Adhezijska otpornost materijala na automatiziranom uređaju "prizma po prstenu"

Štefan, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:923675

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Martin Štefan

Zagreb, 2021. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Student:

Martin Štefan

Zagreb, 2021. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici, Prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na dodijeljenoj temi, strpljenju i savjetima koji su ovaj rad učinili mogućim.

Veliko hvala asistentu Draženu Mezdiću koji je koordinirao svim aspektima eksperimentalnog dijela kako bi kvalitetno i u što kraćem roku dobili rezultate.

Zahvaljujem se i svim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu na pruženoj pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji i prijateljima na potpori tijekom studiranja.

Martin Štefan

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTIN ŠTEFAN** Mat. br.: 0035207651

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Adhezijska otpornost materijala na automatiziranom uređaju "prizma po prstenu"**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The adhesion resistance of materials on automated "block on ring" device**

Opis zadatka:

Klizno trošenje je progresivni gubitak materijala koji nastaje na kontaktnom području dvaju materijala uslijed djelovanja opterećenja. Takvo klizno kretanje uzrokuje mehaničko trošenje što može dovesti do smanjene proizvodne učinkovitosti, značajki stroja ili čak njegovog oštećenja. Klizno trošenje često uključuje složene mehanizme trošenja koji se odvijaju na dodirnoj površini, poput adhezijskog i abrazijskog trošenja, te trošenja zbog umora površine. Eksperimentalna metoda „prizma po prstenu“ (ASTM G77) široko se koristi u procjeni ponašanja kliznog trošenja materijala i određivanja faktora trenja u različitim simuliranim uvjetima.

U ovom je radu potrebno:
1) Opisati utjecajne faktore koji djeluju na faktor trenja i adhezijsko trošenje na automatiziranom uređaju „prizma po prstenu“ te njihovo djelovanje na točnost i preciznost ispitivanja.
2) Izmjeriti tvrdoće i hrapavosti prstena i prizmi prije početka ispitivanja.
3) Odrediti faktore trenja i otpornost na adhezijsko trošenje u suhom i vlažnom stanju za odabrane triboparove.
4) Komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
6. svibnja 2021.	8. srpnja 2021.	12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao: prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednica Povjerenstva: prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
POPIS KRATICA VII
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. MEHANIZMI TROŠENJA 2
2.1. Abrazija 2
2.2. Adhezija 3
2.3. Tribokorozija 4
2.4. Umor površine 5
3. TRIBOLOŠKO ISPITIVANJE PRIZMA PO PRSTENU (engl. „*BLOCK ON RING*“) 6
4. AUTOMATIZACIJA SUSTAVA 8
4.1. Automatsko pokretanje sustava 8
4.2. Akvizicijski sustav 8
4.4. Rezultati 14
5. KONSTRUKCIJA NOVOG TRIBOLOŠKOG UREĐAJA ZA ISPITIVANJE TROŠENJA U SUHIM I VLAŽNIM UVJETIMA 15
6. PREGLED LITERATURE 18
7. EKSPERIMENTALNI DIO 21
7.2. Mjerenje hrapavosti površine 23
7.3. Mjerenje tvrdoće 25
7.4. Ispitivanje u suhom stanju 25
7.5. Ispitivanje u vlažnom stanju 30
7.6. Određivanje faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje 35
7.6.1. Određivanje konstante opruge uređaja za ispitivanje „block on ring“ 35
7.6.2. Rezultati faktora trenja 35
7.6.3. Otpornost na adhezijsko trošenje 44

8. ZAKLJUČAK 47

POPIS SLIKA

Slika 1. Abrazija [3] ... 2
Slika 2. Jedinični događaj abrazije [4] ... 3
Slika 3. Jedinični događaj adhezije [4] ... 4
Slika 4. Jedinični događaj tribokorozije [4] ... 4
Slika 5. Umor površine [5] ... 5
Slika 6. Shematski prikaz metode „*block on ring*“ [6] ... 6
Slika 7. NI USB-6001 [7] ... 9
Slika 8. Projektiranje sheme u programu KiCad [7] ... 10
Slika 9. Testiranje električne sheme [7] ... 11
Slika 10. Projektiranje 34-pinskog konektora [7] ... 11
Slika 11. Definiranje udaljenosti i rasporeda nožica komponenti [7] ... 12
Slika 12. Prikaz provlačenja vodova pločice na prednjoj strani kartice [7] ... 12
Slika 13. Lemljenje SMD otpornika [7] ... 13
Slika 14. Grafički prikaz rezultata [7] ... 14
Slika 15. Tablični prikaz rezultata [7] ... 14
Slika 16. Konstrukcija uređaja za tribološka ispitivanja [8] ... 16
Slika 17. Automatizirani uređaj za ispitivanje „*block on ring*“ ... 21
Slika 18. Dimenzije ispitnih uzoraka ... 22
Slika 19. Mahr Perthen Perthometer S8P instrument s ticalom ... 23
Slika 20. Vaga Ohaus Pioneer Analytical Balances ... 26
Slika 21. Ispitivanje u suhom stanju ... 27
Slika 22. Uzorak i prsten u kontaktu ... 27
Slika 23. Prsten nakon ispitivanja u suhom stanju ... 28
Slika 24. Fiziološka tekućina za ispitivanje u vlažnom stanju ... 30
Slika 25. Postavljanje dodatka za ispitivanje u vlažnom stanju ... 31
Slika 26. Ispitivanje u vlažnom stanju ... 31
Slika 27. Prsten nakon ispitivanja u vlažnom stanju ... 32
Slika 28. Određivanje konstante opruge ... 35
Slika 29. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE 1 ... 36
Slika 30. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE-X 1 ... 37

Slika 31. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Č 1 39
Slika 32. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Cr 1 40
Slika 33. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Ti 1 42
Slika 34. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka visokomolekularnog polietilena u suhom i vlažnom stanju 44
Slika 35. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka umreženog visokomolekularnog polietilena u suhom i vlažnom stanju 45
Slika 36. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka čelika u suhom i vlažnom stanju 45
Slika 37. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka kroma u suhom i vlažnom stanju 46
Slika 38. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka titanija u suhom i vlažnom stanju 46
Slika 39. Profil hrapavosti i parametri uzorka titanija prije ispitivanja 50
Slika 40. Profil hrapavosti i parametri uzorka kroma prije ispitivanja 51
Slika 41. Profil hrapavosti i parametri uzorka čelika prije ispitivanja 52
Slika 42. Profil hrapavosti i parametri uzorka visokomolekularnog polietilena prije ispitivanja 53
Slika 43. Profil hrapavosti i parametri uzorka umreženog visokomolekularnog polietilena prije ispitivanja 54
Slika 30. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE 2 55
Slika 45. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE 3 55
Slika 46. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE-X 2 55
Slika 47. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE-X 3 56
Slika 48. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Č 2 56
Slika 49. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Č 3 56
Slika 39. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Cr 2 57
Slika 51. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Cr 3 57
Slika 52. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Ti 2 57
Slika 53. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Ti 3 58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezolucija signala [7] 9
Tablica 2. Specifikacije uređaja [8] 17
Tablica 3. Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzoraka 24
Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće 25
Tablica 5. Izmjere masa svih uzoraka prilikom ispitivanja u suhom stanju 28
Tablica 6. Promjene masa tijekom ispitivanja u suhom stanju 29
Tablica 7. Izmjere masa svih uzoraka prilikom ispitivanja u vlažnom stanju 32
Tablica 8. Promjene masa tijekom ispitivanja u vlažnom stanju 33
Tablica 9. Fotografije tragova trošenja uzoraka nakon svih ispitivanja 34
Tablica 10. Rezultati faktora trenja uzorka PE 1 36
Tablica 11. Rezultati faktora trenja uzorka PE 2 36
Tablica 12. Rezultati faktora trenja uzorka PE 3 37
Tablica 13. Rezultati faktora trenja uzorka PE-X 1 38
Tablica 14. Rezultati faktora trenja uzorka PE-X 2 38
Tablica 15. Rezultati faktora trenja uzorka PE-X 3 38
Tablica 16. Rezultati faktora trenja uzorka Č 1 39
Tablica 17. Rezultati faktora trenja uzorka Č 2 39
Tablica 18. Rezultati faktora trenja uzorka Č 3 40
Tablica 19. Rezultati faktora trenja uzorka Cr 1 41
Tablica 20. Rezultati faktora trenja uzorka Cr 2 41
Tablica 21. Rezultati faktora trenja uzorka Cr 3 41
Tablica 22. Rezultati faktora trenja uzorka Ti 1 42
Tablica 23. Rezultati faktora trenja uzorka Ti 2 43
Tablica 24. Rezultati faktora trenja uzorka Ti 3 43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
F_{trenja}	N	sila trenja
C_{opr}	mm	konstanta krutosti opruge
x	N	otklon opruge
μ_{st}		statički faktor trenja
μ_{d}		dinamički faktor trenja
F_{N}	N	normalna sila
$F_{\text{tr,st}}$	N	sila trenja za vrijeme mirovanja
$\boldsymbol{F_{\text{tr,d}}}$	N	sila trenja za vrijeme klizanja

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylene

SAŽETAK

U teorijskom dijelu diplomskog rada prikazana je podjela mehanizama trošenja. Nadalje, opisan je postupak ispitivanja „*block on ring*“ uz dane formule za izračunavanje parametara kao što su sila trenja i faktor trenja. U nastavku je ukratko objašnjena automatizacija uređaja za ispitivanje metodom „*block on ring*“ koji se nalazi u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Također je prikazan i koncept za daljnje unaprjeđenje sustava za ispitivanje različitim metodama ispitivanja trošenja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je ispitivanje metodom „*block on ring*“ u suhom i vlažnom stanju na uzorcima titanija, kroma, čelika, visokomolekularnog polietilena i umreženog visokomolekularnog polietilena. U svim ispitivanjima je korišten jednaki čelični prsten. Također je i provedeno mjerenje hrapavosti površine uzoraka i tvrdoća istih. Zaključno su određeni faktori trenja te otpornost na adhezijsko trošenje u više vremenskih intervala.

Ključne riječi: trošenje, „*block on ring*“, titanij, krom, čelik, visokomolekularni polietilen, hrapavost, tvrdoća

SUMMARY

First part of this paper gives a review of tribological mechanisms with mathematical formulas for calculating parameters such as friction force and friction coefficient. Summary of automation of the device for block on ring test that is owned by Faculty of mechanical engineering and naval architecture is also given in continuation. Furthermore, concept of improved design for tribological tests is described briefly.

In the experimental part, block on ring test was performed in dry and wet conditions on titanium, chrome, steel, UHMWPE and UHMWPE cross-linked samples. In all tests, equal steel ring was used. Surface roughness and hardness of the samples was also analyzed. After tests, friction coefficient and adhesion resistance was calculated for every sample in different time intervals.

Key words: block on ring, titanium, chrome, steel, UHMWPE, surface roughness, hardness

1. UVOD

Tribologija je znanstvena disciplina koja se bavi proučavanjem zbivanja na površinama triboelemenata odnosno dvaju tijela u dodiru ili relativnom gibanju. Nadalje, bavi se pronalaženjem mjera kojima bi se spriječilo ili smanjilo trenje klizanja, trenje kotrljanja, abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija materijala u interakciji. Mjere obuhvaćaju izbor materijala triboelemenata, podmazivanje, uhodavanje i zaštitu površina od trošenja.

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, česticama ili fluidom. Mehaničko djelovanje prisutnih stranih tijela i kemijsko djelovanje okoline utječe na povećanje brzine trošenja što za posljedicu dovodi do promjene geometrije površina tijela u dodiru [1].

Klizno trošenje je progresivan gubitak materijala koji je rezultat klizanja dva materijala na kontaktnom području uslijed djelovanja opterećenja i može dovesti do ozbiljnog mehaničkog trošenja. Ispitivanje „prizma po prstenu“ (ASTM G77) je široko korištena metoda za procjenu ponašanja kliznog trošenja u različitim uvjetima, te omogućuje pouzdanu klasifikaciju triboparova za određene namjene [2].

U radu će se provesti ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje te odrediti faktor trenja za pet triboparova u suhom i vlažnom stanju na automatiziranom uređaju „prizma po prstenu“ (ASTM G77). Triboparovi su: legura Ti6Al4V – čelik 100Cr6, legura CoCrMo – čelik 100Cr6, čelik 316L – čelik 100Cr6, UHMWPE – čelik 100Cr6 te γ UHMWPE – čelik 100 Cr6.

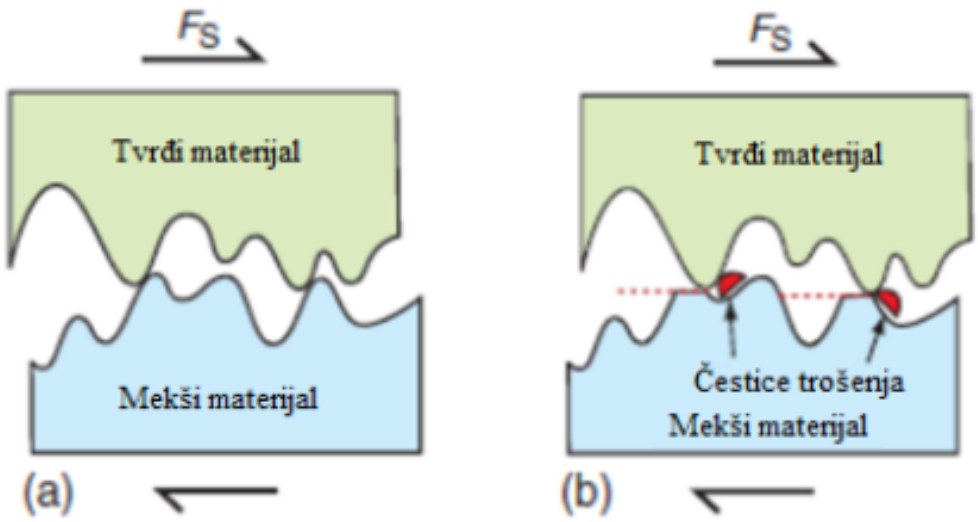
2. MEHANIZMI TROŠENJA

Vrste trošenja materijala dijelimo na četiri osnovna mehanizma trošenja:

- Abrazija.
- Adhezija.
- Umor površine.
- Tribokorozija.

2.1. Abrazija

Abrazija je najučestaliji mehanizam trošenja materijala koji nastaje kao posljedica prodiranja izbočina tvrđeg materijala u površinu mekšeg materijala, slika 1.

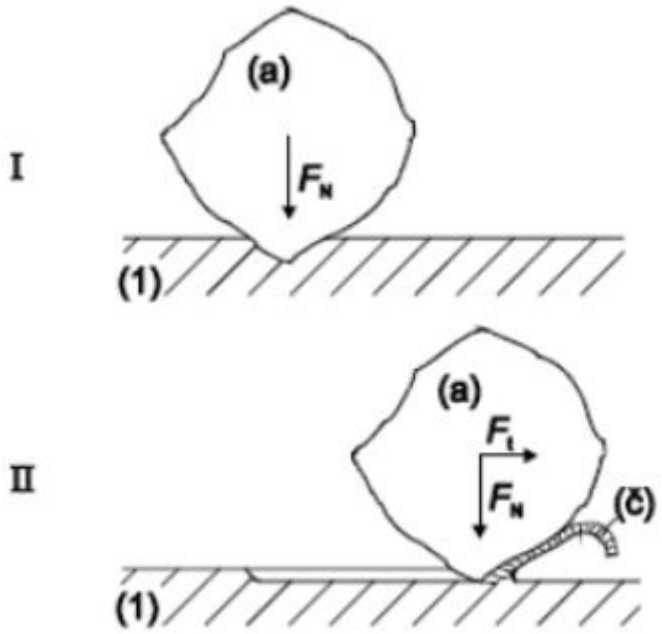


Slika 1. Abrazija [3]

Abrazijske čestice su u prirodi većinom nedefinirane geometrije, a na površini materijala nastaju karakteristični tragovi trošenja nalik žljebovima koji se protežu površinom materijala paralelno sa smjerom klizanja. Abraziju možemo prikazati jediničnim događajem (slika 4) u kojem proces mikrorezanja možemo podijeliti na dvije faze:

1. prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente sile F_N

2. istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente sile F_t [4].

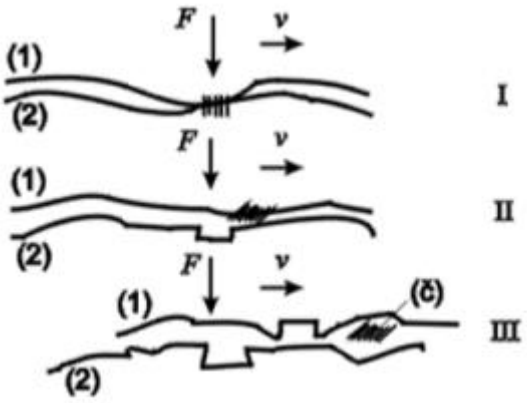


Slika 2. Jedinični događaj abrazije [4]

2.2. Adhezija

Trošenje adhezijom uzrokuju različite sile trenja klizanja. Ukoliko su kohezijske sile u materijalu manjeg iznosa od sila trenja klizanja dolazi do trošenja materijala odnosno prijelaza materijala s jedne tarne plohe na drugu pri relativnom gibanju zbog zavarivanja krutih faza. Ovaj mehanizam trošenja također možemo predočiti jediničnim događajem u tri faze:

1. nastajanje adhezijskog spoja na dodiru izbočina
2. raskidanje adhezijskog spoja, čestica trošenja posntano ostaje na jednom članu kliznog para
3. otkidanje čestice.



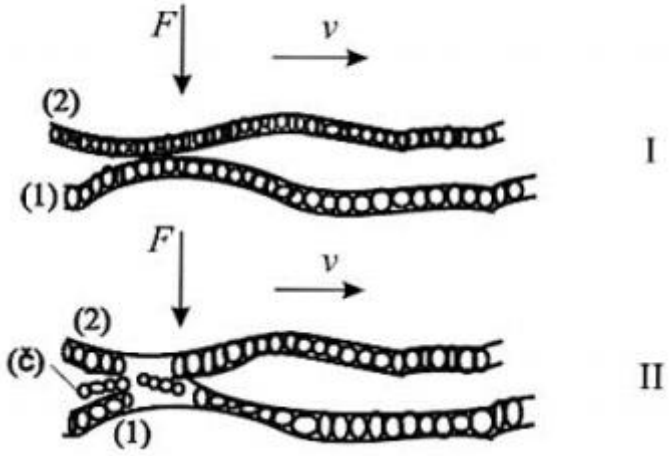
Slika 3. Jedinični događaj adhezije [4]

Otpornost na adhezijsko trošenje predstavlja sklonost stvaranju mikrozavarenih spojeva, odnosno tribološki kompatibilni materijali nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru, tj. prikladni su za rad u paru [4].

2.3. Tribokorozija

Tribokorozija je propadanje materijala uslijed istovremenog djelovanja trošenja i korozije. Može se prikazati jediničnim događajem u dvije faze:

1. stvaranje ili obnavljanje sloja produkata korozije
2. mjestimično razaranje sloja produkata korozije.

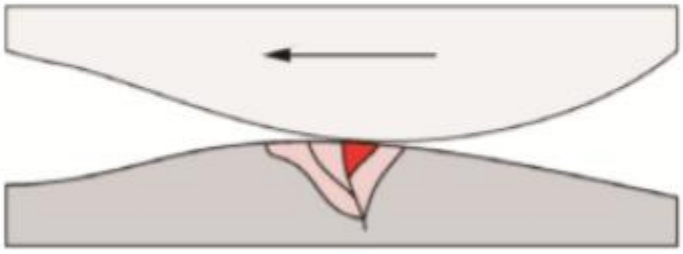


Slika 4. Jedinični događaj tribokorozije [4]

Izgled površina zahvaćenih tribokorozijom ovisi o intenzivnosti stvaranja čestica trošenja. Kod male intenzivnosti stvaranja čestica trošenja na površini se pojavljuju produkti korozije, a kod veće intenzivnosti dolazi do poliranja površine. Čestice trošenja su uglavnom oksidne i praškastog oblika [4].

2.4. Umor površine

Umor površine je mehanizam trošenja u kojem dolazi do odvajanja čestica s površine materijala djelovanjem promjenjivog cikličkog naprezanja. Iako je adhezija među dvije dobro podmazane kontaktne površine zanemariva, dolazi do značajnog trošenja. Ovo trošenje je uzrokovano deformacijama zbog hrapavosti dviju površina u kontaktu. Kontakt između neravnina popraćen vrlo visokom lokalnom razinom naprezanja i velikim brojem ciklusa klizanja ili kotrljanja uzrokuje stvaranje pukotina i posljedično tome odvajanja čestica s površine materijala (slika 5). Trošenje u tim uvjetima se utvrđuje mehanizmom inicijacije pukotine, propagacije pukotine i loma. Istrošene površine sadrže vrlo visoke razine plastičnog naprezanja u odnosu na neistrošene površine. Ovo naprezanje i posljedična modifikacija mikrostrukture materijala uvelike utječu na proces trošenja. Umor površine se odnosi na inicijalno oštećenje glatke površine i najčešće se koristi u kontekstu kotrljajućih ležaja. Pouzdano funkcioniranje kotrljajućih ležajeva ovisi o glatkoj neoštećenoj površini materijala. Mora proći određeni broj kotrljajućih kontaktnih ciklusa prije nego se pojave nepravilnosti na površini čija se formacija može nazvati umorom površine. Jednom kad se stvore „pittovi“ na kotrljajućim površinama, dolazi do znatnih vibracija i potrebe za zamjenom [5].



Slika 5. Umor površine [5]

3. TRIBOLOŠKO ISPITIVANJE PRIZMA PO PRSTENU (engl. „*BLOCK ON RING*“)

Otpornost na adhezijsko trošenje određuje se metodom „*Block on ring*“ prema normi ASTM G 77. Uzorak se postavlja u gornji blok povezan oprugom koji konstantnim opterećenjem pritišće površinu rotirajućeg prstena. U kontaktu uzorka i rotirajućeg prstena javljaju se sile trenja koje uzrokuju otklon opruge koji se bilježi u obliku grafa (slika 6).

Parametri važni za provedbu ispitivanja su dakle:

- Brzina vrtnje kliznog prstena
- Vrijeme ispitivanja
- Normalna sila
- Dimenzije prstena
- Dimenzije i oblik ispitnog uzorka
- Vrsta kliznog kontakta
- Temperatura okoliša
- Primjena maziva.

Slika 6. Shematski prikaz metode „*block on ring*“ [6]

Otklon opruge mjeri se induktivnim senzorom. Uz poznati otklon opruge i konstantu opruge može se izračunati sila relacijom:

$$F_{\text{trenja}} = C_{\text{opr}} \cdot x \quad (1)$$

gdje je C_{opr} koeficijent krutosti opruge, a x je otklon opruge uslijed sile trenja.

Razlikuju se dvije sile trenja koje se javljaju prilikom ispitivanja. U trenutku prije proklizavanja prstena na otklon opruge djeluje statička sila trenja, za vrijeme klizanja mjeri se dinamička sila trenja. Poznavanjem navedenih sila trenja i normalne sile F_{N} može se odrediti statički i dinamički faktor trenja iz relacija:

$$\mu_{\text{st}} = \frac{F_{\text{tr,st}}}{F_{\text{N}}} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{d}} = \frac{F_{\text{tr,d}}}{F_{\text{N}}} \quad (3)$$

gdje su μ_{st} i μ_d statički i dinamički faktor trenja, F_{N} je normalna sila, a $F_{\text{tr,st}}$ i $F_{\text{tr,d}}$ su sila trenja za vrijeme mirovanja i sila trenja za vrijeme klizanja [6].

4. AUTOMATIZACIJA SUSTAVA

4.1. Automatsko pokretanje sustava

Prilikom projektiranja sustava korišteno je više komponenata sigurno smještenih u razvodnom ormaru. Programskim paketom Matlab, u okruženju Simulink, povezana je kartica tvrtke National Instruments USB-6001 za akviziciju podataka s računalom. Ovime je omogućeno prikupljanje i obrada podataka dobivenih od senzora. Nadalje, izrađena je kartica s bakrenim vodičima na kojoj su smješteni tranzistori i optoizolatori [7].

4.2. Akvizicijski sustav

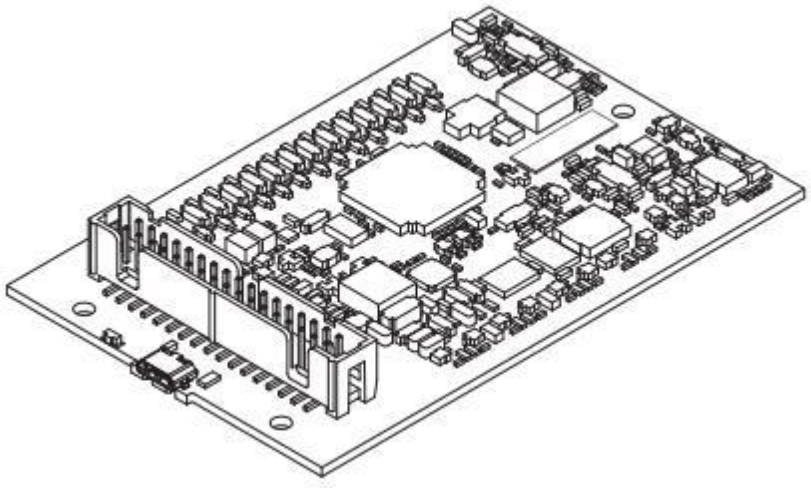
Sustav prikuplja, mjeri i analizira fizikalne veličine u različitim procesima te se sastoji od senzora, odnosno uređaja koji pretvara fizikalne veličine, kao što su temperatura, zvuk, tlak i dr. u el. signale. Te izlazne signale prikuplja uređaj koji prilagođuje podatke akvizicijskoj kartici ili smanjuje šum. Nadalje, te prilagođene podatke, kartica mjeri i analizira. Softverskim programom dizajnira se i projektira sustav za automatizaciju. Kod projektiranja sustava za prikupljanje podataka potrebno je izabrati akvizicijsku karticu sa zadovoljavajućim karakteristikama od kojih su najbitnije rezolucija signala i period uzorkovanja. S obzirom na to da induktivni senzor koji se koristi daje analogni signal, pretvorbu u digitalni će vršiti akvizicijska kartica. U ovom kontekstu rezolucija se odnosi na tu pretvorbu. Budući da računalo sprema brojeve u digitalnom obliku odnosno u obliku nula i jedinica, potrebna je pretvorba signala. Ako uređaj pretvara signal u rasponu od 0 do 10 V u vrijednosti veličine 2 bita, taj će se raspon podijeliti u dijelove. U ovom slučaju će se raspon podijeliti na 4 dijela jer se pomoću 2 bita mogu prikazati samo četiri broja. Ovime dobivamo rezoluciju od 2,5 V po bitu. S ove četiri vrijednosti prikazuju se stvarni analogni signali. Ako se dva različita signala predstavljaju istim digitalnim brojem, tu grešku nazivamo pogreškom kvantizacije [7].

Tablica 1. Rezolucija signala [7]

Napon	2-bitna digitalna reprezentacija
0-2,5 V	00
2,5-5 V	01
5-7,5 V	10
7,5-10 V	11

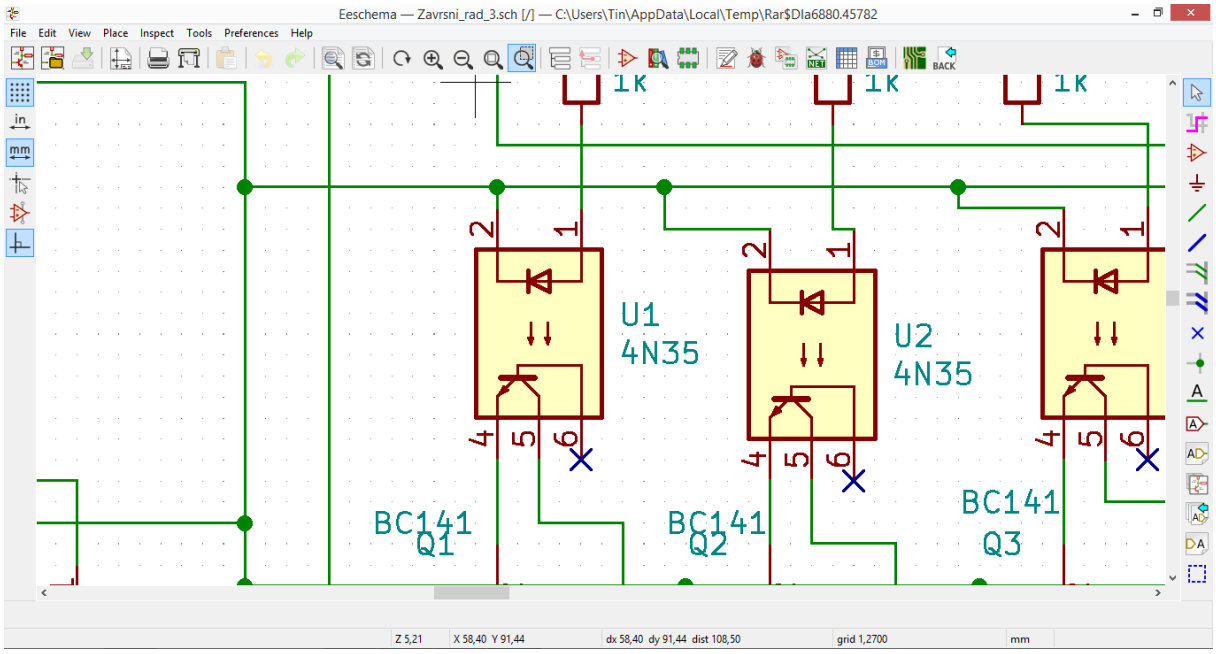
4.3. Akvizicijska kartica (NI USB-6001)

Za upravljanje pokretanjem uređaja odabrana je već spomenuta akvizicijska kartica koja ima dobre karakteristike uz pristupačnu cijenu. Ima 2 analogna izlaza, 8 analognih ulaza i 13 digitalnih višefunkcionalnih priključaka te mogućnost spajanja na računalo putem USB konektora. Budući da je napajanje izvedeno pomoću USB kabla, na digitalnim izlazima možemo dobiti napon od 3,6 V i struju od 4 mA što je nedovoljno za aktivaciju releja. Zbog toga je projektirana kartica s bakrenim vodovima s optoizolatorima. Da bi se zauzelo što manje prostora u razvodnom ormaru, akvizicijska kartica je sklopljena bez kućišta. Nadalje, prednost ove kartice je mogućnost spajanja na programski paket Matlab čime se onda u programskom okruženju Simulink može dizajnirati automatski sustav. Korištenje Simulinka je vrlo jednostavno i intuitivno jer se bazira na blokovskim dijagramima.

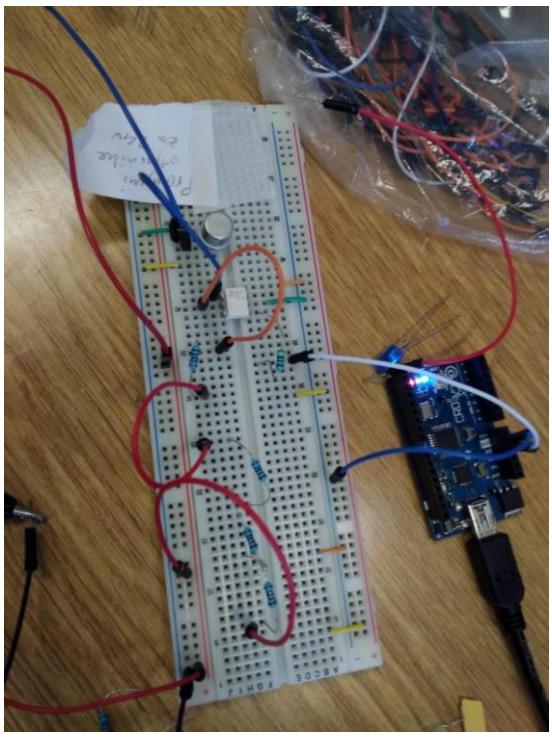


Slika 7. NI USB-6001 [7]

Za izradu sustava korišteni su računalni programi Simulink, KiCad i Solidworks electrical. U programu Solidworks electrical su izrađene sve električne sheme. Sheme su napravljene u A4 formatu i podijeljene na shemu upravljačkog kruga i shemu električnog kruga motora. U programu KiCad je projektirana pločica s bakrenim vodovima. Također je u istom programu projektirana shema nakon proračuna svi potrebnih otpornika i komponenti te je cijela shema testirana prije daljnjeg postupka projektiranja kartice.

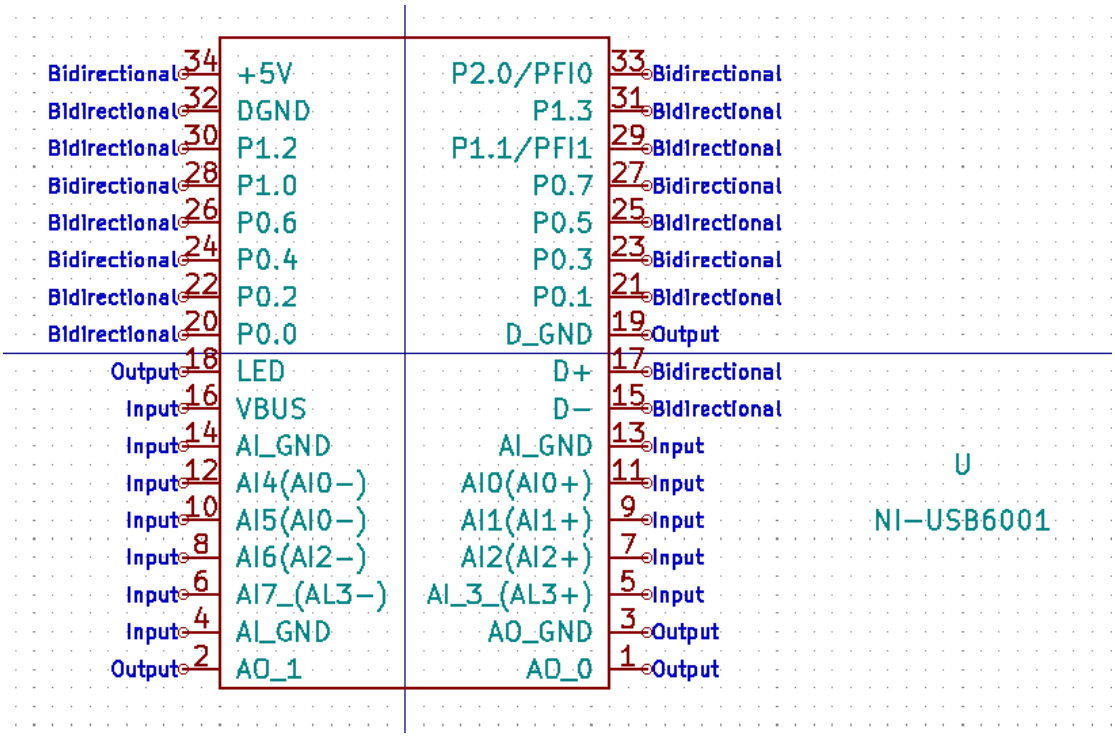


Slika 8. Projektiranje sheme u programu KiCad [7]



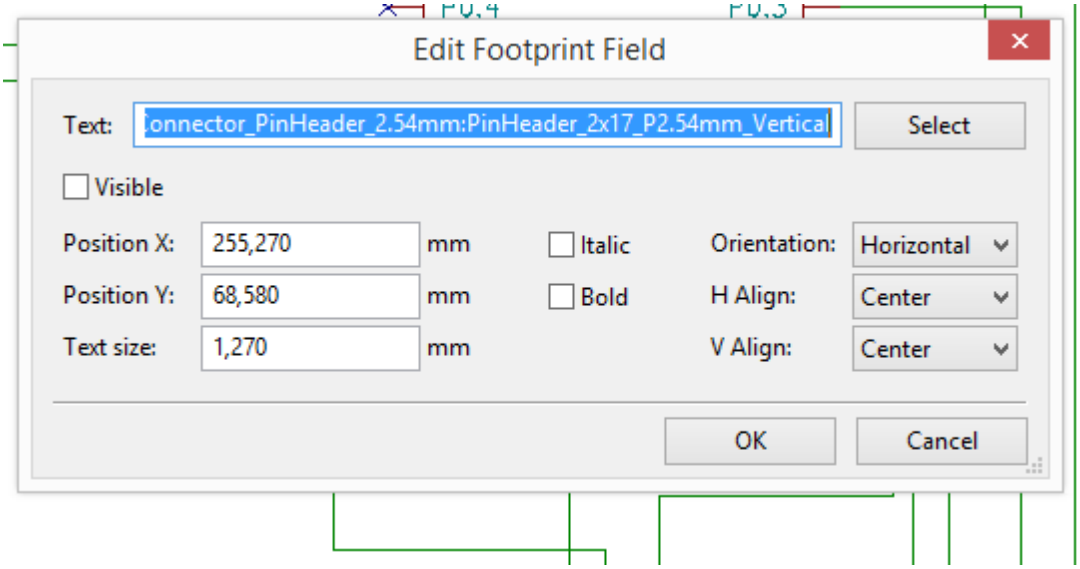
Slika 9. Testiranje električne sheme [7]

Budući da je pločica s bakrenim vodičima spojena flah kabelom na akvizicijsku karticu, isprojektiran je konektor s 34 „pina“ koji je sukladan rasporedu „pinova“ kartice.



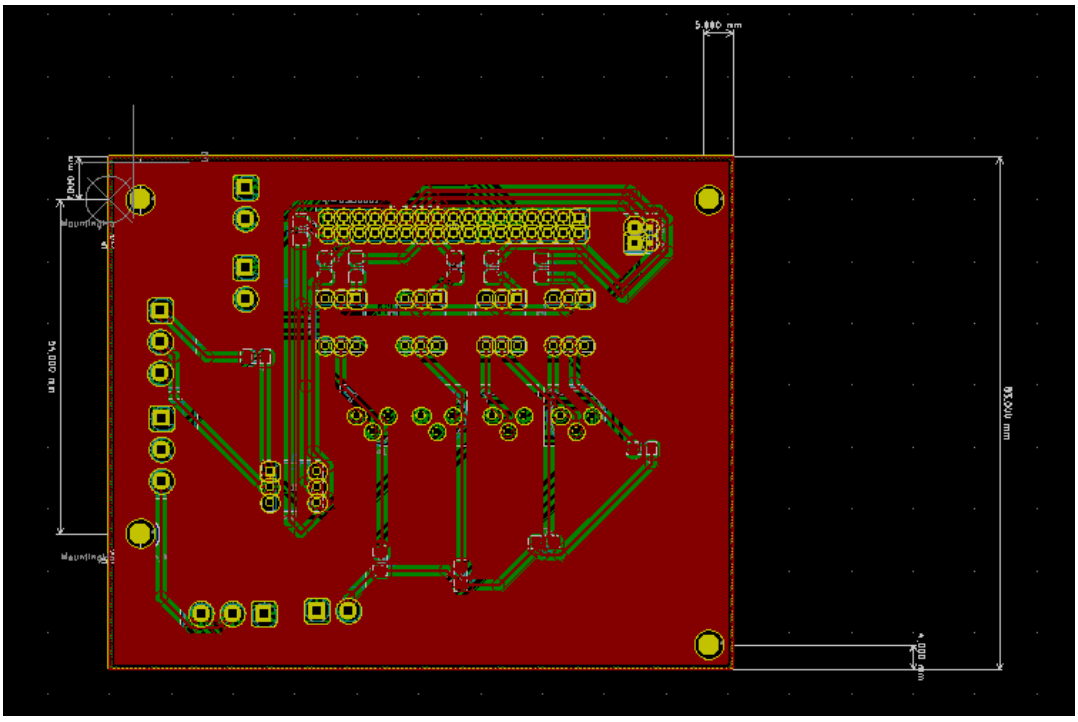
Slika 10. Projektiranje 34-pinskog konektora [7]

Potom je trebalo u programu definirati udaljenost i raspored nožica komponenti (eng.footprint).



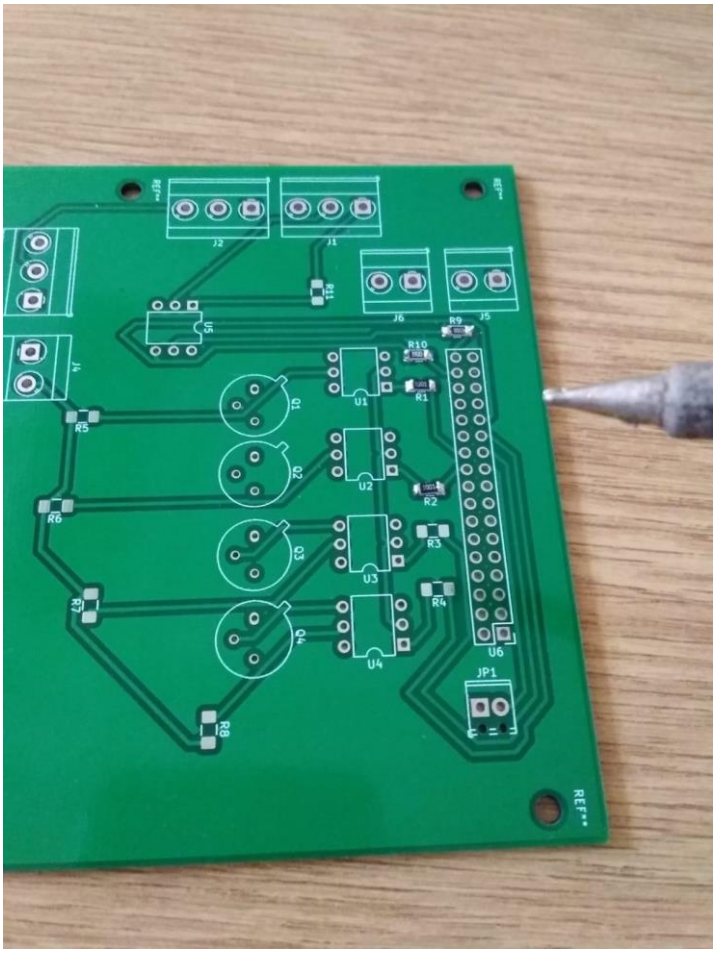
Slika 11. Definiranje udaljenosti i rasporeda nožica komponenti [7]

Završni korak projektiranja pločice s bakrenim vodovima je bilo provlačenje vodova prema već izrađenoj shemi. Vodovi su provlačeni po površinama s obje stranice pločice zbog nemogućnosti njihovih presijecanja.



Slika 12. Prikaz provlačenja vodova pločice na prednjoj strani kartice [7]

Tehnička dokumentacija pločice je poslana tvrtki koja izrađuje PCB pločice. S obzirom na to da je dostavljena kartica bez komponenata, iste su lemljene na za to predviđena mjesta.

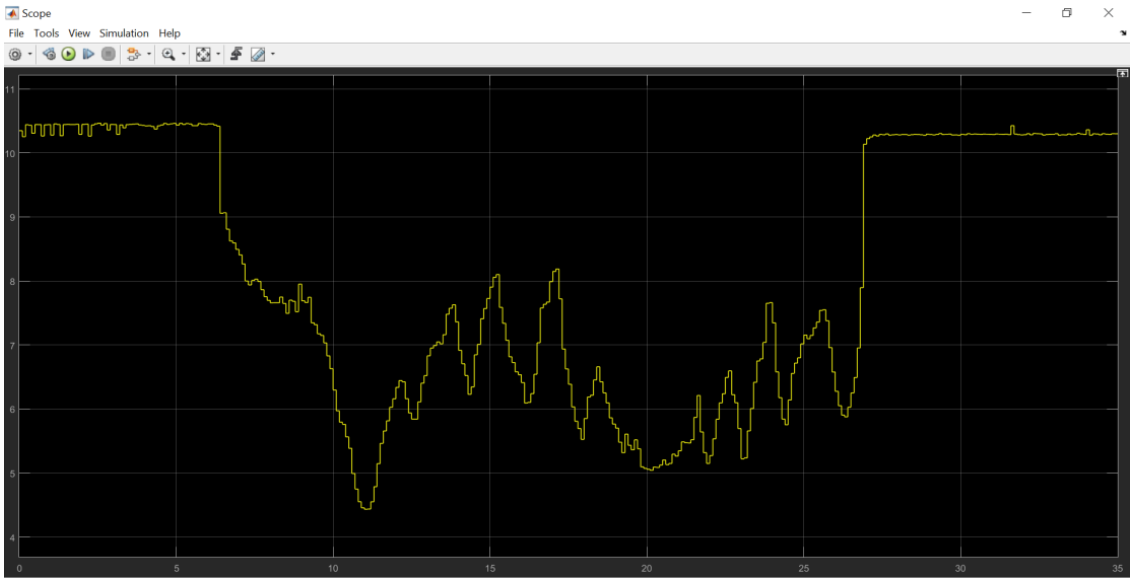


Slika 13. Lemljenje SMD otpornika [7]

Izrađen je program u računalnom programu Simulink koji pokreće motor sa zakašnjenjem u odnosu na početak zapisivanja rezultata. Rezultati ispitivanja se automatski arhiviraju u obliku tablice koja sadrži vrijednosti signala i vrijeme (u milisekundama) te se rezultati grafički ispisuju u drugom dijelu programa [7].

4.4. Rezultati

Provedeno je mjerenje rezultata ispitivanja pomoću komparatora čije vrijednosti su očitavane u određenim vremenskim razmacima. Izračunate su srednje vrijednosti krajnjih područja otklona kazaljke zbog brzog pomicanja pokazivača komparatora za vrijeme očitavanja. Zatim je provedena automatizacija uređaja zamjenom komparatora induktivnim senzorom te su rezultati prikazani u grafičkom i tabličnom obliku. Za mjerenje se koristio uzorak čelika s TiB2 prevlakom i prsten od čelika Č4732.



Slika 14. Grafički prikaz rezultata [7]

Na priloženom grafu, apscisa predstavlja vrijeme u sekundama, a ordinata predstavlja napon izlaznog signala senzora u V.

1	0	10.3466
2	0.1000	10.2524
3	0.2000	10.4395
4	0.3000	10.4305
5	0.4000	10.3053
6	0.5000	10.4421
7	0.6000	10.4408
8	0.7000	10.2627
9	0.8000	10.4382
10	0.9000	10.4408
11	1	10.2769
12	1.1000	10.4524

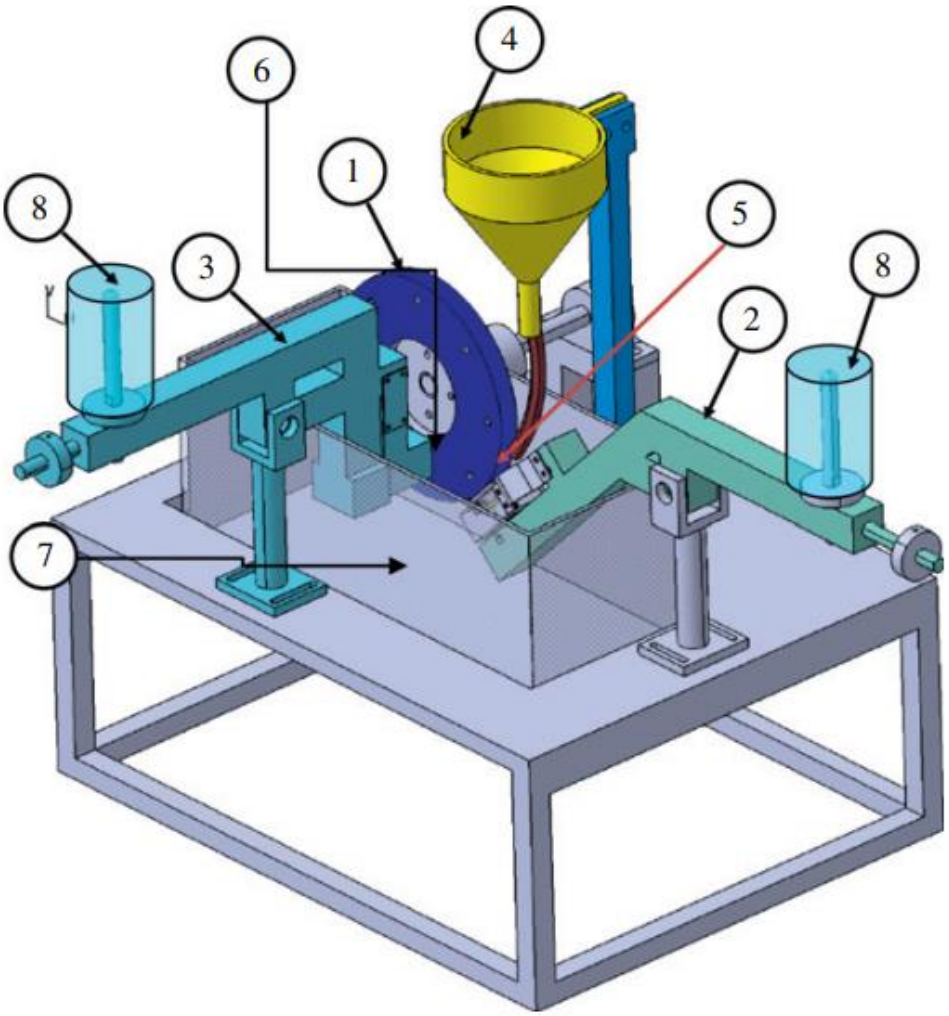
Slika 15. Tablični prikaz rezultata [7]

U odnosu na mjerenje komparatorom, mjerenje senzorom je preciznije jer nije potrebno računati srednje vrijednosti te je period očitavanja podataka senzorom znatno kraći [7].

5. KONSTRUKCIJA NOVOG TRIBOLOŠKOG UREĐAJA ZA ISPITIVANJE TROŠENJA U SUHIM I VLAŽNIM UVJETIMA

U današnje vrijeme postoji potreba za procjenom triboloških svojstava novih inženjerskih materijala korištenjem različitih tehnika. Dizajnirani su i proizvedeni različiti laboratorijski tribološki uređaji poput „prizma po disku“ (eng.„*Block-on Disc*“), „prizma po prstenu“ (eng. „*Block-on-Ring*“), gumeni kotač/suhi pijesak, gumeni kotač/mokri pijesak, ispitivanje na abraziju itd.

Za svaku od ovih metoda je potreban zaseban uređaj koji je gotovo uvijek vrlo skup i zauzima puno mjesta. S tim na umu konstruiran je koncept stroja u programu CATIA koji bi objedinio više od jedne metode ispitivanja u različitim kontaktnim mehanizmima (crta,točka ili područje) koji rade istovremeno pod istim ispitnim uvjetima. Na istom stroju bi se mogli provoditi različiti načini trošenja (adhezijom, abrazija s dva i tri tijela u suhim i mokrim uvjetima). Glavna razlika između ovih metoda je kontaktni mehanizam (područje, linija ili točka) između tribopara. Konstrukcija ovog stroja pokušava smjestiti sve metode u jedan uređaj. Slika 16 prikazuje uređaj koji je dizajniran u programu CATIA. Glavne komponente stroja su okretni kotač (1), poluga „prizme po prstenu“ (2), poluga „prizme po disku“(3), lijevak za abraziju s tri tijela (4), uzorak za „prizmu po prstenu“ (5), uzorak za „prizmu po prstenu“ (6), spremnik lubrikanta (7) i uteg (8).



Slika 16. Konstrukcija uređaja za tribološka ispitivanja [8]

Na obje poluge su postavljene mjerne stanice (Accutec B6 N-50 i Accutec H3-50) za mjerenje sila trenja između kliznog para i integrirane su s indikatorom mase za simultano očitanje sila trenja. Nadalje, na okvir uređaja su pričvršćeni infracrveni termometri (Extech model 42580) i usmjereni na mjesto trošenja kako bi se mjerila temperatura prilikom ispitivanja. Na uređaju se istovremeno može provoditi ispitivanje „prizma po prstenu“ i „prizma po disku“. Za ispitivanje u vlažnim uvjetima, spremnik (7) je moguće napuniti željenom emulzijom u kojoj su potopljena oba uzorka. Na istom stroju je također moguće provesti ispitivanje abrazijom s tri tijela koristeći konfiguraciju pijesak/gumeni kotač. Kako bi se osigurao prolazak čestica pijeska kroz područje kontakta, koriste se dvije pločice koje usmjeravaju pijesak u mjesto kontakta tribopara. Neke tehničke specifikacije uređaja navedene su u tablici 2.

Tablica 2. Specifikacije uređaja [8]

Dio	Specifikacija
Brzina kotača	5 – 2000 o/min
Tip kotača	6.65 inčni čelični kotač prema ASTM B 611 9 inčni gumeni kotač prema ASTM G 65
Opterećenje	5 – 500 N
Motor	Motor izmjenične struje s pogonom pretvarača frekvencije
Veličina uzorka	25 mm x 58 mm za „prizmu po prstenu“ 10 mm x 10 mm za „prizmu po disku“
Debljina uzorka	6 – 20 mm
Ispitivanje	ASTM (G65, G105, B611, G137-95 i G77)

Glavne prednosti stroja su sljedeće:

- Moguće je provesti simultano ispitivanje dviju metoda
- Rezultati ispitivanja su pouzdaniji jer uzorci klize po površini istih karakteristika, time se osiguravaju jednaki uvjeti ispitivanja (temperatura, vlažnost itd.). Nadalje, provođenje dva različita ispitivanja simultano, smanjuje vrijeme potrebno za ispitivanje
- Ispitvanje abrazijom s dva ili tri tijela se može provoditi u suhim i vlažnim uvjetima
- Ušteda na prostoru zbog zamjene tri uređaja s jednim
- Ispitivanje abrazijom s tri tijela se može provoditi s visokim i niskim naprezanjem s obzirom na materijal kotača koji u ovom slučaju može biti metalni ili gumeni [8].

6. PREGLED LITERATURE

6.1. Karakteristike trošenja visokomolekularnog polietilena (UHMWPE) „*twist*“ metodom

Cilj ovog rada je bio evaluirati dinamički koeficijent trenja u kontaktu UHMWPE s čelikom. Test trošenja zakretom je izvršen kao nova metoda za procjenu in vivo trošenja materijala acetabularne čašice za kompletnu zamjenu koljena. Provedeni su eksperimentalni podaci za potvrdu povezanog teorijskog modela razvijenog u ovom radu. Nadalje, razvijen je model kontakta između kotrljajućeg ležaja i ravne površine UHMWPE za „*twist*“ metodu. Također je provedena eksperimentalna studija za analizirani problem. Izračunati kontaktni radijus ima odgovarajuće vrijednosti kao i kontaktni radijus izmjeren optičkim istraživanjima. Nadalje, dubina penetracije raste s kontaktnom silom, a zakretni moment raste s opterećenjem. Dobiveni koeficijent trenja je vrlo mali i povećava se s brzinom rotacije [9].

6.2. Tribološki učinci diskontinuiranog „block on ring“ testa

U ovom radu se pokušala utvrditi razlika triboloških karakteristika kliznog para metodom „*block on ring*“ s dvije metode testiranja, kontinuiranom i diskontinuiranom. Nadalje, verificirana je implementacija termo analize prema normi ASTM G77. Uspoređujući dvije metode testa, ustanovljeno je da diskontinuirani test trošenja ima mali učinak na koeficijent trenja. Tijek faktora trenja pojedinog napretka ispitivanja usporediv je s prosječnim vrijednostima i njihovim faktorima trenja. S druge strane, razlika u trošenju je bila značajna. Kontinuirana metoda ispitivanja dovela je do gotovo dva puta većeg gubitka volumena od diskontinuirane metode. Uklanjanjem i čišćenjem uzorka uzrokovano je uklanjanje tribološkog filma s uzorka, kao i ostataka trošenja. To je promijenilo uvjete mjerenja između ispitivanja. Ovo je zapažanje presudno i mora se uzeti u obzir prilikom usporedbe rezultata triboloških ispitivanja različitih vrsta materijala. Korištenje termoanalize prilikom „*block on ring*“ testa pokazalo se mogućim i korisnim za dobivanje dodatnih informacija. Toplinska analiza u tribologiji mogla bi se koristiti za potkrepljivanje mehanizma oksidacije u praktičnim uvjetima te za karakterizaciju i poboljšanje toplinskih i oksidacijskih svojstava kliznog para.

U ovom slučaju rezultati su pokazali da je maksimalna temperatura kontakta između kliznog para dosegnula 112 ° C u diskontinuiranom načinu tijeku ispitivanja i 130 ° C u kontinuiranom načinu ispitivanja. Varijacija temperature je u korelaciji s procesom koeficijenta trenja za svaki test [10].

6.3. Učinak niskotemperaturnog plazmatskog nitriranja na otpornost na trošenje legure Ti6Al4V

Istraživan je učinak niskotemperaturnog plazmatskog nitriranja na otpornost na trošenje legure Ti6Al4V. Plazmatsko nitriranje je provedeno na temperaturi od 535 ºC u smjesi plinova $N_2/H_2 = 3$ u trajanju od 4, 8 i 12 sati. Provedena su ispitivanja na trošenje adhezijom korištenjem tribometra u konfiguraciji „block on ring“ po normi ASTM G77 u kliznim uvjetima bez lubrikanta. Tvrdoća nitriranih uzoraka je ispitana na uređaju za mjerenje tvrdoće po Vickersu. Također je provedeno ispitivanje SEM mikroskopom kako bi se ustanovili mehanizmi trošenja prilikom trošenja adhezijom. Trošenje materijala je izraženo gubitkom mase po jedinici duljine klizanja. Utvrđeno je da je došlo do velikog povećanja otpornosti na trošenje i tvrdoće nitriranih uzoraka u odnosu na nenitrirane uzorke. Produljenje vremena nitriranja s 4 na 12 h je također značajno utjecalo na poboljšanje otpornosti na trošenje i tvrdoće legure Ti6Al4V [11].

6.4. Tribotehnička svojstva kompozita UHMWPE ojačanog mikročesticama hidroksiapatita ispitanog suhim i podmazanim klizanjem

Ispitana su tribotehnička svojstva visokomolekularnog polietilena ojačanog mikročesticama hidroksiapatita metodom „*block on ring*“ suhim klizanjem te potom klizanjem uz podmazivanje s destiliranom vodom i krvnom plazmom. Pokazano je da ojačanjem visokomolekularnog polietilena česticama hidroksiapatita dolazi do smanjenja stope trošenja u suhom klizanju za 20 %. U slučaju ispitivanje s podmazivanjem, došlo je do smanjenja stope trošenja od 50 – 70 % u odnosu na suho klizanje. Matricu je sačinjavao čisti visokomolekularni polietilen u koji su disperzirane sferulitne čestice hidroksiapatita [12].

6.5. Procjena sposobnosti podmazivanja polimernih materijala u tribosustavu čelik/čelik

U ovom radu se procjenjivala sposobnost podmazivanja različitih komercijalno dostupnih polimernih materijala u tribosustavu čelik/čelik metodom „*block on ring*“. Rezultati su pokazali da, ovisno o vrstama polimera i punila, polimerni materijali mogu biti izvrstan materijal za podmazivanje tribosustava čelik/čelik u suhim uvjetima, te mogu poslužiti kao zamjena za ulja i masti u vakuumskim primjenama i u uvjetima „*fretinga“*. Optičkom analizom trošene površine čelika utvrđen je utjecaj različitih polimernih materijala na trošenje u tribosustavu čelik/čelik te se time pruža mogućnost razvoja novog koncepta podmazivanja u raznim primjenama [13].

6.6. Mehanička i tribološka svojstva kroma prevučenog PVD postupkom

Izmjerena su mehanička svojstva kao što su Youngov modul i žilavost prevlaka Cr3C2-NiCr, WC-Co i Cr203 prevučenih PVD postupkom. Tribološka svojstva triju vrsta prevlaka ispitana su metodom „block on ring“ u vlažnim uvjetima gdje je medij bila voda. Nadalje , ispitani su i utjecaji mehaničkih svojstava na tribološka svojstva prevlaka. Nadalje, utvrđeno je da su Youngov modul, čvrstoća i žilavost prevlaka bili niži od istih sirovih materijala, što se može pripisati postojanju pora i mikropukotina u prevlakama. Iznos koeficijenata trošenja, u opadajućem redoslijedu, je Cr3C2-NiCr, WC-Co i Cr203, a koeficijent trošenja Cr203 prevlake bio je manji od 1 x $10^{-6} mm^3$. Mehanizmi trošenja prevlaka objašnjeni su u smislu mikropukotina i pora, a voda je pojačala trošenje prevlaka. Utvrđeno je da što je veća žilavost, manja poroznost i duljina mikropukotina prevlake, to je veća otpornost prevlake na trošenje [14].

7. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio diplomskog rada je proveden u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (slika 17). Ispitana je otpornost na adhezijsko trošenje u vlažnom i suhom stanju te su određeni faktori trenja za uzorke legura Ti6Al4V, CoCrMo, Fe 316L te UHMWPE i γ-UHMWP. Nadalje, izmjerene su tvrdoće svih ispitnih uzoraka (prizmi) te prstena kao i površinska hrapavost prije početka ispitivanja.

Slika 17. Automatizirani uređaj za ispitivanje „*block on ring*“

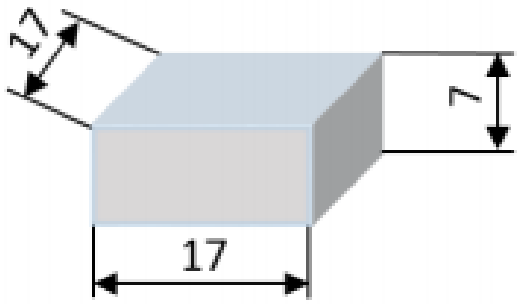
Prsten je u svim triboparovima bio iste legure 100Cr6, ugljični čelik legiran kromom i molibdenom.

Drugi dio tribopara sačinjavali su 5 različitih materijala:

- Legura titanija T6Al4V
- Legura kroma CoCrMo
- Legura čelika 316L
- Visokomolekularni polietilen - UHMWPE
- Umreženi visokomolekularni polietilen – γ UHMWPE.

7.1. Priprema uzoraka

U Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pripremljeni su uzorci, dimenzija 17x17x7 mm (slika 17.). Brušenje uzoraka je provedeno na uređaju Buehler Phoenix Alpha. Korišten je papir za brušenje gradacije P320, a brzina je bila 300 okr/min uz hlađenje vodom.



Slika 18. Dimenzije ispitnih uzoraka

Uzorci su polirani nakon brušenja u dvije faze na uređaju Struers DAP-V. U prvoj fazi su uzorci polirani na ploči MD- Largo dijamantnom pastom granulacije 9 μm, a u sljedećoj fazi je korištena ploča MD-Chem i tekućina Silica granulacije čestica 0,03 μm. Brzina je u obje faze poliranja bila 150 okr/min, dok je sila pritiska iznosila 20 N uz korištenje lubrikanta.

7.2. Mjerenje hrapavosti površine

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina provedena su mjerenja hrapavosti površine na elektroničko-mehaničkom uređaju s ticalom Mahr Perthen Perthometer S8P (slika 18). Mjerenja su provedena prema normama ISO 4287:1997, ISO 4288:1996 te ISO 3274:1996 [15–17]. Provedeno je mjerenje na jednom uzorku titanija, čelika, kroma te dva prstena.

Slika 19. Mahr Perthen Perthometer S8P instrument s ticalom

Tablica 3. Rezultati mjerenja hrapavosti površine uzoraka

Uzorak		Ti6Al4V	CoCrMo	316L	Prsten od čelika 100 Cr6	Prsten od čelika 100 Cr6
x	R_a, (µm)	0,025	0,003	0,002	0,114	0,156
	R_z, (µm)	0,177	0,022	0,017	0,963	1,399
	R_{max}, (µm)	0,284	0,027	0,025	1,131	1,901
s	R_a, (µm)	0,006	0,000	0,000	0,007	0,008
	R_z, (µm)	0,057	0,001	0,004	0,065	0,125
	R_{max}, (µm)	0,069	0,004	0,012	0,151	0,337
R	R_a, (µm)	0,016	0,001	0,001	0,018	0,020
	R_z, (µm)	0,145	0,003	0,012	0,156	0,318
	R_{max}, (µm)	0,162	0,009	0,031	0,394	0,913

U tablici 3. su prikazani rezultati mjerenja hrapavosti uzoraka prije početka ispitivanja.

7.3. Mjerenje tvrdoće

Provedeno je mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu na uzorcima titanija, kroma i čelika. Rezultati su dani u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće

Mjerenje br.	Ti6Al4V	CoCrMo	316L
	HV1	HV1	HV1
1	318	461	300
2	328	459	289
3	319	455	287
4	315	458	283
5	314	459	292
$\bar{x}$	319	458	290

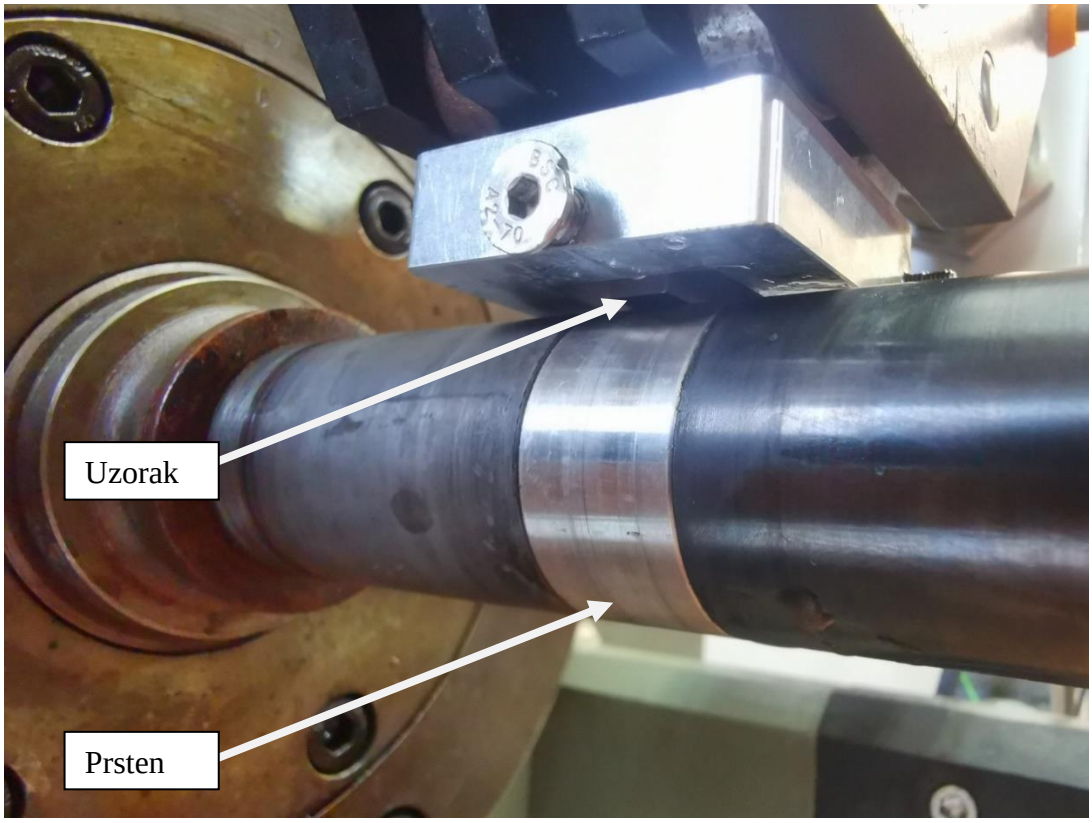
7.4. Ispitivanje u suhom stanju

Uzorci su ispitivani na adhezijsko trošenje u intervalima od 15, 30 i 45 minuta. Za svaki ispitni uzorak/prizmu korišten je novi prsten od čelika (ukupno 5 prstena za ispitivanje u suhom stanju). Ispitivanja su provedena na tri uzorka svake vrste materijala/prizme (5 materijala) što je ukupno 15 uzoraka. Normalna sila je iznosila 100 N za sve uzorke osim za uzorke legure čelika 316L gdje je normalna sila iznosila 20 N. Na početku ispitivanja je provedeno mjerenje mase uzoraka te nakon svakog vremenskog intervala mjerena je masa na vagi Ohaus Pioneer Analytical Balances (slika 20).

Slika 20. Vaga Ohaus Pioneer Analytical Balances

Ispitivanje se provodilo tako da se uzorak ispitivao 15 minuta nakon čega je slijedilo mjerenje mase, slijedilo je daljnjih 15 minuta ispitivanja i mjerenje mase te posljednjih 15 minuta ispitivanja te mjerenje mase što ukupno čini 45 minuta ispitivanja po uzorku. Tako su ispitana 3 uzorka titanija, pa 3 kroma, 3 čelika, 3 visokomolekularnog polietilena i 3 uzorka umreženog visokomolekularnog polietilena.

Slika 21. Ispitivanje u suhom stanju



Slika 22. Uzorak i prsten u kontaktu

Slika 23. Prsten nakon ispitivanja u suhom stanju

Tablica 5. Izmjere masa svih uzoraka prilikom ispitivanja u suhom stanju

	Uzorak	Početna masa, (g)	Masa nakon 15 min ispitivanja, (g)	Masa nakon 30 min ispitivanja, (g)	Masa nakon 45 min ispitivanja, (g)
Ti6Al4V	Ti 1	3,5207	3,5212	3,5208	3,5208
	Ti 2	3,4122	3,4127	3,4115	3,4118
	Ti 3	3,4251	3,4252	3,4250	3,4257
CoCrMo	Cr 1	6,5760	6,5770	6,5765	6,5758
	Cr 2	6,5200	6,5199	6,5212	6,6878
	Cr 3	6,6874	6,6868	6,6878	6,6871
316L	Č 1	6,5530	6,5535	6,5536	6,5531
	Č 2	6,5641	6,5643	6,5643	6,5640
	Č3	6,4759	6,4759	6,4760	6,4757
UHMWPE	PE 1	0,7699	0,7700	0,7698	0,7701

	PE 2	0,7885	0,7881	0,7882	0,7881
	PE 3	0,8088	0,8085	0,8082	0,8081
γ UHMWPE	PE-X 1	0,7815	0,7808	0,7813	0,7809
	PE-X 2	0,7701	0,7692	0,7695	0,7701
	PE-X 3	0,7806	0,7802	0,7809	0,7807

Tablica 6. Promjene masa tijekom ispitivanja u suhom stanju

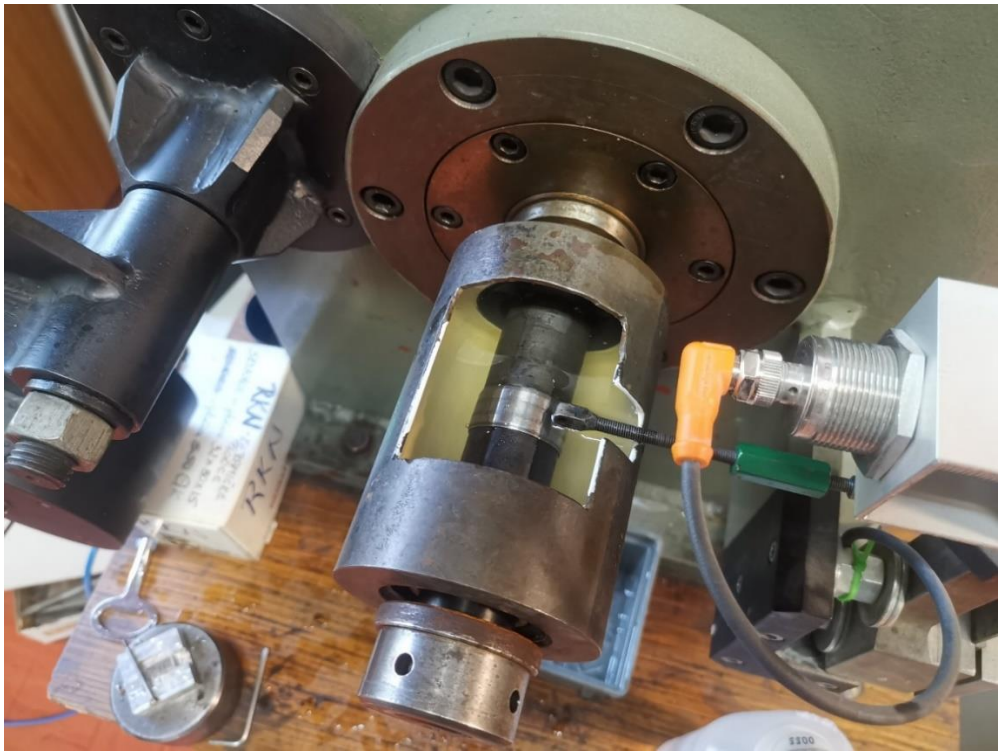
	Uzorak	Δm 15 min, (g)	Δm 30 min, (g)	Δm 45 min, (g)
Ti6Al4V	Ti 1	0,0005	0,0001	0,0001
	Ti 2	0,0005	-0,0007	-0,0004
	Ti 3	0,0001	-0,0001	0,0006
CoCrMo	Cr 1	0,0010	0,0005	-0,0002
	Cr 2	-0,0001	0,0012	0,0006
	Cr 3	-0,0006	0,0004	-0,0003
316L	Č 1	0,0005	0,0006	0,0001
	Č 2	0,0002	0,0002	-0,0001
	Č3	0,0000	0,0001	-0,0002
UHMWPE	PE 1	0,0001	-0,0001	0,0002
	PE 2	-0,0004	-0,0003	-0,0004
	PE 3	-0,0003	-0,0006	-0,0007
γ UHMWPE	PE-X 1	-0,0007	-0,0002	-0,0006
	PE-X 2	-0,0009	-0,0006	0,0000
	PE-X 3	-0,0004	0,0003	0,0001

U tablici 6. je zelenom bojom označen gubitak mase, dok je povećanje mase označeno crvenom bojom.

7.5. Ispitivanje u vlažnom stanju

Ispitivanja u vlažnom stanju su provedena na isti način kao i ispitivanja u suhom stanju s razlikom da je u vlažnom stanju korištena fiziološka tekućina odnosno 0,9 % otopina NaCl koja predstavlja simulaciju tjelesnih tekućina (slika 24). Za ispitivanja u vlažnom stanju su korišteni novi prstenovi za svaku vrstu ispitnog uzorka (ukupno 5 prstenova).

Slika 24. Fiziološka tekućina za ispitivanje u vlažnom stanju



Slika 25. Postavljanje dodatka za ispitivanje u vlažnom stanju

Slika 26. Ispitivanje u vlažnom stanju

Slika 27. Prsten nakon ispitivanja u vlažnom stanju

Tablica 7. Izmjere masa svih uzoraka prilikom ispitivanja u vlažnom stanju

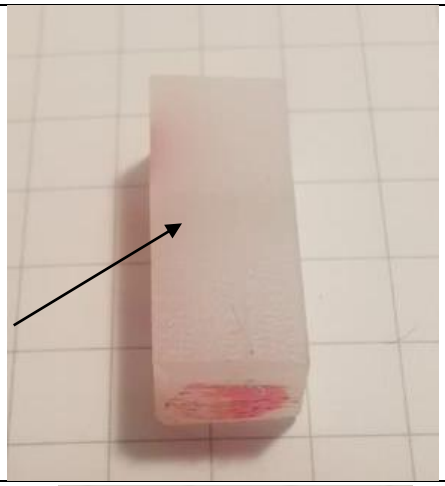
	Uzorak	Početna masa, (g)	Masa nakon 15 min ispitivanja, (g)	Masa nakon 30 min ispitivanja, (g)	Masa nakon 45 min ispitivanja, (g)
Ti6Al4V	Ti 1	3,5208	3,5205	3,5211	3,5205
	Ti 2	3,4118	3,4123	3,4120	3,4112
	Ti 3	3,4257	3,4259	3,4251	3,4250
CoCrMo	Cr 1	6,5758	6,5763	6,5762	6,5755
	Cr 2	6,5206	6,5205	6,5201	6,5200
	Cr 3	6,6871	6,6867	6,6870	6,6870
316L	Č 1	6,5531	6,5533	6,5531	6,5530
	Č 2	6,5640	6,5642	6,5645	6,5639

	Č3	6,4757	6,4756	6,4754	6,4756
UHMWPE	PE 1	0,7701	0,7695	0,7694	0,7696
	PE 2	0,7881	0,7886	0,7885	0,7881
	PE 3	0,8081	0,8090	0,8082	0,8081
γ UHMWPE	PE-X 1	0,7809	0,7810	0,7812	0,7809
	PE-X 2	0,7701	0,7698	0,7693	0,7696
	PE-X 3	0,7807	0,7796	0,7806	0,7800

Tablica 8. Promjene masa tijekom ispitivanja u vlažnom stanju

	Uzorak	Δm 15 min, (g)	Δm 30 min, (g)	Δm 45 min, (g)
Ti6Al4V	Ti 1	-0,0003	0,0003	-0,0003
	Ti 2	0,0005	0,0002	-0,0006
	Ti 3	0,0002	-0,0006	-0,0007
CoCrMo	Cr 1	0,0005	0,0004	-0,0003
	Cr 2	-0,0001	-0,0005	-0,0006
	Cr 3	-0,0004	-0,0001	-0,0001
316L	Č 1	0,0002	0,0000	-0,0001
	Č 2	0,0002	0,0005	-0,0001
	Č3	-0,0001	-0,0003	-0,0001
UHMWPE	PE 1	-0,0006	-0,0007	-0,0005
	PE 2	0,0005	0,0004	0,0000
	PE 3	0,0009	0,0001	0,0000
γ UHMWPE	PE-X 1	0,0001	0,0003	0,0000
	PE-X 2	-0,0003	-0,0008	-0,0005
	PE-X 3	-0,0011	-0,0001	-0,0007

Tablica 9. Fotografije tragova trošenja uzoraka nakon svih ispitivanja

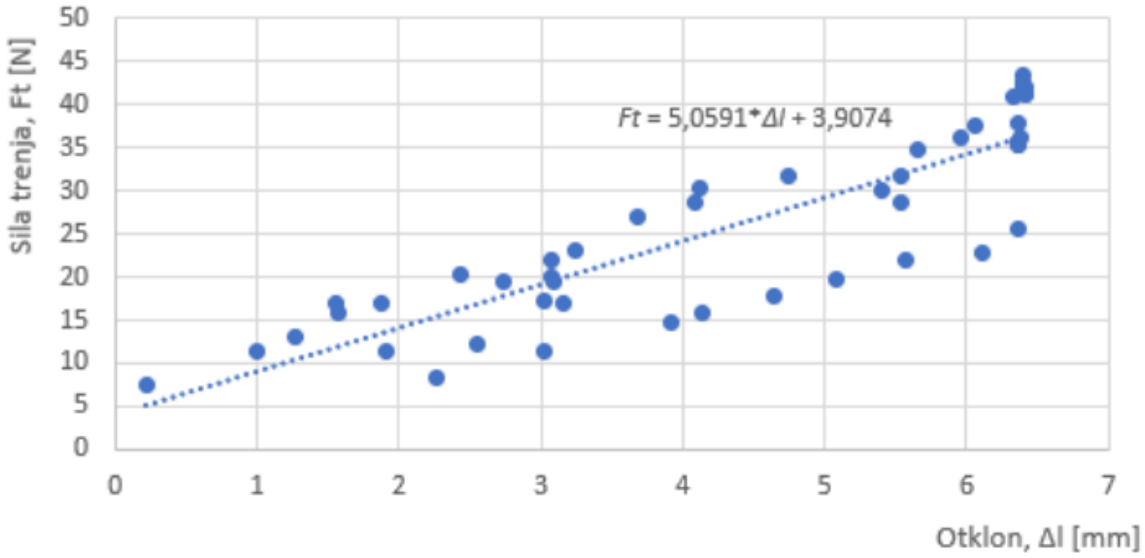
PE 1 	PE-X 1
Č 1	Cr 1
Ti 1	

Na slikama prikazanim u Tablici 9 prikazani su tragovi trošenja označenih strelicama. Tragovi su izraženiji kod ispitnih uzoraka legura Ti6Al4V, CoCrMo te 316L kod kojih su vidljivi tamni tragovi po ivici traga trošenja. Za pretpostaviti da je da su tamni tragovi posljedica korozijskih produkata čeličnog prstena.

7.6. Određivanje faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje

7.6.1. Određivanje konstante opruge uređaja za ispitivanje „block on ring“

Prije određivanja faktora trenja potrebno je kalibrirati uređaj, odnosno ustanoviti konstantu opruge (slika 28) kako bi se mogli izračunati faktori trenja. Kalibriranje uređaja se provodilo pomoću dinamometra. Očitane vrijednosti na dinamometru su pridružene vrijednostima promjene napona zabilježene senzorom. Trajanje kalibracije je iznosilo 50 sekundi. Dobivena naponsko-vremenska karakteristika je pomoću linearnog gradijenta senzora koja iznosi 1,11 V/mm preračunata u otklon (Δl).



Slika 28. Određivanje konstante opruge

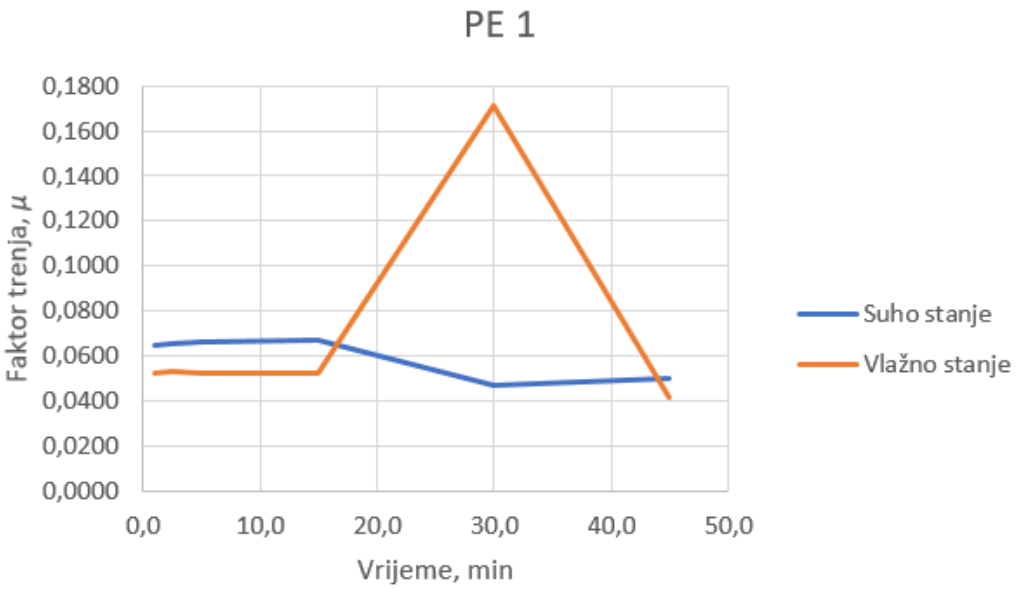
7.6.2. Rezultati faktora trenja

Za izračun faktora trenja potrebno je prvo izračunati sile trenja po formuli sa slike 28.

$$F_t = 5{,}0591 * \Delta l + 3{,}9074 \quad (4)$$

Otklon se računa kao razlika početnog napona podijeljenog s linearnim gradijentom senzora i napona u vremenskim razmacima od 1, 2.5, 5, 15, 30 i 45 minuta. Dijeljenjem sile trenja s normalnom silom izračunava se faktor trenja. Tijekom ispitivanja je korišten uteg od 2 kg koji preko poluge opterećuje uzorak normalnom silom od 100 N. Tijekom ispitivanja uzoraka od čelika nije korišten uteg zbog zavarivanja prstena i uzorka te je stoga normalna sila iznosila 20 N.

U tablicama 10, 11 i 12 te na slici 29 prikazani su rezultati faktora trenja u suhom i vlažnom stanju za visokomolekularni polietilen.



Slika 29. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE 1

Tablica 10. Rezultati faktora trenja uzorka PE 1

PE1						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,0649	0,0655	0,0662	0,0672	0,0466	0,0501
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,0527	0,0531	0,0527	0,0524	0,1714	0,0418

Tablica 11. Rezultati faktora trenja uzorka PE 2

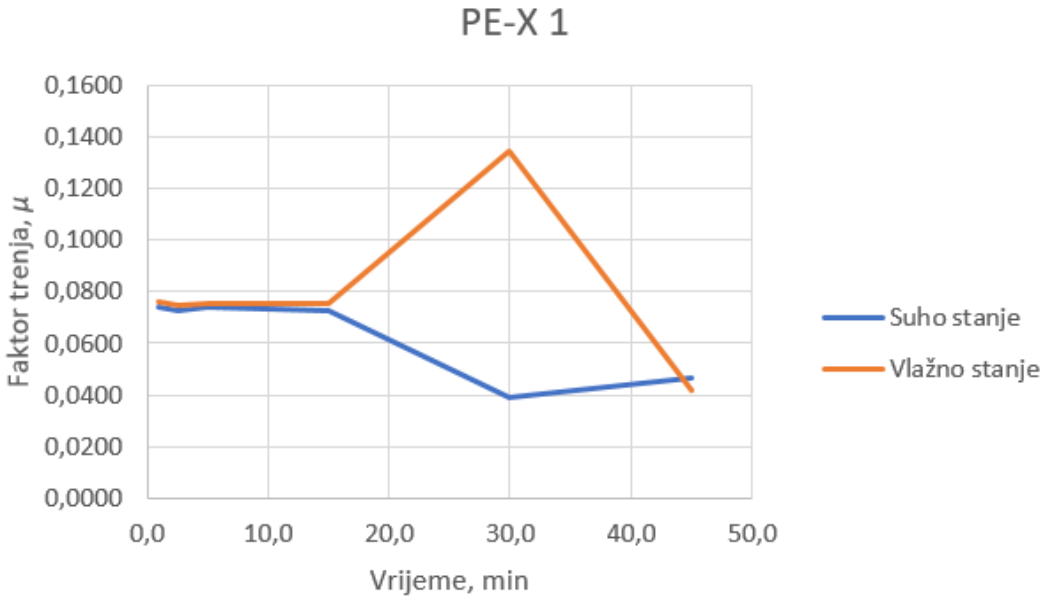
PE2						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,0415	0,0412	0,0412	0,0413	0,0505	0,0485
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,0474	0,0464	0,0464	0,0476	0,1624	0,0411

Tablica 12. Rezultati faktora trenja uzorka PE 3

PE 3						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,0430	0,0434	0,0436	0,0432	0,0398	0,0532
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,0519	0,0520	0,0527	0,0525	0,1340	0,0409

Iz tablica 10, 11 i 12 te slike 29 u prvih 15 minuta ispitivanja vidljiv je konstantan faktor trenja koji odgovara iskustvenim vrijednostima iz literature [9]. U sljedećih 15 minuta ispitivanja u vlažnom stanju vidljivo je naglo povećanje faktora trenja te pad jednakog iznosa u posljednjih 15 minuta. Može se zaključiti da u početku nije došlo do ostvarivanja kontakta između površina uzoraka i prstena što pokazuje konstantan faktor trenja, a nagli porast faktora trenja se može objasniti naljepljivanjem odvojenih čestica koji povećavaju kontakt tribopara. U zadnjih 15 minuta ispitivanja moguće je otkidanje nalijepljenih čestica te ponovno neostvarivanje kontakta tribopara. Kod ispitivanja u suhom stanju nije došlo do znatne promjene fakotra trenja.

U tablicama 13, 14 i 15 te na slici 30 prikazani su faktori trenja umreženog visokomolekularnog polietilena u suhom i vlažnom stanju.



Slika 30. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE-X 1

Tablica 13. Rezultati faktora trenja uzorka PE-X 1

PE-X 1						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,0743	0,0724	0,0742	0,0728	0,0391	0,0467
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,0759	0,0748	0,0755	0,0751	0,1346	0,0420

Tablica 14. Rezultati faktora trenja uzorka PE-X 2

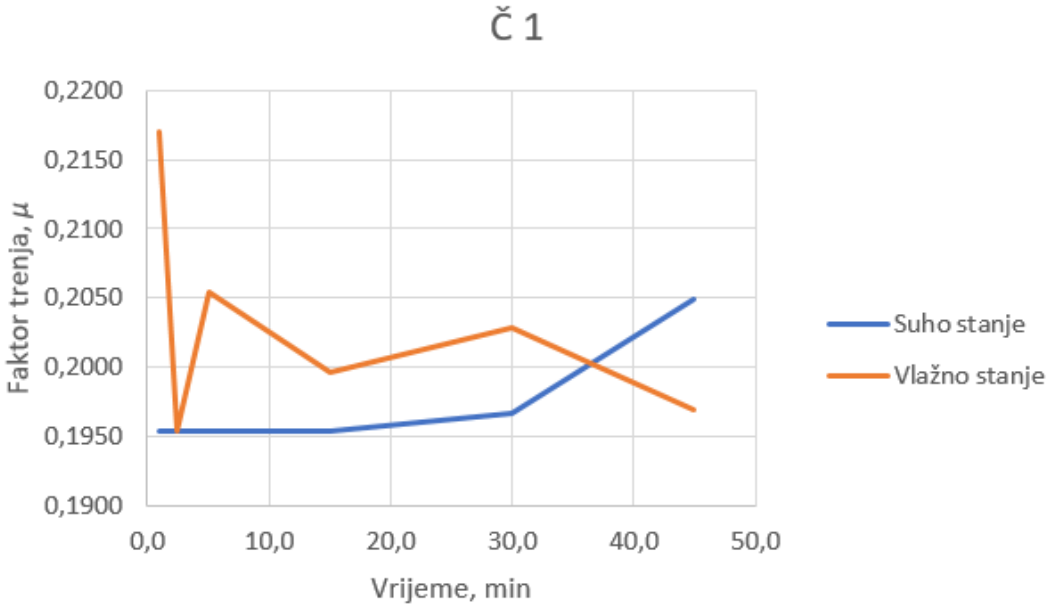
PE-X 2						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,0428	0,0419	0,0428	0,0440	0,0394	0,0503
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,0839	0,0857	0,0865	0,0863	0,1059	0,0437

Tablica 15. Rezultati faktora trenja uzorka PE-X 3

PE-X 3						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,0450	0,0443	0,0472	0,0472	0,0395	0,0495
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,0769	0,0771	0,0758	0,0769	0,1278	0,0426

Iz rezultata prikazanih u tablicama 13, 14 i 15 te slici 30 vidljiv je blag porast faktora trenja koji odgovara vrijednostima iz literature [9] uz vrlo sličan izgled kretanja vrijednosti faktora trenja kroz 45 minuta ispitivanja kao i kod standardnog visokomolekularnog polietilena. Može se zaključiti da je na jednak način došlo prvotno do neostvarivanja kontakta tribopara, potom naljepljivanja te krajnjeg odljepljivanja čestica s površine uzoraka kod ispitivanja u vlažnom stanju dok je kod ispitivanja u suhom stanju došlo do postepenog neostvarivanja kontakta tribopara.

U tablicama 16, 17 i 18 te na slici 31 prikazani su faktori trenja uzoraka legure čelika 316L u suhom i vlažnom stanju.



Slika 31. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Č 1

Tablica 16. Rezultati faktora trenja uzorka Č 1

Č 1						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,1954	0,1954	0,1954	0,1954	0,1967	0,2049
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,2170	0,1954	0,2054	0,1997	0,2029	0,1970

Tablica 17. Rezultati faktora trenja uzorka Č 2

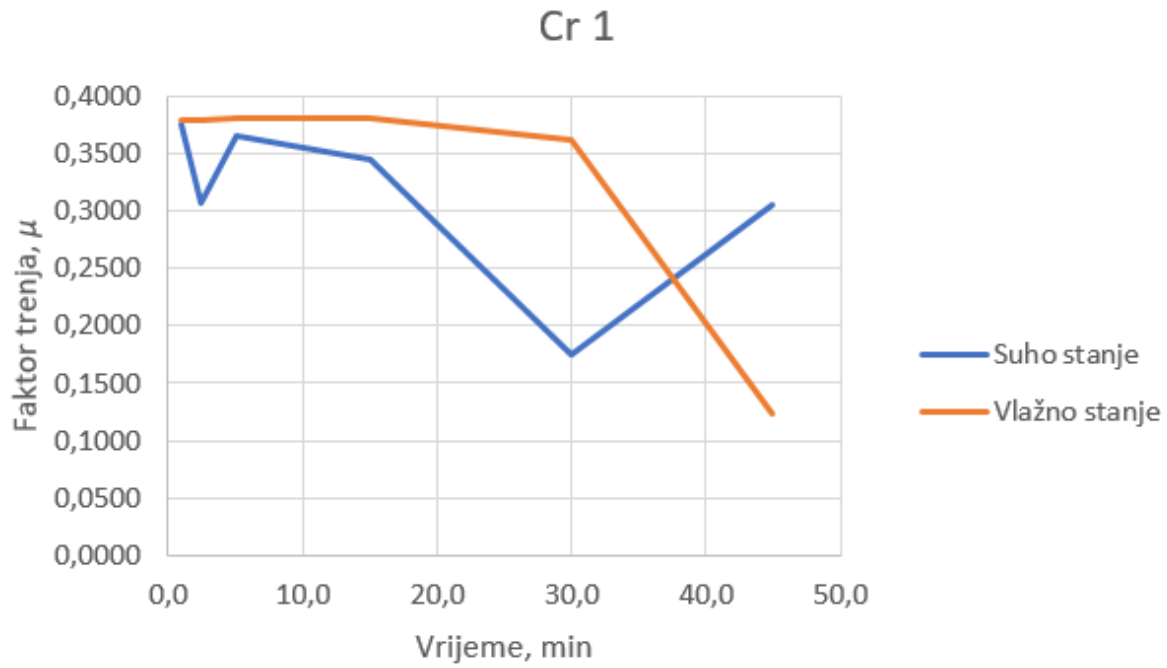
Č 2						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,1954	0,1954	0,1954	0,1954	0,2202	0,1995
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,2049	0,1999	0,2036	0,1970	0,2033	0,1983

Tablica 18. Rezultati faktora trenja uzorka Č 3

Č 3						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,2546	0,2592	0,2567	0,4706	0,1954	0,2004
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,2109	0,2198	0,2070	0,2015	0,1983	0,2095

Iz rezultata prikazanih u tablicama 16, 17 i 18 te na slici 31 vidljivi su rezultati ispitivanja uzoraka legure čelika 316L u suhom i vlažnom stanju koji odgovaraju iskustvenim vrijednostima iz literature [13]. Kod ispitivanja u vlažnom stanju vidljiv je pad faktora trenja na samom početku ispitivanja te relativno stabilno kretanje istog kroz ostalih 40 minuta ispitivanja. Može se zaključiti da je prvotno ostvareni kontakt tribopara prekinut te je ostao nejednoliko ostvaren do kraja ispitivanja. Kod ispitivanja u suhom stanju vidljiv je blagi rast faktora trenja što znači da je došlo do postepenog ostvarivanja kontakta tribopara.

U tablicama 19, 20 i 21 te na slici 32 prikazani su rezultati ispitivanja legure CoCrMo u suhom i vlažnom stanju.



Slika 32. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Cr 1

Tablica 19. Rezultati faktora trenja uzorka Cr 1

Cr 1						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,3749	0,3068	0,3645	0,3455	0,1756	0,3056
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,3787	0,3790	0,3805	0,3802	0,3613	0,1239

Tablica 20. Rezultati faktora trenja uzorka Cr 2

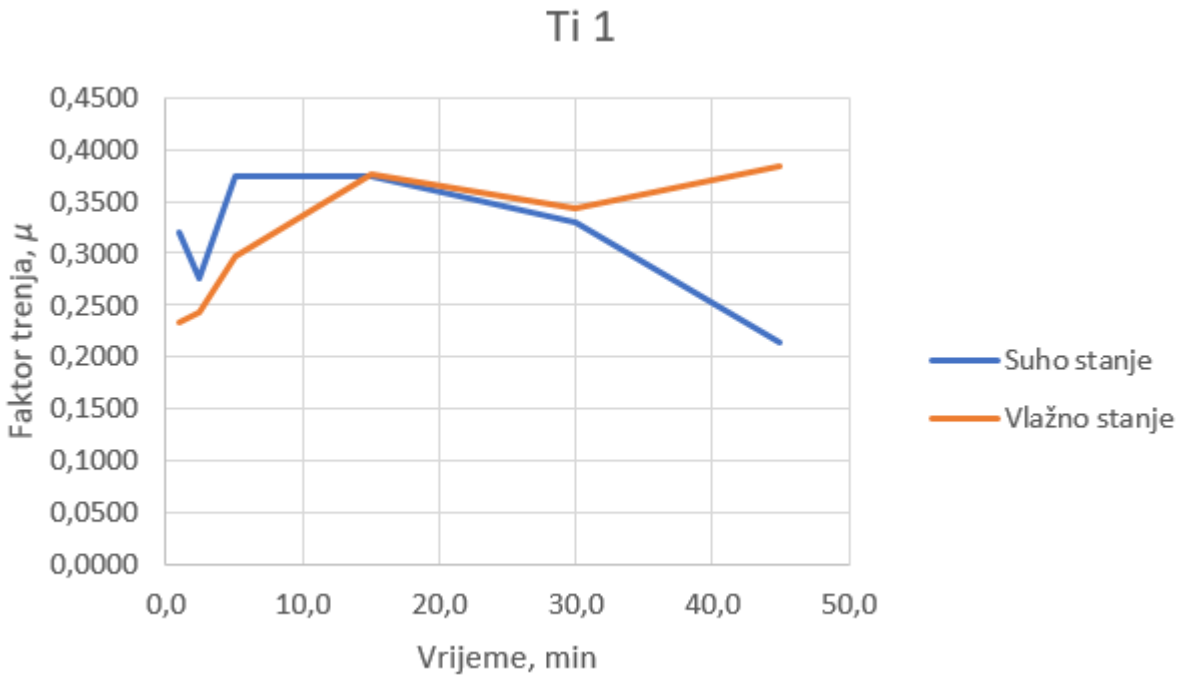
Cr 2						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,3753	0,2985	0,2426	0,3747	0,2009	0,2381
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,3219	0,3796	0,3786	0,2793	0,3786	0,0882

Tablica 21. Rezultati faktora trenja uzorka Cr 3

Cr 3						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,3267	0,3740	0,3294	0,3667	0,2262	0,2482
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,3790	0,3782	0,3745	0,3687	0,3642	0,1155

Iz rezultata prikazanih u tablicama 19, 20 i 21 te na slici 32 prikazani su rezultati ispitivanja legure CoCrMo u suhom i vlažnom stanju koji odgovaraju vrijednostima iz literature [18]. Kod ispitivanja u suhom stanju vidljiv je pad faktora trenja u prvih 30 minuta ispitivanja nakon čega slijedi blagi porast istog. Može se zaključiti da je došlo do stvaranja nejednolikog kontakta tribopara u prvih 30 minuta ispitivanja, nakon čega je uslijedilo postepeno ostvarivanje kontakta te posljedično tome i rast faktora trenja. Kod ispitivanja u vlažnom stanju vidljiv je blagi pad u prvih 30 minuta te potom nagli pad faktora trenja u posljednjih 15 minuta ispitivanja što znači da je došlo do stvaranja nejednolikog kontakta tribopara.

U tablicama 22, 23 i 24 te na slici 33 prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka legure Ti6Al4V u suhom i vlažnom stanju.



Slika 33. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Ti 1

Tablica 22. Rezultati faktora trenja uzorka Ti 1

Ti 1						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,3204	0,2757	0,3753	0,3750	0,3307	0,2136
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,2337	0,2428	0,2979	0,3770	0,3439	0,3846

Tablica 23. Rezultati faktora trenja uzorka Ti 2

Ti 2						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,3088	0,3106	0,3033	0,3600	0,2789	0,2229
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,2347	0,2747	0,2429	0,3785	0,3756	0,3813

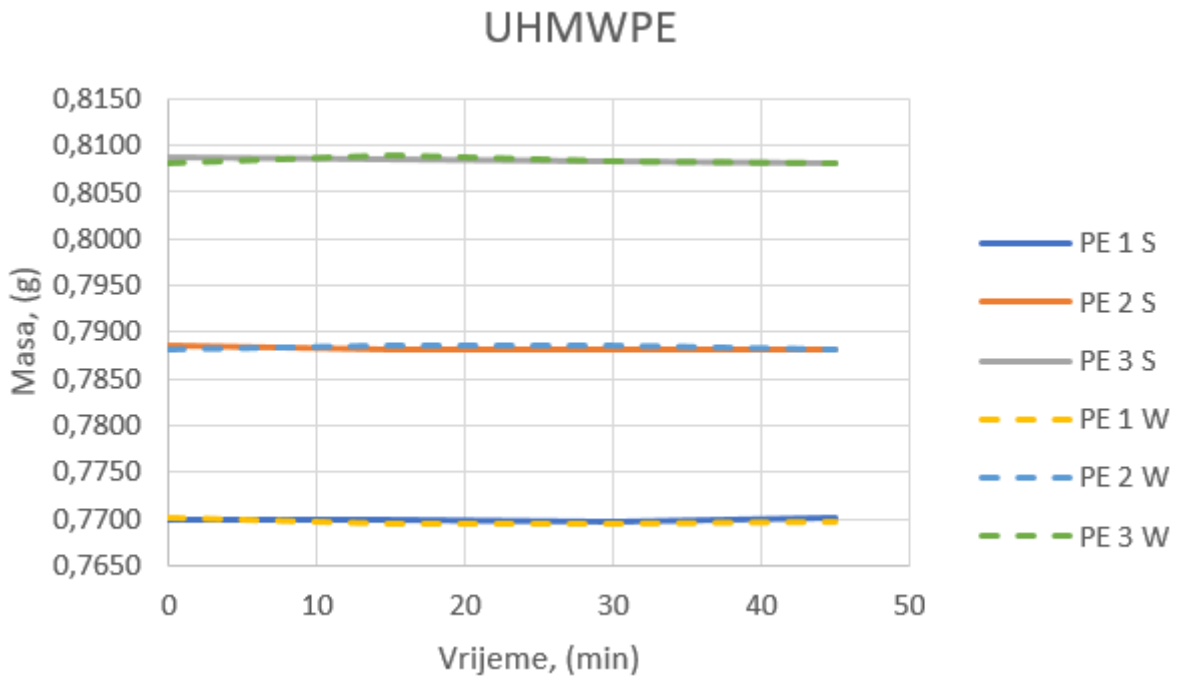
Tablica 24. Rezultati faktora trenja uzorka Ti 3

Ti 3						
Vrijeme, min	1	2,5	5	15	30	45
Faktor trenja u suhom stanju, μ	0,3451	0,3419	0,3625	0,3742	0,2826	0,2200
Faktor trenja u vlažnom stanju, μ	0,3765	0,3505	0,3616	0,3629	0,3824	0,0935

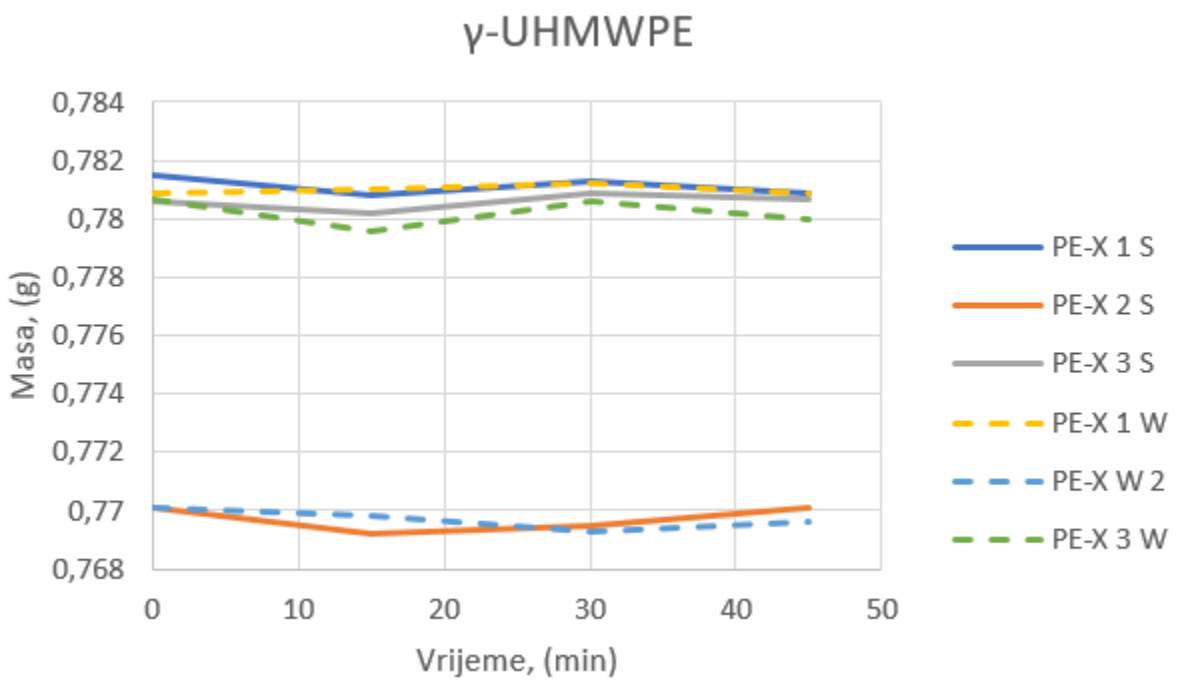
Iz rezultata prikazanih u tablicama 22, 23 i 24 te na slici 33 prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka legure Ti6Al4V u suhom i vlažnom stanju koji su slični iskustvenim vrijednostima iz literature [19]. Kod ispitivanja u suhom i vlažnom stanju primjetna je sličnost u kretanju faktora trenja u prvih 30 minuta no u zadnjih 15 minuta ispitivanja došlo je do porasta faktora trenja u vlažnom stanju, dok je kod ispitivanja faktora trenja u suhom stanju došlo do pada istog. Može se pretpostaviti da je do porasta faktora trenja u vlažnom stanju došlo zbog korozijskih produkata na prstenu.

7.6.3. Otpornost na adhezijsko trošenje

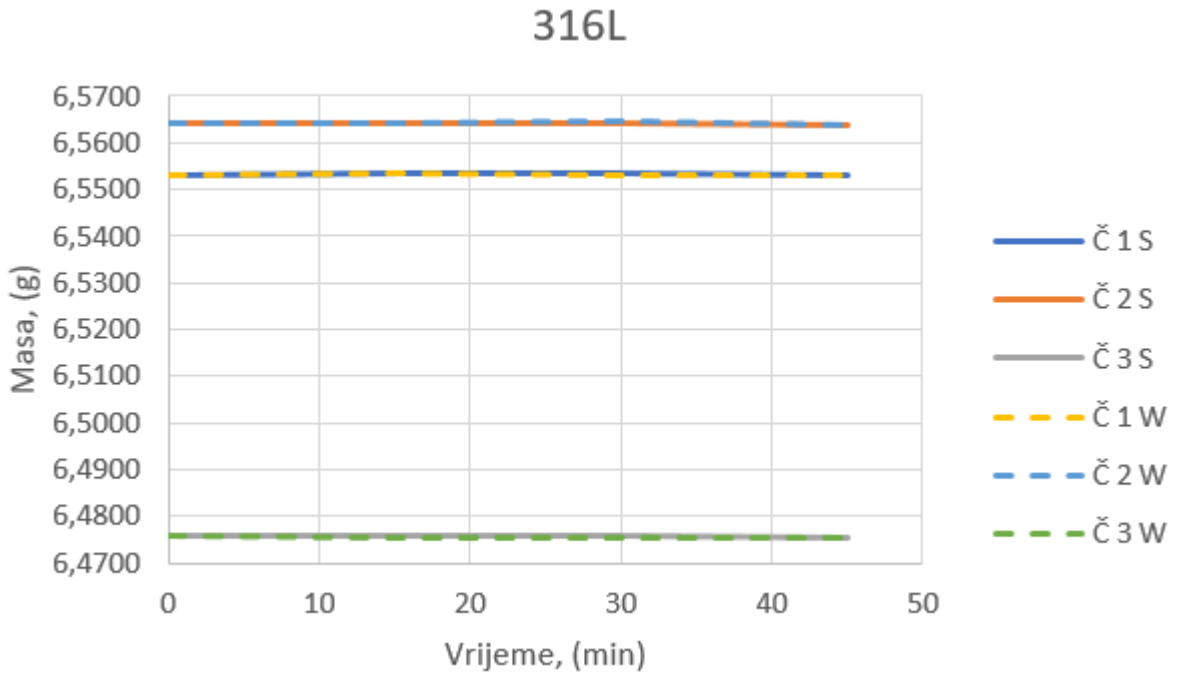
Otpornost na adhezijsko trošenje predstavlja gubitak mase materijala u vremenu. Pridruživanjem mjerenih masa uzoraka odabranim vremenskim intervalima, u nastavku su dani grafički prikazi ovisnosti prirasta ili gubitka mase u vremenu. Na slikama 34 – 38 dani su grafički prikazi promjena mase svih uzoraka gdje neprekinuta linija prikazuje ispitivanje u suhom stanju, a isprekidana linija prikazuje ispitivanje u vlažnom stanju. Zbog vrlo male promjene mase čije vrijednosti su dane u tablicama 6 i 8, na grafičkim prikazima nisu vidljive značajne promjene što se može protumačiti izvrsnom otpornosti na adheziju svih ispitanih materijala (gubici mase kod svih materijala su manji od 0,1 %).



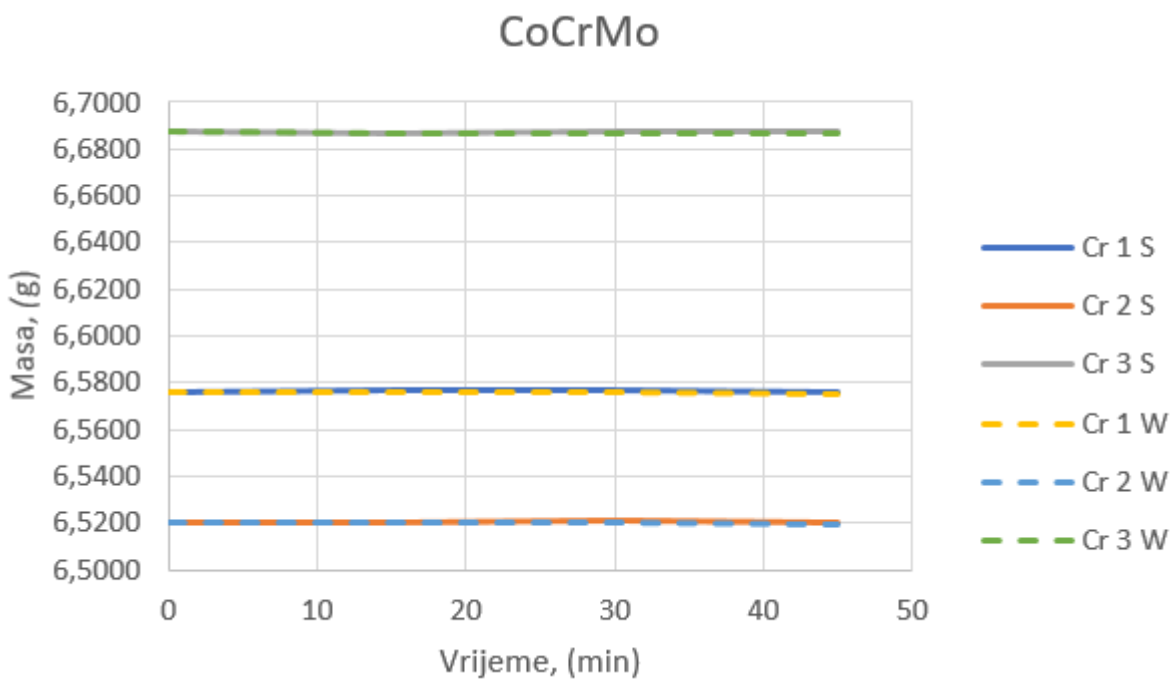
Slika 34. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka visokomolekularnog polietilena u suhom i vlažnom stanju



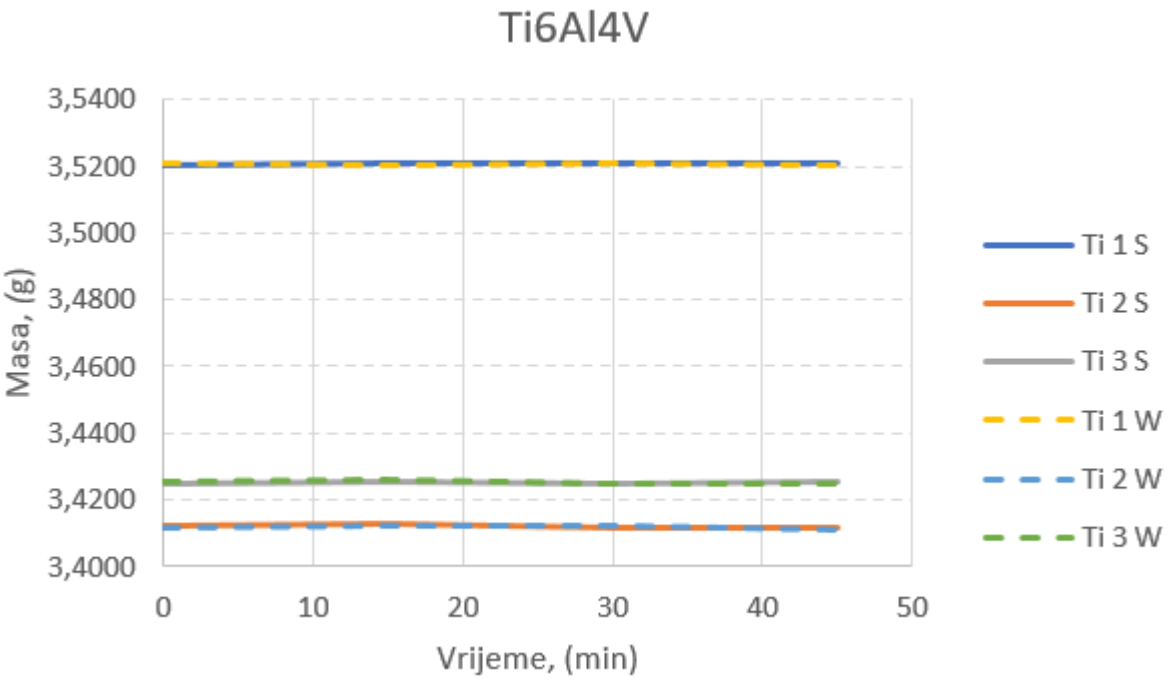
Slika 35. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka umreženog visokomolekularnog polietilena u suhom i vlažnom stanju



Slika 36. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka čelika u suhom i vlažnom stanju



Slika 37. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka kroma u suhom i vlažnom stanju



Slika 38. Grafički prikaz promjene mase tijekom ispitivanja uzoraka titanija u suhom i vlažnom stanju

8. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje metodom „block on ring“ te određenih faktora trenja na uzorcima Ti6Al4V, CoCrMo, 316L, UHMWPE te γ-UHMWPE, može se zaključiti sljedeće:

- Vrijednosti faktora trenja svih uzoraka odgovaraju iskustvenim vrijednostima iz literature te prosječna vrijednost iznosi (suho stanje/vlažno stanje):
    - UHMWPE - 0,0495/0,0666
    - γ-UHMWPE - 0,0507/0,0804
    - legura čelika 316L – 0,2234/0,2040
    - legura CoCrMo – 0,3041/0,3228
    - legura Ti6Al4V – 0,3112/0,3164
- Gubitak mase materijala je za sve ispitane triboparove manji od 0,1 % za ispitivani period od 45 minuta.
- Ispitani uzorci pokazuju visoku otpornost na adhezijsko trošenje.

LITERATURA

[1] Fatigue Wear. Tribol Ser. 1993;24(C). doi: 10.1016/S0167-8922(08)70588-1

[2] Leroux P. Block on Ring Sliding Wear Evaluation BLOCK-ON-RING SLIDING WEAR EVALUATION Duanjie Li , PhD Prepared by. 2016;(January).

[3] podmazivanje. :1–93.

[4] Grilec, K.; Ivušić V. Tribologija, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.

[5] HONG W, CAI W, WANG S, TOMOVIC MM. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review. Vol. 31, Chinese Journal of Aeronautics. 2018. doi: 10.1016/j.cja.2017.11.016

[6] Stilin K. Povišenje otpornosti na adhezijsko trošenje titanove legure Ti6Al4V plazmatskim nitriranjem. 2021;

[7] Janković T. Automatizacija uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje. 2021;

[8] Yousif BF. Design of newly fabricated tribological machine for wear and frictional experiments under dry/wet condition. Mater Des. 2013;48. doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.046

[9] Chiiu G, Popescu AM, Tudor A, Petrescu AM, Stoica GF, Subhi KA. Wear characteristics of UHMW polyethylene by twist method. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/295/1/012002

[10] Smazalová E, Houdková Š, Švantner M. Tribological effects of discontinuous Block-on-Ring test. In: METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 2014.

[11] Gul O, Sari NY, Sinmazcelik T. The effect of low temperature plasma nitriding on wear resistance of Ti6Al4V Alloy. In: Acta Physica Polonica A. 2014. doi: 10.12693/APhysPolA.125.491

[12] Sonjaitham N, Puangmalee N. Tribotechnical properties of UHMWPE based composite filled with Ha microparticles under dry sliding and lubrication. In: Advanced Materials Research. 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.213

[13] Lin L, Sun C, Emrich S, Kopnarski M, Schlarb AK. Assessment of the lubrication ability of polymer materials in the fluid-free steel/steel tribosystem. Wear. 2020;452–453. doi: 10.1016/j.wear.2020.203287

[14] LI J, ZHANG Y, HUANG J, DING C. Mechanical and tribological properties of plasma-sprayed Cr. J Therm spray Technol. 1998;7(2).

[15] ISO 4287:1997 Geometric Product Specification (GPS) — Surface texture: profile method — Terms, definitions and surface texture parameters.

[16] ISO 4288:1996 Geometric Product Specification (GPS) — Surface texture: profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture.

[17] ISO 3274:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surfacetexture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instrument.

[18] Sugumaran AA, Shukla K, Khan I, Ehiasarian AP, Hovsepian PE. Dry sliding wear mechanisms of HIPIMS plasma nitrided CoCrMo alloy for medical implant applications. Vacuum. 2021;185. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109994

[19] Atar E. Sliding wear performances of 316 L, Ti6Al4V, and CoCrMo alloys. Kov Mater. 2013;51(3). doi: 10.4149/km-2013-3.183

PRILOZI

perthometer S8P 4.5

Perthen

LT	1.750 MM
LM	1.250 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

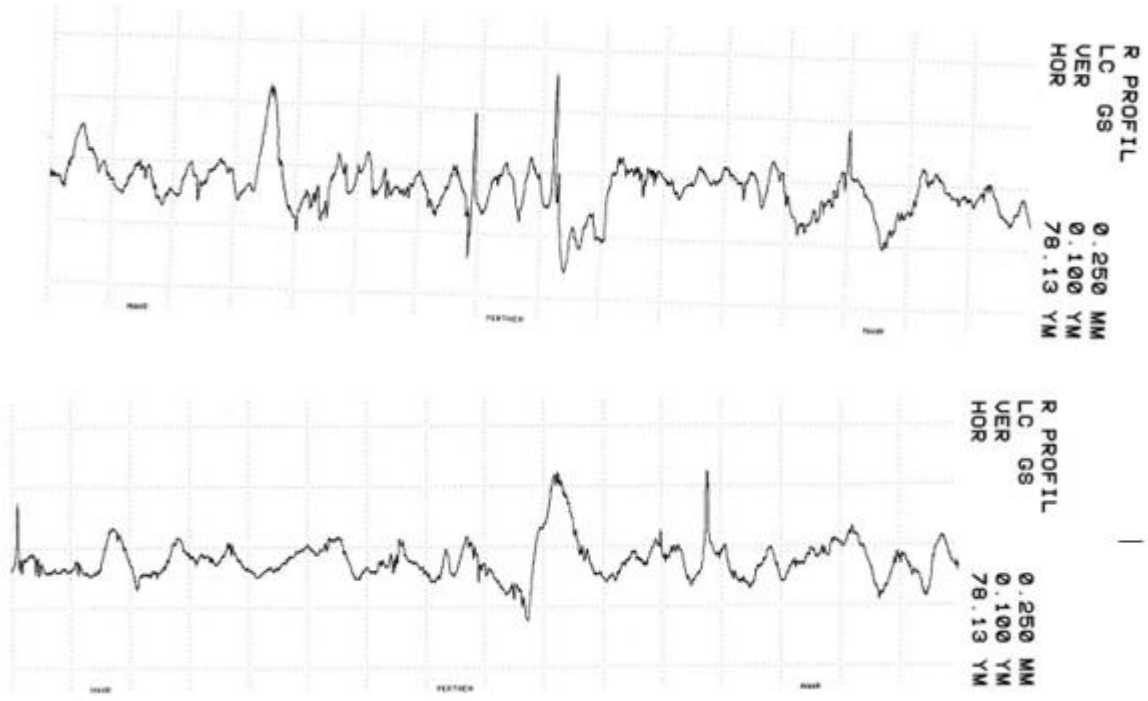
FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:TI

NR.:05.05.2021.
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 5
T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.284	0.069	0.162	0.389	0.227		
2	RZ	YM	0.177	0.057	0.145	0.266	0.121		
3	RA	YM	0.025	0.006	0.016	0.035	0.019		
4	RP	YM	0.161	0.064	0.178	0.250	0.072		
5	RPM	YM	0.101	0.042	0.109	0.163	0.053		
6	WT	YM	0.231	0.108	0.221	0.363	0.142		
7	RT	YM	0.308	0.105	0.259	0.486	0.227		
8	PT	YM	0.450	0.154	0.362	0.700	0.337		



Slika 39. Profil hrapavosti i parametri uzorka titanija prije ispitivanja

perthometer S8P 4.5

Perthen

LT	0.560 MM
LM	0.400 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:CR

NR.:05.05.2021.
NAME:G.BARSIC

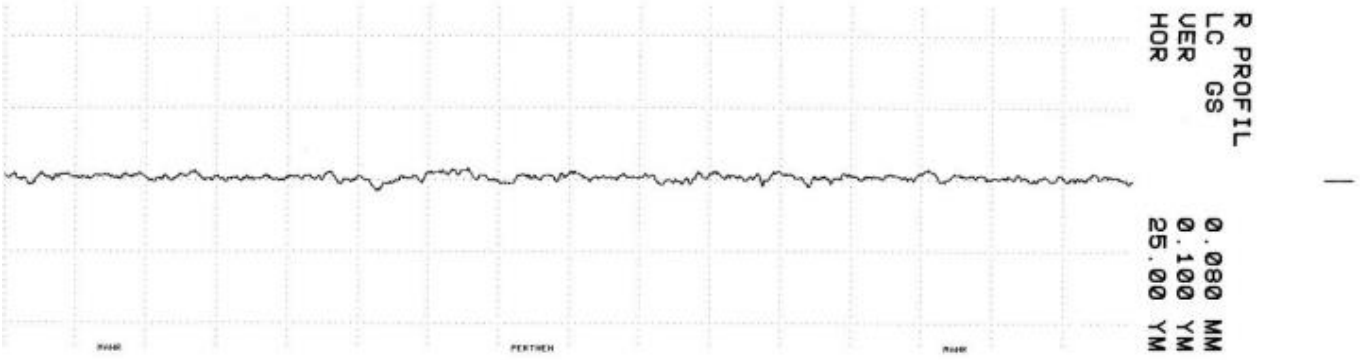
MESS.-NR.: 5
T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT

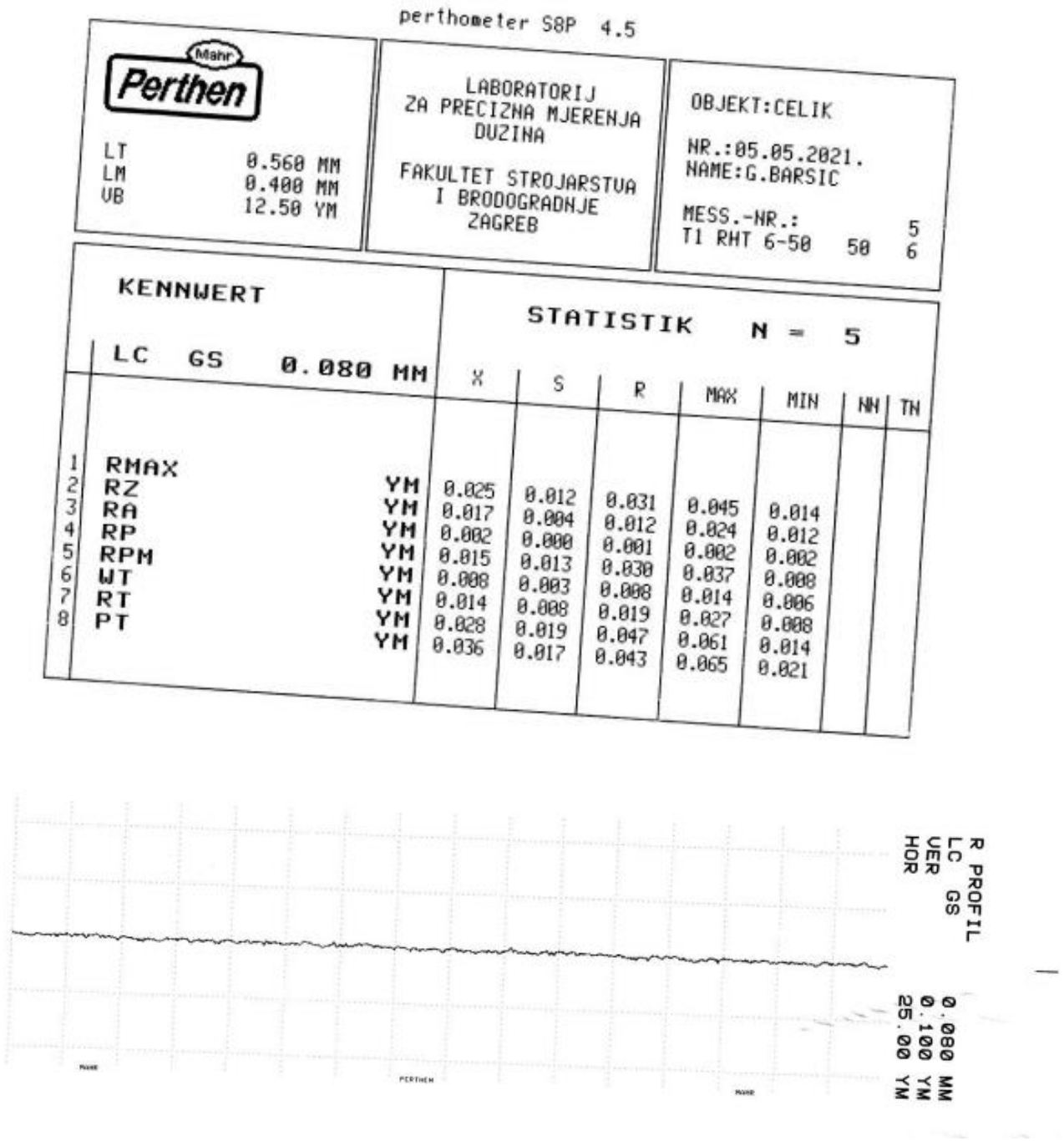
LC GS 0.080 MM

STATISTIK N = 5

			X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.027	0.004	0.009	0.031	0.022		
2	RZ	YM	0.022	0.001	0.003	0.024	0.021		
3	RA	YM	0.003	0.000	0.001	0.004	0.003		
4	RP	YM	0.012	0.003	0.007	0.016	0.009		
5	RPM	YM	0.010	0.001	0.003	0.011	0.008		
6	WT	YM	0.021	0.013	0.034	0.041	0.008		
7	RT	YM	0.028	0.003	0.008	0.032	0.024		
8	PT	YM	0.042	0.014	0.037	0.065	0.028		



Slika 40. Profil hrapavosti i parametri uzorka kroma prije ispitivanja



Slika 41. Profil hrapavosti i parametri uzorka čelika prije ispitivanja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT 5.600 MM
LM 4.000 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:P1

NR.:05.05.2021.
NAME:G.BARSIC

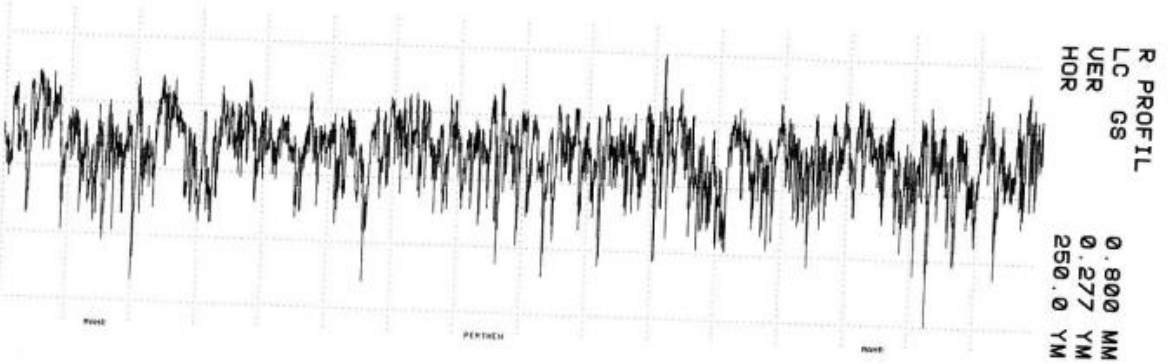
MESS.-NR.: 5
T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT

STATISTIK N = 5

LC GS 0.800 MM

			X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	1.131	0.151	0.394	1.384	0.990		
2	RZ	YM	0.963	0.065	0.156	1.027	0.871		
3	RA	YM	0.114	0.007	0.018	0.121	0.104		
4	RP	YM	0.482	0.092	0.212	0.600	0.388		
5	RPM	YM	0.366	0.041	0.087	0.406	0.319		
6	WT	YM	0.323	0.143	0.359	0.554	0.195		
7	RT	YM	1.207	0.123	0.282	1.384	1.102		
8	PT	YM	1.322	0.170	0.423	1.527	1.104		



Slika 42. Profil hrapavosti i parametri uzorka visokomolekularnog polietilena prije ispitivanja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT	5.600 MM
LM	4.000 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

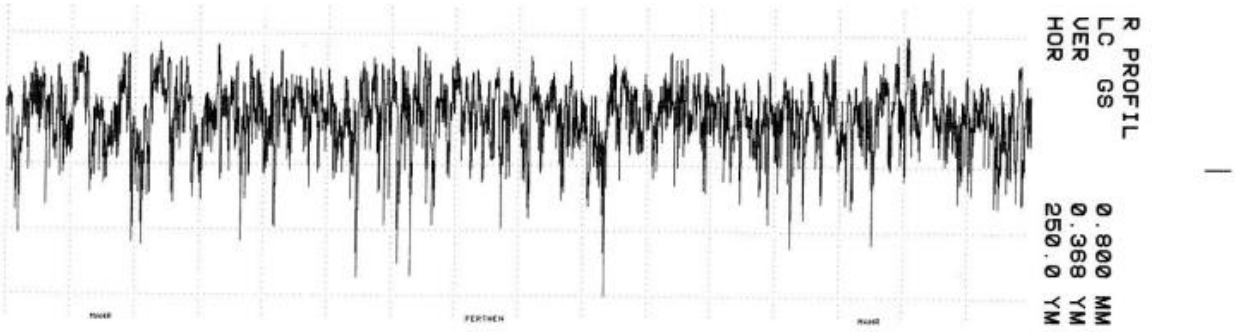
FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:P2

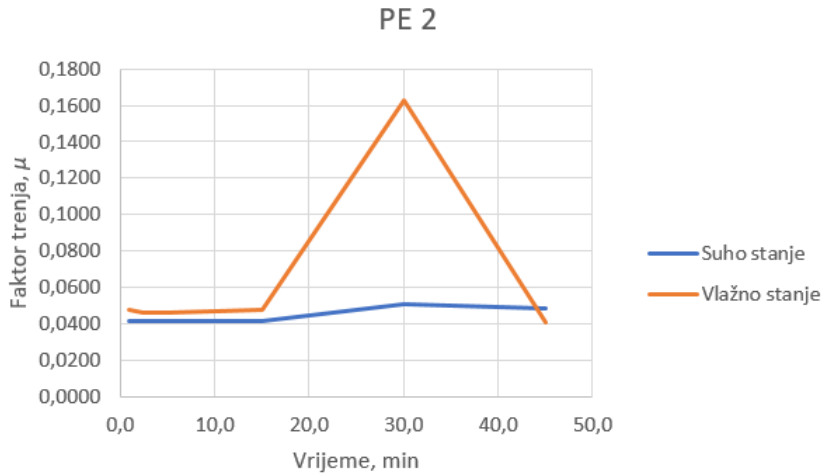
NR.:05.05.2021.
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 5
T1 RHT 6-50 50 6

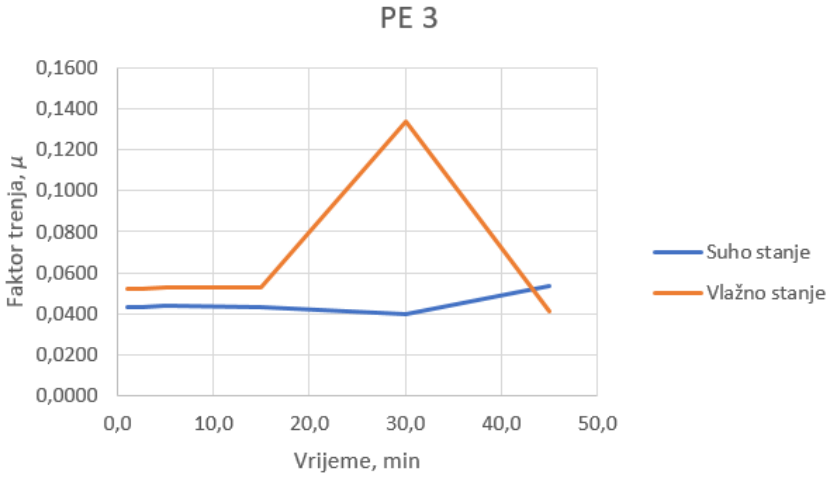
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	1.901	0.337	0.913	2.317	1.404		
2	RZ	YM	1.399	0.125	0.318	1.543	1.225		
3	RA	YM	0.156	0.008	0.020	0.163	0.143		
4	RP	YM	0.518	0.062	0.145	0.597	0.452		
5	RPM	YM	0.437	0.038	0.085	0.487	0.401		
6	WT	YM	0.302	0.151	0.385	0.559	0.174		
7	RT	YM	2.018	0.361	0.960	2.430	1.470		
8	PT	YM	2.122	0.387	0.958	2.470	1.512		



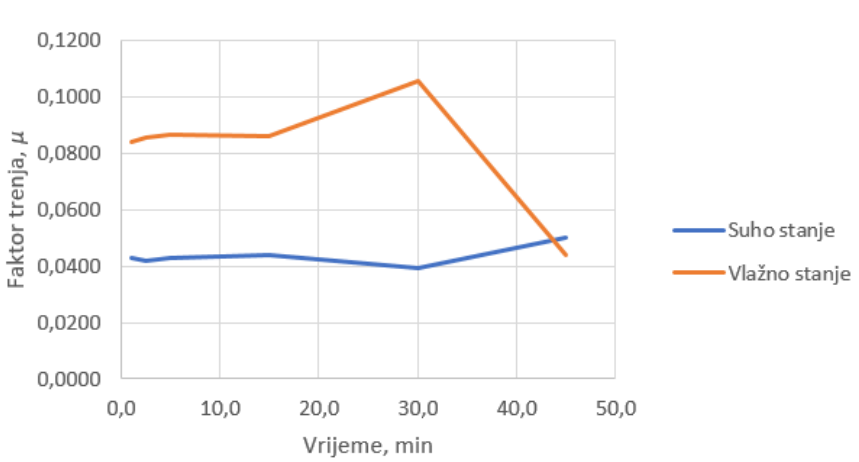
Slika 43. Profil hrapavosti i parametri uzorka umreženog visokomolekularnog polietilena prije ispitivanja



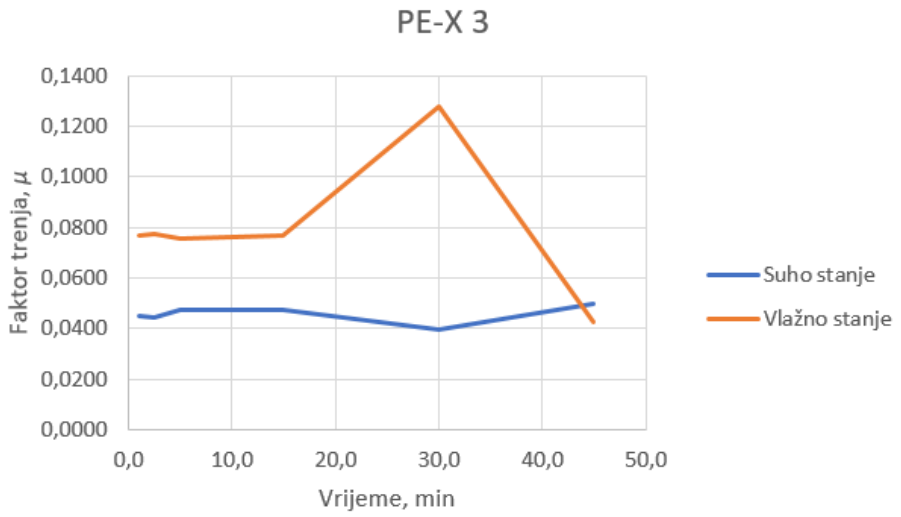
Slika 44. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE 2



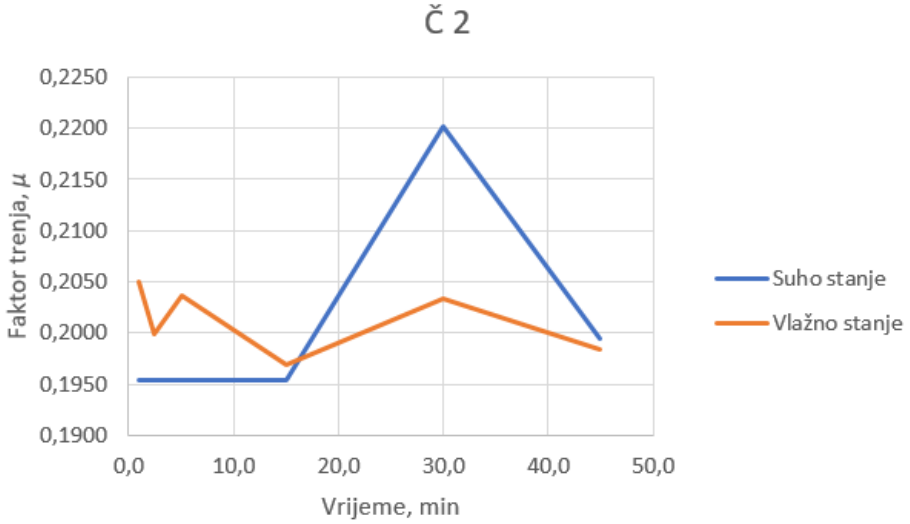
Slika 45. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE 3



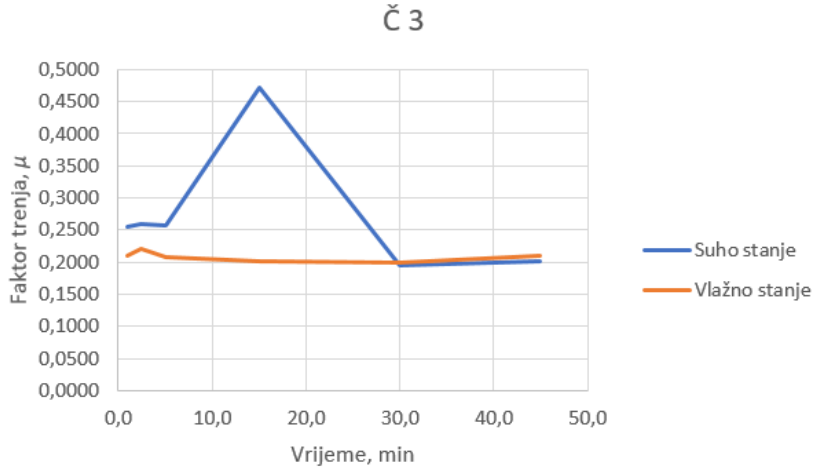
Slika 46. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE-X 2



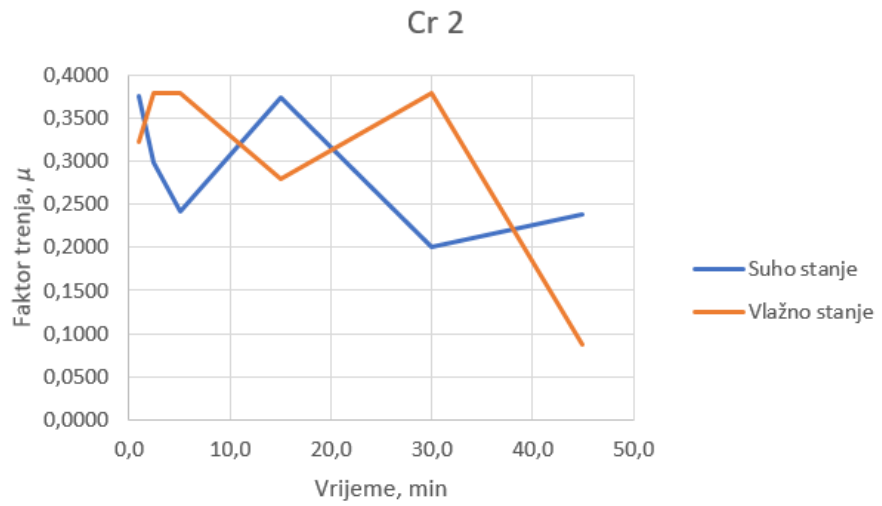
Slika 47. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka PE-X 3



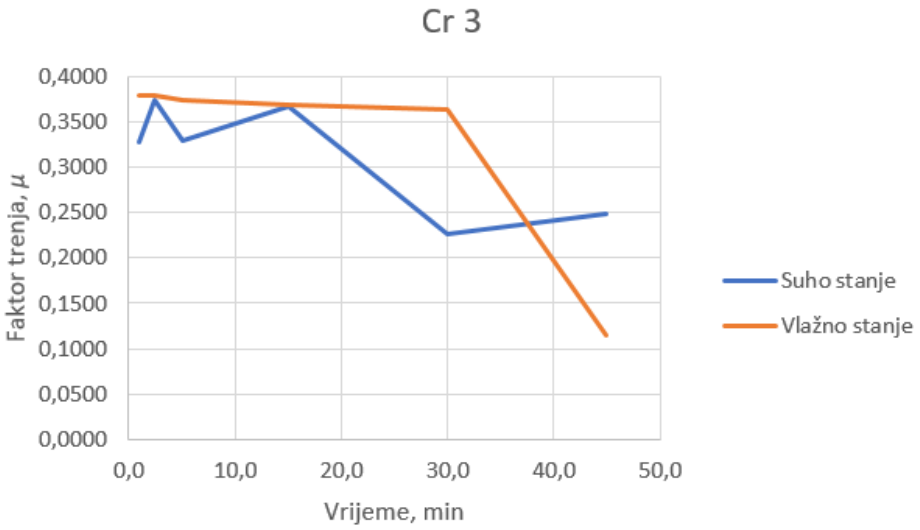
Slika 48. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Č 2



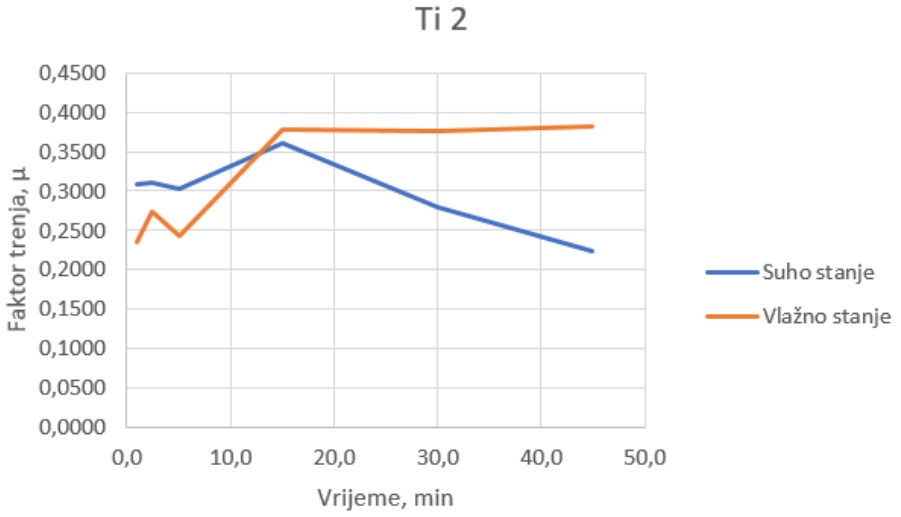
Slika 49. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Č 3



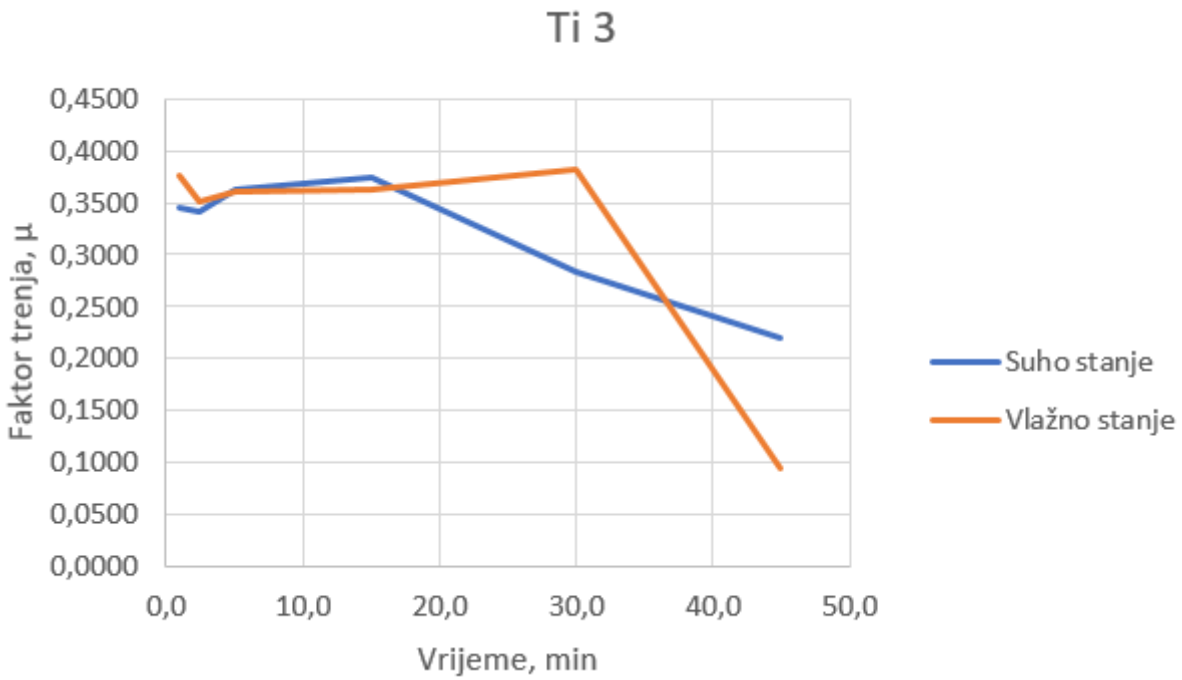
Slika 50. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Cr 2



Slika 51. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Cr 3



Slika 52. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Ti 2



Slika 53. Grafički prikaz faktora trenja u ovisnosti o vremenu uzorka Ti 3