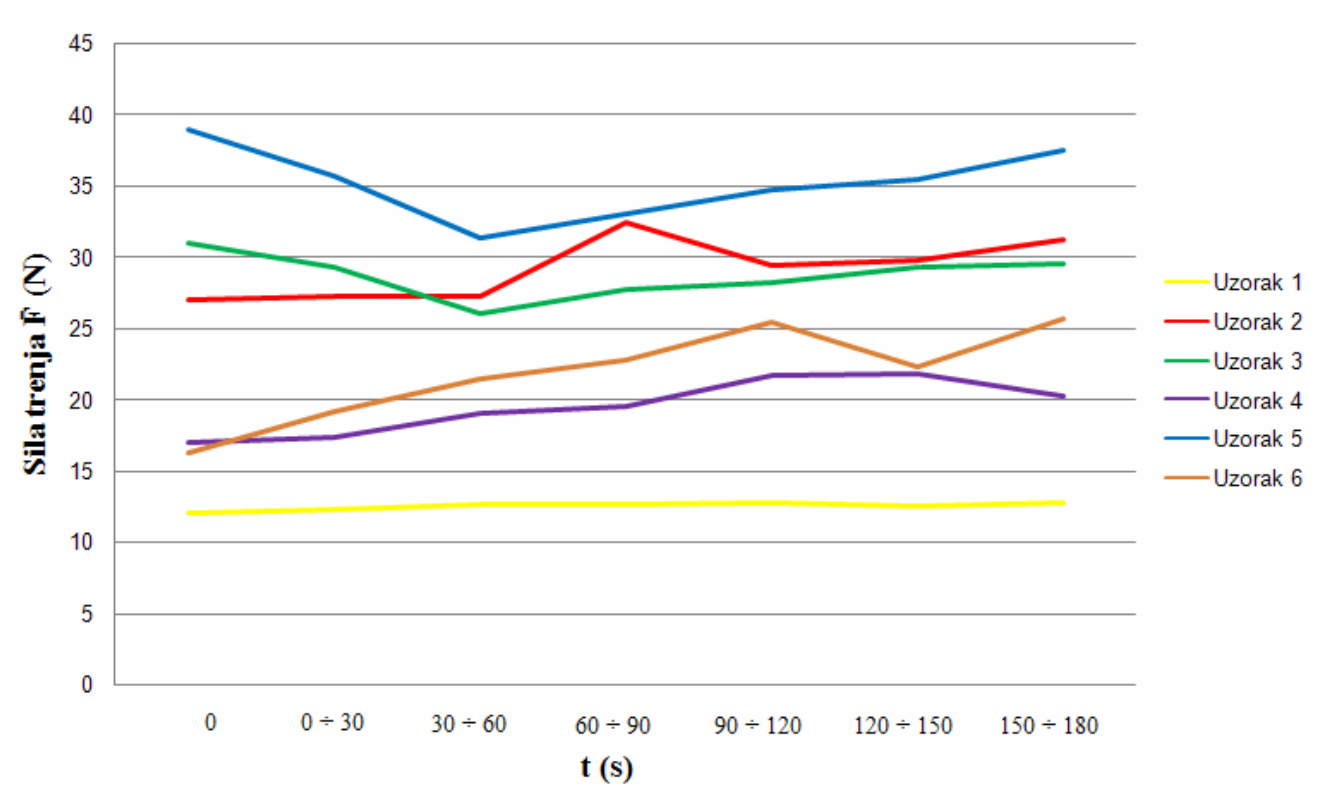
- **Osvrt na rezultate ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje**

Ispitivanje uzoraka na otpornost prema adhezijskom trošenju nije pokazalo na ispitnim uzorcima nikakve tragove trošenja. Tragovi trošenja nisu vidljivi niti na gumenom prstenu. Razlog tomu je prekratko vrijeme trajanja ispitivanja od 180s. Međutim dobiveni su rezultati koeficijenta trenja za svaki uzorak prema kojima se može izračunati sila trenja F_t. U većini slučajeva u teoriji veća sila trenja znači odmah i veće trošenje, prema tome i veće adhezijsko trošenje. Iz tog razloga vrijednosti sile trenja dobivenih za svaki uzorak će biti osnovni pokazatelj otpornosti prema adhezijskom trošenju. U tablici 25 prikazane su srednje vrijednosti sile trenja $\overline{F}_t$ u ovisnosti o vremenskom periodu *t* [s].

Tablica 25: Vrijednosti sile trenja uzoraka

UZORAK	Srednje vrijednosti sile trenja $\overline{F}_t$ [N] u ovisnosti o vremenskom periodu t [s]						
	0	0 ÷ 30	30 ÷ 60	60 ÷ 90	90 ÷ 120	120 ÷ 150	150 ÷ 180
1	12	12.3	12.7	12.7	12.8	12.5	12.8
2	27	27.3	27.2	32.5	29.5	29.8	31.3
3	31	29.3	26	27.7	28.2	29.3	29.5
4	17	17.3	19	19.5	21.7	21.8	20.2
5	39	35.7	31.3	33	34.7	35.5	37.5
6	16.3	19.2	21.5	22.8	25.5	22.3	25.7

Na slici 90 je prikazana usporedba srednjih vrijednosti sile trenja $\overline{F}_t$ u ovisnosti o vremenskom periodu *t* [s].



Slika 90: Usporedba vrijednosti sile trenja uzoraka

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da sve provedene toplinsko kemijske obrade na uzorcima stvaraju površinske slojeve koji su hrapaviji od površine referentnog uzorka 1, kako se vidi na slici 90. Uzorak 5 obrađen običnim Tenifer postupkom nitrokarburiranja pokazuje najviše sile trenja, te je prema tome površina uzorka 5 najnepovoljnija za tarni par ispitni uzorak – gumeni prsten. Loš rezultat uzorka 5 je i očekivan ako se pogleda slika mikrostrukture (tablica 42), gdje se vidi da je sloj vrlo valovit što znači da je i vrlo hrapav. Razlog tomu je taj što je sloj dobiven samo nitrokarburiranjem bez naknadne oksidacije i poliranja. Uzorak 2 također pokazuje loše rezultate, a razlog tome jest prisutnost željeznih oksida magnetita u sloju na površini koji očito čine sloj valovitim, a samim time i hrapavim. Sloj uzorka 3 relativno isto pokazuje loše rezultate sile trenja kao i uzorak 2. Na slikama mikrostrukture uzorka 3 se vidi da je sloj valovit što znači da je površina uzorka hrapava. Razlog tomu je taj što je uzorak 3 podvrgnut postupku nitrokarburiranja plus naknadna oksidacija, ali bez završnog poliranja. Da se proveo postupak poliranja površina uzorka 3 sigurno bi bila manje hrapava što bi u konačnici rezultiralo i manjom silom trenja. Najbolje rezultate pokazuju uzorci 4 i 6 čiji rezultati su i očekivani ako se pogleda slika mikrostrukture njihovih slojeva koja pokazuje blagu valovitost sloja, a to odmah znači i manju hrapavost površine. Iznos sile trenja uzoraka 4 i 6 je manja od iznosa sila trenja ostalih toplinsko obrađenih uzoraka, što znači da je toplinsko kemijska obrada uzoraka 4 i 6 optimalna tribološka mjera u vidu otpornosti na adhezijsko trošenje.

7. ZAKLJUČAK

Plinski amortizer gubi svoju funkciju kad dođe do curenja plina iz cilindra. To se najčešće događa kada dođe do oštećenja ili trošenja gumenih oringa (brtvila), čime amortizer, u toku sabijanja klipnjače, nema pravilno brtvljenje. Glavni razlog nepravilnog brtvljenja, oštećenja ili prevelikog trošenja gumenih oringa leži u stanju površine klipnjače. Čelik Č.1531.5 (C45E) koristi se za izradu klipnjača plinskog amortizera, a kako je klipnjača klizni element amortizera, od površine se traži da bude povišene tvrdoće te prije svega da bude glatka i otporna na adhezijsko trošenje. Traženo stanje površine može se postići tako da čelik Č1531.5 podvrgnemo odgovarajućim postupcima toplinsko kemijske obrade i na taj način napravimo odgovarajuću modifikaciju površinskog sloja.

U ovom radu istražena su svojstva površine slojeva koja su dobiven sa pet različitih toplinsko kemijskih obrada. Od njih pet tražene uvjete stanja površine, u vidu male sile trenja i povišene tvrdoće, ispunile su dvije toplinsko kemijske obrade:

- **TENIFER QPQ**
- **Postupak nitrokarburiranja poduzeća Laverna d.o.o. (sastav radnog medija (solne kupke) nije poznat zbog zaštite prava proizvođača.)**

Te dvije toplinsko kemijske obrade su se pokazale kao optimalna tribološka mjera u cilju povećanja otpornosti na adhezijsko trošenje, što je i bio cilj ovoga rada. U tablici 26 prikazana je usporedba rezultata ispitivanja površinskih slojeva dobivenih toplinsko kemijskim obradama.

Tablica 26: Dobiveni rezultati istraživanja

Toplinsko kemijska obrada	HV 0.1 (jezgre)	HV 0.05 (zone spojeva)	HRC	$\overline{F}_t$ [N]
Tenifer QPQ	241	453,67	22.5	19.5
Nitrokarburiranje Laverna d.o.o.	243	644	26.1	21.9
Tenifer Q	239	473.33	22.3	28.7
Tenifer	244	593,67	24.2	35.2
Oksidacija	242	198.67	19.9	29.2

8. LITERATURA

[1] Vinko Ivušić: ”Tribologija” , Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[2] Dostupno na: http://www.the-ultralight-site.com/fig7-8.gif, [listopad 2009.]

[3] Gorana Jelić Mrčelić: ”Korozija i zaštita materijala okoliša”, Digitalni udžbenik, Pomorski fakultet, Split, 2009.

[4] Dostupno na: http://www.vibanalysis.co.uk/technical/wear/brinroll.jpg, [listopad 2009.]

[5] S. Škorić: ”Brušenje", Predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

[6] Dostupno na: www.daros.se/technical/images.html, [listopad 2009.]

[7] Dostupno na: http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/vrst_tros_hr.html, [listopad 2009.]

[8] Dostupno na: http:// www.fsb.hr/zavod_za_materijale/download, [listopad 2009.]

[9] M.G. Žnidarec d.o.o.: Katalog proizvoda, Zagreb, 2003.

[10] Dostupno na: http:// www.aritechgassprings.comlift_gas_springs.html, [listopad 2009.]

[11] Dostupno na: http://www.lesjoforsab.com/gas-springs/conventional-gas.asp, [listopad 2009.]

[12] Stabilus Catalog: Gas springs technical information, Koblenz, 1995.

[13] Lesjoforsab Catalog: Gas springs, Oslo, 2008

[14] Mladen Stupnišek, Franjo Cajner: “Osnove toplinske obrade metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.

[15] Dostupno na: http http://mminitriding.com/nitriding.html, [listopad 2009.]

[16] Dostupno na: http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/casehardening.html, [listopad 2009.]

[17] Dostupno na: http://www.ibccoatings.com/dhin.html, [listopad 2009.]

[18] Dostupno na: http://arniesairsoft.co.uk/news2/wp-content, [listopad 2009.]

[19] Franjo Cajner, Darko Landek, Ema Stupnišek Lisac: “Improvement of properties of steels applying salt bath nitrocarburizing with post-oxidation”, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2003.

[20] Dostupno na:http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale, [listopad 2009.]

[21] Struers metalog guide, Kopenhagen, 1992.

[22] F. Wendell: Current Trends in surface Treatment of Tools Used for Plastics Processing, Berlin, 1990.

[23] M. Mainka,J. Bosslet:New Developments in salth bath nitrocarburizing, Duferrit Gmbh, 68169 Manheim, Germany (396 – 403)

[24] M. Novosel : Osnove toplinske obrade, Inžinjerski priručnik , Školska knjiga Zagreb 1998

[25] Marušić, Katarina; Otmačić, Helena; Landek, Darko; Cajner, Franjo; Stupnišek-Lisac, Ema. Modification of carbon steel surface by the Tenifer® ; process of nitrocarburizing and post-oxidation. // Surface & Coatings Technology. 201 (2006) ; 3415-3421 (članak, znanstveni).

[26] Dostupno na: http://www.vorax.hr/dokumenti/mjer_tvr_hr.html, [listopad 2009]

[27] Mladen Franz: “ Mehanička svojstva materijala”, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.

9. PRILOG

9.1 REZULTATI ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE

Uzorak 1

Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 27, 28, 29 i slikom 91.

Tablica 27: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 1

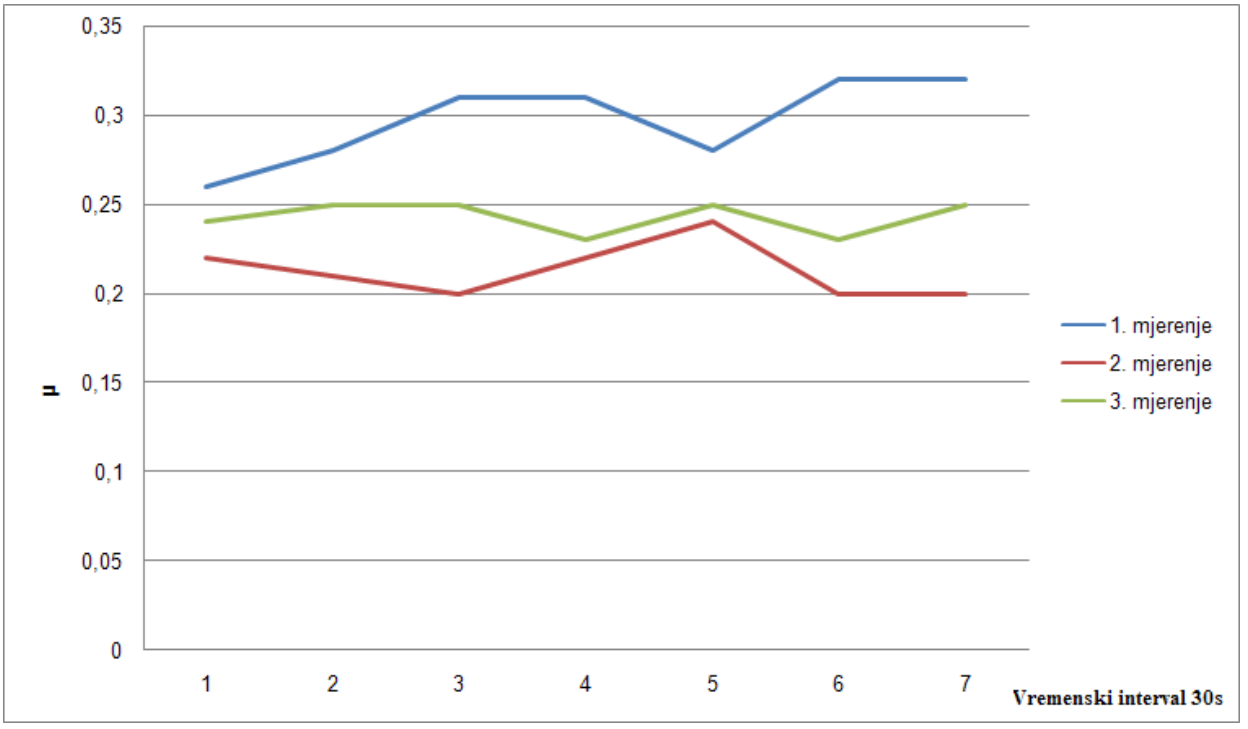
t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	2	13	13	0.26
0 ÷ 30	2 ÷ 2.4	13 ÷ 15	14	0.28
30 ÷ 60	2.2 ÷ 2.6	14 ÷ 17	15.5	0.31
60 ÷ 90	1.9 ÷ 2.9	12 ÷ 19	15.5	0.31
90 ÷ 120	2 ÷ 2.3	13 ÷ 15	14	0.28
120 ÷ 150	2 ÷ 2.9	13 ÷ 19	16	0.32
150 ÷ 180	2 ÷ 2.9	13 ÷ 19	16	0.32

Tablica 28: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 1

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	1.7	11	11	0.22
0 ÷ 30	1.5 ÷ 1.7	10 ÷ 11	10.5	0.21
30 ÷ 60	1.5 ÷ 1.6	10 ÷ 10	10	0.2
60 ÷ 90	1.6 ÷1.9	10 ÷ 12	11	0.22
90 ÷ 120	1.7 ÷ 2	11 ÷ 13	12	0.24
120 ÷ 150	1.5 ÷ 1.6	10 ÷ 10	10	0.2
150 ÷ 180	1.5 ÷ 1.6	10 ÷ 10	10	0.2

Tablica 29: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 1

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	1.9	12	12	0.24
0 ÷ 30	1.9 ÷ 2	12 ÷ 13	12.5	0.25
30 ÷ 60	1.9 ÷ 2	12 ÷ 13	12.5	0.25
60 ÷ 90	1.7 ÷1.9	11 ÷ 12	11.5	0.23
90 ÷ 120	1.7 ÷ 2.2	11 ÷ 14	12.5	0.25
120 ÷ 150	1.7 ÷ 1.9	11 ÷ 12	11.5	0.23
150 ÷ 180	1.9 ÷ 2	12 ÷ 13	12.5	0.25



Slika 91: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 1

Uzorak 2

Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 30, 31, 32 i slikom 92.

Tablica 30: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 2

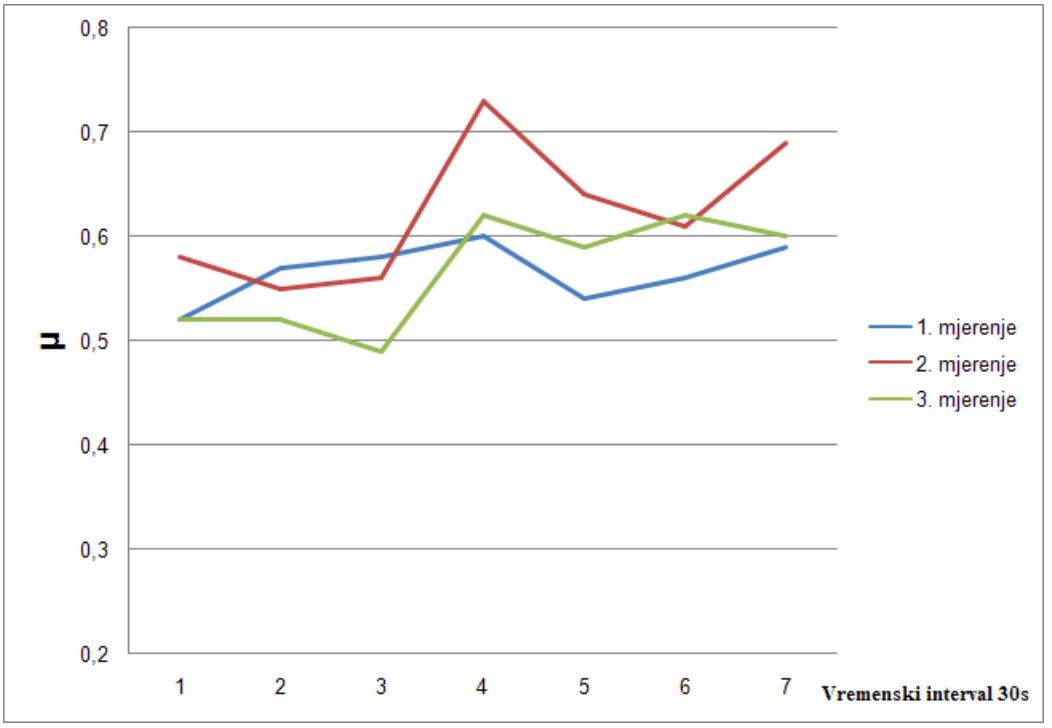
t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\bar{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	4	26	26	0.52
0 ÷ 30	3.4 ÷ 5.4	22 ÷ 35	28.5	0.57
30 ÷ 60	2.5 ÷ 6.5	16 ÷ 42	29	0.58
60 ÷ 90	2.7 ÷ 6.5	18 ÷ 42	30	0.6
90 ÷ 120	2.7 ÷ 5.5	18 ÷ 36	27	0.54
120 ÷ 150	3.2 ÷ 5.4	21 ÷ 35	28	0.56
150 ÷ 180	3.7 ÷ 5.3	24 ÷ 35	29.5	0.59

Tablica 31: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 2

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\bar{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	4.4	29	29	0.58
0 ÷ 30	3.9 ÷ 4.4	26 ÷ 29	27.5	0.55
30 ÷ 60	3.8 ÷ 4.6	25 ÷ 31	28	0.56
60 ÷ 90	4.3 ÷ 6.8	28 ÷ 45	36.5	0.73
90 ÷ 120	3.7 ÷ 6.1	24 ÷ 40	32	0.64
120 ÷ 150	4.2 ÷ 5.1	27 ÷ 34	30.5	0.61
150 ÷ 180	4.2 ÷ 6.4	27 ÷ 42	34.5	0.69

Tablica 32: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 2

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	3.9	26	26	0.52
0 ÷ 30	3.9 ÷ 4	26 ÷ 26	26	0.52
30 ÷ 60	3.4÷ 4.2	22 ÷ 27	24.5	0.49
60 ÷ 90	4.3 ÷ 5.1	28 ÷ 34	31	0.62
90 ÷ 120	3.7 ÷ 5.4	24 ÷ 35	29.5	0.59
120 ÷ 150	4.2 ÷ 5.4	27 ÷ 35	31	0.62
150 ÷ 180	4.2 ÷ 5	27 ÷ 33	30	0.60



Slika 92: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 2

Uzorak 3

Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 33, 34, 35 i slikom 93.

Tablica 33: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 3

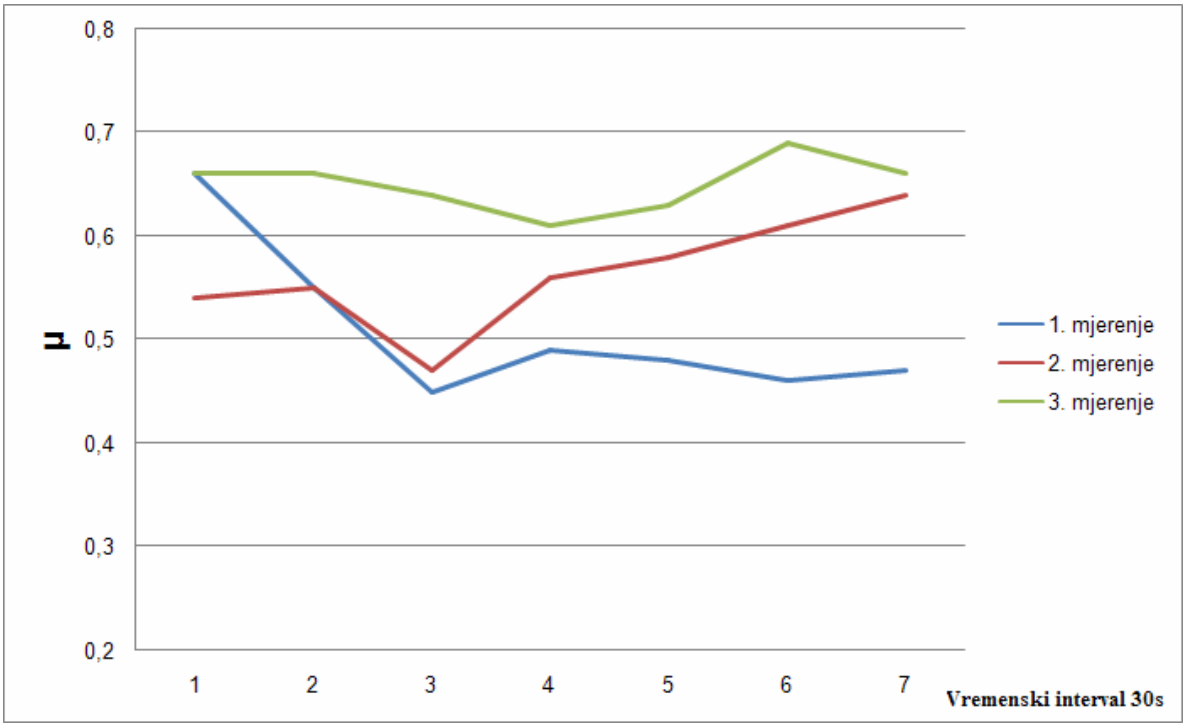
t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\bar{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	5	33	33	0.66
0 ÷ 30	3.4 ÷ 5	22 ÷ 33	27.5	0.55
30 ÷ 60	3.1 ÷ 3.8	20 ÷ 25	22.5	0.45
60 ÷ 90	3.3 ÷ 4.1	22 ÷ 27	24.5	0.49
90 ÷ 120	2.9 ÷ 4.4	19 ÷ 29	24	0.48
120 ÷ 150	2.9 ÷ 4.2	19 ÷ 27	23	0.46
150 ÷ 180	3.1 ÷ 4.2	20 ÷ 27	23.5	0.47

Tablica 34: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 3

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\bar{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	4.2	27	27	0.54
0 ÷ 30	3.6 ÷ 4.9	23 ÷ 32	27.5	0.55
30 ÷ 60	2.9 ÷ 4.3	19 ÷ 28	23.5	0.47
60 ÷ 90	3.2 ÷ 5.4	21 ÷ 35	28	0.56
90 ÷ 120	3.2 ÷ 5.6	21 ÷ 37	29	0.58
120 ÷ 150	3.7 ÷ 5.6	24 ÷ 37	30.5	0.61
150 ÷ 180	3.9 ÷ 5.8	26 ÷ 38	32	0.64

Tablica 35: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 3

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	5	33	33	0.66
0 ÷ 30	3.8 ÷ 6.2	25 ÷ 41	33	0.66
30 ÷ 60	3.8 ÷ 6	25 ÷ 39	32	0.64
60 ÷ 90	4.0 ÷ 5.4	26 ÷ 35	30.5	0.61
90 ÷ 120	4.0 ÷ 5.6	26 ÷ 37	31.5	0.63
120 ÷ 150	4.5 ÷ 6	30 ÷ 39	34.5	0.69
150 ÷ 180	4.5 ÷ 5.5	30 ÷ 36	33	0.66



Slika 93: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 3

Uzorak 4

Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 36, 37, 38 i slikom 94.

Tablica 36: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 4

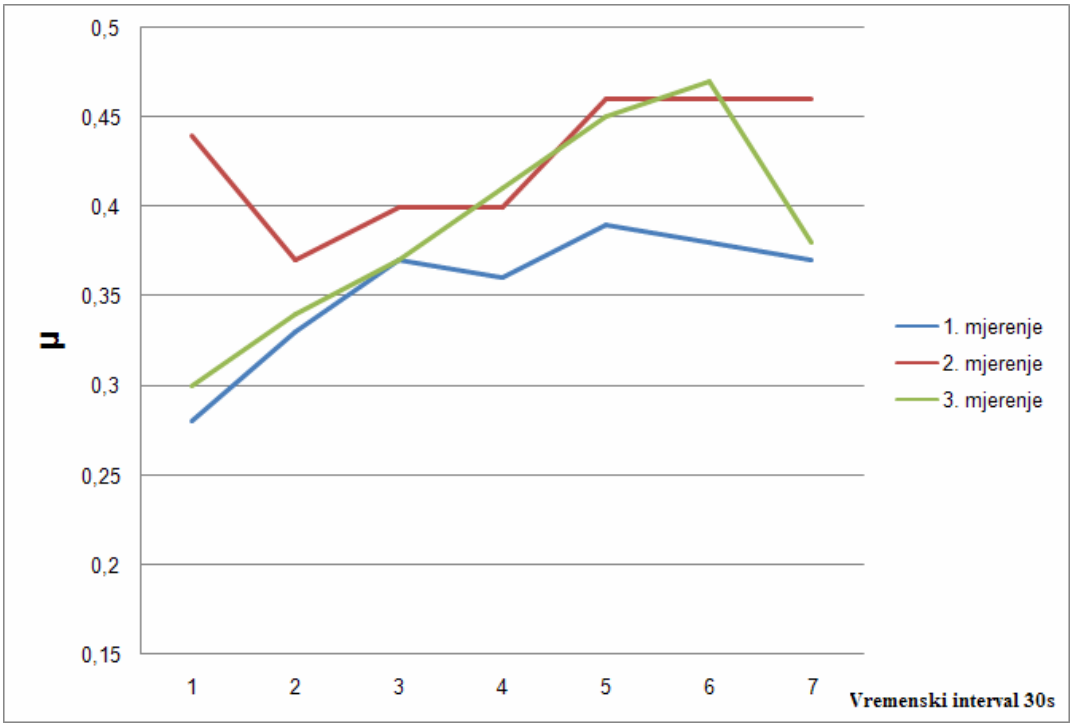
t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\bar{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	2.2	14	14	0.28
0 ÷ 30	2.2 ÷ 3	14 ÷ 19	16.5	0.33
30 ÷ 60	2.4 ÷ 3.3	15 ÷ 22	18.5	0.37
60 ÷ 90	2.3 ÷ 3.2	15 ÷ 21	18	0.36
90 ÷ 120	2.6 ÷ 3.3	17 ÷ 22	19.5	0.39
120 ÷ 150	2.6 ÷ 3.2	17 ÷ 21	19	0.38
150 ÷ 180	2.5 ÷ 3.2	16 ÷ 21	18.5	0.37

Tablica 37: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 4

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\bar{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	3.3	22	22	0.44
0 ÷ 30	2.4 ÷ 3.3	15 ÷ 22	18.5	0.37
30 ÷ 60	2.4 ÷ 3.8	15 ÷ 25	20	0.4
60 ÷ 90	2.7 ÷ 3.4	18 ÷ 22	20	0.4
90 ÷ 120	2.9 ÷ 4.1	19 ÷ 27	23	0.46
120 ÷ 150	3 ÷ 4.2	19 ÷ 27	23	0.46
150 ÷ 180	3.1 ÷ 4	20 ÷ 26	23	0.46

Tablica 38: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 4

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	2.4	15	15	0.3
0 ÷ 30	2.4 ÷ 3	15 ÷ 19	17	0.34
30 ÷ 60	2.4 ÷ 3.4	15 ÷ 22	18.5	0.37
60 ÷ 90	2.9 ÷ 3.4	19 ÷ 22	20.5	0.41
90 ÷ 120	2.7 ÷ 4.2	18 ÷ 27	22.5	0.45
120 ÷ 150	3.1 ÷ 4.1	20 ÷ 27	23.5	0.47
150 ÷ 180	2.5 ÷ 3.3	16 ÷ 22	19	0.38



Slika 94: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 4

Uzorak 5

Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 39, 40, 41 i slikom 95.

Tablica 39: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 5

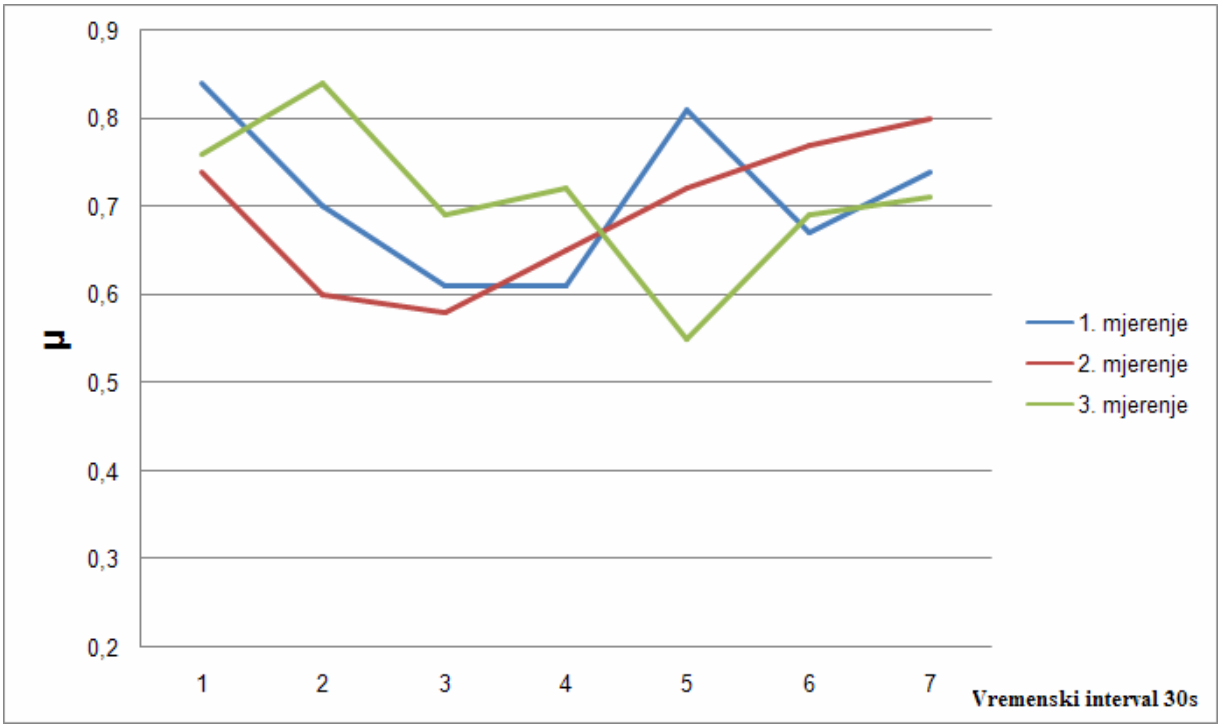
t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	6.3	42	42	0.84
0 ÷ 30	4.3 ÷ 6.3	28 ÷ 42	35	0.7
30 ÷ 60	4 ÷ 6.2	20 ÷ 41	30.5	0.61
60 ÷ 90	3.3 ÷ 6	22 ÷ 39	30.5	0.61
90 ÷ 120	5.3 ÷ 7	35 ÷ 46	40.5	0.81
120 ÷ 150	3.4 ÷ 6.8	22 ÷ 45	33.5	0.67
150 ÷ 180	4.4 ÷ 6.8	29 ÷ 45	37	0.74

Tablica 40: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 5

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	5.6	37	37	0.74
0 ÷ 30	3.6 ÷ 5.6	23 ÷ 37	30	0.60
30 ÷ 60	3.2 ÷ 5.6	21 ÷ 37	29	0.58
60 ÷ 90	4.3 ÷ 5.6	28 ÷ 37	32.5	0.65
90 ÷ 120	4.5 ÷ 6.4	30 ÷ 42	36	0.72
120 ÷ 150	5.3 ÷ 6.5	35 ÷ 42	38.5	0.77
150 ÷ 180	5.8 ÷ 6.5	38 ÷ 42	40	0.80

Tablica 41: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 5

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\bar{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	5.8	38	38	0.76
0 ÷ 30	5.8 ÷ 7	38 ÷ 46	42	0.84
30 ÷ 60	4.2 ÷ 6.5	27 ÷ 42	34.5	0.69
60 ÷ 90	5.0 ÷ 5.9	33 ÷ 39	36	0.72
90 ÷ 120	4.0 ÷ 5.4	20 ÷ 35	27.5	0.55
120 ÷ 150	4.8 ÷ 5.8	31 ÷ 38	34.5	0.69
150 ÷ 180	4.4 ÷ 6.3	29 ÷ 42	35.5	0.71



Slika 95: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 5

Uzorak 6

Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 42, 43, 44 i slikom 96.

Tablica 42: Prikaz rezultata 1. mjerenja uzorka 6

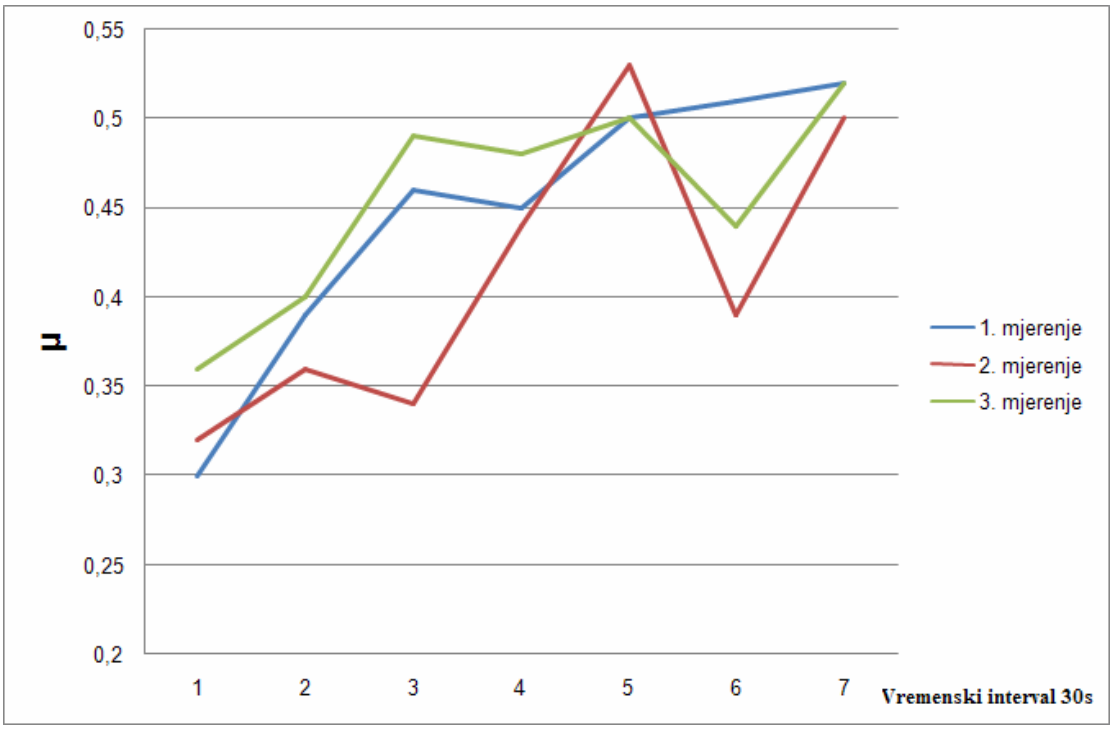
t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	2.4	15	15	0.3
0 ÷ 30	2.4 ÷ 3.7	15 ÷ 24	19.5	0.39
30 ÷ 60	2.4 ÷ 4.6	15 ÷ 31	23	0.46
60 ÷ 90	2.7 ÷ 4.2	18 ÷ 27	22.5	0.45
90 ÷ 120	3.1 ÷ 4.5	20 ÷30	25	0.50
120 ÷ 150	3 ÷ 4.9	19 ÷ 32	25.5	0.51
150 ÷ 180	3.1 ÷ 4.9	20 ÷ 32	26	0.52

Tablica 43: Prikaz rezultata 2. mjerenja uzorka 6

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	2.5	16	16	0.32
0 ÷ 30	2.2 ÷ 3.3	14 ÷ 22	18	0.36
30 ÷ 60	2.3 ÷ 3	15 ÷ 19	17	0.34
60 ÷ 90	2.2 ÷ 4.5	14 ÷ 30	22	0.44
90 ÷ 120	2.7 ÷ 5.3	18 ÷35	26.5	0.53
120 ÷ 150	2.4 ÷ 3.7	15 ÷ 24	19.5	0.39
150 ÷ 180	3.1 ÷ 4.5	20 ÷ 30	25	0.50

Tablica 44: Prikaz rezultata 3. mjerenja uzorka 6

t [s]	Δl [mm]	F_t [N]	$\overline{F}_t$ [N]	μ
POČETAK	2.7	18	18	0.36
0 ÷ 30	2.4 ÷ 3.8	15 ÷ 25	20	0.4
30 ÷ 60	3 ÷ 4.5	19 ÷ 30	24.5	0.49
60 ÷ 90	2.5 ÷ 4.9	16 ÷ 32	24	0.48
90 ÷ 120	2.7 ÷ 4.9	18 ÷32	25	0.50
120 ÷ 150	2.4 ÷ 4.4	15 ÷ 29	22	0.44
150 ÷ 180	3.3 ÷ 4.5	22 ÷ 30	26	0.52



Slika 96: Prikaz rezultata mjerenja uzorka 6