

Uređaj za ispitivanje trenja i otpornosti prevlaka na klizno trošenje

Kovačić, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:647442>

Rights / Prava: [Attribution 3.0 Unported/Imenovanje 3.0](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Kovačić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Student:

Filip Kovačić

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz stručnu pomoć mentora prof. dr. sc. Darka Landeka koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Darku Landeku na ukazanoj pomoći, stručnim savjetima i uloženom vremenu, prof. dr. sc. Damiru Godecu sa zavoda za tehnologiju na izrađenim komponentama te svojoj obitelji na strpljenju i podršci.

Filip Kovačić



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:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FILIP KOVAČIĆ** Mat. br.: 0035205727

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Uređaj za ispitivanje trenja i otpornosti prevlaka na klizno trošenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Device for testing friction and resistance of coatings to sliding wear**

Opis zadatka:

Vrijednost faktora trenja tankih prevlaka u uvjetima kliznog trošenja, s i bez podmazivanja, važna je veličina za njihovu primjenu na konstrukcijskim dijelovima i alatima. Za ispitivanje faktora trenja u kliznim triboparovima primjenjuje se nekoliko eksperimentalnih metoda od kojih se, zbog jednostavnosti uređaja i prikladnosti za ispitivanje tankih prevlaka ističe metoda s klizanjem prizme po prstenu.

U radu treba opisati utjecajne čimbenike na vrijednost faktora trenja, pojavu vibracija, zagrijavanje i širinu traga trošenja u uređajima za ispitivanje trošenja metodom klizanja prizme po prstenu. Na temelju analize utjecajnih čimbenika na klizno trošenje tankih prevlaka projektirati i izraditi upravljački i mjerni sustav tribometra s konstantnom silom pritiska prizme na prsten, zadanim vremenom trošenja i promjenljivom brzinom vrtnje prstena, uz mogućnost mjerenja brzine rotacije prstena, sile trenja i temperature prizme tijekom trošenja. Za prototipnu izvedbu tribometra, upravljivog preko osobnog računala, primijeniti tokarilicu Proxxon Micromot DB250, ARD mikrokontrolere, Joy-IT senzore i Arduino programsko sučelje. Izvedbu tribometra ispitati na triboparovima sastavljenim od prstena prevučenog PACVD prevlakama TiN, TiCN i prizme od ležajne bronce. Navesti u radu korištenu literaturu i eventualnu stručnu pomoć.

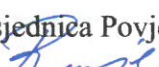
Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA	2
2.1. Trenje	3
2.1.1. Trenje polimernih materijala.....	8
2.1.2. Trenje keramičkih materijala	8
2.2. Pojava topline tijekom trenja.....	9
2.3. Topografija površina	10
2.4. Trošenje materijala.....	14
2.4.1. Adhezijsko trošenje	15
2.4.2. Abrazijsko trošenje.....	16
2.4.3. Trošenje umorom površine.....	18
2.4.4. Trošenje tribokorozijom.....	19
2.5. Podmazivanje površina tribopara	20
2.6. Tribometri za ispitivanje trenja i trošenja	23
2.6.1. Tribometri za suho trenje ili klizanje uz djelomično podmazivanje	25
2.6.2. Tribometri za abrazivno, erozijsko i kavitacijsko trošenje	30
2.6.3. Tribometri za nestandardne uvjete	34
2.6.4. Tribometar za metodu trošenja klizanjem „prizme po prstenu“	38
2.7. Tvrde prevlake.....	42
2.8. Nitiranje	45
3. ADITIVNA PROIZVODNJA.....	47
3.1. Stereolitografija	51

3.2. Digitalna obrada svjetla.....	51
3.3. PolyJet.....	52
3.4. Selektivno lasersko srašćivanje.....	52
3.5. 3D ispis.....	53
3.6. Laminiranje.....	53
3.7. Taložno srašćivanje.....	53
4. KONSTRUKCIJA TRIBOMETRA.....	54
4.1. Mehanička izvedba tribometra.....	54
4.2. Sustav za prikupljanje podataka s tribometra.....	58
5. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA.....	64
5.1. Plan pokusa.....	64
5.2. Nitiranje i prevlačenje prstenova.....	65
5.3. Umjeravanje senzora.....	68
6. REZULTATI ISPITIVANJA.....	71
6.1. Hrapavost površine.....	71
6.2. Ispitivanje faktora trenja.....	74
6.2.1. Ispitivanje tribopara „prizma/neprevučeni prsten“.....	74
6.2.3. Ispitivanje tribopara „prizma/prsten nitiran u plazmi“.....	76
6.2.5. Ispitivanje tribopara „prizma/prsten prevučen prevlakom TiN“.....	78
6.2.7. Ispitivanje tribopara „prizma/prsten prevučen prevlakom TiCN“.....	80
6.3. Ispitivanje traga trošenja.....	83
6.4. Diskusija rezultata.....	84
7. ZAKLJUČAK.....	85
LITERATURA.....	87
PRILOZI.....	91

POPIS SLIKA

Slika 1.	Sila trenja F potrebna za svladavanje trenja i početak gibanja a) kotrljanje i b) klizanje [2].....	4
Slika 2.	Vrijednosti koeficijenta trenja tijekom promjene normalne sile [2]	5
Slika 3.	Vrijednosti koeficijenta trenja tijekom promjene površine kontakta [2]	5
Slika 4.	Prikaz odnosa statičkog i kinetičkog trenja [3]	6
Slika 5.	Različite vrste klizanja prema stanju površina nalijeganja [4].....	7
Slika 6.	Model kontakta tijela 1 i tijela 2 uz vidljivu površinu kontakta A [1].....	10
Slika 7.	Slojevi površine metala [1].....	11
Slika 8.	Greške površine: hrapavost, valovitost i makroskopske greške [1],[37]	12
Slika 9.	Krivulja konture površine [1],[38]	13
Slika 10.	Više krivulja kontura zajedno čine trodimenzionalne promijene [1]	14
Slika 11.	Nastanak adhezijskog trošenja [8].....	16
Slika 12.	Nastanak abrazijskog trošenja [8] a) abrazija u dodiru dvaju tijela b) abrazija u dodiru triju tijela.....	17
Slika 13.	Utjecaj omjera tvrdoća materijala na trošenje [1]	17
Slika 14.	Nastanak trošenja umorom površine [8]	18
Slika 15.	Nastanak tribokorozijskog trošenja [8]	20
Slika 16.	Koeficijent trenja prema vrsti podmazivanja [1].....	21
Slika 17.	Shematski prikaz različitih tribometara za simulaciju suhog trenja ili djelomičnog podmazivanja [11]	25
Slika 18.	Shema tribometra „četiri kuglice“ [12]	26
Slika 19.	Shema Falex ispitivača [13]	26
Slika 20.	Shema Timken tribometra [14]	27
Slika 21.	Shematski prikaz ispitivanja metodom „klin na disku“ [15].....	28
Slika 22.	Krivulja vrijednosti koeficijenta trenja izmjerena na tribometru metodom trošenja „klin na disku“ [15]	28
Slika 23.	Shematski prikaz a) Bowden-Leben tribometra i b) Cameron-Mills tribometra [11],[43].....	30
Slika 24.	Shematski prikazi tribometara za ispitivanje dvije vrste abrazivnog trošenja [11],[44].....	31
Slika 25.	Shematski prikazi tribometara za ispitivanje trošenja korozijom i kavitacijom [11],[44].....	31

Slika 26.	Shematski prikaz tribometra za ispitivanje trošenja abrazijom u dodiru triju tijela [11],[45].....	32
Slika 27.	Shematski prikaz aparature s kuglicom koja stvara krater trošenjem površine [11]	33
Slika 28.	Shematski prikaz tribometra za visoku temperaturu [11]	36
Slika 29.	Shematski prikaz tribometra za izrazito nisku temperaturu [11],[48].....	37
Slika 30.	Shematski prikaz tribometra za rad u vakuumu [11],[49].....	38
Slika 31.	Shematski prikaz ispitivanja metodom klizanja „prizme po prstenu“ [16].....	39
Slika 32.	Tribometar za ispitivanje trošenja metodom „prizma po prstenu“ tvrtke Nanovea [17]	40
Slika 33.	Koeficijent trenja dobiven ispitivanjem trošenja metodom „prizma po prstenu“ kod podmazivanja i suhog trenja [17]	41
Slika 34.	Tragovi trošenja na prizmi a) suho trenje i b) uz podmazivanje [17]	41
Slika 35.	Shematski prikaz PACVD uređaja 89[21]	44
Slika 36.	Različiti načini nanošenja tvrdih prevlaka [18].....	45
Slika 37.	Shematski prikaz uređaja za nitriranje u plazmi [23].....	46
Slika 38.	Primjeri rezolucija STL datoteke [24].....	49
Slika 39.	Primjer upotrebe potpore pri izradi komada [24].....	50
Slika 40.	Proces izrade u aditivnoj proizvodnji [24]	50
Slika 41.	Shematski prikaz izrade komada aditivnom tehnologijom PolyJet [26].....	52
Slika 42.	CAD model nosača uzorka izrađenog tehnologijom PolyJet.....	55
Slika 43.	CAD model vratila izrađenog tehnologijom PolyJet	55
Slika 44.	CAD model diska izrađenog tehnologijom PolyJet	56
Slika 45.	Dijelovi smješteni na radnoj podlozi printera	56
Slika 46.	3D printer Stratasys Connex350.....	57
Slika 47.	3D CAD model tribometra za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“	57
Slika 48.	Tlocrt i nacrt tribometra za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“	58
Slika 49.	Mikrokontroler Arduino Uno Rev3 [28]	59
Slika 50.	Senzor brzine Joy-IT LM393 [29].....	59
Slika 51.	Senzor sile Joy-IT HX711-05 [30].....	60
Slika 52.	Senzor akceleracije Velleman VMA208 [31]	61
Slika 53.	Senzor temperature, modul MAX6675 i termoelement [32]	61

Slika 54.	Shematski prikaz spajanja mikrokontrolera sa sensorima	62
Slika 55.	Tribometar za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“ s naznačenim vidljivim komponentama.....	63
Slika 56.	Drugi pogled tribometra za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“	63
Slika 57.	Prsten za ispitivanje kliznog trošenja oznake NTN 1R30X35X17 [33]	64
Slika 58.	Svjetlosni mikroskop Toolcraft DigiMicro Profi UM012CH [34]	65
Slika 59.	Uređaj Rübig PC 70/90 S	66
Slika 60.	Prizma i prstenovi korišteni u pokusu	67
Slika 61.	Profili hrapavosti prizme i ispitnih prstenova	72
Slika 62.	Histogram srednje vrijednosti parametara hrapavosti	73
Slika 63.	Izgled tribopara tijekom ispitivanja.....	74
Slika 64.	Parametri ispitivanja triboparova A1 i A2 označenih prema tablici 2.....	75
Slika 65.	Parametri ispitivanja triboparova B1 i B2 označenih prema tablici 2.....	77
Slika 66.	Parametri ispitivanja triboparova C1 i C2 označenih prema tablici 2.....	79
Slika 67.	Parametri ispitivanja triboparova D1 i D2 označenih prema tablici 2	81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razlike između proizvodnih postupaka [25].....	48
Tablica 2. Oznake i uvjeti ispitivanja.....	64
Tablica 3. Parametri nitriranja u plazmi.....	66
Tablica 4. Parametri PACVD prevlačenja TiN.....	67
Tablica 5. Parametri PACVD prevlačenja TiCN.....	67
Tablica 6. Dobiveni podaci za kalibraciju.....	68
Tablica 7. Dobiveni podaci tahometra i senzora brzine.....	69
Tablica 8. Očitanja senzora temperature.....	70
Tablica 9. Srednje vrijednosti parametara hrapavosti.....	71
Tablica 10. Prosječne vrijednosti parametara tijekom ispitivanja.....	82
Tablica 11. Određivanje širine traga trošenja.....	83

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
a	mm	promjer kontaktne plohe
F	N	tangencijalna sila
H	μm	visina valova
K_1	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	toplinska vodljivost tijela 1
K_2	$\text{W/m}\cdot\text{k}$	toplinska vodljivost tijela 2
L	μm	udaljenost valova
N	N	normalna sila
n	-	broj članova niza
q	W/m^2	gustoća toplinskog toka
q_1	W/m^2	gustoća toplinskog toka tijela 1
q_2	W/m^2	gustoća toplinskog toka tijela 2
V	-	relativna standardna devijacija
v	m/s	stalna brzina
\bar{x}	-	aritmetička sredina
ΔT_{f1}	$^{\circ}\text{C}$	promjena temperature tijela 1
ΔT_{f2}	$^{\circ}\text{C}$	promjena temperature tijela 2
μ	-	koeficijent trenja
μ_k	-	koeficijent kinetičkog trenja
μ_s	-	koeficijent statičkog trenja
σ	-	standardna devijacija

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3DP	<i>3D Printing</i> – 3D tiskanje
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i> – akrilonitril butadien stiren
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje
CVD	<i>Chemical vapor deposition</i> – kemijsko prevlačenje iz parne faze
DLP	<i>Digital Light Processing</i> – digitalna obrada svjetla
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> – taložno srašćivanje
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> – laminiranje
PA	<i>Polyamide</i> – poliamid
PACVD	<i>Plasma assisted chemical vapor deposition</i> – plazmom potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze
PC	<i>Polycarbonate</i> – polikarbonat
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i> – poli(etilen-tereftalat)
PLA	<i>Polylactic acid</i> – polilaktična kiselina
PMMA	<i>Polymethyl methacrylate</i> – poli(metil-metakrilat)
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> – poli(vinil-klorid)
PVD	<i>Physical vapor deposition</i> – fizikalno prevlačenje iz parne faze
SLA	<i>Stereolithography</i> – stereolitografija
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> – selektivno lasersko srašćivanje
STL	<i>Standard Triangulation Language</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – univerzalna serijska sabirnica

SAŽETAK

U radu je opisana i razrađena izvedba uređaja za ispitivanje trenja i trošenja metodom klizanja „prizme po prstenu“ (metoda eng. „*Block on ring*“) te je provedeno ispitivanje na uređaju. Prikazano je konstrukcijsko rješenje uređaja kao i sustav za upravljanje preko senzora sile, temperature, akceleracije i brzine vrtnje povezanih na mikrokontroler Arduino Uno Rev3. Ispitivanje je provedeno uz pomoć uzorka, odnosno prizme od ležajne bronce i četiri prstena od kojih je svaki u jednom stanju: kaljeno i popušteno, nitrirano u plazmi, prevučeni prevlakama PACVD TiN i PACVD TiCN. Brzine okretanja prstena tijekom ispitivanja su 180 o/min i 1200 o/min. Prikupljeni su podaci za silu trenja, temperaturu prizme, brzinu vrtnje prstena i akceleraciju, odnosno vibracije prizme te je svjetlosnim mikroskopom određena širina traga trošenja na prizmi nakon 30 s ispitivanja. Najveći koeficijent trenja utvrđen je u triboparu sastavljenom od prizme od ležajne bronce i prstena nitriranog u plazmi pri brzini vrtnje prstena od približno 180 o/min, a najmanji koeficijent trenja utvrđen je u triboparu sastavljenom od prizme od ležajne bronce i prstena s prevlakom PACVD TiN također pri brzini vrtnje prstena od približno 180 o/min.

Ključne riječi: metoda klizanja „prizme po prstenu“, trenje, adhezijsko trošenje, koeficijent trenja, širina traga trošenja, PACVD, TiN, TiCN, nitriranje u plazmi

SUMMARY

In this paper the design of the device for testing friction and wear using “Block on Ring” method is described and elaborated. Also, tribological tests were made on the device. The device solution is presented for design, as well as for control system that uses force sensor, temperature sensor, accelerometer and speed sensor all connected to microcontroller Arduino Uno Rev3. The tribological test is carried out with a bearing bronze block and four rings where each one is in different state: hardened and tempered, plasma nitrided, coated with PACVD TiN and PACVD TiCN. The rotational speed of the ring in the test is 180 rpm and 1200 rpm. Data is collected for friction force, temperature of the block, rotational speed of the ring and acceleration, i.e., vibrations of the block. Then after 30 s of testing wear track width is measured by light microscope. The highest coefficient of friction is determined on the bearing bronze block and the plasma nitride ring tribo-pair with rotational speed of the ring at approximately 180 rpm. The lowest coefficient of friction is determined on the bearing bronze block and the PACVD TiN coated ring with same rotational speed of the ring at approximately 180 rpm.

Key words: Block on Ring method, friction, adhesive wear, coefficient of friction, wear track width, PACVD, TiN, TiCN, plasma nitriding

1. UVOD

U teorijskom dijelu rada će se detaljno opisati tribološko ispitivanje metodom klizanja „prizme po prstenu“ (metoda eng. „*Block on ring*“), i sažeto će se opisati ostali načini ispitivanja trenja i trošenja u kojima su dvije površine u dodiru i relativnom gibanju. Tribološka ispitivanja pripadaju u znanstvenu disciplinu koja se naziva tribologija, a bavi se pojavama trenja i trošenja na površinama dvaju tijela u kontaktu. Pri gibanju dvaju tijela u kontaktu između njih djeluje kinetička sila trenja ovisna o koeficijentu trenja koji je svojstven svakom triboparu. Zbog konstantnog kontakta dvaju tijela i pojave trenja na površinama dolazi do trošenja.

U eksperimentalnom dijelu rada rješava se zadatak projektiranja i ispitivanja uređaja za tribološko ispitivanje metodom klizanja „prizme po prstenu“. Uređaj treba biti osmišljen za ispitivanje u uvjetima suhog trenja i trenja s podmazivanjem. Uređaj treba opremiti senzorima za mjerenje brzine rotacije vratila s kliznim prstenom, temperature i akceleracije prizme pritisnute na prsten, te mjerenje sile trenja između prizme i prstena. Iz izmjerene sile trenja može se izračunati faktor trenja između prizme i prstena izrađenih od različitih materijala. Svi senzori biti će povezani na mikrokontroler Arduino Uno koji očitava signale sa senzora i predaje ih na računalo.

Nakon izrade vratila, držača prizme i spajanja senzora na mikrokontroler provest će se njihova ugradnja na modelarsku tokarilicu snage 100 W s mogućnosti kontinuirane promjene brzine rotacije vratila. Automatizirano prikupljanje podataka sa senzora ispitat će se na primjeru četiri tribopara sastavljena od kaljenih i popuštenih prstena s nitriranom ili prevučenom površinom i prizme od ležajne bronce.

2. TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA

Tribologija je kompleksna, interdisciplinarna znanost koja se bavi interakcijom površina u relativnom gibanju. Sama riječ prvi puta se pojavljuje 1966. godine kada ju je engleski inženjer strojarstva H. Peter Jost spomenuo u znanstvenom radu “*A Report on the Present and Industry’s Needs*”. Tribologija dolazi od grčke riječi „tribos“, a znači znanost o trenju. Obuhvaća proučavanje i primjenu principa trenja, podmazivanja i trošenja. [1]

Između dva tijela u kontaktu i relativnom gibanju gotovo uvijek se pojavljuje sila trenja i nastupaju procesi trošenja. U nekim slučajevima trenje je poželjna pojava kao što je to kod kontakta potplata obuće i podloge, kočnica, remenskih prijenosa, tarnih prijenosa, vijčanih spojeva i slično. S druge strane trenje može biti i nepoželjna pojava jer se radom sile trenja gubi dio energije unesene u sustav, kao što je to kod kliznih i valjnih ležajeva, zupčanih prijenosa itd. [1]

Trošenje je proces pomicanja ili ljuštenja materijala s površina u kontaktu kada dođe do gibanja tribopara, a uslijed djelovanja trenja. Još jedna posljedica pojave trenja je i toplina koja se razvija na mjestu kontakta radom sile trenja. Kako bi se smanjila sila trenja, a posljedično i trošenje materijala koriste se maziva. [1]

Uzroci trenja i trošenja su lokalne deformacije i procesi adhezije. Lokalne deformacije pojavljuju se na površinama tijela u međusobnom kontaktu. Proces adhezije obuhvaćaju jedinične događaje plastične i elastične deformacije površine na kontaktnom mjestu, adhezijskog spajanja površina i raskidanja spoja. [1]

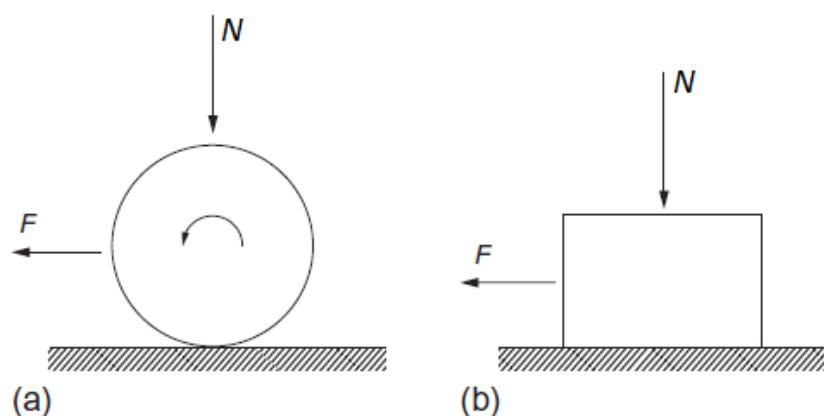
2.1. Trenje

Trenje se fizikalno može definirati kao pojava odupiranja gibanja jednog tijela preko drugog. Dijeli se prema relativnom gibanju na statičko i kinetičko (dinamičko) trenje. Relativno gibanje tijela provodi se na jedan od dva načina klizanjem ili kotrljanjem. Iako se gibanje može svrstati u jednu od dvije kategorije često prilikom samog gibanja nekog okruglog tijela postoji istovremeno kotrljanje i klizanje. Kako postoje dvije vrste gibanja tako se i trenje prema gibanju dijeli na trenje klizanja i trenje kotrljanja. U oba idealna slučaja kotrljanja i klizanja, da bi se tijelo odnosno objekt pomaknuo preko drugog nepomičnog tijela, potrebno je djelovanje tangencijalne sile F [Slika 1]. Omjer između tangencijalne sile koja je jednaka sili trenja i normalne sile N naziva se koeficijent ili faktor trenja, a označava se grčkim slovom μ . [2]

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

Iz jednadžbe (1) zaključuje se kako veličina sile trenja ovisi o faktoru trenja koji može imati široki raspon vrijednosti. Vrijednost faktora trenja iznosi od 0,001, koja se javlja kod valjnih ležaja pa sve do vrijednosti većih od 10 prilikom klizanja identičnih čistih metalnih površina u vakuumu. Raspon vrijednosti faktora trenja za većinu materijala u standardnoj atmosferi bez podmazivanja iznosi od 0,1 do 1,0. [2]

Faktor trenja klizanja je konstantan za određeni tribopar u nepromjenjivim uvjetima podmazivanja iako se normalna sila i površina kontakta mogu mijenjati. Otkrivanje te pojave dovelo je do postavljanja dvaju empirijskih zakona trenja klizanja koji su nazvani prema znanstveniku koji ih je postavio Guillaumeu Amontonsu u 17. stoljeću. Prvi Amontonsov zakon trenja definira pojavu da je sila trenja proporcionalna normalnoj sili, a drugi opisuje činjenicu da je sila trenja neovisna o površini kontakta između dvaju tijela. Tim zakonima kasnije je pridodan treći zakon koji je opisao znanstvenik Charles-Augustin de Coulomb u 18. stoljeću. Coulombov zakon definira činjenicu da je sila trenja neovisna o brzini klizanja. [2]

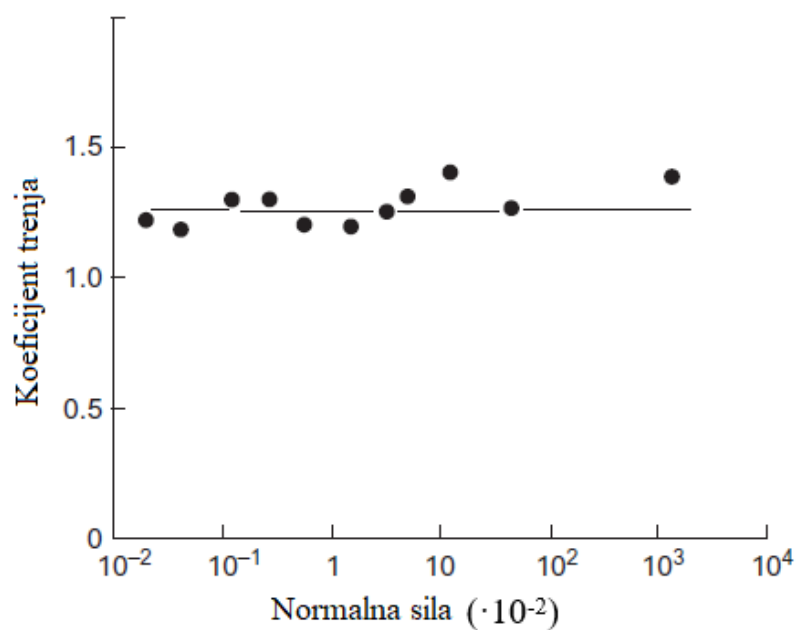


Slika 1. Sila trenja F potrebna za svladavanje trenja i početak gibanja a) kotrljanje i b) klizanje [2]

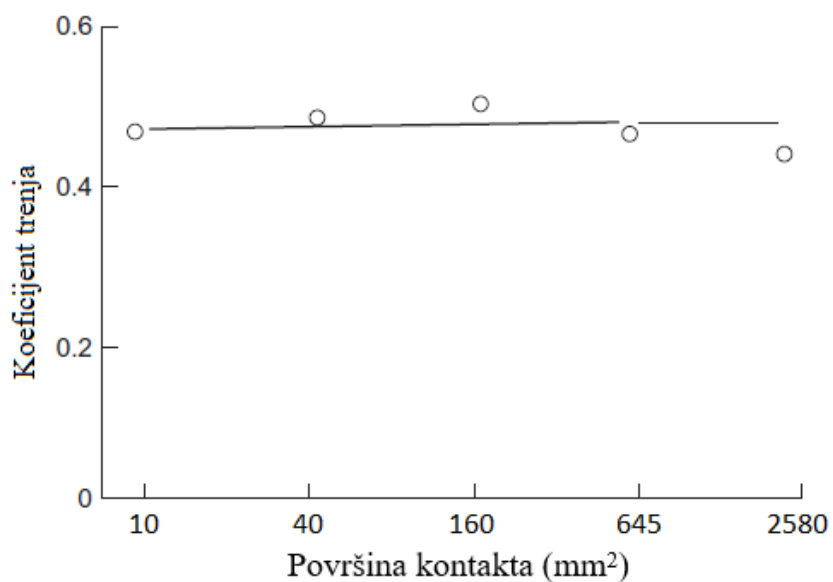
Prvi zakon trenja kod klizanja vrijedi za većinu materijala s ili bez podmazivanja. Za klizanje bez podmazivanja u standardnoj atmosferi kod tribopara sastavljenog od čelika i poliranog aluminija na slici [Slika 2] uočava se kako s promjenom vrijednosti normalne sile koeficijent trenja ostaje približno isti iako je vrijednost normalne sile porasla za 10^6 . Iako većina metala i drugih materijala podliježu prvom Amontonsovom zakonu polimeri nisu jedni od njih zbog vrlo niskog modula elastičnosti. Kontakt između polimera i metala ili dva polimera uglavnom se javlja uz elastičnu deformaciju te kod njih trenje djeluje na drugačiji način nego kod metalnih materijala. [2]

Drugi Amontonsov zakon trenja nije toliko detaljno istražen kao prvi zakon trenja, ali i on vrijedi za većinu materijala isključujući polimere. Na slici [Slika 3] se može vidjeti kako koeficijent trenja za drvene klizače na čeličnoj površini bez podmazivanja ostaje približno isti dok se površina kontakta povećava. [2]

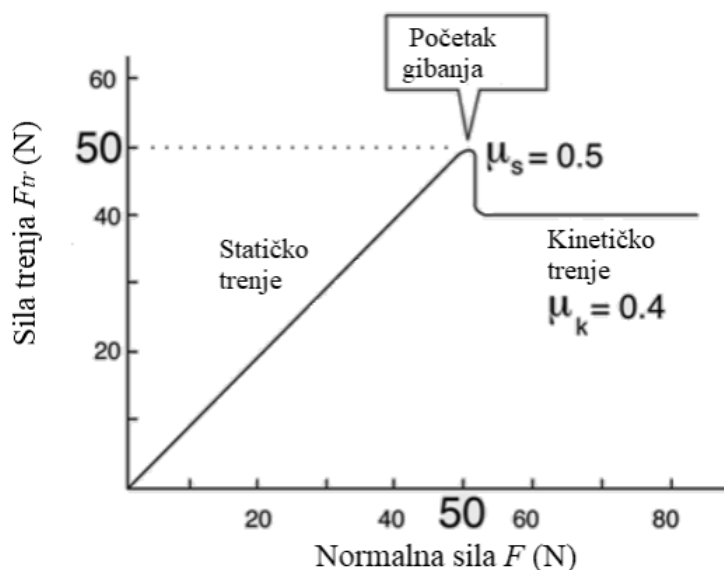
Treći zakon trenja nije također toliko istražen kao prva dva zakona, ali lako se može opaziti da je potrebna veća sila trenja za početak klizanja nego za održavanje klizanja [Slika 4]. Iz toga proizlazi da je koeficijent statičkog trenja (μ_s) veći od koeficijenta kinetičkog trenja (μ_k). Jednom kada je počelo klizanje μ_k ostaje isti usprkos promijeni brzine gibanja, iako se pri velikim brzinama klizanja koje iznose desetine ili stotine metara u sekundi kod metala koeficijent kinetičkog trenja smanjuje s povećanjem brzine klizanja. [2]



Slika 2. Vrijednosti koeficijenta trenja tijekom promjene normalne sile [2]



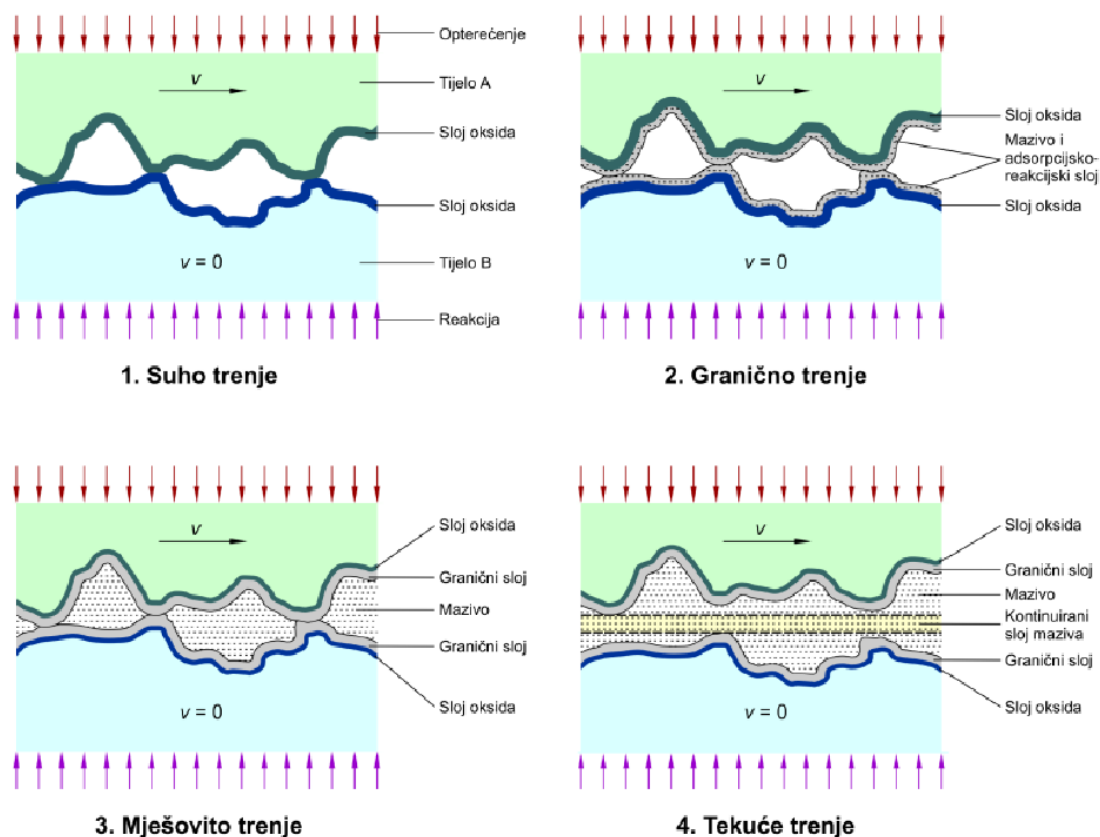
Slika 3. Vrijednosti koeficijenta trenja tijekom promjene površine kontakta [2]



Slika 4. Prikaz odnosa statičkog i kinetičkog trenja [3]

Trenje klizanja se može podijeliti na četiri različite vrste trenja, a odnosi se na stanje površina tribopara koje naliježu jedna na drugu [Slika 5]. Također, podjela se može odnositi i na režime podmazivanja kojima se opisuje prijenos opterećenja s jedne površine na drugu. [4]

1. Suho trenje – između površina tribopara ne nalazi se mazivo. Ovo trenje je poželjno kod sustava koji se oslanjaju na trenje kao što je kočenje te prijenos gibanja u tarnoj spojci ili na remenici.
2. Granično trenje – postoji vrlo tanak sloj maziva uz sloj oksida. Na nekim dijelovima površine vrhovi neravnina prekidaju granični sloj maziva i dolazi do kontakta između površina. Ovo trenje se nastoji izbjeći zbog povećanog trošenja.
3. Mješovito trenje – Površine tribopara još uvijek nisu u potpunosti razdvojene, Na nekim mjestima dolazi do kontakta vrhova neravnina, ali manje nego kod graničnog trenja.
4. Tekuće trenje – sloj maziva je konstantan između površina, čime su površine tribopara u potpunosti razdvojene te se sila trenja se smanjuje u odnosu na ostale vrste trenja.



Slika 5. Različite vrste klizanja prema stanju površina nalijeganja [4]

Osim trenja klizanja treba spomenuti i trenje kotrljanja. Najrašireniji slučajevi trenja kotrljanja su okretanje kotača po podlozi i gibanja dijelova u valjnim ležajevima. Kada se djeluje silom na mirujuće rotacijsko tijelo prvo se javlja malo statičko trenje kotrljanja koje se protivi kotrljanju, ali ono je toliko male vrijednosti da nema utjecaja na gibanje nego to čini statičko trenje klizanja. Kada se tijelo počne gibati, djeluje kinetičko trenje kotrljanja. Postoji nekoliko faktora zbog kojih dolazi do pojave trenja, a jedno od najznačajnijih je elastična deformacija površine prilikom kotrljanja tijela po površini, čime dolazi do gubitka energije uslijed deformacije. Drugi značajan utjecajni faktor je pojava nepravilnosti na površinama zbog kojih površine nisu u potpunosti glatke. Treći značajni faktor je pojava trenja na razini molekula i atoma, koje se javlja jer se atomi međusobno privlače te dolazi do adhezije između različitih materijala. Kada se površine pritisnu jedna uz drugu molekularne sile pokušavaju ih zadržati spojenima, što se najbolje može uočiti kod visokopoliranih metala i elastomera. Koeficijent trenja kotrljanja je obično 100 do 1000 puta manji od koeficijenta trenja klizanja u istom triboparu. [5],[6]

2.1.1. Trenje polimernih materijala

Kontakt između dva polimera ili između polimera i metala često je najvećim dijelom elastičan. Zbog toga se trenje na površini polimera značajno razlikuje od trenja na površini metalnih materijala. Za normalnu silu koja iznosi između 10 N i 100 N za tribopar sastavljen od metala i polimera vrijedi prvi Amontonsov zakon trenja. Kada se izade iz toga raspona proporcionalnost između sile trenja i normalne sile više ne vrijedi. Kod normalnih sila od 0,02 N do 1 N koeficijent trenja se smanjuje kako se normalna sila povećava što se objašnjava već spomenutom elastičnom deformacijom površina. Normalne sile veće od 100 N izazivaju povećanje koeficijenta trenja zbog plastične deformacije materijala u području kontakta. [6]

Kod trenja polimernih materijala, i dalje vrijedi drugi Amontonsov zakon trenja te je sila trenja neovisna o brzini klizanja, iako samo u slučaju kada se u kontaktu javlja zanemarivo mala toplina. Uslijed djelovanja normalne sile na mjestu kontakta može se pojaviti dovoljne toplinske energije da se promijeni viskoelastičnost polimera, a samim time se mijenja i vrsta trenja. [6]

Faktor trenja između polimera te između polimera i keramike ili metala obično iznosi od 0,1 do i 0,5. [2]

2.1.2. Trenje keramičkih materijala

U tribologiji se najviše proučava tehnička ili inženjerska keramika. Odlikuje ju niska gustoća uz odlična mehanička svojstva kao što su visoka čvrstoća i tvrdoća i postojanost pri visokim temperaturama. Neke od takvih keramika su silicijev nitrid (Si_3N_4), silicijev karbid (SiC) i aluminijev oksid (Al_2O_3). U ove materijale često se dodaju različiti aditivi u manjim količinama kako bi se pospješio proces proizvodnje i uporabna svojstva. Jedna od širih primjena je korištenje keramike kao premaza ili prevlake na nekom drugom materijalu. [2]

Glavna razlika u mehaničkom ponašanju tehničke keramike u odnosu na metale je u različitim vrstama kemijskih veza između atoma. Kod metala se javljaju metalne veze, a kod keramike su veze kovalentne ili ionske. Kemijske veze koje se javljaju kod keramike izazivaju manji broj dislokacija u kristalnim rešetkama i time je plastično tečenje pri sobnoj temperaturi više ograničeno nego kod metala te je keramika u pravilu krhak i slabo duktilan materijal. [2]

Koeficijent trenja μ između površina tehničke keramike obično je u rasponu od 0,25 do 0,8 što je slično metalnim triboparovima u zraku uz oksidni film na površinama tribopara. [2]

2.2. Pojava topline tijekom trenja

Kada dvije površine klizu jedna preko druge obavlja se rad sila trenja i dolazi do zagrijavanja površina u području kontakta dvaju tijela. Zagrijavanje uslijed trenja može uzrokovati lokalno smanjenje čvrstoće ili čak taljenje materijala. Osim toga može doći do pojačane oksidacije ili neke druge kemijske reakcije s okolinom i mazivima. [2],[41]

Za predviđanje porasta temperature na površinama tijela u kliznom kontaktu treba postaviti model koji obuhvaća normalnu silu, površinu kontakta i brzinu gibanja. Model kontakta prikazan na slici [Slika 6] sadrži tijelo 1 sa sfernim izbočenjem koje pritišće tijelo 2 normalnom silom prilikom čega tijelo 2 klizi stalnom brzinom v . Gustoća toplinskog toka koji nastaje u kontaktu na površini A je [2],[41]:

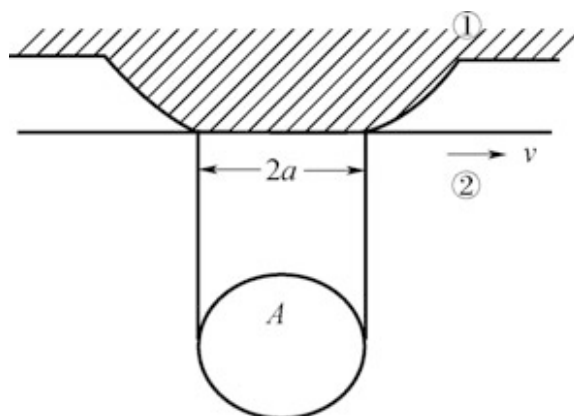
$$q = \frac{\mu \cdot N \cdot v}{\pi \cdot a^2} \quad (2)$$

gdje je μ faktor trenja, a promjer kontaktne plohe, a N je normalna sila. Materijali obaju tijela karakterizirani su njihovom toplinskom vodljivošću K_1 , odnosno K_2 . Gustoća toplinskog toka bit će podijeljena između dva objekta, q_1 kondukcijom prelazi u tijelo 1, a q_2 prelazi u tijelo 2. Stoga je $q = q_1 + q_2$. Tijelom 1 se kontinuirano širi toplina od mjesta kontakta preko izbočine na ostatak tijela. Ako je toplinski tok jednak preko cijele kružne površine kontakta onda se promjena temperature ΔT_{f1} može zapisati kao [2],[41]:

$$\Delta T_{f1} = \frac{q_1 \cdot a}{K_1} \quad (3)$$

Kontakt na tijelu 2 se pomiče po površini tijela samim time i izvor topline se pomiče pa će na mjestu gdje je u nekom trenutku ostvaren kontakt dvaju površina temperatura porasti, ali čim površine u kontaktu nastave međusobno kliziti temperatura će se u prethodnoj točki kontakta opet smanjiti. Stoga, da bi se riješio taj problem uzima se da je klizanje izrazito sporo i time zanemarivo za porast temperature. Sada se promjena temperature može pisati kao i za tijelo 1 [2],[41]:

$$\Delta T_{f2} = \frac{q_2 \cdot a}{K_2} \quad (4)$$



Slika 6. Model kontakta tijela 1 i tijela 2 uz vidljivu površinu kontakta A [1]

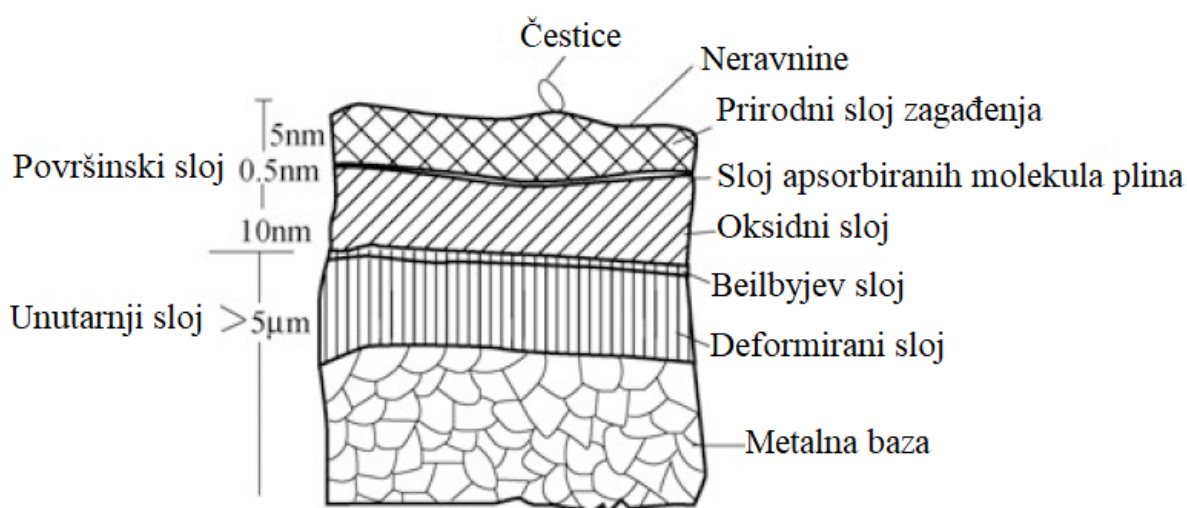
Pojava povišenja temperature u kliznom triboparu značajno utječe na polimerne materijale. Oni su zbog svoje viskoelastičnosti vrlo osjetljivi na toplinu nastalu trenjem. Kako je već spomenuto trenje je disipacijski proces gdje se 90 % do 95 % mehaničke energije pretvara u toplinsku energiju. Ustaljeno je mišljenje da se toplina stvara zbog deformacije materijala na mjestu kontakta kao i zbog pucanja adhezijskih veza koje nastaju uslijed trenja. Da bi se uočio utjecaj promjene temperature na neki polimer trebaju se proučiti mehaničke karakteristike polimera pri različitim temperaturama. Osnovni mehanizam trenja koji se javlja kod polimera kada uslijed porasta temperature postignu visoko elastično stanje je adhezija. [7]

2.3. Topografija površina

Kruta tijela odnosno njihove površine koje čine triboparove sadrže kompleksne strukture i značajke. Te značajke usko su povezano s materijalom površine, načinom obrade površine i okolinom u kojoj se površine nalaze. Karakteristike površina krutih tijela također imaju veliki utjecaj na interakcije tribopara u području kontakta, trenje, trošenje i svojstva podmazivanja. U području tribologije površinom se smatra sloj s važnim fizičkim svojstvima koji je sastavni dio krutog tijela. Tijekom obrade odvajanja čestica sloj površine je sastavljen od nekoliko razina zbog promjena u strukturi površine kod metala. Fizikalna i kemijska svojstva površinskog sloja različita su od ostatka materijala koje čini neko kruto tijelo. [1],[35]

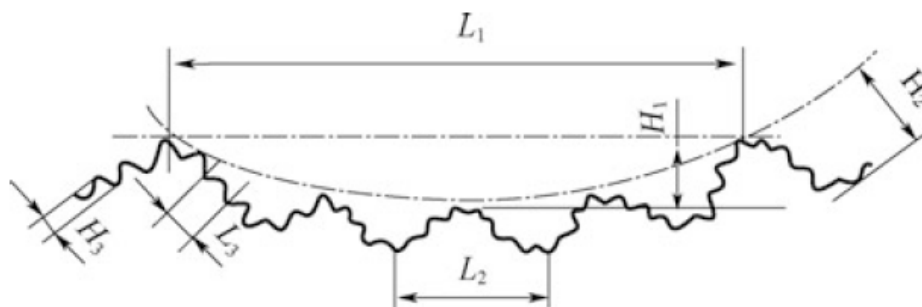
Kao što se može vidjeti na slici [Slika 7] deformacijski sloj nalazi se na osnovnom metalu i nastao je kao posljedica procesa oblikovanja površine materijala i time čini tvrdi sloj materijala. Tako na primjer tijekom brušenja, rezanja, tokarenja i poliranja dolazi do plastične deformacije i visokih naprezanja bez potrebe za povišenjem temperature. Deformiranje materijala i površine provodi se pod utjecajem dvaju faktora. Prvi faktor je ulazna snaga (energija procesa deformacije), a drugi su karakteristike materijala. Debljina sloja za male deformacije iznosi od 1 μm do 10 μm dok je za velike deformacije od 10 μm do 100 μm . Deformacijski sloj javlja se i kao posljedica pojave trenja. Beilbyjev sloj nalazi se na deformacijskom sloju i posljedica je procesa koji obuhvaćaju poliranje. [1],[35]

Skoro svi metali i legure mogu reagirati s kisikom iz zraka pri čemu nastaje oksidni sloj. Osim oksidnog sloja u uvjetima primjene postupaka modificiranja i prevlačenja površina mogu nastati i drugi slojevi kao što je nitridni, boridni ili sulfidni sloj. Oksidni sloj nalazi se na Beilbyjevom sloju. Debljina sloja oksida ili neke druge kemijske reakcije ovisi o osjetljivosti materijala na okolinu, vremenu do pojave reakcije i temperature tijekom reakcije. Oksidni sloj također može nastati i tijekom trenja. Brzina razvijanja oksidacije povećava se oslobađanjem topline tijekom procesa obrade odvajanjem čestica. Da bi se zaštitila površina od oksidacije u tribopar izložen zraku dodaju se maziva i aditivi čime se stvara zaštitni površinski sloj. [1],[36]



Slika 7. Slojevi površine metala [1]

Ostale važne značajke krutog tijela su geometrija i struktura površinskog sloja. Kruta tijela obrađena bilo kojom metodom sadrže nesavršenosti i odstupaju od idealne geometrijske ravnine. Nesavršenost se može iskazati na makroskopskoj razini odstupanja kao i na atomskoj površini odstupanja. Prema konturama površina tijekom obrade odvajanjem čestica profil površine može biti podijeljen na hrapavost površine, valovitost i greške na makroskopskoj razini [Slika 8]. [1]



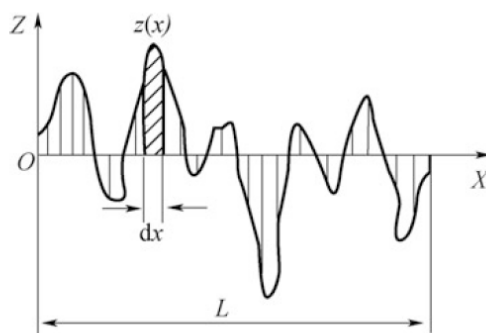
Slika 8. Greške površine: hrapavost, valovitost i makroskopske greške [1],[37]

Prema omjeru između udaljenosti valova L i visine valova H može se provesti klasifikacija grešaka. Ako je $L/H > 1000$ onda se može smatrati greškom na makroskopskoj razini kao što je greška kružnosti i greška cilindričnosti koje proizlaze iz preciznosti obrade odvajanjem čestica. S druge strane, ako je $L/H = 50-1000$ takva greška naziva se valovitost i nastaje zbog vibracija tijekom obrade. Zadnja mogućnost omjera je $L/H < 50$ što označava mikro geometrijske značajke u koje pripada hrapavost površine. [1],[37]

Makroskopske greške u koje spada odstupanje od oblika najmanje utječu na trenje i trošenje. Valovitost površine gdje se pojavljuju valovi u pravilnim razmacima dugih perioda nastaje vibracijama niskih frekvencija reznih alata. Valovitost površine ima veliki utjecaj na trenje i trošenje materijala. Hrapavost površine podrazumijeva nepravilnost mikro geometrijskih značajki koje obuhvaćaju visoke vrhove i prostore između njih nastale kao posljedica visokofrekvencijskih vibracija reznih alata na strojevima za obradu odvajanja čestica. Ostale značajke mikro geometrije čija nepravilnost utječe na hrapavost površine je plastična deformacija površine te trenje i trošenje reznog alata. Sve navedeno zajednički utječe na trenje i trošenje tribopara. [1],[37]

Sve površine koje čine tribopar sastoje se od mnogo mikro konkavnih i konveksnih vrhova različitih oblika. Karakteristike površinske geometrije imaju ključnu ulogu u trenju, trošenju i podmazivanju kod mješovitog podmazivanja i suhog trenja. Morfološka svojstva površina koriste se za opisivanje geometrijskih značajki. Najvažniji parametar topografije površine je već spomenuta površinska hrapavost koja se može prikazati primjenom jednodimenzionalnih, dvodimenzionalnih ili trodimenzionalnih parametara. [1],[35]

Jednodimenzionalna morfologija najčešće je prikazana preko visina krivulje konture [Slika 9] gdje se vide brjegoviti i dolovi na konturi visine Z na presjeku površine X . Za liniju prosječne visine konture kao i središnju liniju odabrana je x -os. Površina između obje strane krivulje i x -osi treba biti jednaka. [1],[38]

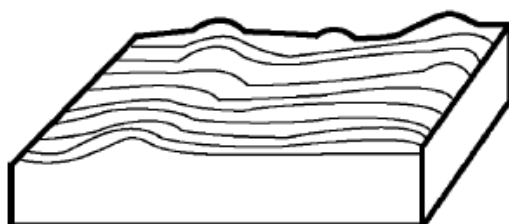


Slika 9. Krivulja konture površine [1],[38]

Kako bi se ispravno ispitala hrapavost površine, treba prethodno odrediti smjer mjerenja i mjernu duljinu. Uobičajeni parametri za jednodimenzionalnu topografiju su devijacija od aritmetičke sredine, srednja kvadratna devijacija i maksimalna razlika između vrha i dola. Za određivanje odnosa između karakteristika površinske geometrije i triboloških svojstva nisu dovoljni jednodimenzionalni morfološki parametri. Eksperimentima je utvrđeno da su nagibi i krivulje konture površine usko povezani s karakteristikama trošenja kliznih površina. Stoga da bi se bolje prikazalo podmazivanje kod površinske hrapavosti i ostvareni kontakt tribopara, uzimaju se u obzir gradijent i najviši vrh krivulje. Time se opisuju dvodimenzionalni topografski parametri. [1],[39]

Gradijent je nagib svake točke na krivulji konture površine kao i aritmetička sredina apsolutne vrijednosti. Aritmetička sredina za svaku zakrivljenost vrha neravnine koristi se za, kako je već rečeno, opisivanje dvodimenzionalnih topografskih parametara i ima utjecaj na podmazivanje i uvjete pri kontaktu površina. [1],[39]

Kada dvodimenzionalni morfološki parametri ne obuhvaćaju sve potrebne zahtjeve potrebno je primijeniti trodimenzionalne topografske parametre kojima se najbolje opisuje hrapava površina. Morfološke trodimenzionalne promijene prikazane su pomoću više krivulja kontura površina koje su smještene na malim razmacima čime se dobiva prostorni prikaz površine [Slika 10]. [1]



Slika 10. Više krivulja kontura zajedno čine trodimenzionalne promijene [1]

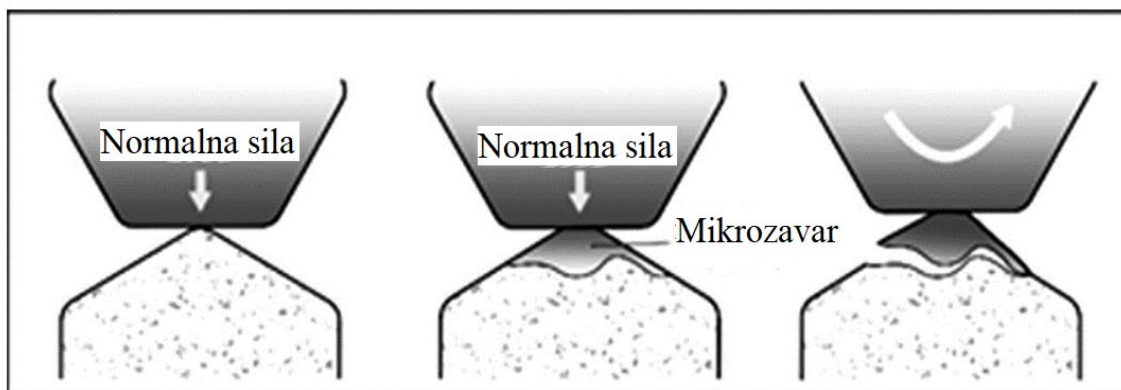
2.4. Trošenje materijala

Trošenje se može opisati kao kontinuirani proces gubitka površinske komponente materijala tijela u kontaktu tijekom relativnog gibanja i neizbježan je rezultat pojave trenja. Prema karakteristikama trošenja na površini uslijed trenja postoje četiri kategorije trošenja: trošenje adhezijom, abrazijom, umor površine i tribokorozijom. [1]

2.4.1. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje [Slika 11] nastaje kada se dvije površine u kontaktu relativno gibaju tijekom čega na mjestima kontakta dolazi do adhezije odnosno mikrozavara. Spojeni dijelovi se lome uslijed gibanja čime dolazi do prijelaza materijala s jedne površine na drugu. Prema intenzitetu i lokaciji oštećenja, trošenje adhezijom može se podijeliti u više skupina, od umjerenog do intenzivnog trošenja. Iako su intenzitet trošenja i koeficijent trenja različiti, svim oblicima adhezije je zajedničko prenošenje materijala s površina i nastanak trošenja u obliku ogrebotina uzduž smjera gibanja. Za tijela koja se nalaze pod velikim opterećenjem i pri velikim brzinama površinski spojevi nastali adhezijom će biti jači i veće površine, zbog velike plastične deformacije vrhova neravnina na površinama i porasta temperature na mjestu kontakta. Za smanjenje trenja i adhezijskog trošenja u triboparove se dodaje sloj maziva. Pod djelovanjem velikih vrijednosti normalne sile ili visoke temperature dolazi do probijanja sloja maziva i zatim do adhezijskog trošenja. [1],[40]

Na adhezijsko trošenje utječe niz faktora. Već su opisani utjecaji kritičnog opterećenja površine djelovanjem normalne sile i pojava povišene temperature na površini tribopara, zbog koje dolazi do smanjenja tvrdoće materijala. Glavni uzrok povišenja temperature je zajedničko djelovanje povišenog kontaktnog pritiska i brzine klizanja na površini tribopara. Dodatni faktor, utjecajan na adhezijsko trošenje su vrsta kristalne rešetke i svojstva materijala u kontaktu. Materijali istog tipa jedinične ćelije skloniji su pojavi adhezijskih spojeva i povećanom adhezijskom trošenju. Otpornost na adhezijsko trošenje puno je veće kod krhkih materijala nego kod onih duktilnih. Razlog je taj što kod pojave adhezije spojevi vrhova neravnina kod duktilnih materijala plastično teku što uzrokuje velika oštećenja i u dubljim slojevima površine, dok kod krhkih materijala lomljenjem spoja dolazi do minimalnih krhotina na samom površinskom sloju. Tribopar od istog materijala manje je otporan na adhezijsko trošenje od tribopara sačinjenog od dva različita materijala, npr. metal – nemetal, koji pokazuje veću otpornost na trošenje od tribopara metal - metal. [1],[40]



Slika 11. Nastanak adhezijskog trošenja [8]

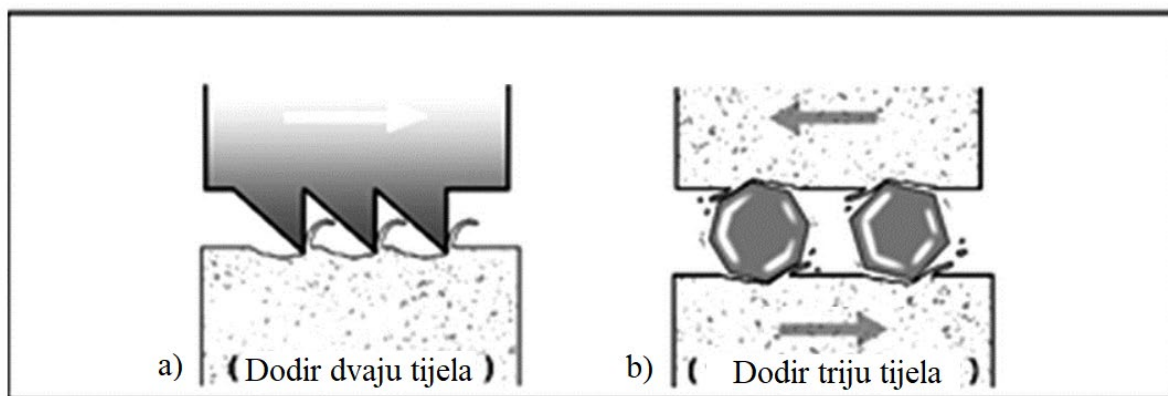
2.4.2. Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje [Slika 12] definirano je kao istiskivanje materijala s površine uzrokovano tvrdim česticama između dviju površina ili tvrdih vrhova neravnina jedne površine u triboparu. Kada se između dviju površina trenja nalazi neka slobodna čestica izvana koja uzrokuje abraziju to se naziva abrazija u dodiru triju tijela. Tlačenje čestice dovodi do plastične deformacije i umora materijala duktilnih često metalnih površina ili do pukotina kod krhkih materijala. Ako se javlja abrazija samo između dva tijela u relativnom gibanju, naziva se abrazija u dodiru dvaju tijela. Trošenje abrazijom u pravilu izaziva tvrđa površina pritiskom na mekšu površinu. Abrazijsko trošenje smatra se najčešćim načinom trošenja materijala. [1],[35]

Prema mehanizmu nastanka trošenje abrazijom dijeli se na tri kategorije:

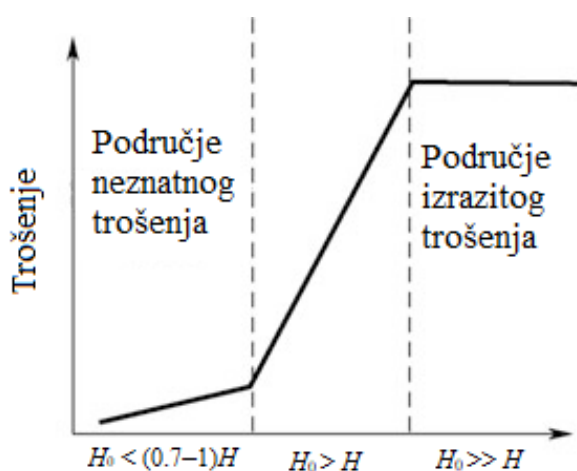
1. Mikrorezanje – abrazivne čestice su pritisnute na površinu normalnom silom, a zbog sile trenja tijekom klizanja doći će do rezanja, brazdanja i struganja čestice po površini.
2. Mikroumor – površina materijala oštećuje se umorom uslijed cikličkog kontaktnog opterećenja između abrazivnih čestica i mekše površine u triboparu, pri čemu nastaju površinske mikropukotine.
3. Mikropukotine – kod krhkih materijala pritiskom abrazivne čestice dolazi do lomljenja površinskog sloja materijala i nastanka mikropukotina.

Na abrazijsko trošenje utječe niz faktora. Abrazivna čestica utječe svojom tvrdoćom, čvrstoćom, oblikom i veličinom. Gubitak materijala proporcionalan je veličinom čestice, ali samo do određene veličine čestice. Drugi bitan parametar je normalna sila, omjer tvrdoća abraziva i materijala površine. Abraziv se označuje s H_0 , a materijal koji se troši H . Kao što je vidljivo na slici [Slika 13], ako je $H_0 < (0,7-1)H$, javlja se slabo trošenje ili uopće nema trošenja. Kada je $H_0 > H$ gubitak materijala abrazijskom se povećava kako se povećava i tvrdoća abraziva H_0 . U krajnjim slučajevima gdje je $H_0 \gg H$ javlja se veliki gubitak na koji ne utječe promjena tvrdoće H_0 . Stoga kako bi se spriječilo abrazijsko trošenje materijal površine mora biti veći od tvrdoće abraziva. [1],[35]



Slika 12. Nastanak abrazijskog trošenja [8]

a) abrazijska u dodiru dvaju tijela b) abrazijska u dodiru triju tijela



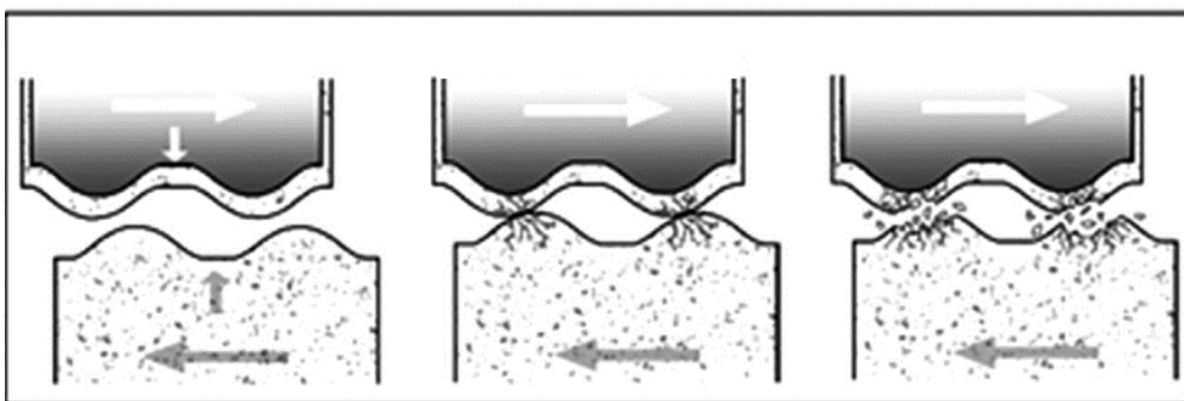
Slika 13. Utjecaj omjera tvrdoća materijala na trošenje [1]

2.4.3. Trošenje umorom površine

Umor površine [Slika 14] javlja se kada na površine tribopara djeluje cikličko opterećenje. Smjer naprezanja konstantno se mijenja tijekom ostvarivanja i gubitka kontakta između dvaju tijela. Do trošenja dolazi kada se zbog umora materijala počinju na površini stvarati mikropukotine koje se postepeno sve više produbljuju i povećavaju sve dok se cijeli dio oslabljenog dijela materijala ne okrhne. Najčešće se javlja kod valjnih ležajeva i zupčanih prijenosnika. Trošenje umorom površine može se podijeliti na podpovršinski pokrenuto trošenje i površinski pokrenuto trošenje. [1],[36]

Podpovršinski pokrenuto trošenje se obično javlja kod metalnog tribopara gdje se jedno tijelo kotrlja preko drugoga. Mikropukotina se javlja na mjestu opterećenja ispod površine nakon čega se širi uzdužno sa smjerom kotrljanja paralelno s površinom dok u jednom trenutku ne izbije na površinu prilikom čega se dio materijala otkida i nastaje udubina. [1],[36]

Površinski pokrenuto trošenje najčešće se javlja kod tribopara čelika visoke kvalitete prilikom klizanja. Mikropukotine se počinju javljati na mjestu koncentracije opterećenja na površinama tribopara i šire se u smjeru klizanja do slojeva ispod površine. Nakon toga dolazi do grananja pukotine i stvaranja udubina. [1],[36]



Slika 14. Nastanak trošenja umorom površine [8]

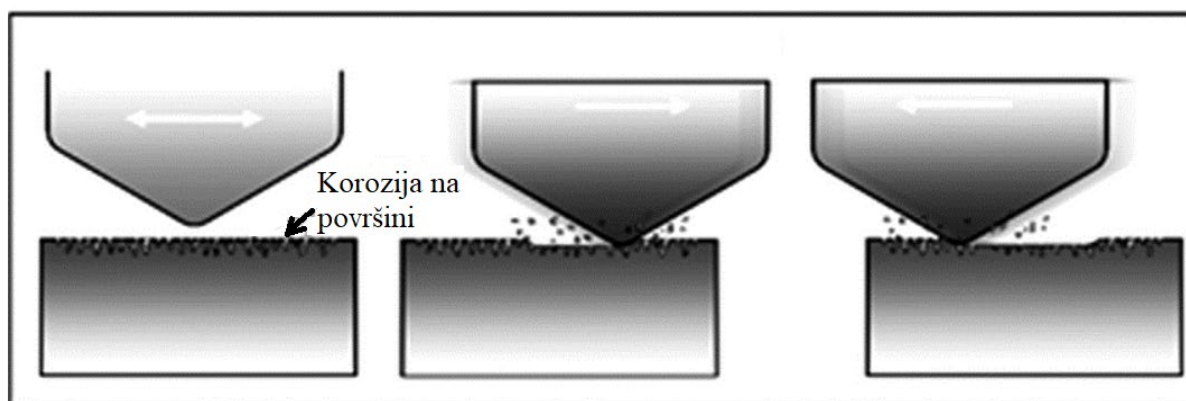
Jedan od najznačajnijih utjecajnih faktora na trošenje umorom površine je kontaktni pritisak površina u relativnom gibanju. Općenito se vrijednost kontaktnog pritiska smatra glavnom značajkom za određivanje vijeka trajanja dijelova trošenih umorom površine. Kada se normalno opterećenje zamijeni velikih opterećenjem samo na trenutke, ne dolazi do smanjenja dinamičke izdržljivosti odnosno do smanjenja vremena prije nego dođe do umora površine. Tek kada je veliko opterećenje primijenjeno otprilike pola cikličkog opterećenja, dolazi do smanjenja dinamičke izdržljivosti. Također je bitno i koliko brzo se ponavlja cikličko opterećenje. Većom brzinom oslobađa se više toplinske energije odnosno raste temperatura na površini čime se metal omekšava, mehanička svojstva se pogoršavaju i povećava se brzina trošenja umorom materijala. Dodatni utjecajni faktor na trošenje umorom površine su svojstva materijala u površinskom kontaktu. Povećanjem tvrdoće materijala povećava se otpornost na trošenje, ali samo do određene granice jer nakon toga će materijal postati previše krhak čime će se vijek trajanja materijala prije pojave umora opet smanjiti. Hrapavost površine je isto bitna za otpornost trošenja. Pri određenoj vrsti opterećenja manja hrapavost površine povećava otpornost, dok veća hrapavost smanjuje. Na trošenje umorom površine također utječe i podmazivanje, gdje se većom viskoznošću maziva postiže veća otpornost na trošenje umorom površine kao i nekim aditivima koji se dodaju uljima i krutim mazivima. [1],[36]

2.4.4. Trošenje tribokorozijom

Tribokorozijsko trošenje [Slika 15] je definirano kao šteta na površini nastala zbog kemijskog i elektrokemijskog utjecaja između metala i medija koji ga okružuje tijekom procesa trenja. Najčešće korozijsko trošenje je trošenje uslijed oksidacije i trošenje u posebnom mediju. [1],[37]

Kada se tribopar nalazi u mediju koji omogućuje oksidaciju i kada se zbog trenja sloj oksida ukloni s površine materijala dolazi do konstantnog trošenja i stvaranja novog sloja. Trošenje je prikazano kao pojava paralelnih tankih linija u smjeru klizanja. Gubitak materijala s površine tribopara ovisi o brzini stvaranja oksidnog sloja. Ako se sloj oksida dovoljno brzo uspije obnoviti onda ne dolazi do značajnog trošenja izložene površine, što znači da oksidni sloj pospješuje otpornost na trošenje. Faktori koji utječu na trošenje uz oksidaciju jesu brzina klizanja tribopara, temperatura, opterećenja na mjestima kontakta, tvrdoća oksidnog sloja, vrsta maziva i svojstva materijala. [1],[37]

Tribokorozijsko trošenje u posebnom mediju javlja se kod metalnih površina u mediju koji je kiselina, lužina ili sol. Mehanizam trošenja sličan je kao kod trošenja pojavom oksidacije, ali tragovi oštećenja su veći kao i gubici materijala. [1],[37]



Slika 15. Nastanak tribokorozijskog trošenja [8]

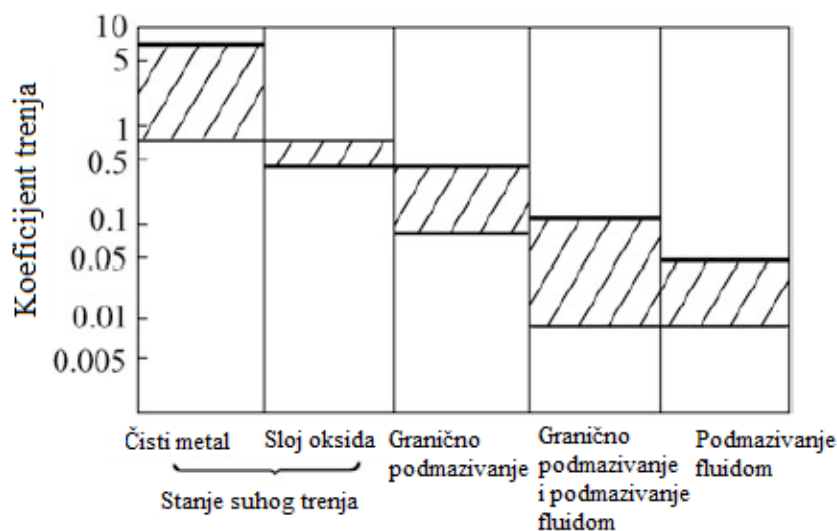
2.5. Podmazivanje površina tribopara

Glavni cilj podmazivanja je stvoriti film maziva s manjom smičnom čvrstoćom između površina tribopara čime se smanjuje trenje i trošenje. Film maziva može biti fluid (plin ili tekućina) ili film od krutog maziva. Prva maziva su bila biljnog i životinjskog podrijetla, a onda se pojavom naftne industrije počinju koristiti ulja dobivena rafinacijom nafte. Tekuća maziva najčešća su u upotrebi i sastoje se od baznog ulja i aditiva. Bazno ulje može biti mineralno ili sintetsko. Aditivi služe da bi pospješili svojstva maziva kao što je postojanost pri višim temperaturama i bolja sposobnost zaštite od korozije. Kruta maziva najčešće se sastoje od grafita i molibdenovog disulfida. [9]

Prema načinu formiranja filma i karakteristikama maziva podmazivanje se može podijeliti u nekoliko kategorija koje su u sličnom obliku već spomenute kao vrste trenja klizanja: hidrodinamičko podmazivanje, hidrostatičko podmazivanje, elastično hidrodinamičko podmazivanje, granično podmazivanje i suho trenje. [1]

Svaka kategorija podmazivanja ima drugačiju debljinu filma, ali za prepoznavanje koji je način podmazivanja u primjeni treba još uzeti u obzir i hrapavost površine. Da bi površine u kontaktu bile potpuno razdvojene filmom, on mora biti deblji od najvišeg vrha neravnina. U stvarnosti između tribopara javlja se više stanja podmazivanja što se naziva mješovito podmazivanje. Osim debljine film za određivanje koje se podmazivanje javlja, može se primijeniti i faktor trenja [Slika 16]. [1]

Kod filma maziva proučavaju se različita svojstva kao što je maksimalno opterećenje koje može podnijeti. Za podmazivanje fluidom kao što je hidrodinamičko i hidrostatičko podmazivanje primjenjuju se znanja iz područja mehanike fluida, prijenosa topline i vibracija za proračun opterećenja i ostalih fizikalnih svojstava površinskih slojeva tribopara. Kod mješovitog podmazivanja i suhog trenja glavni problem je ograničiti trošenje površina, stoga se ta stanja proučavaju kroz aspekt mehanike materijala, elastično-plastične mehanike, prijenosa topline i ostalih disciplina koje uključuju fiziku i kemiju. [1]



Slika 16. Koeffcijent trenja prema vrsti podmazivanja [1]

Iako je podmazivanje fluidom najrasprostranjenije zbog svoje široke primjene, odličnih svojstva podmazivanja i jednostavnosti upotrebe, problem stvara velika potrošnja tih maziva. Osim toga određeni kvarovi u sustavu podmazivanja na strojevima dovode do zastoja u proizvodnji i smanjene sigurnosti u radnom okruženju. Također postepena apsorpcija maziva dovodi do ubrzane degradacije materijala i smanjuje životni vijek stroja. Maziva u obliku fluida ne mogu se koristiti u medicinskoj opremi, preciznoj elektronici i optičkim instrumentima koji zahtijevaju potpuno čistu okolinu bez ulja. Konvencionalna maziva i tehnologija podmazivanja ponekad ne može zadovoljiti zahtjeve visokobrzinskih sustava, visokotemperaturnih sustava, velika opterećenja i slične ekstremne uvjete. Zbog toga su se počele razvijati i druge vrste maziva kao što su kruta maziva. [10]

Kruta maziva koja se koriste kod kompozitnih materijala mogu biti od mekih metala, oksida, ugljika i polimera. Mogu se podijeliti u tri kategorije prema temperaturi kod koje se primjenjuju: maziva za nisku temperaturu, maziva za srednju temperaturu, maziva za visoku temperaturu. Neka maziva mogu biti smještena u više kategorija kao što je to molibdenov disulfid (MoS_2) koji je postojan pri velikom rasponu temperatura čak do $-100\text{ }^\circ\text{C}$. Meki metali, grafit i polimeri spadaju u maziva za srednju temperaturu. Meki oksidi se plastično deformiraju i pritom pružaju dobro svojstvo podmazivanja kod povišenih temperatura. [10]

U grupu mekih metala spadaju srebro, zlato i olovo. Imaju nisku tvrdoću i posmičnu čvrstoću što se može prepisati plošno centriranoj ili volumno centriranoj kubičnoj kristalnoj rešetki tih metala. Imaju svojstva slična visoko viskoznom fluidima što im pomaže da se sami obnavljaju prilikom oštećenja filma maziva, a također imaju i niski koeficijent trenja kao i vrijeme trošenja tribopara. [10]

2.6. Tribometri za ispitivanje trenja i trošenja

Tribometri su uređaji kojima se mjeri trenje i trošenje. Pravim odabirom tribometra mogu se simulirati sve kritične karakteristike trošenja i trenja nekog sustava bez da se eksperimentira na samoj opremi stroja i konstrukcije. Pri izboru tribometra za mjerenje treba biti oprezan jer izborom tribometra koji nije pogodan za potreban problem mogu se dobiti potpuno krivi rezultati i donijeti krivi zaključci. Zato je potrebno imati temeljito znanje o karakteristikama različitih tribometara kako bi se znao primijeniti pravi uređaj za potreban tribološki test. Neka pitanja koja treba postaviti prije odabira tribometra jesu sljedeća:

1. Hoće li se primjenjivati kružno klizanje ili naizmjenično gibanje?
2. Treba li se tribometar nalaziti u zatvorenom sustavu?
3. Trebali li tribometar promjenjivo opterećenje i brzinu?

Funkcija tribometra je da se u kontroliranim uvjetima simulira trenje i trošenje jer su trenje i trošenje veoma osjetljivi na faktore kao što su varijacija u temperaturi, opterećenju ili vlazi. Samim time važno je odabrati mjernu opremu i projektirati sustav kojim će se ti faktori pažljivo kontrolirati i nadzirati. Također postoji i praktična prednost provođenja eksperimenta bez otežanih okolnosti koje dolaze uz proučavanje trenja i trošenja na originalnoj opremi koja će se koristiti pri nekom radu. Na primjer, trošenje između cilindara i klipa u motoru s unutrašnjim izgaranjem ima bitan ekonomski utjecaj na troškove goriva. Potpuni testovi na motorima s unutrašnjim izgaranjem ograničeni su vremenom i resursima te se stoga većina početnih ispitivanja podmazivanja provodi na pojednostavljenim ispitnim uređajima. Još jedna prednost tribometara je što se mogu konstruirati tako da dozvole precizna mjerenja trenja, trošenja i povezanih parametara kao što je temperatura na način koji nije moguć kod industrijskih uređaja.

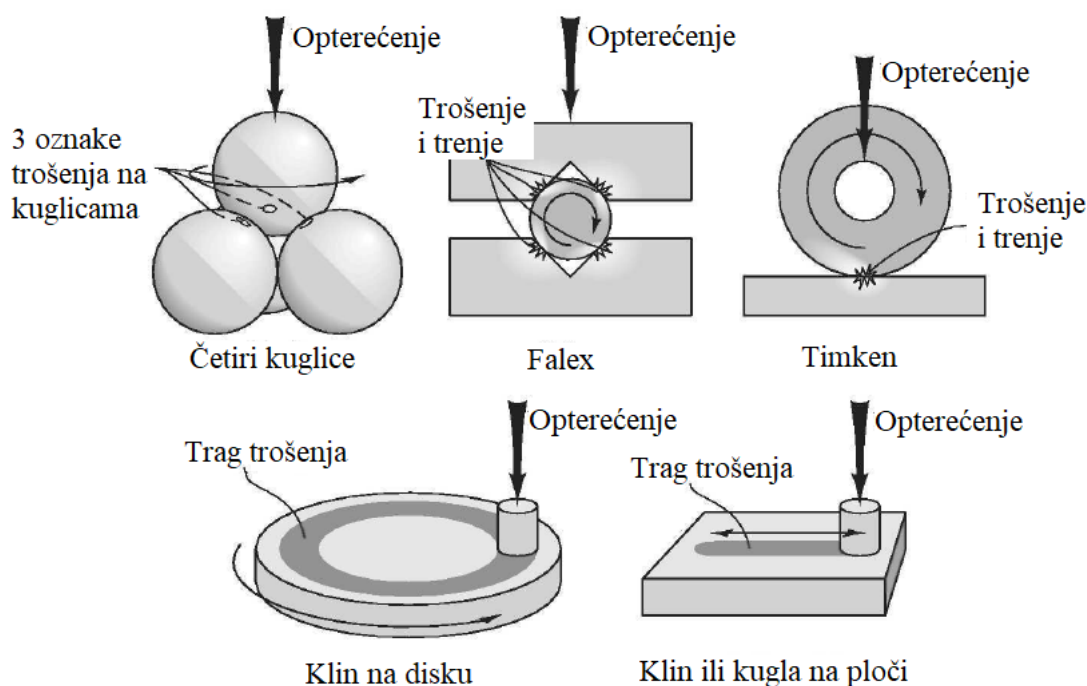
[11]

Većina tribometara je manje veličine čime se omogućuje provođenje eksperimenata u laboratorijskim uvjetima. Svi tribometri se sastoje od kontakta površina koje se troše i čine glavni fokus provedenih testova te formiraju ključni dio opreme. Prosječan tribometar također sadrži različitu pomoćnu opremu za omogućavanje gibanja, trenutno opterećenje, dovođenje maziva ili posebnog plina. Oni napredniji tribometri su opremljeni instrumentima za mjerenje koeficijenta trenja, količine trošenja i temperature. Tribometri se razlikuju po konstrukciji i funkciji. Glavni čimbenik za potrebu širokog raspona tribometara je različitost u kontaktnim površinama u stvarnim situacijama koje treba simulirati. Trošenje se odvija pri uvjetima čistog klizanja, čistog kotrljanja, kombiniranog klizanja i kotrljanja, udara, abrazije, erozije i kavitacije. Svaki oblik trošenja zahtjeva posebno konstruirani tribometar. [11]

Iako postoji određen broj tribometara koji imaju široki raspon mogućih ispitivanja, većina ih ima prilično ograničeno područje primjene. Uobičajeno su konstruirani za specifičan mehanizam trošenja ili radne uvjete i nisu pogodni za provođenje eksperimenata koji izlaze iz predviđenih uvjeta. Općenito, tribometri se mogu podijeliti u grupe prema mehanizmima trošenja ili radnim uvjetima. [11]

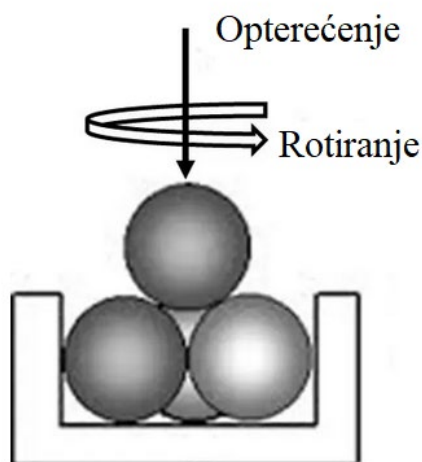
2.6.1. Tribometri za suho trenje ili klizanje uz djelomično podmazivanje

Ova grupa tribometara je najveća i najviše je razvijena jer puno komercijalnog interesa leži u uređajima koji mogu sa sigurnošću procijeniti različita maziva. Najčešće konfiguracije korištene za suho trenje ili djelomično podmazivano klizanje prikazane su na slici [Slika 17]. [11]



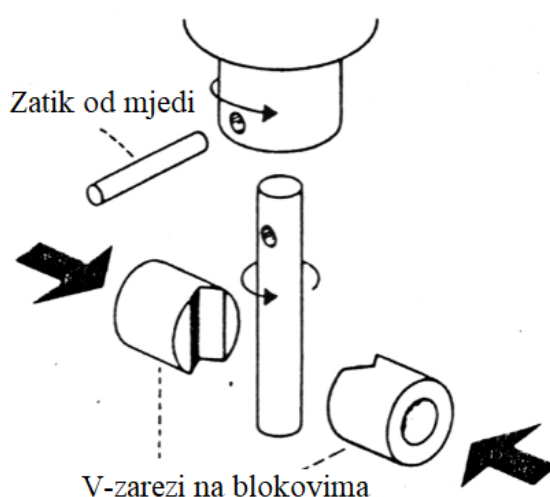
Slika 17. Shematski prikaz različitih tribometara za simulaciju suhog trenja ili djelomičnog podmazivanja [11]

Jedna od konstrukcija tribometra za testiranje maziva prilikom ekstremnih opterećenja je uređaj „četiri kuglice“ (*4-ball*) [Slika 18] koji se sastoji od piramidalne formacije čeličnih kuglica pritisnutih zajedno gdje su tri kuglice fiksirane, a četvrta se rotira brzinom 1770 ± 60 o/min. Posuda u kojoj se kuglice nalaze napuni se tekućim mazivom i zatim se fiksirane kuglice pritišću o rotirajuću kuglicu u intervalima od deset sekundi. Provodi se više intervala ispitivanja pri sve većim opterećenjima dok ne dođe do međusobnog zavarivanja kuglica. Zatim se mjere tragovi trošenja na tri fiksne kuglice. [11],[42]



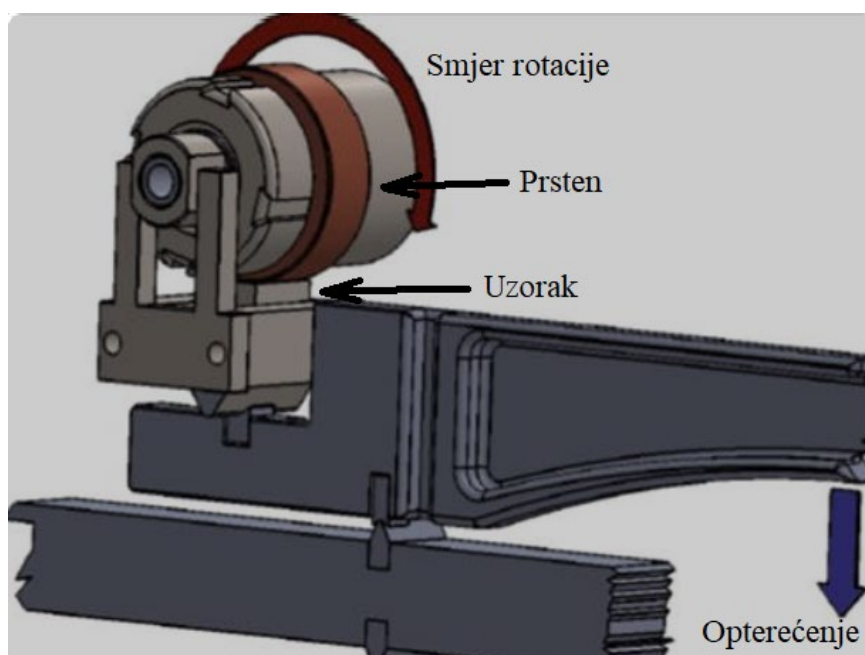
Slika 18. Shema tribometra „četiri kuglice“ [12]

Druga pak vrsta tribometra je Falex ispitivač [Slika 19] koji se sastoji od klina ili valjka smještenog između dva bloka s „V“ zarezima. Time se dobivaju četiri kontaktne površine, a za ispitivanje su potrebni samo sila koja pritišće blokove na valjak i moment kojim se valjak okreće. Tribometar pruža podatke o koeficijentu trenja za određenu kombinaciju materijal/mazivo, maksimalnom opterećenju prije oštećenja površine i veličini oznaka trošenja. [11],[42]



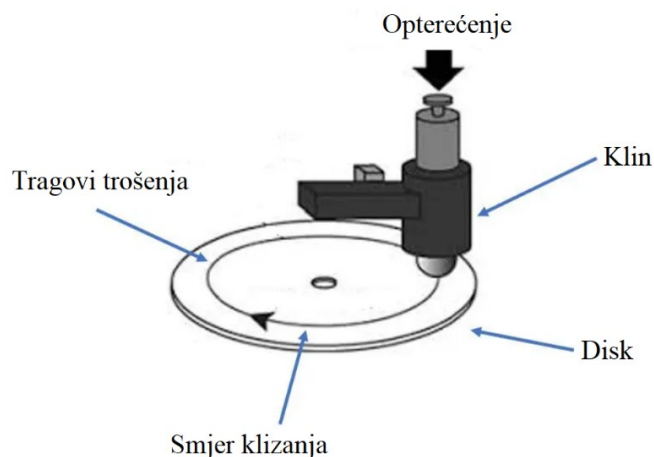
Slika 19. Shema Falex ispitivača [13]

Sljedeća konfiguracija tribometra je Timken aparatura [Slika 20]. U ovom tipu tribometra prsten koji se rotira brzinom od 800 o/min pritišće se na stacionarnu ploču uz prisustvo maziva koje se ispituje. Ispitivanje se provodi 10 minuta uz sve veće opterećenje do maksimalnog opterećenja koje je iskazano tragovima trošenja na ploči. Opterećenjem se utvrđuje čvrstoća filma maziva. [11],[42]



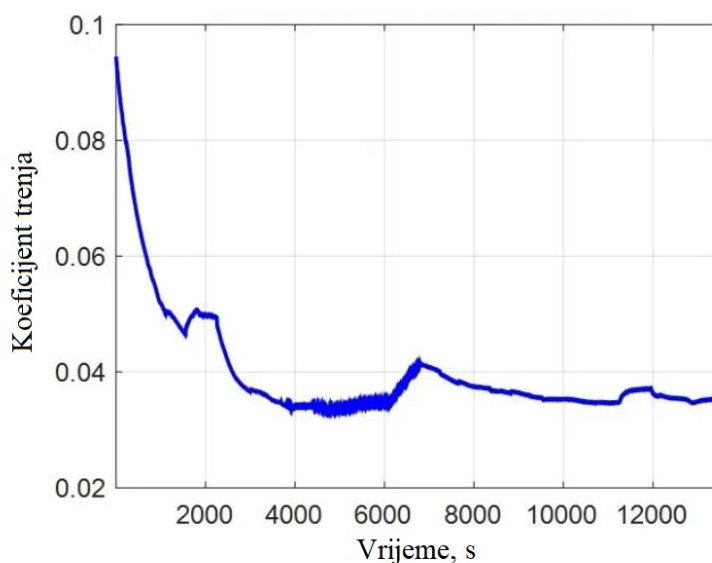
Slika 20. Shema Timken tribometra [14]

Posebna vrsta tribometra za ispitivanje trenja i adhezijskog trošenja je tribometar za ispitivanja prema metodi klizanja „klina na disku“ (*pin-on-disc*) [Slika 21]. Ova aparatura je među najviše korištenima na svijetu. Klin se pritišće na rotirajući disk i to tako da je prslonjen ili na ravnu površinu diska ili na obod diska. Može se ispitivati pri suhom trenju kao i pri podmazivanju. Dimenzije klina i diska ovise o tipovima testova koji se namjeravaju provesti. „Klin na disku“ pruža jako dobru kontrolu eksperimentalnih uvjeta i zbog toga se sve više preferira u odnosu na ostale tribometre. Osim toga omogućuje da se eksperimenti provode u relativno stabilnim uvjetima bez varijacija u površini kontakta ili brzine klizanja kao što je to slučaj kod drugih tribometara. Jedan problem koji se javlja kod ovakvog načina ispitivanja je kontrola normalne sile na klinu. Na početku testa površina diska je potpuno glatka, ali s vremenom postaje sve hrapavija uslijed trošenja zbog čega klin počinje vibrirati ili poskakivati po disku. [11]



Slika 21. Shematski prikaz ispitivanja metodom „klin na disku“ [15]

Tijekom provođenja testa cijelo vrijeme se nadzire sila trenja, trošenje i temperatura. Prema krivulji koja prikazuje mjereni koeficijent trenja [Slika 22] može se vidjeti da je na početku mjerenja koeficijent veliki te s vremenom pada. Takva pojava je tipična prilikom mjerenja koeficijenta trenja i pripisuje se procesu uhodavanja. Tijekom uhodavanja topografija površine se mijenja i dolazi do kemijskih reakcija sve dok sustav ne dođe u stabilno stanje, nakon čega se može očitati koeficijent trenja. Poslije određenog broja ciklusa ispitivanje se zaustavlja i pristupa se obradi analizom parametara topografije površine s ciljem određivanja volumena traga trošenja i promjene hrapavosti. [15]

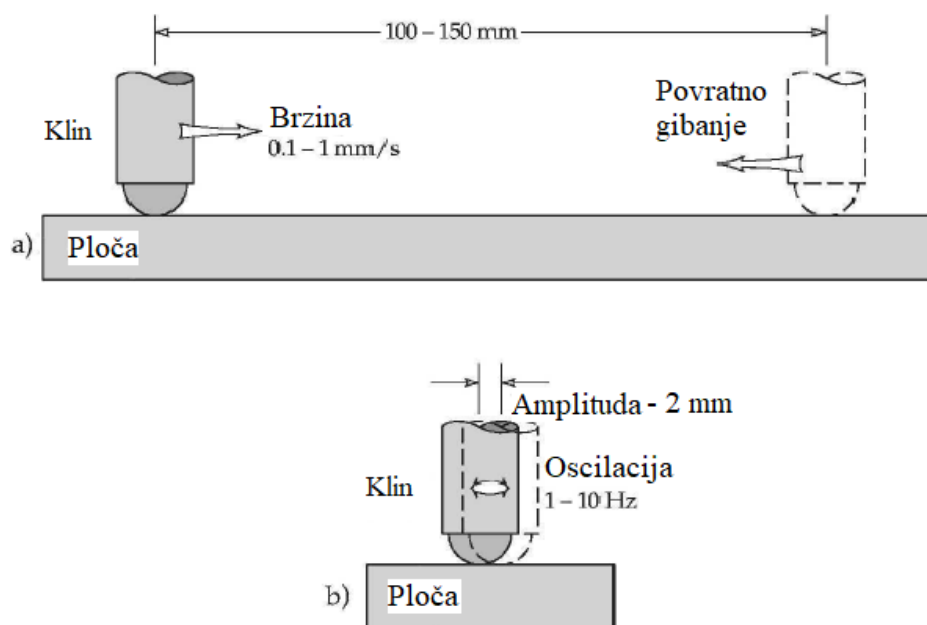


Slika 22. Krivulja vrijednosti koeficijenta trenja izmjerena na tribometru metodom trošenja „klin na disku“ [15]

Postoji mnogo faktora koji utječu na rezultate tribometra za metodu ispitivanja kliznog trošenja „klin na disku“ pri čemu se traži da plan i uvjeti ispitivanja što točnije prikazuju stvarni kontakt tribopara koji treba uzeti u obzir pri konstruiranju tribometra [15]:

1. Oblik klina može biti bilo kojega oblika kao što su to zaobljena ili ravna glava klina.
2. Ako klin ima ravnu glavu treba posebno paziti oko poravnavanja s površinom diska da ne bi došlo do neravnomjernog trošenja.
3. Materijal klina je značajan za rezultat ispitivanja. Tribološko ponašanje je različito ovisno koji je materijal klina, a koji diska. To je posebno izraženo kada se koriste mekši i tvrdi materijal. Ako je mekši materijal klin sa zaobljenom glavom, tijekom testiranja će nastati ravna površina koja će na disku imati drugačije opterećenje od onoga inicijalnoga kod zaobljene glave. Ako je pak disk mekši materijal, doći će do stvaranja velikog udubljenja
4. Djelovanje klina može biti postavljeno na više smjerova prema uzorku. Jedno mjesto je pritiskanje diska odozgo, također može biti i odozdo kao i kontakt s bočnim dijelom diska.

Tribometar koji također koristi klin kao dio aparature koristi se u metodi trošenja klizanjem „klina na ploči“ (*pin-on-slab*) [Slika 23]. Ovakva konfiguracija je pogodna za proučavanje naizmjeničnog klizanja što ju razlikuje od „klin na disku“ konfiguracije koja je pogodna za proučavanje klizanja u jednom smjeru. Najpoznatiji primjer ovoga tribometra je Bowden-Leben uređaj koji se koristi u velikom broju istraživačkih projekata. Osim Bowden-Leben uređaja u novije vrijeme razvijen je još i Cameron-Mills uređaj koji ima male amplitude i veliku frekvenciju. Prednost Cameron-Mills konfiguracije je visoka repetitivnost ciklusa klizanja po površini što uzrokuje brže postizanje stabilnog stanja trenja i trošenja. S druge strane Bowden-Leben tribometar uglavnom pruža podatke o trenju i trošenju samo za početnu fazu trošenja zbog toga što klin napravi malo prelazaka preko ploče u zadanom vremenskom periodu. Povišenje temperature na površini precizno se regulira ograničenjem brzine klizanja na oba uređaja. [11],[43]



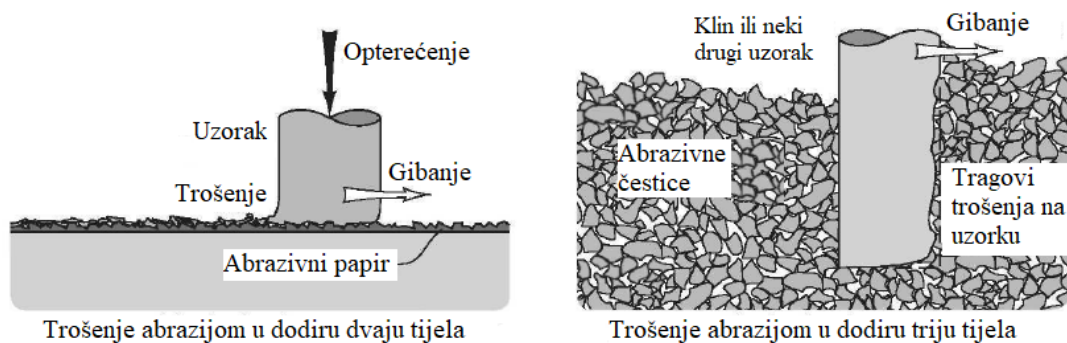
Slika 23. Shematski prikaz a) Bowden-Leben tribometra i b) Cameron-Mills tribometra [11],[43]

2.6.2. Tribometri za abrazivno, erozijsko i kavitacijsko trošenje

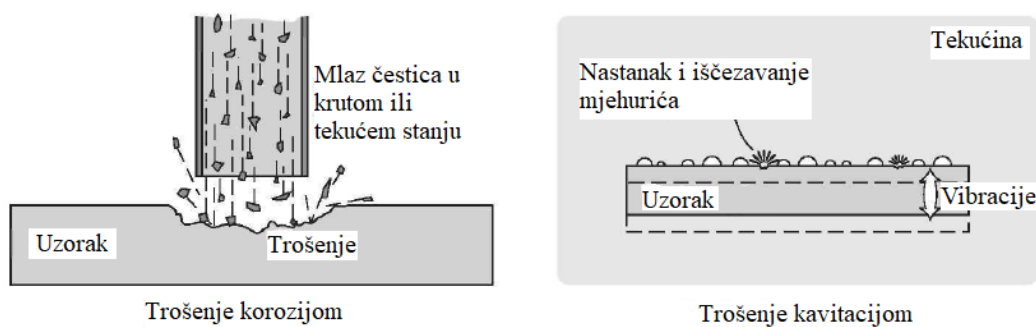
Ova skupina tribometara značajno se razlikuje u konstrukciji od tribometara koji se koriste za proučavanje suhog trenja ili klizanja uz djelomično podmazivanje. Postoje neke iznimke kao što su tribometri za metode trošenja „klin na disku“ i „klin na ploči“ koji se mogu koristiti za proučavanje abrazivnog trošenja u slučaju abrazije u dodiru dvaju tijela [Slika 24]. Trošenje se u tom slučaju stvara tako što se abrazivni papir pričvrsti na disk ili ploču, a može se i koristiti poseban disk prekriven abrazivnim česticama. U tome slučaju proučava se samo trošenje na klinu. Kada se istražuje trošenje kod abrazije i erozije u dodiru triju tijela [Slika 24] potrebno je imati stalan tok abrazivnih čestica koje prelaze preko testnog uzorka. Kod erozivnog trošenja abrazivne čestice se najčešće raspršuju zrakom, plinom ili tekućinom kroz mlaznicu na mirujuću površinu, a kod abrazivnog trošenja uzorak se može pomicati kako bi se postigao protok abrazivnih čestica preko površine. [11]

Pri konstrukciji tribometara za erozijsko trošenje [Slika 25] bitno je odabrati mlaznicu prema određenim parametrima jer brzine i trajektorije abrazivnih čestica mogu utjecati na prikupljene podatke. Ustanovljeno je da kod tribometara gdje se abrazivne čestice dovode plinom kroz mlaznicu, hrapavost unutrašnje strane mlaznice se treba pažljivo kontrolirati. Ako je hrapavost površine prevelika mlaz čestica će izlaziti s većim kutom i veći će biti raspon brzina čestica. Time se komplicira interpretacija rezultata eksperimenta. Kako bi se spriječilo postepeno povećanje hrapavosti na unutrašnjoj strani mlaznice moraju se za izradu mlaznice koristiti materijali otporni na eroziju. [11],[44]

Postoje studije i za erozijsko trošenje tekućinom, U tome slučaju postoji zahtjev da sustav za pumpanje tekućine stvara mlaz tekućine s brzinama većima od 100 m/s. Također i istraživanje kavitacijskog trošenja [Slika 25] traži posebnu aparaturu. Kavitacija se može inducirati naglim pomicanjima uzorka u tekućini ili ultrazvučnim vibracijama uronjenog uzorka. [11],[44]

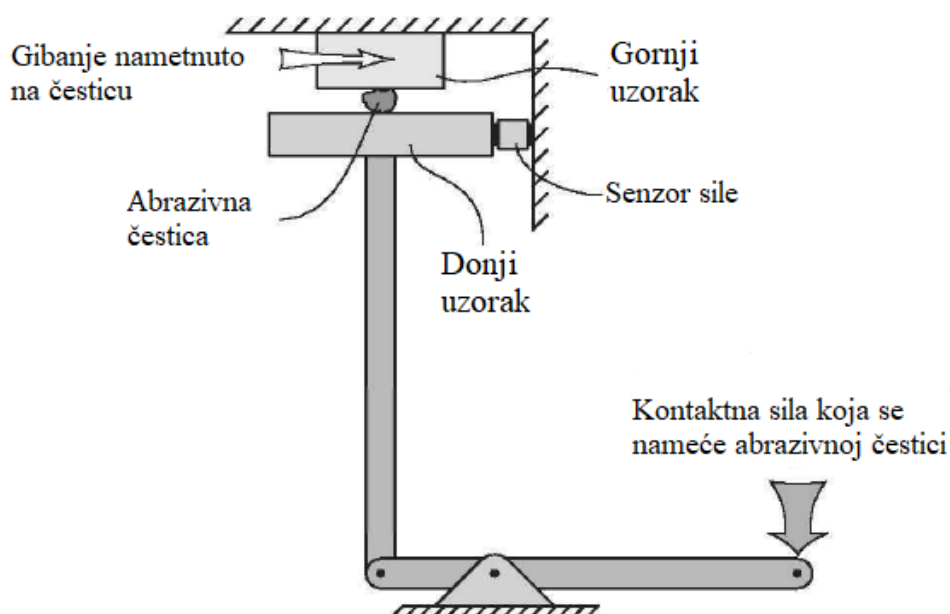


Slika 24. Shematski prikazi tribometara za ispitivanje dvije vrste abrazivnog trošenja [11],[44]



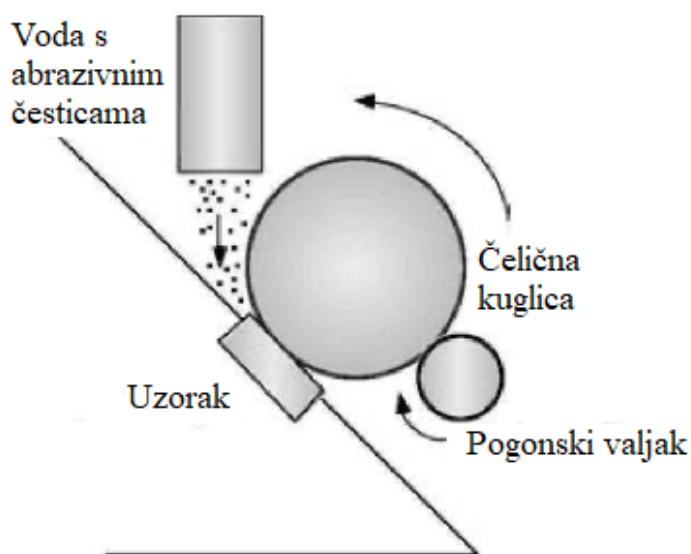
Slika 25. Shematski prikazi tribometara za ispitivanje trošenja korozijom i kavitacijom [11],[44]

Konstrukcija tribometara za proučavanje trošenja abrazije, erozije i kavitacije ovisi o zahtjevima pojedinačnih istraživačkih projekata. Iz toga razloga postoje i posebne aparature za ispitivanje trošenja abrazijom u dodiru triju tijela [Slika 26] gdje ne postoje abrazivne čestice već jedno veće abrazivno tijelo između dva tijela odnosno ploča. U toj konstrukciji obrazac kotrljanja i klizanja abrazivnog tijela se može proučavati i kasnije uspoređivati s oštećenjima uzrokovanim trošenjem. [11],[45]



Slika 26. Shematski prikaz tribometra za ispitivanje trošenja abrazijom u dodiru triju tijela [11],[45]

Još jedna konstrukcija tribometra za trošenje mikroabrazijom i erozijom je aparatura koja se sastoji od čelične kuglice koja je pritisnuta na metalnu ploču i ujedno se rotira [Slika 27]. Istovremeno se na mjesto kontakta usmjeri mlaz vode pomiješane s abrazivnim česticama. Izgled oštećenja koji je nastao na površini uzorka je u obliku kratera. Količina trošenja procjenjuje se mjerenjem promjera kratera i određivanjem volumena uklonjenog materijala s površine. Informacije o mehanizmu trošenja dobivaju se iz mikroskopskog proučavanja morfologije istrošene površine. Prvotno je ovaj tribometar konstruiran za mjerenje debljine prevlake na površini i otpornost prevlake na abrazivno trošenje. Obično je promjer čelične kuglice 25 mm, a abrazivne čestice su manje od 10 μm . S vremenom je konstrukcija modificirana da može prihvatiti i kuglice promjera 41 mm čime se može provesti istraživanje za materijale otporne na abrazivno trošenje u dodiru triju tijela ili ispitati utjecaj različitih oblika i veličina čestica na trošenje. Glavna prednost ovog tribometra je njegova jednostavnost za korištenje, mogućnost ponovljivosti i niska cijena provedbe ispitivanja. [11],[46]



Slika 27. Shematski prikaz aparature s kuglicom koja stvara krater trošenjem površine [11]

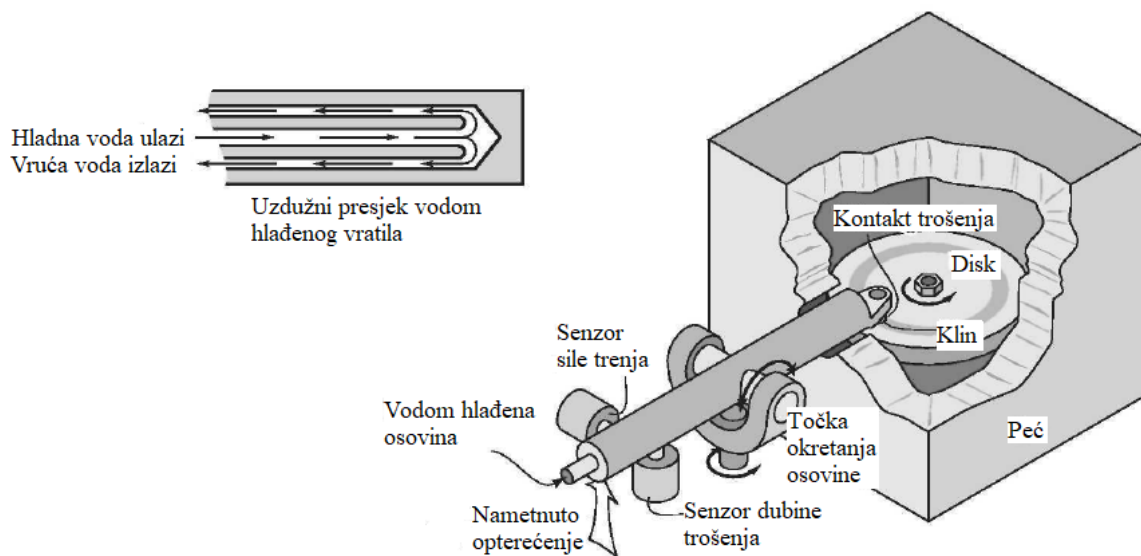
2.6.3. Tribometri za nestandardne uvjete

Tribologija tijela u kontaktu prilikom uvjeta koji nisu standardni kao što su ekstremne temperature ispitnog uzorka ili trošenje u vakuumu ima veliku praktičnu i znanstvenu važnost. Na primjer, raketni motori na tekuće gorivo zahtijevaju valjne ležajeve za rad u tekućem kisiku. Zato je ključno provjeriti da se ti ležajevi neće pokvariti uslijed trošenja prije nego se potroši gorivo. Moderna tehnologija sve više ovisi o pouzdanosti mehaničkih komponenata u ekstremnim uvjetima kao što je to kod nuklearnih reaktora, zrakoplova i svemirskih vozila. Zbog toga se razvijaju tribološka istraživanja za proučavanje komponenata tijekom trenja i trošenja u širokom rasponu nestandardnih uvjeta. [11]

Tribometri za nestandardne uvjete omogućavaju provedbu standardnih triboloških mjerenja u ekstremnoj okolini kao što je visoka ili niska temperatura ili vakuum. Osnovni mehanizmi kontakta dvaju tijela poput brzine klizanja i naprezanja ostaju nepromijenjeni usprkos uvjetima koji nisu ambijentalni. Tijekom konstrukcije tribometra trebaju se uzeti u obzir načini izolacije instrumenata, pogonskog sustava i utega za opterećenje od štetnog utjecaja ekstremnih uvjeta. Čest primjer takvog slučaja je zahtjev za adekvatnom termalnom izolacijom pogonskog vratila i elektromotora za tribološka ispitivanja pri visokim temperaturama i vakuumu. Komponente koje se podliježu visokoj temperaturi moraju biti izrađene od vatrootpornih materijala kao što je keramika ili superlegura s niklom prevučena prevlakom koja stvara toplinsku barijeru prema jezgri materijala. Često se zahtjeva pažljivo konstruiranje kako bi se osiguralo da senzori za trenje i trošenje mogu precizno zapisivati podatke dok su zaštićeni od štetnih utjecaja temperature, korozivnih kemikalija, radijacije i magnetskog polja. Konstrukcija komore za ispitivanje mora dozvoliti izvršavanje eksperimenata pri precizno održavanim uvjetima, a pri tome pogoni i mjerni sustav nalaze se izvan komore. Također se mora osigurati da zabilježeni podaci nisu pod utjecajem magnetskog polja ili vibracija koji proizlaze iz okoline. [11],[47]

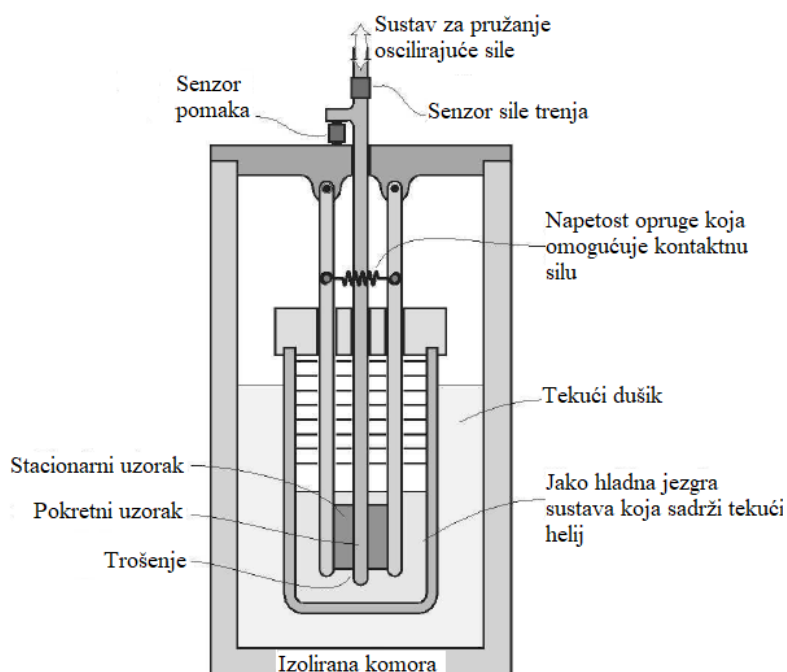
Tribometri za visoku temperaturu posebno su konstruirani i izrađeni za ispitivanje keramičkih materijala. Keramički materijali pokazuju visoku čvrstoću, toplinsku otpornost i otpornost na trošenje, kemijsku inertnost, nisku toplinsku provodljivost i postojanost mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama. Samim time postoji veliki interes za njihovo korištenje u motorima s unutarnjim izgaranjem i plinskim turbinama gdje se temperature penju do 1000 °C odnosno 1400 °C. Konvencionalna tekuća maziva gube svoja svojstva pri mnogo nižim temperaturama od navedenih, stoga se keramička maziva, koja se primjenjuju kao premazi od krutih maziva, ispituju pri temperaturama višim od 800 °C. Kako bi se keramički materijali ispitali pri uvjetima konstantne povišene temperature i da bi se mogli provesti svi potrebni tribološki testovi, potrebno je konstruirati i izraditi posebne tribometre. Neki tribometri koji su prvobitno osmišljeni za ambijentalnu temperaturu kao što su tribometri za metode trošenja „klin na disku“ ili „klin na ploči“ mogu se adaptirati za primjenu na povišenim temperaturama dodavanjem grijača i izoliranjem komore za ispitivanje. Takve modifikacije mogu se jednostavno provesti i nisu skupe, a omogućuju ispitivanja na temperaturama do 500 °C. Za još više temperature potrebni su posebni tribometri koji mogu mjeriti trenje i trošenje u nekim slučajevima i do temperature od 1500 °C. [11],[47]

Kako bi se uzela u obzir različita okolina, tribometri za visoku temperaturu konstruiraju se za ispitivanja u vakuumu, zraku i plinskim atmosferama. Sastoje se od izolirane komore s grijaćim elementima za postizanje visoke temperature oko uzorka. Jedan od načina za postizanje visoke temperature koja može doseći do 1200 °C je vakuumska peć s elektronskim snopom. Temperatura se obično regulira termoelementom smještenim u blizini uzorka. Ako na izoliranoj komori postoji poseban prozor, temperatura se može mjeriti i pomoću infracrvenog pirometra. Jedan primjer aparature za postizanje temperature do 1000 °C tijekom ispitivanja trenja i trošenja prikazan je na slici [Slika 28]. Vodom hlađena osovina pruža izolaciju pogonskog sustava i instrumenata od vruće komore za ispitivanje. Testni uzorak je klin koji se nalazi na kraju osovine. Utvrđeno je da koeficijent trenja kod mnogih keramičkih materijala dostiže maksimum kod 500 °C dok se umjereno trenje i trošenje odvija kod 100 °C. [11],[47]



Slika 28. Shematski prikaz tribometra za visoku temperaturu [11]

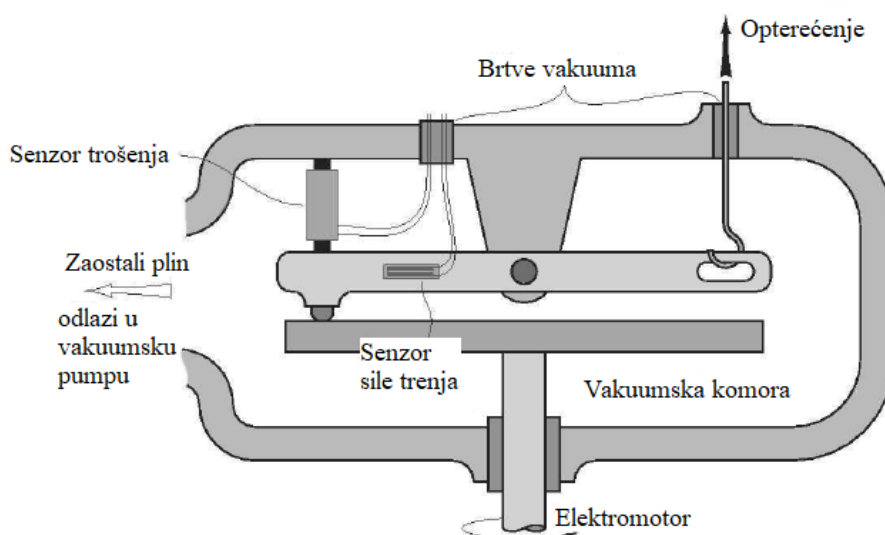
Osim pri visokim temperaturama, tribološka svojstva materijala i maziva ispituju se i pri niskim temperaturama. Shematski prikaz jednog od tribometara koji se koristi za proučavanje trošenja različitih materijala pri ekstremno niskim temperaturama prikazan je na slici [Slika 29]. Kod toga tribometra korišten je tekući dušik i tekući helij za rashlađivanje kontaktne površine između ispitanih materijala. Jedan od problema koji se trebao riješiti prilikom konstruiranja je izoliranje tekućeg dušika ili helija od svih pokretnih dijelova osim površine kontakta. Korištena su duga vratila za pogon pokretnog uzorka i ograničavanje gibanja stacionarnog uzorka. Također je održana potrebna udaljenost između izoliranog spremnika s tekućim dušikom ili helijem i mjernih instrumenata zbog čega je ostvarena stabilna razlika u temperaturi između kraja vratila koji je uronjen u kriogenu tekućinu i drugoga kraja koji je povezan sa pogonskim sustavom. Postoje i konstrukcije kod kojih mjesto kontakta nije uronjeno u kriogenu tekućinu nego je zrak ohlađen prolaskom kroz tekući dušik prije dolaska na mjesto kontakta. Tribometri za ekstremno visoke i niske temperature podliježu istim osnovnim principima konstruiranja, kao što je izolacija izvora grijanja ili hlađenja od mjernih instrumenata, ležajeva i pogonskog sustava. [11],[48]



Slika 29. Shematski prikaz tribometra za izrazito nisku temperaturu [11],[48]

Još jedna vrsta tribometara za nestandardne uvjete su tribometri za rad u vakuumu [Slika 30]. Istraživanja trenja, trošenja i podmazivanja u vakuumu mogu se podijeliti u dvije grupe. Jedna grupa je osnovna istraživanja mehanizama trošenja, trenja i podmazivanja, a druga je trošenje, trenje i podmazivanje materijala za primjenu u svemiru. Tribometri za ispitivanje u vakuumu obično se sastoje od vakuumske komore s površinama uzorka u kontaktu i pomoćne opreme kao što je vakuumska pumpa i pogonski sustav za gibanje površina u kontaktu. Pogonsko vratilo izlazi iz komore kroz brtvu do elektromotora. Senzori za trenje i trošenje mogu biti smješteni izvan vakuumske komore, ali i unutar jer nedostatak zraka ne ometa senzore u radu. Neki tribometri sadrže i grijaća tijela kako bi se ispitivanja mogla provesti pri povišenim temperaturama. Vrijednosti koeficijenta trenja u vakuumu više se mijenjaju oko određene srednje vrijednosti nego kod ispitivanja na zraku, jer čim se zaštitni sloj oksida ili maziva izgubi tijekom trošenja, koeficijent trenja većine metala se naglo povećava. Zbog toga potporna struktura površina u kontaktu koja je obično postavljena s tenzometrima i ponaša se kao senzor sile treba biti dovoljno jaka da izdrži nagle poraste sile trenja. Kod tribometara za rad u vakuumu nedostatak zraka sprječava hlađenje površina u kontaktu konvekcijom, stoga se toplina nastala trenjem može jedino odvesti preko kondukcije i zračenja. Osim toga, maziva teže ispuštaju pare zbog zagrijavanja uslijed trenja što utječe na tlak u komori. [11],[49]

Radi toga se tijekom konstruiranja tribometara treba posebno paziti na pravilnu disipaciju topline kao što je primjenom sustava hlađenja i na uklanjanje para od maziva pomoću vakuumskih pumpi visokog kapaciteta. [11],[49]



Slika 30. Shematski prikaz tribometra za rad u vakuumu [11],[49]

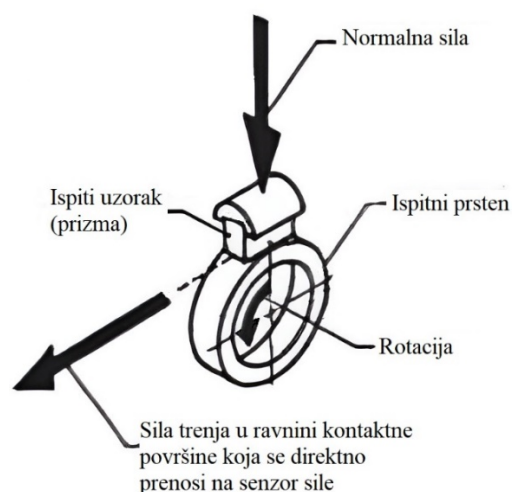
2.6.4. Tribometar za metodu trošenja klizanjem „prizme po prstenu“

Klizno trošenje je progresivan gubitak materijala s površina dvaju tijela u kontaktu pod određenim opterećenjem. Neizbježna je pojava u širokom rasponu industrija gdje su korišteni strojevi i motori u radu, u to spada automobilska, zrakoplovna i naftna industrija. Kliznim trošenjem može doći do smanjene proizvodnje, performansa strojeva pa čak i oštećenja strojeva. Mehanizmi trošenja koji se javljaju tijekom klizanja mogu biti adhezijsko trošenje, abrazijsko trošenje dvaju tijela u kontaktu ili triju tijela u kontaktu i trošenje umorom materijala. Način trošenja materijala značajno ovisi o radnom okruženju koje uključuje normalnu silu, brzinu, koroziju i podmazivanje. Ispitivanje metodom „prizma po prstenu“ omogućuje proučavanje ponašanja materijala tijekom kliznog trošenja u različitim simuliranim uvjetima i zatim rangiranje triboparova za specifične tribološke primjene. [17]

Tribometar za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“ [Slika 31] je uređaj za koji će se u nastavku rada razraditi konstrukcija i pripadajući senzori za prikupljanje podataka u pokusu adhezijskog trošenja. Zbog toga razloga će ovdje biti spomenut u posebnom poglavlju iako bi se mogao smjestiti u grupu tribometara za suho trenje ili klizanje uz djelomično podmazivanje.

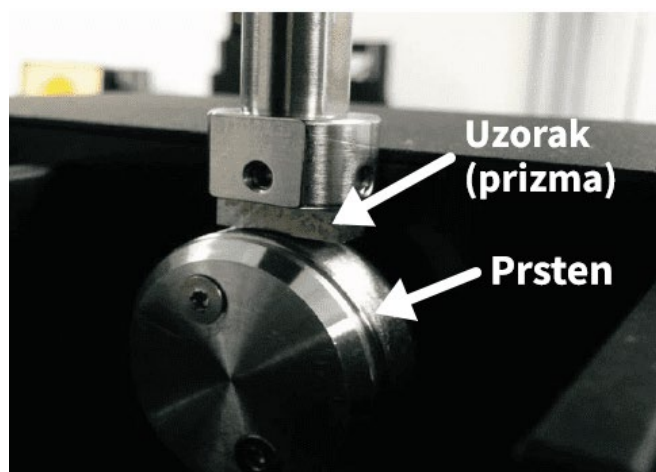
Tribometrom za metodu trošenja klizanjem „prizme po prstenu“ može se odrediti koeficijent trenja, adhezijsko trošenje, silu trenja, brzina trošenja i slične tribološke parametre. Ova metoda laboratorijskog ispitivanja vrlo je fleksibilna, jer se u ispitivanju mogu koristiti različite kombinacije materijala tribopara, različite sile opterećenja i brzine klizanja. Ispitivanje adhezijskog trošenja se može provoditi bez podmazivanja ili uz podmazivanje. [16]

Ispitivanje metodom trošenja klizanjem „prizme po prstenu“ se provodi na način da se uzorak, koji je u ovome slučaju prizma, optereti s konstantnom silom dok prsten rotira određenom brzinom uz pojavu trenja klizanja između prizme i prstena. Količina potrošenog materijala na prizmi određuje se pomoću širine traga trošenja na prizmi, a količina trošenja na prstenu se mjeri razlikom mase prstena prije i poslije ispitivanja. Sila trenja koja je potrebna da drži prizmu na mjestu se kontinuirano mjeri tijekom ispitivanja pomoću mjerne ćelije odnosno senzora sile. Prikupljeni podaci u kombinaciji s podacima normalne sile omogućuju računanje koeficijenta trenja preko jednadžbe (1). [16],[17]



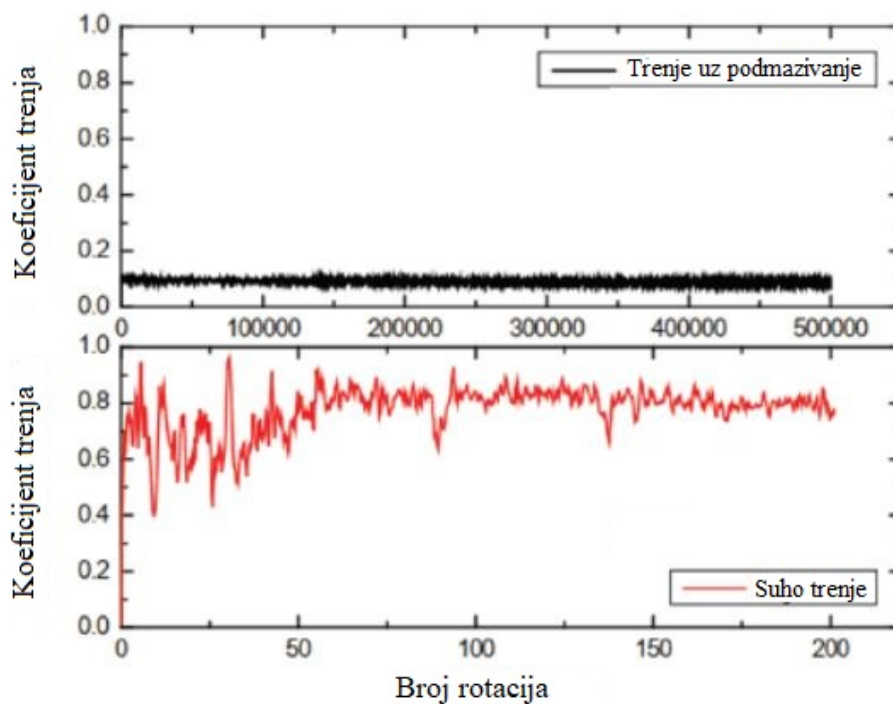
Slika 31. Shematski prikaz ispitivanja metodom klizanja „prizme po prstenu“ [16]

Proizvođača tribometara ima mnogo, a neki od njih su Nanovea, Rtec Instruments, Falex i dr. Tvrtka Nanovea je na vlastitom tribometru „prizma po prstenu“ [Slika 32] provela ispitivanje tribopara legiranih čelika u uvjetima suhog trenja i pri podmazivanju kako bi utvrdila razliku u utjecaju na trošenje materijala. Mineralno ulje je korišteno za podmazivanje, a parametri testa bili su sljedeći: opterećenje normalnom silom je 134 N, brzina okretanja prstena je za suho trenje 72 o/min, a kod podmazivanja 197 o/min, ispitivanje trošenja je provedeno na sobnoj temperaturi. [17]

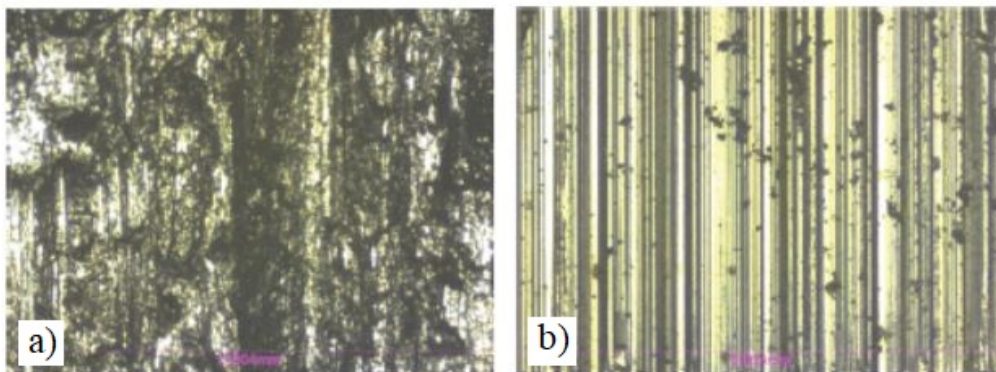


Slika 32. Tribometar za ispitivanje trošenja metodom „prizma po prstenu“ tvrtke Nanovea [17]

Rezultati testa su pokazali da prizma ima značajno veće trenje u suhom stanju nego pri podmazivanju. Kod suhog trenja nakon perioda uhodavanja koeficijent trenja se ustabilio na 0,8, a pri podmazivanju mineralnim uljem konstantan koeficijent trenja je iznosio 0,09 [Slika 33]. Još jedna razlika se može vidjeti i u oštećenjima na prizmi gdje je mnogo veće oštećenje ustanovljeno kod suhog trenja [Slika 34]. [17]



Slika 33. Koeffcijent trenja dobiven ispitivanjem trošenja metodom „prizma po prstenu“ kod podmazivanja i suhog trenja [17]



Slika 34. Tragovi trošenja na prizmi a) suho trenje i b) uz podmazivanje [17]

Može se zaključiti da mazivo ima ključnu ulogu u načinu trošenja tribopara. Mineralno ulje smanjuje, u opisanom slučaju, koeffcijent trenja približno 90 puta. Svestranost tribometra za ispitivanja metodom klizanja „prizma na prstenu“ omogućuje proučavanje trošenja uz različita maziva, povišene temperature i tribokorozijske uvjete. [17]

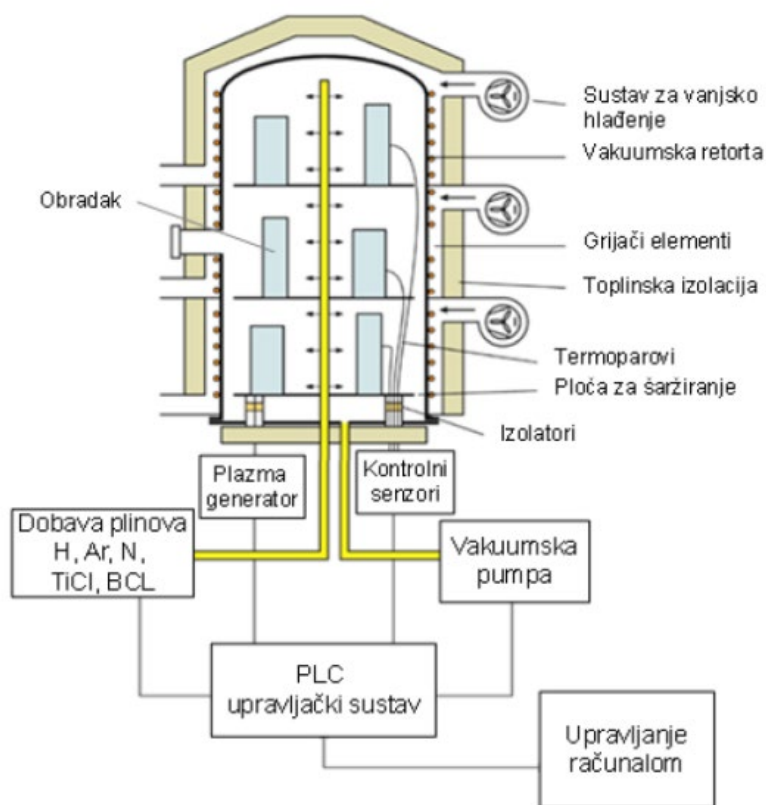
2.7. Tvrde prevlake

Obrada odvajanjem čestica je postao glavni proces korišten u proizvodnji različitih komponenata kroz povijest. U svakoj tehnologiji koja se bavi obradom postoji potreba da alati traju što duže i da se postigne potrebna kvaliteta proizvoda što uključuje niski stupanj hrapavosti površine i dimenzijsku stabilnost. Rezni alati su ključni u procesima obrade odvajanjem čestica, samim time nastoje se kod suvremenih reznih alata što više poboljšati trajnost i produktivnost. To se može donekle ostvariti modificiranjem geometrije alata, parametrima obrade ili poboljšanjima alatnih materijala. Pristup unaprjeđivanja reznog alata kroz poboljšanje je prilično ograničen jer alat mora biti duktilan da spriječi napukline, ali i tvrd da smanji trošenje. Kako su ova dva zahtjeva na materijal u oprečnosti pojavio se novi način unaprjeđivanja reznih alata. Odabire se neki prihvatljivi duktilni materijal koji se zatim zaštiti tvrdom prevlakom. Duktilnim materijalom se osigurava otpornost na pukotine, a tvrdi materijal štiti reznu oštricu od abrazivnog i adhezijskog trošenja. Osim toga tvrda prevlaka smanjuje temperaturu alata tako što smanjuje trenje između alata i površine obradivog materijala. Rezultat toga svega je mogućnost rada reznog alata pri većim brzinama rezanja i s većim posmakom. Tvrde zaštitne prevlake visoke tvrdoće i dobre otpornosti na trošenje i oksidaciju obično čine nitridi prijelaznih metala. Debljina prevlake je nekoliko mikrometara i nanosi se postupcima kemijskog prevlačenja iz parne faze (CVD), fizikalnog prevlačenja iz parne faze (PVD) i postupcima plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (PACVD). [18]

S funkcionalne strane najvažnija svojstva prevlake su dobra adhezija na osnovni materijal i kemijska stabilnost. PVD postupak počinje tako da se materijal prevlake dovodi u parnu fazu u vakuumskoj komori, a zatim se usmjerava na površinu osnovnog materijala gdje se kondenzira kao tanki film. Postupak se provodi pri temperaturama od 150 °C do 500 °C. Omogućuje manju hrapavost površine i manje je štetan za okoliš od CVD postupka. Nedostaci postupka su u debljini sloja zbog zaostalih naprezanja, u nekim slučajevima lošija adhezivnost na osnovni materijal, nemogućnost nanošenja jednolikog sloja na kompleksnije geometrije i mogućnost nanošenja iz samo jednog smjera. [18],[19]

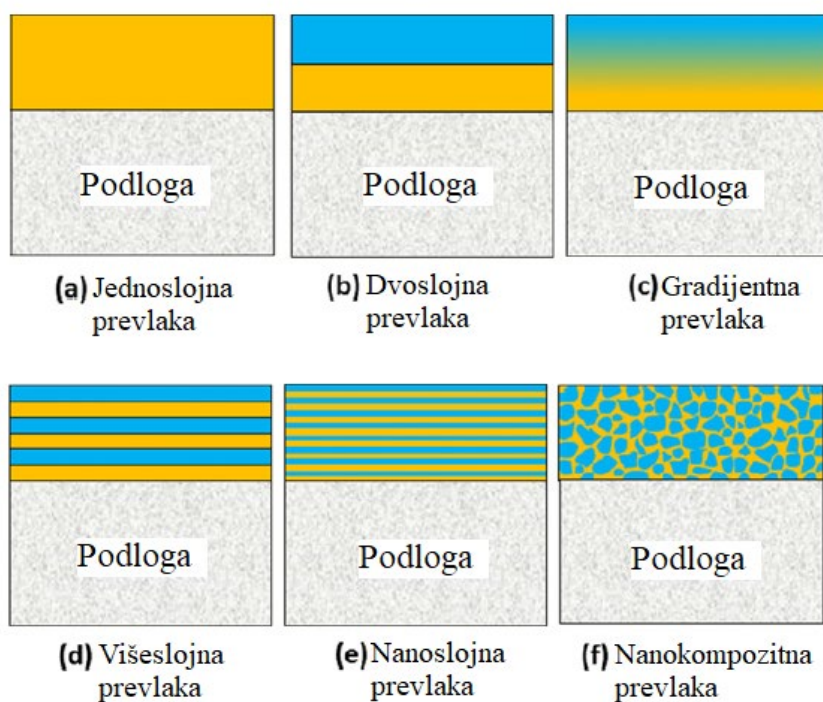
CVD postupak sastoji se od nanošenja slojeva materijala u parnoj fazi kemijskim putem pri temperaturama između 800 – 1000 °C. Smjesa plinova je u interakciji sa zagrijanom površinom osnovnog materijala. Pri kemijskom raspadanju i kemijskim reakcijama plinova stvara se čvrsti film odnosno prevlaka na osnovnom materijalu. Uz to, još se stvaraju kemijski nusprodukti koji se ispuštaju iz komore uz ostatak smjese plinova. Prednost CVD postupka je mogućnost nanošenja prevlake na kompleksnijim geometrijama i da pri tome svugdje bude ista debljina nanosena. Ostale prednosti su velika brzina nanošenja materijala i potreban je manji vakuum nego kod PVD postupka. Nedostatak postupka je visoka temperatura jer se time ograničavaju vrste osnovnih materijala koji se prevlače i vodi do zaostalog naprezanja u prevlakama koje su nanosene na materijale različitih koeficijenata toplinskog širenja. [18],[19]

PVD i CVD postupci prevlačenja pogodni su za alatne čelike, ali dolazi do raznih problema tijekom nanošenja tvrdih prevlaka na kalupe za visokotlačno lijevanje, injekcijsko prešanje i oblikovanje lima deformiranjem. Neki od tih problema su visoka cijena kalupa zbog čega dolazi do velikih troškova ako postupak prevlačenja pođe po krivu. Drugi problem je često velika dimenzija i težina kalupa s kompleksnim geometrijama zbog čega je otežana rotacija kalupa u PVD postupku. Zahtjevne geometrije na kalupima uglavnom se izrađuju elektroerozijom što negativno utječe na adheziju PVD prevlaka. Zbog tih razloga i još nekih drugih razvijeno je plazmom potpomognuto prevlačenje iz parne faze (PACVD) [Slika 35]. Taj postupak kombinira neke prednosti CVD i PVD postupaka. Obično je tlak za vrijeme postupka u rasponu od nekoliko desetaka do par stotina Pa što omogućuje prevlačenje velikih i teških alata bez rotacije. Temperatura nanošenja je između 480 °C i 510 °C zbog čega je postupak prikladan za prevlačenje čelika. [20]



Slika 35. Shematski prikaz PACVD uređaja 88[21]

U svojoj osnovi tvrde prevlake se nanose kao jedan homogeni sloj na osnovni materijal [Slika 36], ali postoji mogućnost da se nanesu i dva sloja. U tome slučaju donji sloj može biti visoke tvrdoće čime se omogućuje otpornost na trošenje, a gornji sloj može biti mekani materijal kojim će se smanjiti koeficijent trenja. Još jedna mogućnost je postepeni prijelaz između dva sloja (gradijentna prevlaka) gdje nema točne granice između slojeva, takav slučaj može biti prevlaka od titanij karbonitrida gdje se omjer atoma ugljika i dušika mijenja tijekom procesa nanošenja prevlake. Ako se dva sloja različitih materijala ponavljaju nekoliko puta na površini osnovnog materijala dobije se višeslojna prevlaka, a ako su ti slojevi tanji od 10 nm i broj slojeva je još više povećan dobije se nanoslojna prevlaka. U slučaju da je tijekom prevlačenja formirana dvofazna struktura gdje je jedna faza raspršena u kontinuiranoj matrici druge faze nastaje nanokompozitna prevlaka. [18]



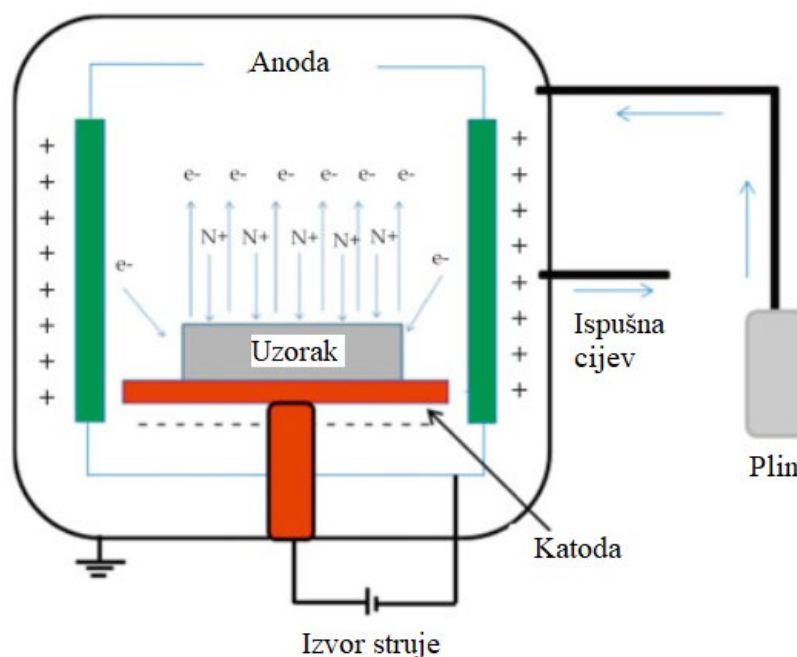
Slika 36. Različiti načini nanošenja tvrdih prevlaka [18]

2.8. Nitriranje

Još jedan postupak povećanja otpornosti površine koji će se spomenuti u ovome radu je nitriranje s posebnim osvrtom na nitriranje u plazmi. Nitriranje je široko rasprostranjeni termokemijski postupak modificiranja površine u kojem se dušik dovodi na površinu metala pri povišenim temperaturama. Glavni cilj postupka nitriranja je postići visoku površinsku tvrdoću, poboljšati otpornost na trošenje, produžiti vrijeme do pojave umora materijala i povećati otpornost na koroziju. Pri tome se dimenzije uzorka zanemarivo povećavaju dok svojstva osnovnog materijala ostaju ista. [22]

Nitriranje u plazmi [Slika 37] je postupak gdje se površina modificira djelovanjem povišene temperature i plazme koja dovodi dušik u površinske slojeve metala. To je najnaprednija metoda nitriranja. U ovoj metodi predmeti su negativno polarizirani (katoda), a zid peći je anoda. U vakuumsku komoru se uvodi dušik ili smjesa dušika i vodika pod niskim tlakom ($10^{-2} - 10^2$ Pa). Pomoću plazme plin se ionizira te ioni dušika pri velikoj brzini udaraju u negativno nabijenu površinu osnovnog materijala.

Prednost ovakvog postupka je uniformiranost modificiranja površine koja je neovisna o geometriji dijela. Tijekom postupka nitriranja u plazmi na površini se stvara tvrdi sloj koji se sastoji od difuzijske zone i zone spojeva. Svojstva, sastav i dubina nitriranog sloja ovise o temperaturi, vremenu procesa, sastavu plinova i parametrima plazme. Svaki parametar ima drugačiji utjecaj, ali smatra se da višom temperaturom se povećava dubina zone spojeva i difuzijske zone dok se istovremeno smanjuje površinska tvrdoća. Vrijeme postupka obično je kraće nego kod drugih postupaka nitriranja, a postignuta tvrdoća je veća. [19],[22]



Slika 37. Shematski prikaz uređaja za nitriranje u plazmi [23]


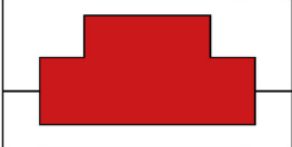




3. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja je tehnologija koja omogućuje direktnu izradu predmeta iz virtualnog trodimenzionalnog modela konstruiranog na računalu (CAD model) formiranjem strukture materijala i oblika predmeta sloj po sloj. To je u oprečnosti s tehnologijama odvajanja čestica gdje se počinje od bloka materijala kojemu se uklanja višak materijala dok se ne postigne zadani oblik odnosno proizvod. Kod aditivne proizvodnje proizvod počinje „printanjem“ jednog sloja na drugi i tako dok se ne dobije potreban proizvod. Ovisno o tehnologiji debljina slojeva može varirati od nekoliko mikrometara do oko 0,25 milimetara. Također postoji i široki raspon materijala koji se koristi kod različitih tehnologija. [24]

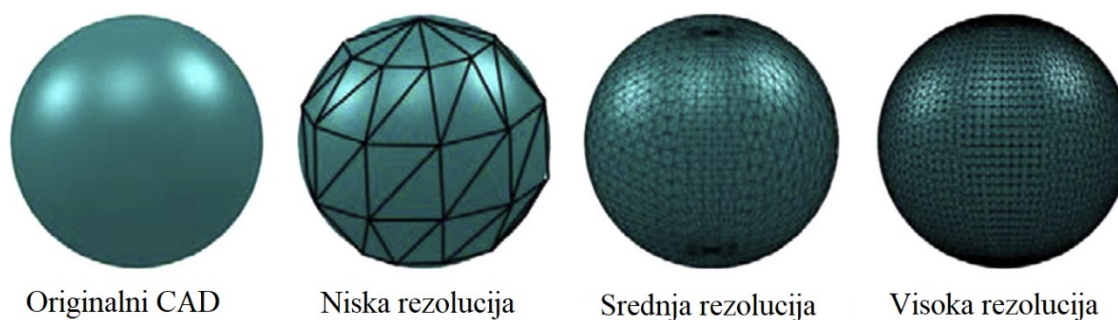
Postoji više prednosti ovakvoga načina proizvodnje u odnosu na tradicionalne načine u koje spadaju obrada odvajanjem čestica, lijevanje, oblikovanje deformiranjem i slično. Neke od značajnih prednosti jesu sljedeće [25]:

1. Smanjena cijena proizvodnje – proizvodni proces aditivne tehnologije gdje se proizvod konstruira na računalu i koriste se materijali manje cijene povećavaju ekonomičnost proizvodnje, pogotovo u slučajevima maloserijske proizvodnje i proizvoda po narudžbi.
2. Povećana kompleksnost – slijedno dodavanje slojeva materijala stvara osnovu aditivne tehnologije i omogućuje izradu proizvoda kompleksne geometrije što kod tradicionalnih načina stvara velike izazove ili u nekim slučajevima potpunu nemogućnost izrade.
3. Prilagodljivo konstruiranje – digitalni aspekt aditivne proizvodnje omogućuje automatizirani pristup konstruiranju, dokumentaciji i proizvodnji kompleksnih inženjerskih sustava, time se smanjuje cijena odnosno mogu se izrađivati visoko prilagodljivi proizvodi prema specifičnim zahtjevima.
4. Smanjenje gubitaka – dobrim iskorištavanjem materijala, aditivna proizvodnja omogućuje smanjene gubitke i troškove materijala za kompleksne geometrije.
5. Distribuiranje proizvodnje – digitalni podaci koji uključuju konstrukcije proizvoda mogu biti globalno dijeljeni što omogućuje bilo kojoj tvrtki da izradi proizvod čime se smanjuje vrijeme isporuke i troškovi konstruiranja povezani s transportom i održavanjem.

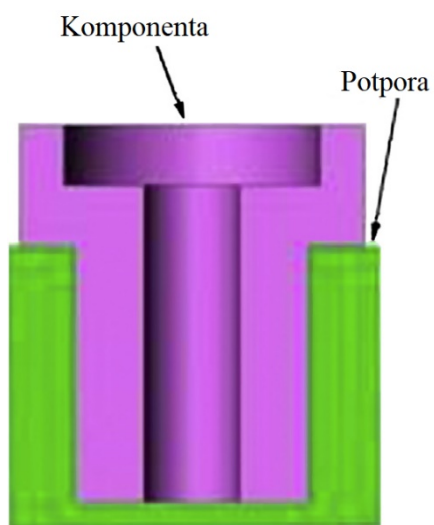
Tablica 1. Razlike između proizvodnih postupaka [25]

	Dodavanje materijala	Oblikovanje materijala	Oduzimanje materijala
Shematski prikaz			
Primjer			
Prednosti	<ul style="list-style-type: none"> • Niska cijena pri niskoj proizvodnji • Moguća visoka kompleksnost • Visoka prilagodljivost 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka kvaliteta materijala • Relativno niska cijena pri visokoj proizvodnji • Prednost u komercijalnoj primjeni 	<ul style="list-style-type: none"> • Niska cijena pri umjerenom proizvodnji • Relativno visoka kvaliteta završne obrade • Nije potreban referentni komad
Nedostaci	<ul style="list-style-type: none"> • Završna obrada • Visoka cijena pri visokoj proizvodnji 	<ul style="list-style-type: none"> • Potrebno proizvesti referentan komad • Moguća samo niska kompleksnost 	<ul style="list-style-type: none"> • Velika količina odvojene čestice • Srednja razina kompleksnosti

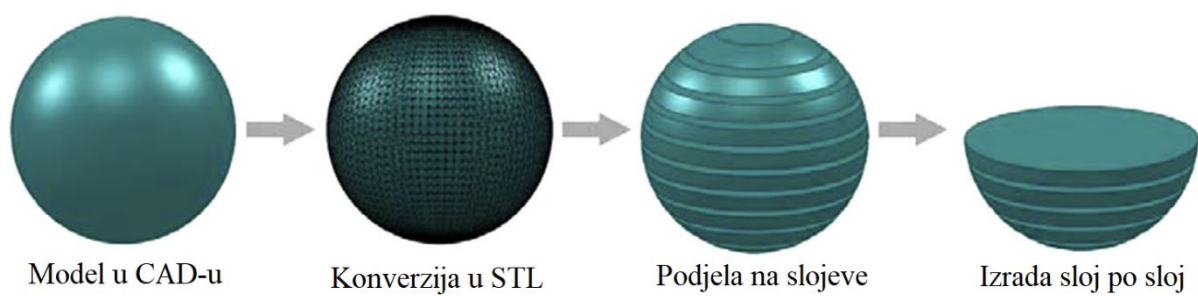
Aditivna proizvodnja započinje stvaranjem virtualnog 3D CAD modela. CAD model uobičajeno mora biti potpuno zatvorenog volumena što znači da ako je model kocka, mora sadržavati svih šest stranica. Nakon toga se CAD datoteka konvertira u format koji je kompatibilan s uređajem aditivne proizvodnje. Najčešće je taj format STL datoteka koja pretvara originalnu CAD datoteku u datoteku koja sadrži model sačinjen od trokutastih površina. Što je veća rezolucija STL datoteke to je kvalitetniji model odnosno sadrži više detalja [Slika 38]. U novije vrijeme razvijeni su napredni STL formati koji dodaju više informacija datoteci kao što su boja i materijal modela, također se razvijaju načini da se „printanje“ vrši direktno iz CAD formata. Zatim se STL datoteka otvori u softveru uređaja aditivne proizvodnje i model se postavlja u najpogodniju orijentaciju za izradu. Orijentacija modela može značajno utjecati na kvalitetu površine i čvrstoću komada. Kod nekih procesa izrade koristi se potporni materijal za prevjese na modelu [Slika 39]. Softver razdvaja model STL datoteke na tanke slojeve [Slika 40] i omogućuje postavljanje parametara izrade kao što su rezolucija (debljina sloja), materijal, brzina i način ispune. [24]



Slika 38. Primjeri rezolucija STL datoteke [24]



Slika 39. Primjer upotrebe potpore pri izradi komada [24]



Slika 40. Proces izrade u aditivnoj proizvodnji [24]

Najčešće korišteni materijali za izradu aditivnom proizvodnjom su polimerni materijali. Kako bi se odabrao prikladan polimer treba obratiti pažnju na kriterije izbora materijala kao što je trenje i trošenje, toplinska i električna izolacija, kemijska postojanost, elastičnost i žilavost. Neki od prikladnih polimera jesu ABS, PA, PC, PMMA i PVC. Kada je odabran prikladan polimer treba se odlučiti za jedan od procesa aditivne proizvodnje koji ima sedam. Ti procesi su stereolitografija (SLA), digitalna obrada svjetla (DLP), hibridni proces SLA/3DP (PolyJet), selektivno lasersko srašćivanje (SLS), 3D ispis (3DP), laminiranje (LOM), taložno srašćivanje (FDM). [26]

3.1. Stereolitografija

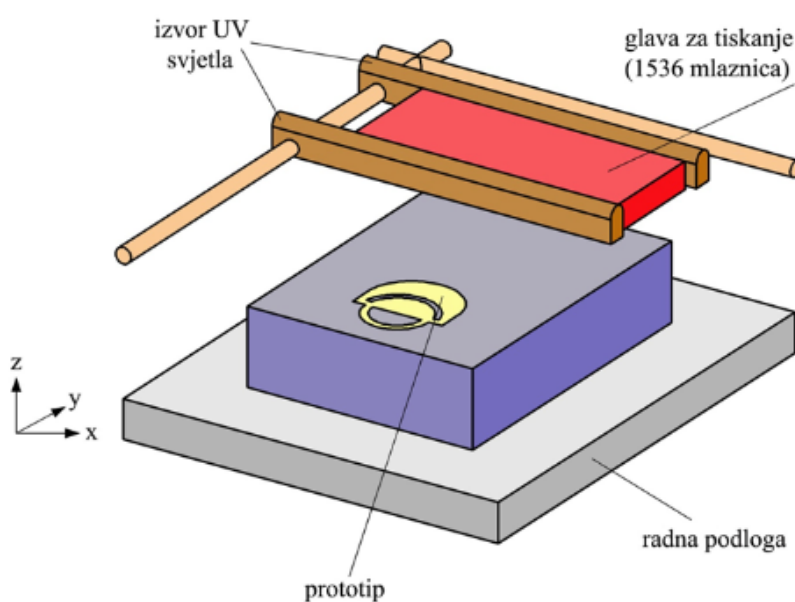
Stereolitografija je proces gdje se ispis odvija u X-Y ravnini i temeljen je na fotopolimerizaciji. Laserski snop osvjetljava sloj polimera zadana oblika presjeka u tekućem stanju. Sloj se skrućuje iznad podloge, a zatim se radna podloga spušta za debljinu jednog sloja nakon čega laser opet osvjetljava novi sloj tekućeg polimera. Na kraju procesa komad se vadi iz tekućeg polimera i ispire se u odgovarajućem otapalu. Komadi mogu biti od mikro razine do velikih dimenzija. Prednosti su visoka kvaliteta površine i visoka razlučivost detalja „printanog“ proizvoda kao i visoka točnost i široki raspon materijala. Nedostaci su mogućnost „printanja“ samo u X-Y ravnini, nekad je potrebno dodatno umrežavanje, proces je spor, troškovi materijala i održavanja su visoki. [26],[27]

3.2. Digitalna obrada svjetla

Digitalna obrada svjetla je unaprjeđenje SLA procesa povećanjem brzine. Točnost odnosno debljina sloja može biti do 0,02 mm. Također se provodi samo u X-Y ravnini. Najčešće korišteni materijali su epoksidne smole, akrilne smole, nano-kompoziti i biokompatibilni materijali. [26]

3.3. PolyJet

PolyJet postupak je kombinacija stereolitografije i 3D ispisa [Slika 41]. To je ujedno i aditivna tehnologija kojom će se izraditi nekoliko komponenata tribometra za metodu klizanja „prizme po prstenu“ čija konstrukcija će biti opisana u ovome radu. Ovdje se „printa“ kapljevit polimer koji se zatim fotopolimerizira pomoću izvora UV svjetla. „Printanje“ je u X-Y ravnini. Troškovi materijala su dosta visoki, ali prednost je što se može vršiti višekomponentno odnosno višebojno „printanje“. [26],[27]



Slika 41. Shematski prikaz izrade komada aditivnom tehnologijom PolyJet [26]

3.4. Selektivno lasersko srašćivanje

Selektivno lasersko srašćivanje je postupak gdje se djelovanjem visoke temperature lasera srašćuju čestice materijala. Kada se spusti radna podloga nanosi se novi sloj i tako do gotovog komada. Materijali mogu biti plastomeri, metali (čelik, titan, aluminij) i mješavine materijala (gradivni materijal i vezivo). Točnost odnosno debljina sloja može biti do 0,05 mm. Koristi se praškasti materijal, a osim X-Y ravnine podržana je i Z os. Nije nužno koristiti potporu. Veći dio neiskorištenog materijala može se ponovno koristiti. Nedostatak je relativno niska kvaliteta površine kao i to što se proces odvija pri višim temperaturama pa tijekom hlađenja proizvoda može doći do deformacija. Također proizvodi su porozni i nisu u boji. [26],[27]

3.5. 3D ispis

3D ispis temeljen je na principu tiskanja veziva po sloju materijala u obliku praha. Time se omogućuje prijanjanje slojeva. Spuštanjem radne podloge za visinu pojedinoga sloja omogućuje se taloženje novoga sloja praha. Kada je komad izveden do kraja ostavlja se u komori određeno vrijeme da se postigne tražena čvrstoća. Materijali koji su pogodni za ovaj postupak su polimeri (PMMA i poliuretan), gips, šećer, metalni prahovi i keramike. 3D ispis izvodi se pri velikim brzinama i pri tome je mala potrošnja energije. Materijal koji nije iskorišten može se ponovno koristiti, osim toga materijal je relativno jeftin kao i sam uređaj. Nedostatak postupka je loša dimenzijska tolerancija za veće dijelove i loša površinska hrapavost zbog čega treba dodatna obrada površine. Proizvodi su nakon „printanja“ krhki te ih treba naknadno obraditi. [26],[27]

3.6. Laminiranje

Laminiranje se sastoji od lasera ili noža koji izrezuje slojeve u potrebnom obliku preko kojih prelazi zagrijani valjak pri čemu se pokreće vezivno sredstvo i spaja sloj s prethodnim. Brzina izrade je velika i materijal je relativno jeftin. Točnost „printanih“ dijelova je visoka. Nedostatak je 90 % neiskorištenost materijala pri čemu se taj materijal ne može ponovno koristiti. Uklanjanje viška materijala je otežano i može uzrokovati oštećenje proizvoda. [26],[27]

3.7. Taložno srašćivanje

Zadnja tehnologija aditivne proizvodnje koja se koristi je taložno srašćivanje. Osnova ovoga procesa je omekšani polimer koji kroz sapnicu smještenu na glavi uređaja izlazi u obliku niti. Napravljeni sloj se hladi i skrućuje te se na njega veže novi sloj omekšanog polimera. Materijali koji se često koriste su polimeri PLA, ABS i PET, zatim metali i keramika. Točnost odnosno debljina slojeva je minimalno 0,1 mm. Prednosti ovakve tehnologije su jednostavni printeri i održavanje. Manje je inicijalno investiranje u odnosu na ostale tehnologije i manja je potrošnja energije. Nedostatak je mogućnost izrade samo u X-Y ravnini, potrebna je potporna struktura kod prevjesa, vidljivi su pojedini slojevi na bočnim stjenkama gotovog komada i kvaliteta površine je niža od procesa gdje se koriste kapljevit materijali. [26],[27]

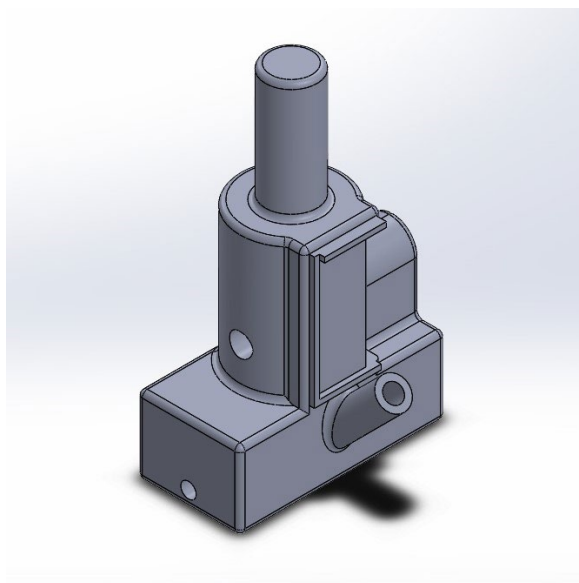
4. KONSTRUKCIJA TRIBOMETRA

U ovome poglavlju će se opisati postupak izrade tribometra za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“, uz navođenje svih potrebnih komponenata za mehanički dio uređaja kao i onih komponenata odnosno senzora koji su potrebni za prikupljanje podataka. Spomenuti će se i način zapisivanja podataka u računalu.

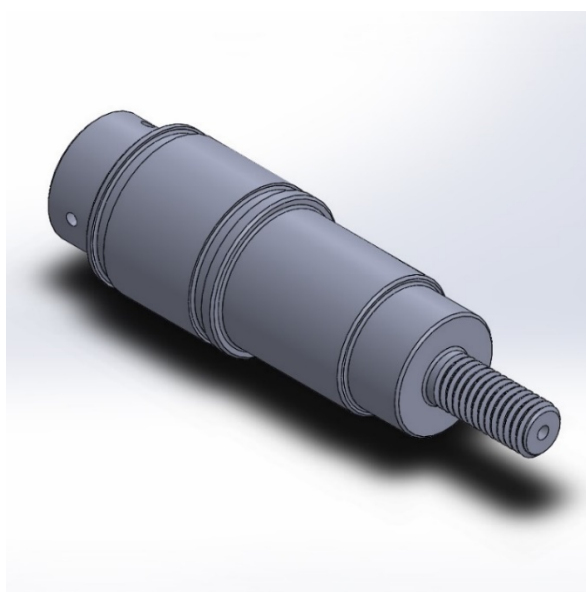
4.1. Mehanička izvedba tribometra

Osnova tribometra [Slika 47] za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“ je stolni tokarski stroj proizvođača Proxxon model DB250. Tokarilica je duljine 500 mm. Izbor tokarilice je proveden zbog dobre momentne karakteristike elektromotora i mirne rotacije stezne glave na koju se postavlja vratilo s ispitnim prstenom. Brzina elektromotora je u rasponu od 1000 o/min do 6000 o/min uz stalni zakretni moment. Još jedan način pokretanja uređaja je primjena električnog odvijača s brzinom vrtnje u praznom hodu od 200 o/min. Već spomenuto vratilo duljine 105 mm s jedne strane je pričvršćeno i centrirano steznom glavom dok se druga strana održava centriranom pomoću tokarskog konjica. Na kraju vratila je navoj M10 na kojemu se nalazi disk za prekidanje svjetlosnog snopa senzora brzine, pomoću čega se mjeri brzina vrtnje vratila. Na dijelu vratila s najvećim promjerom (30 mm) smješten je unutarnji prsten valjnog ležaja koji služi kao dio ispitnog tribopara „prizma – prsten“. Na prsten se pritišće prizma odnosno uzorak koji je učvršćen vijkom u nosač uzorka. Na nosač uzorka postavljaju se utezi čijom težinom se postiže djelovanje normalne sile koja djeluje na kontaktnoj površini prizme i prstena. Nosač uzorka je preko zglobnog spoja povezan na mjernu ćeliju čime se osigurava da se na ćeliju prenosi samo tangencijalna sila, odnosno sila trenja između prizme i prstena. Osim toga spoj nosača uzorka i mjerne ćelije u horizontalnoj ravnini je izveden što bliže paralelnoj ravnini kontaktne površine tribopara da bi se smanjilo djelovanje dodatnih zakretnih momenata između mjerne ćelije i uzorka te time omogućilo što točnije mjerenje sile trenja.

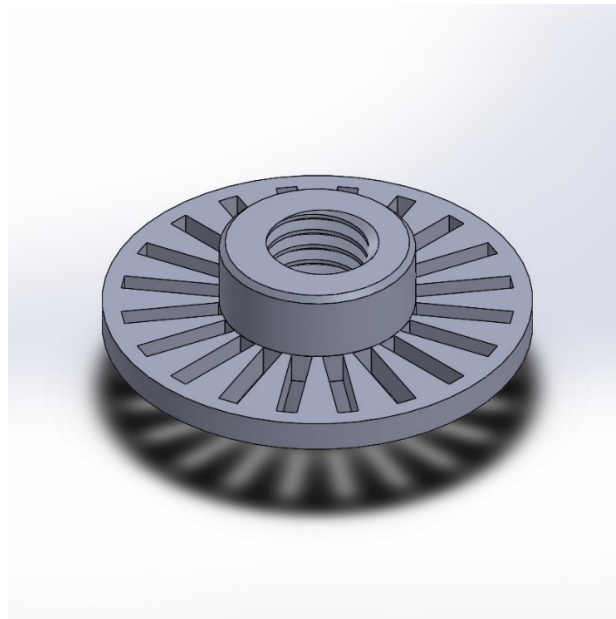
Nosač uzorka [Slika 42], vratilo [Slika 43] i disk [Slika 44] izrađeni su aditivnom tehnologijom PolyJet koja omogućuje jednostavnu izradu dijelova nevezano uz kompleksnost geometrije. Vrijeme izrade je 6 sati i 34 minute, a visina pojedinog sloja 16 μm . Materijal od kojeg su dijelovi izrađeni je VeroClear-RGD810, kruti prozirni materijal sličan PMMA. Svi dijelovi su izrađeni istovremeno na uređaju [Slika 45] proizvođača Stratasys model Connex350 [Slika 46].



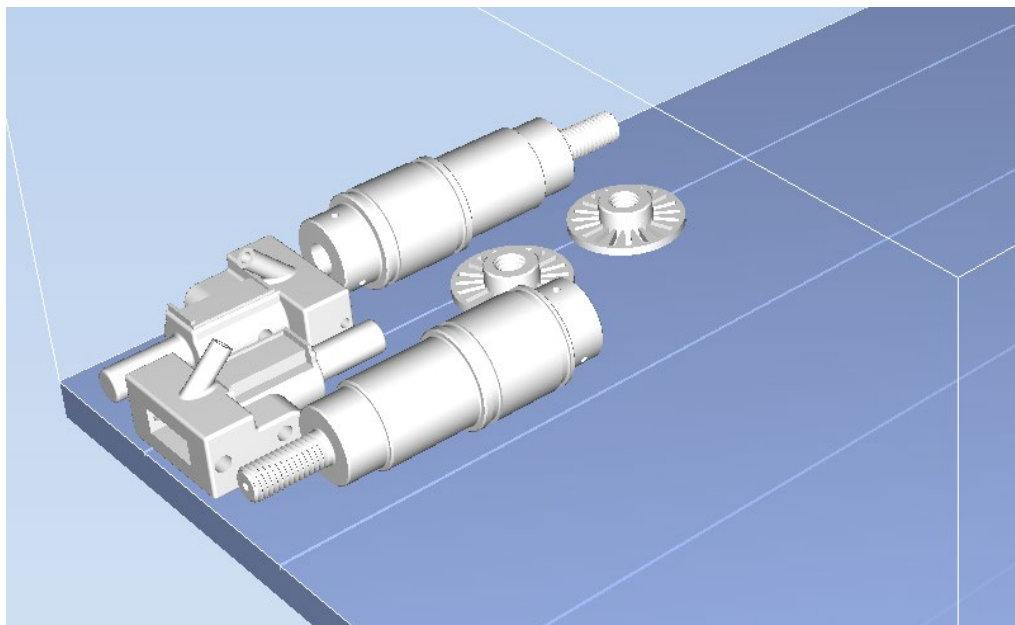
Slika 42. CAD model nosača uzorka izrađenog tehnologijom PolyJet



Slika 43. CAD model vratila izrađenog tehnologijom PolyJet



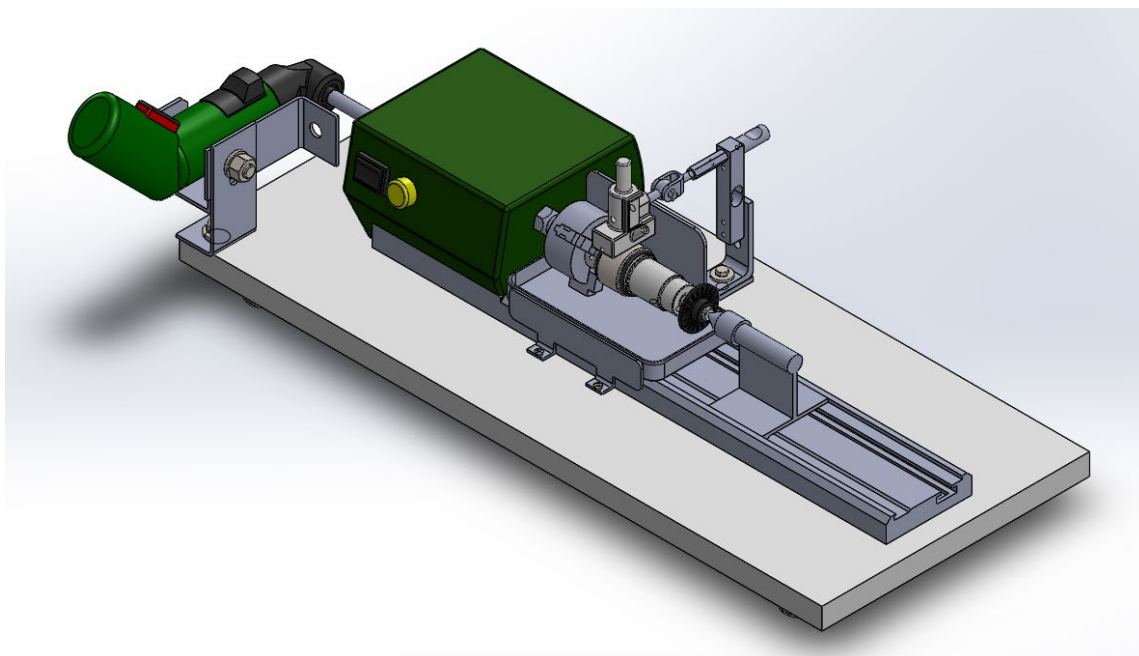
Slika 44. CAD model diska izrađenog tehnologijom PolyJet



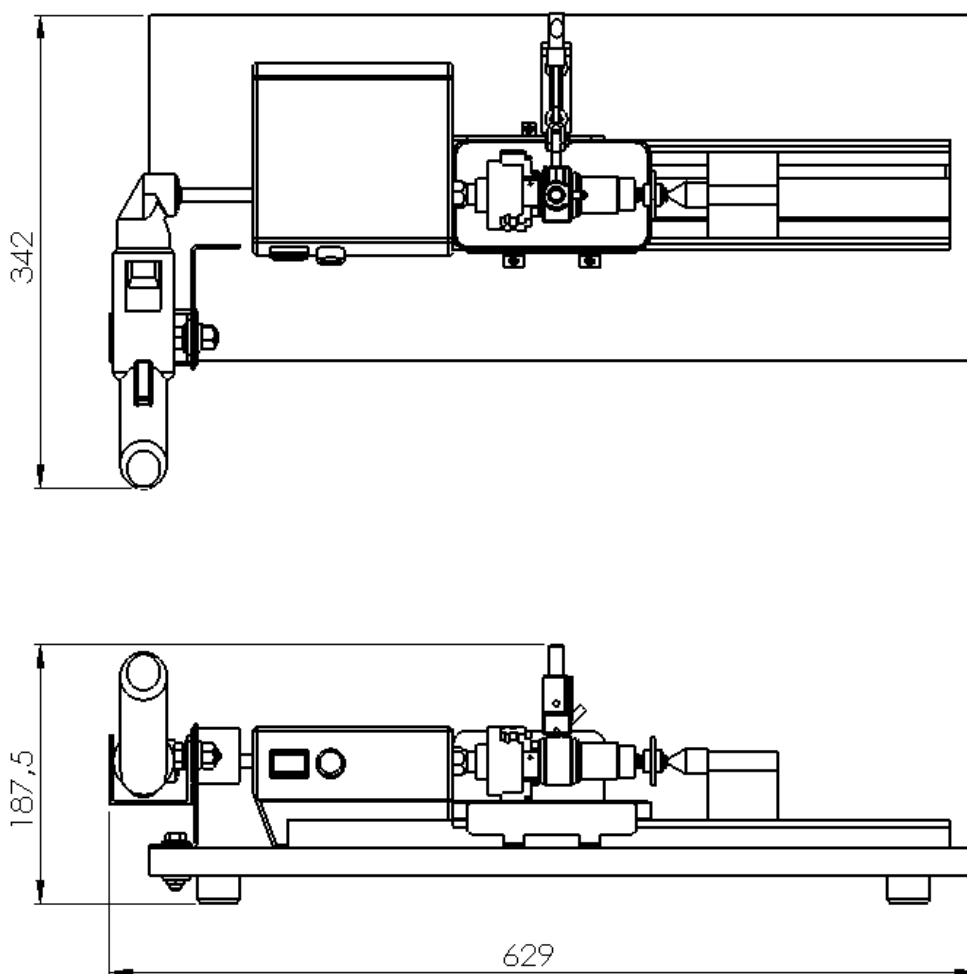
Slika 45. Dijelovi smješteni na radnoj podlozi printera



Slika 46. 3D printer Stratasys Connex350



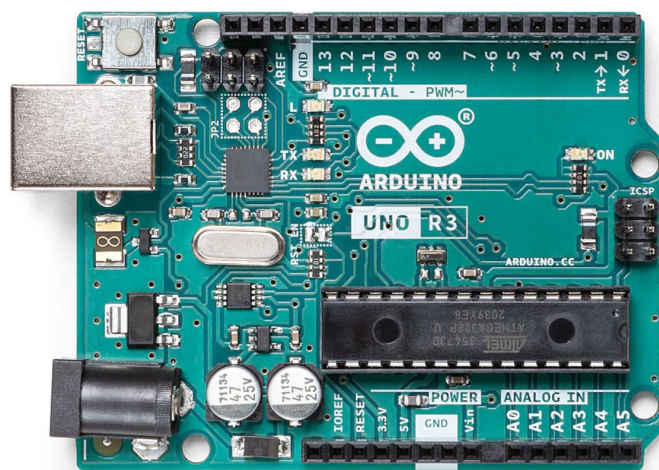
Slika 47. 3D CAD model tribometra za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“



Slika 48. Tlocrt i nacrt tribometra za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“

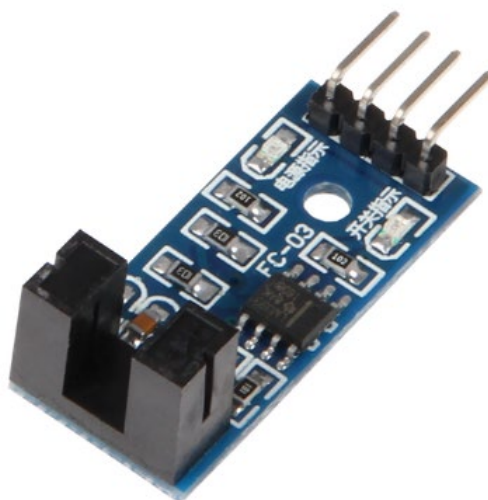
4.2. Sustav za prikupljanje podataka s tribometra

Glavni dio sustava za prikupljanje podataka s tribometra klizanjem „prizme po prstenu“ je mikrokontroler Arduino, model Uno Rev3 [Slika 49]. Mikrokontroler se napaja preko USB kabela koji je povezan na računalo. USB kabelom se ujedno šalju i primaju podaci između mikrokontrolera i računala. Potreban napon za rad mikrokontrolera iznosi 5 V. Na ulazne portove povezuju se senzori. U ovoj konfiguraciji to su četiri različita senzora: senzor brzine, senzor sile, akcelerometar i senzor temperature. Senzori šalju podatke i ujedno se napajaju preko Arduina. Senzori su pričvršćeni na tribometar na specifične pozicije koje omogućuju svakom senzoru najbolje mjerenje. Podatke sa senzora Arduino dalje obrađuje i šalje ih na računalo gdje se bilježe u Excel tablici.



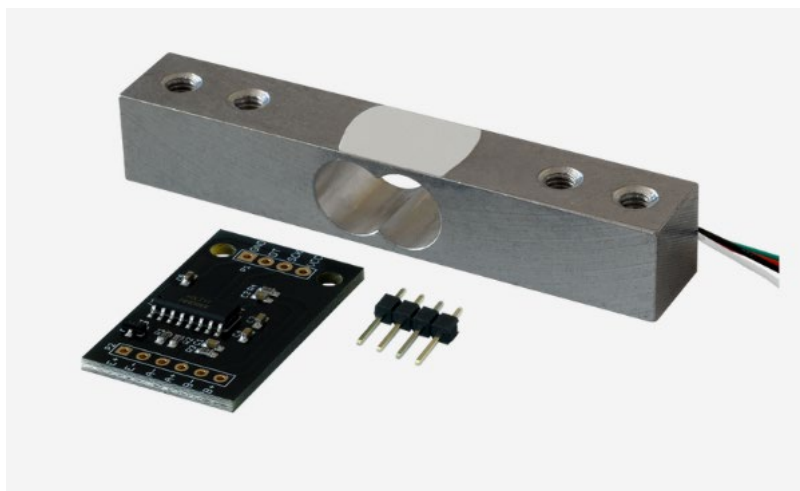
Slika 49. Mikrokontroler Arduino Uno Rev3 [28]

Senzor brzine [Slika 50] sastoji se od modula LM393 koji služi kao komparator napona i sadrži odašiljač i prijemnik infracrvene svjetlosti. Kada se između odašiljača i prijemnika postavi prepreka signal se šalje na mikrokontroler. Kao prepreka je korišten disk s prorezima postavljen na vratilo na kojem je smješten i ispitni prsten.



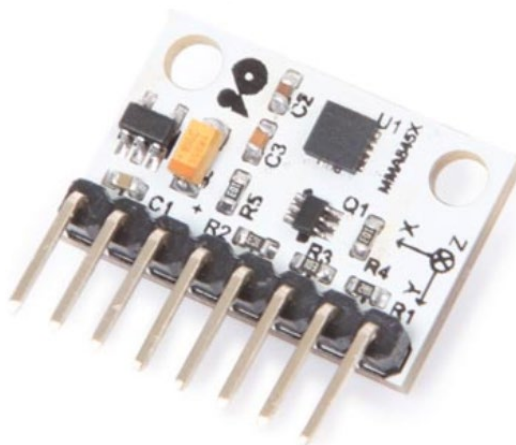
Slika 50. Senzor brzine Joy-IT LM393 [29]

Senzor sile [Slika 51] čini modul HX711 koji služi kao pojačalo signala, ali i analogno digitalni pretvornik. Drugi dio senzora je mjerni pretvornik sile koji se naziva mjerna ćelija. Sastoji se od metalnog bloka sa oslabljenim dijelom na kojemu su smještene tenzometarske trake. Kada se silom djeluje na mjernu ćeliju mijenja se otpor u tenzometarskim trakama, a samim time i napon koji se šalje na modul HX711. Promjene napona su jako male zbog čega je potrebno pojačalo kako bi se dobio upotrebljiv signal. Senzor se prije korištenja za mjerenje mora kalibrirati s poznatom vrijednošću sile kako bi ispravno mjerio silu trenja u triboparu.



Slika 51. Senzor sile Joy-IT HX711-05 [30]

Akcelerometar [Slika 52] koristi modul MMA8452Q koji se montira na dio kojemu se želi mjeriti vibracija, odnosno ubrzanje. U ovoj konfiguraciji tribometra akcelerometar se montira na nosač uzorka jer je nosač kruto povezan s prizmom te se minimalno energije vibracija gubi na putu od površine između prizme i prstena do mjernog modula. Korišteni modul ima mogućnost mjerenja u sve tri osi (X , Y i Z) čime se u sve tri ravnine mjeri ubrzanje u jedinici gravitacijskog ubrzanja g . Akcelerometrom se mjere vibracije pri čemu se uočavaju promjene u frekvenciji i amplitudi vibracija tijekom trošenja.



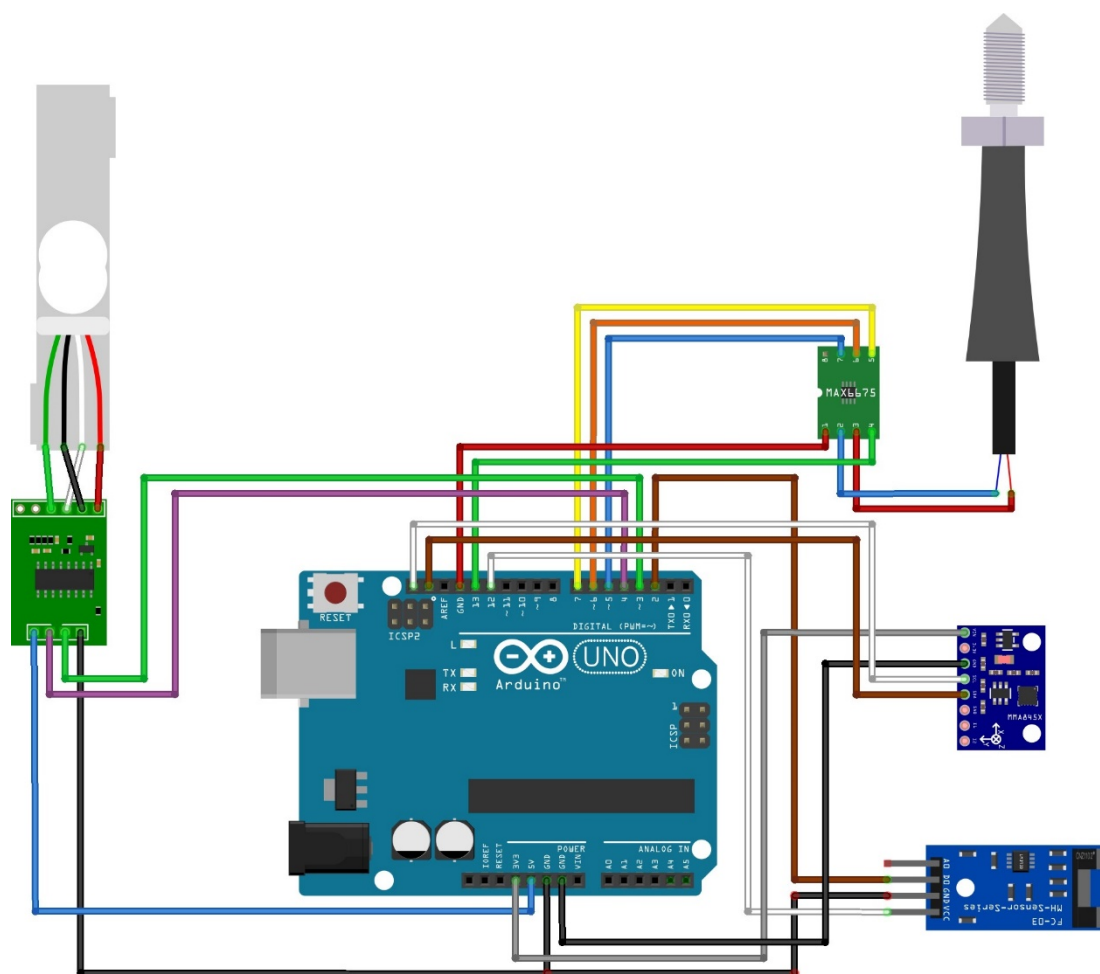
Slika 52. Senzor akceleracije Velleman VMA208 [31]

Senzor temperature [Slika 53] se sastoji od modula MAX6675 koji ima ulogu analogno digitalnog pretvornika povezanog s termoelementom tip K. Analogni signal s termoelementa šalje se na modul gdje se pretvara u digitalni signal. Termoelement je smješten na nosaču uzorka, a kroz provrt na nosaču u direktnom je kontaktu s prizmom da bi se mogla što točnije izmjeriti temperatura neposredno uz kontakt prizme i prstena. Pojavom trenja između površina tribopara oslobađa se toplinska energija zbog koje raste temperatura prizme što će biti zabilježeno pomoću senzora temperature.

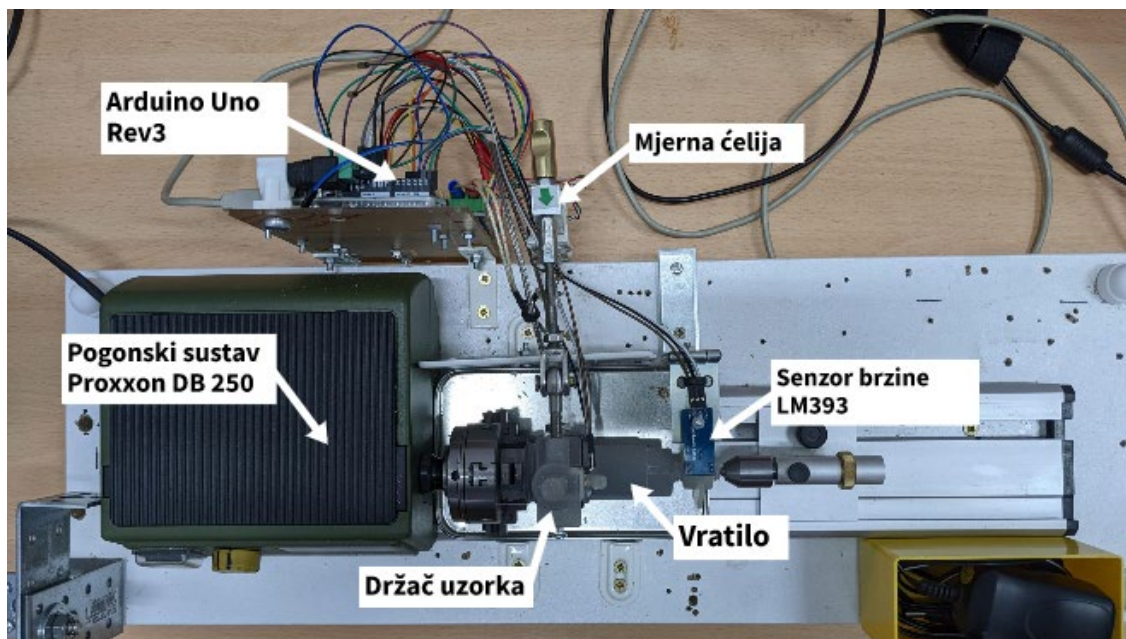


Slika 53. Senzor temperature, modul MAX6675 i termoelement [32]

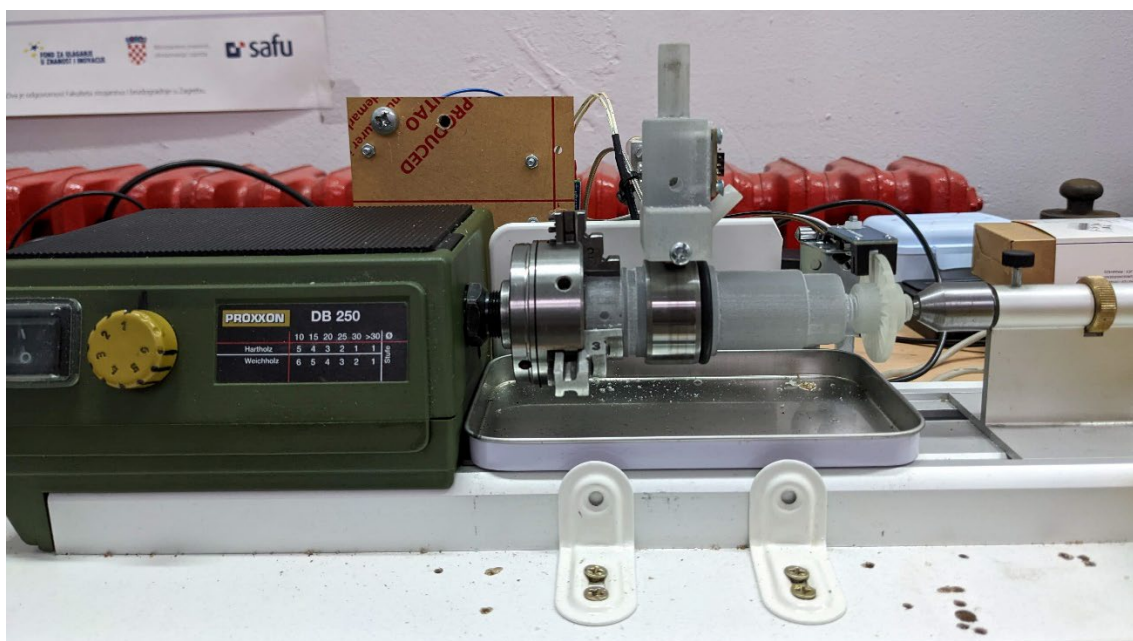
Na slici [Slika 54] prikazana je shema spajanja senzora na mikrokontroler s odgovarajuće označenim ulazno/izlaznim vezama i bojama vodiča. Upravljanje mikrokontrolerom provedeno je primjenom računalnog programa Arduino u kojem je napisan niz kod za uključivanje rada mikrokontrolera i senzora te prikupljanje podataka iz senzora u istom vremenskom taktu (frekvenciji uzorkovanja) u Excel datoteci. Vremenski interval prikupljanja podataka koji podržavaju svi primijenjeni senzori iznosi 0,641 s, odnosno frekvencija uzorkovanja iznosi $f = 1,56 \text{ Hz}$.



Slika 54. Shematski prikaz spajanja mikrokontrolera sa sensorima



Slika 55. Tribometar za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“ s naznačenim vidljivim komponentama



Slika 56. Drugi pogled tribometra za metodu ispitivanja trošenja klizanjem „prizme po prstenu“

5. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA

5.1. Plan pokusa

Materijal prizme je ležajna bronca, a materijal prstena čelik 100Cr6. Za ispitivanje rada tribometra primijenjen je prsten oznake NTN 1R30X35X17 [Slika 57]. Ispitani su triboparovi u kojima je prizma (7x7x14 mm) izrađena od ležajne bronce, a prstenovi su u sljedećim stanjima: kaljeno i popušteno, nitrirano u plazmi, prevučeni prevlakama PACVD TiN i PACVD TiCN. Navedeni triboparovi ispitani su pod opterećenjem koje se sastoji od držača uzorka zajedno s prizmom (90 g) i utega (302 g) pri brzini vrtnje prstena 180 o/min i 1200 o/min u uvjetima suhog trenja [Tablica 2].



Slika 57. Prsten za ispitivanje kliznog trošenja oznake NTN 1R30X35X17 [33]

Tablica 2. Oznake i uvjeti ispitivanja

Oznaka ispitivanja		Toplinska obrada prstena	Brzina vrtnje prstena (o/min)
A	A1	Neprevučeno	180
	A2		1200
B	B1	Nitrirano u plazmi	180
	B2		1200
C	C1	PACVD TiN	180
	C2		1200
D	D1	PACVD TiCN	180
	D2		1200

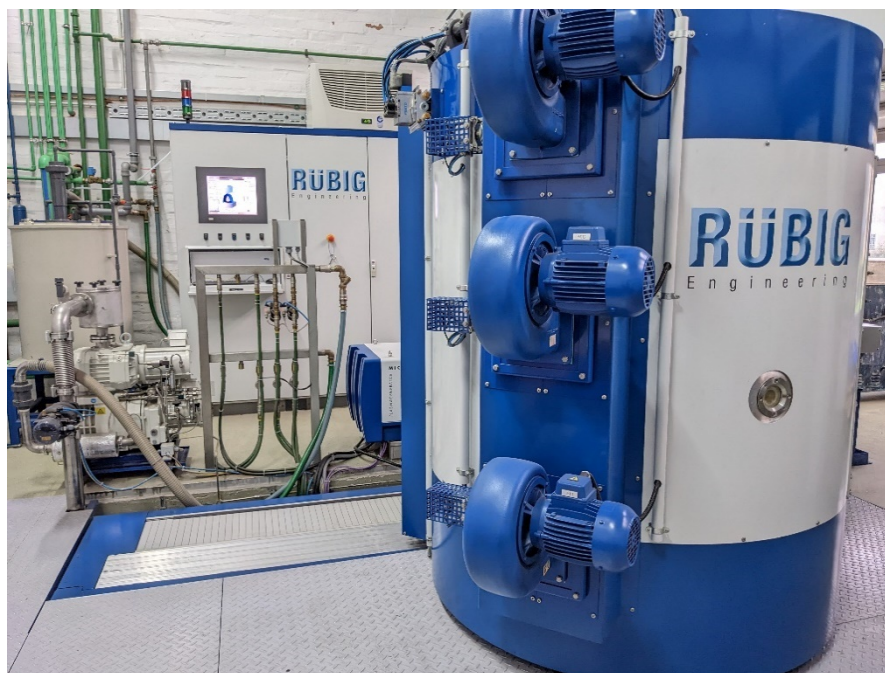
Za svako ispitivanje korišten je novi prsten i nova prizma. Na prstenovima i prizmama snimljen je profil hrapavosti i određeni su vertikalni parametri hrapavosti. Trajanje ispitivanja trenja i trošenja za svaki tribopar iznosi 30 sekundi uz prikupljanje podataka svakih 0,641 s (1,56 Hz). Tijekom mjerenja prikupljaju se podaci sa senzora brzine, sile, temperature i akceleracije. Prije početka ispitivanja provedeno je umjeravanje senzora brzine vrtnje i senzora sile. Nakon 30 sekundi trošenja na prizmi je svjetlosnim mikroskopom Toolcraft DigiMicro Profi UM012CH [Slika 58] uz pomoć softvera MicroCapture Plus izmjerena širina traga trošenja.



Slika 58. Svjetlosni mikroskop Toolcraft DigiMicro Profi UM012CH [34]

5.2. Nitriranje i prevlačenje prstenova

Nitriranje i prevlačenje prstenova provedeno je u industrijskoj vakuumskoj peći Rübiger PC 70/90 S [Slika 59]. Jednom prstenu je modificirana površina postupkom nitriranja u plazmi, a dva prstena su prevučena postupkom PACVD. Prevlake su titanij nitrid (TiN), odnosno titanij karbonitrid (TiCN). Parametri za pojedine postupke su dani u tablicama [Tablica 3],[Tablica 4],[Tablica 5].



Slika 59. Uređaj Rübige PC 70/90 S

Tablica 3. Parametri nitriranja u plazmi

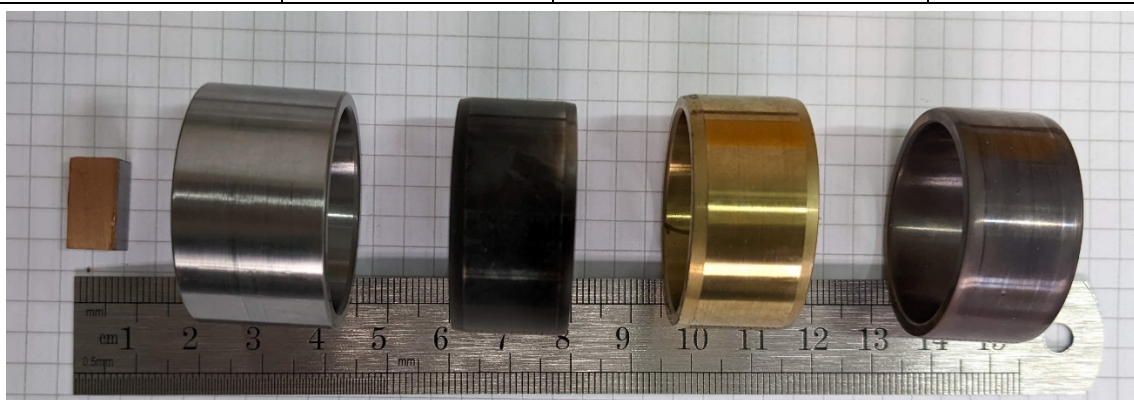
Parametri postupka	Grijanje	Ionsko otprašivanje	Nitriranje u plazmi
$T, ^\circ\text{C}$	400	520	480
t, h	3	2	8
p, mbar	2	2	2
Protok $\text{N}_2, \text{l/h}$	-	20	60
Protok $\text{H}_2, \text{l/h}$	200	200	20
Protok $\text{Ar}, \text{l/h}$	0	10	10
$P_{pl.}, \text{W}$	-	1500	3000

Tablica 4. Parametri PACVD prevlačenja TiN

Parametri postupka	Grijanje	Ionsko otprašivanje	PACVD TiN
$T, ^\circ\text{C}$	400	520	520
t, h	3	2	1,5
p, mbar	2	2	2
Protok $\text{N}_2, \text{l/h}$	-	20	45
Protok $\text{H}_2, \text{l/h}$	200	200	250
Protok $\text{Ar}, \text{l/h}$	0	10	13
TiCl_4	-	-	15
P_{pl}, W	-	1500	3000

Tablica 5. Parametri PACVD prevlačenja TiCN

Parametri postupka	Grijanje	Ionsko otprašivanje	PACVD TiCN
$T, ^\circ\text{C}$	400	520	520
t, h	3	2	3
p, mbar	2	2	2
Protok $\text{N}_2, \text{l/h}$	-	20	45
Protok $\text{H}_2, \text{l/h}$	200	200	250
Protok $\text{Ar}, \text{l/h}$	0	10	13
TiCl_4	-	-	15
CH_4	-	-	10
P_{pl}, W	-	1500	3000



Neprevučeno

Nitrirano u
plazmiPACVD
TiNPACVD
TiCN

Slika 60. Prizma i prstenovi korišteni u pokusu

5.3. Umjeravanje senzora

Prije nego što se počne koristiti u ispitivanju, senzor sile se mora kalibrirati, a brzina okretaja vretena se prvo mora izmjeriti tahometrom da se zatim može izračunati odstupanje senzora brzine od stvarnih vrijednosti preko standardne devijacije.

Masa utega od 100 grama provjerena je na preciznoj laboratorijskoj vagi Velleman VTBAL22. Zatim se na Arduino Uno učitava program za kalibriranje i poznatom silom odnosno masom opterećena je mjerna ćelija kroz deset ponavljanja. Time je dobiveno deset podataka za koje se računa, aritmetička sredina (\bar{x}), standardna devijacija (σ) i relativna standardna devijacija (V) koja označuje točnost rezultata ispitivanja.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (6)$$

Tablica 6. Dobiveni podaci za kalibraciju

Ispitivanje	Podaci
1.	-19584
2.	-19832
3.	-21881
4.	-20523
5.	-21080
6.	-20118
7.	-21928
8.	-20470
9.	-20831
10.	-21637
Aritmetička sredina:	-20788,4
Standardna devijacija:	835,7274
Relativna standardna devijacija:	-4,02016 %

Podatak aritmetičke sredine podijeli se sa silom ostvarenom utegom poznate mase (100 g) što je 1 N. Time se dobiva da je faktor kalibracije -20788,4. Taj broj se upisuje u programski kod za upravljanje tribometrom kako bi senzor sile davao točne vrijednosti sile trenja.

Brzina vrtnje vretena koja se registrira na senzoru ispitana je mini tahometrom UNI-T UT373. Uzeto je deset podataka s tahometra i senzora brzine te je izračunata standardna devijacija i uspoređena su odstupanja.

Tablica 7. Dobiveni podaci tahometra i senzora brzine

Ispitivanje	Podaci tahometra, o/min	Podaci senzora brzine, o/min
1.	1206,4	1150
2.	1207,5	1150
3.	1210,8	1150
4.	1207,4	1150
5.	1208,0	1150
6.	1207,2	1153
7.	1208,9	1153
8.	1210,1	1153
9.	1209,6	1155
10.	1211,8	1153
Aritmetička sredina:	1208,77	1151,7
Standardna devijacija:	1,762	1,889
Relativna standardna devijacija:	0,146 %	0,164 %

Prema dobivenim rezultatima za relativnu standardnu devijaciju može se vidjeti da senzor brzine prikazuje približno istu vrijednost brzine vratila kao i tahometar te je odstupanje kroz deset mjerenja slično.

Tablica 8. Očitavanja senzora temperature

Ispitivanje	Temperatura, °C
1.	24
2.	24,5
3.	24
4.	24,5
5.	24,5
6.	24,75
7.	24,5
8.	24,25
9.	24,25
10.	25
Aritmetička sredina:	24,425
Standardna devijacija:	0,313
Relativna standardna devijacija:	1,281 %

Senzor temperature kroz deset očitavanja prosječno odstupa od aritmetičke sredine 1,281 %.

6. REZULTATI ISPITIVANJA

6.1. Hrapavost površine

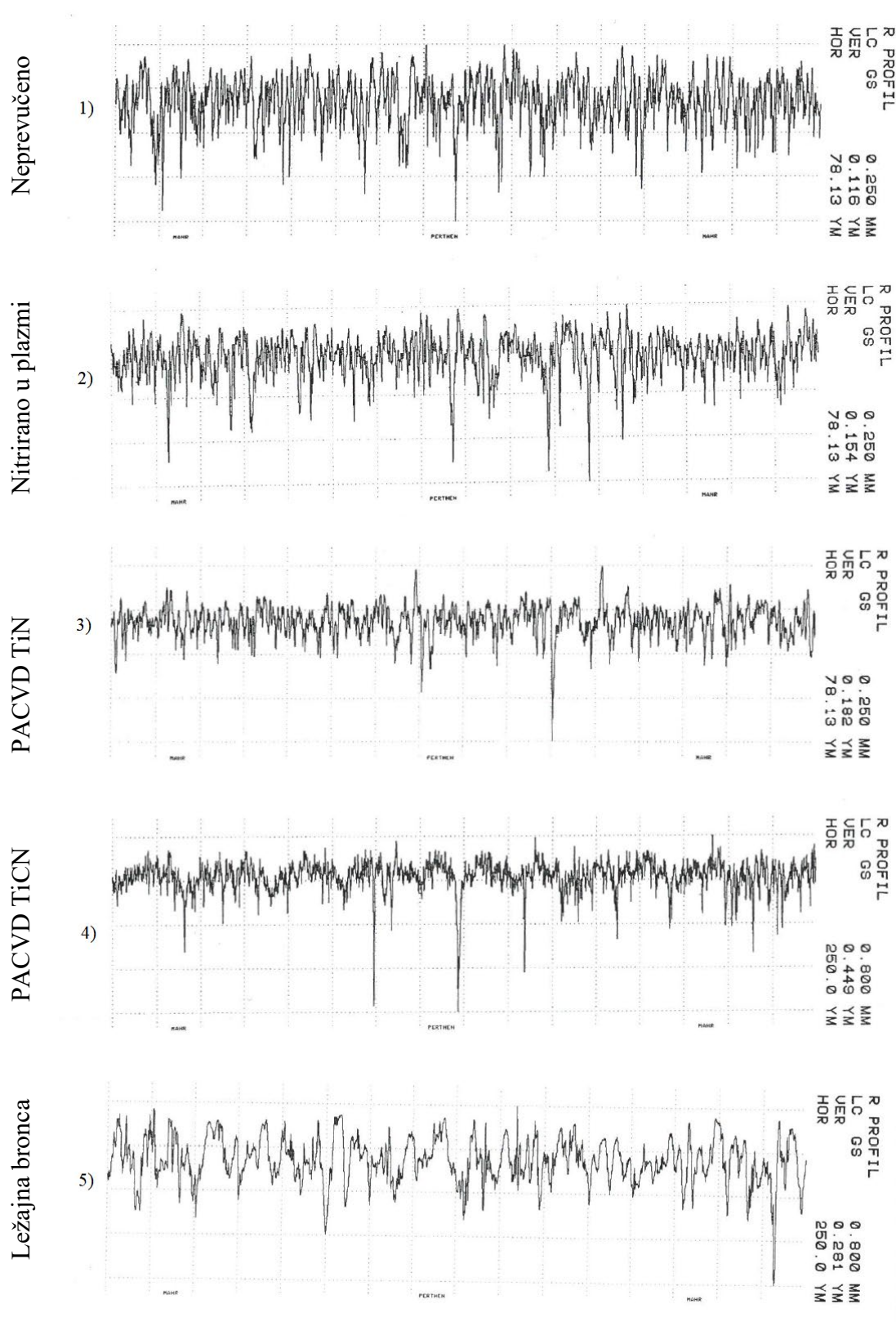
Hrapavost površine ispitana je za sve prstenove i prizmu koji se koriste u pokusu, a to su:

- 1) neprevučeni prsten 100Cr6
- 2) prsten nitriran u plazmi
- 3) prsten prevučen prevlakom TiN
- 4) prsten prevučen prevlakom TiCN
- 5) prizma od ležajne bronce.

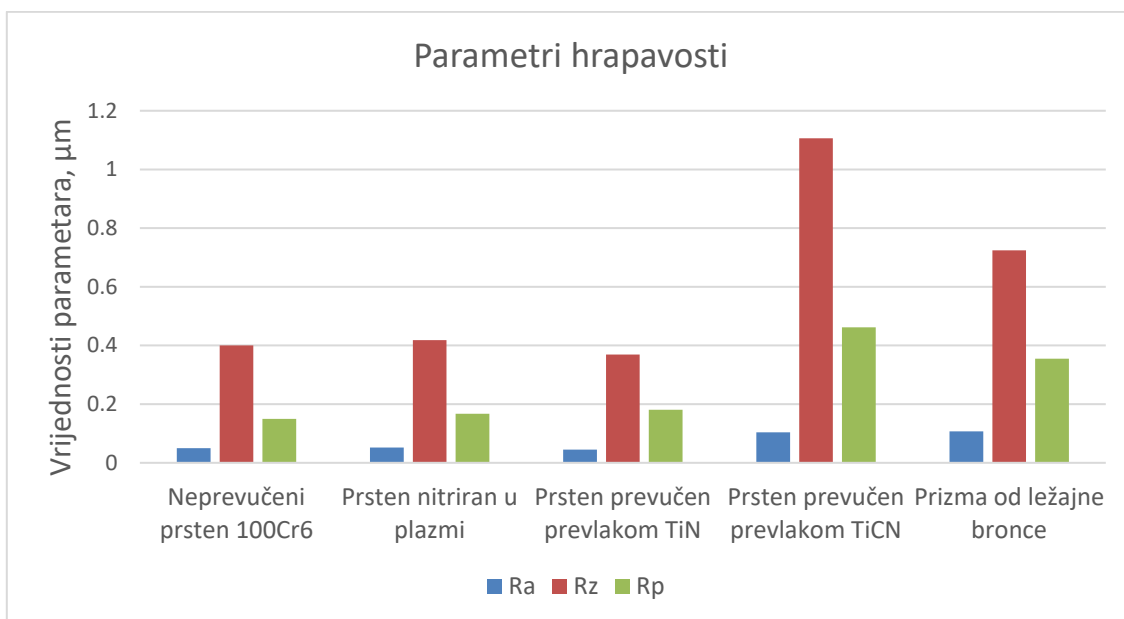
Na svakom uzorku izmjereni su parametri hrapavosti površine koji uključuju srednje aritmetičko odstupanje profila R_a , srednju visinu neravnina R_z i maksimalnu visinu vrha profila R_p kroz 5 ponavljanja. U tablici [Tablica 9] nalaze se srednje vrijednosti parametara hrapavosti, a profili hrapavosti dani su na slici [Slika 61]. Na slici [Slika 62] je prikazan histogram srednje vrijednosti parametara hrapavosti za pojedini uzorak.

Tablica 9. Srednje vrijednosti parametara hrapavosti

Parametri hrapavosti	Neprevučeni prsten 100Cr6	Prsten nitriran u plazmi	Prsten prevučen prevlakom TiN	Prsten prevučen prevlakom TiCN	Prizma od ležajne bronce
$R_a, \mu\text{m}$	$0,050 \pm 0,003$	$0,052 \pm 0,020$	$0,045 \pm 0,002$	$0,104 \pm 0,018$	$0,107 \pm 0,031$
$R_z, \mu\text{m}$	$0,400 \pm 0,039$	$0,418 \pm 0,233$	$0,369 \pm 0,036$	$1,106 \pm 0,215$	$0,724 \pm 0,578$
$R_p, \mu\text{m}$	$0,150 \pm 0,003$	$0,167 \pm 0,172$	$0,181 \pm 0,025$	$0,462 \pm 0,090$	$0,355 \pm 0,683$



Slika 61. Profili hrapavosti prizme i ispitnih prstenova



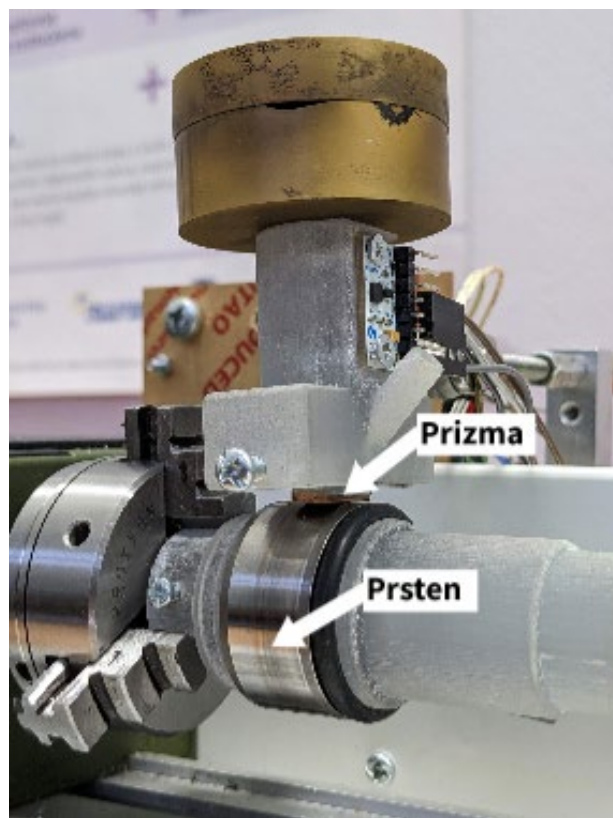
Slika 62. Histogram srednje vrijednosti parametara hrapavosti

Iz slike [Slika 62] uočava se zadržavanje sličnih srednjih vrijednosti parametara hrapavosti prstena nitriranog u plazmi ili prevučenog prevlakom PACVD TiN u odnosu na neprevučeni prsten. Prevlačenje prevlakom PACVD TiCN povećalo je hrapavost površine za 175 % u odnosu na neprevučenu površinu. Hrapavost površine prizme brušena je brusnim papirom gradacije #1000.

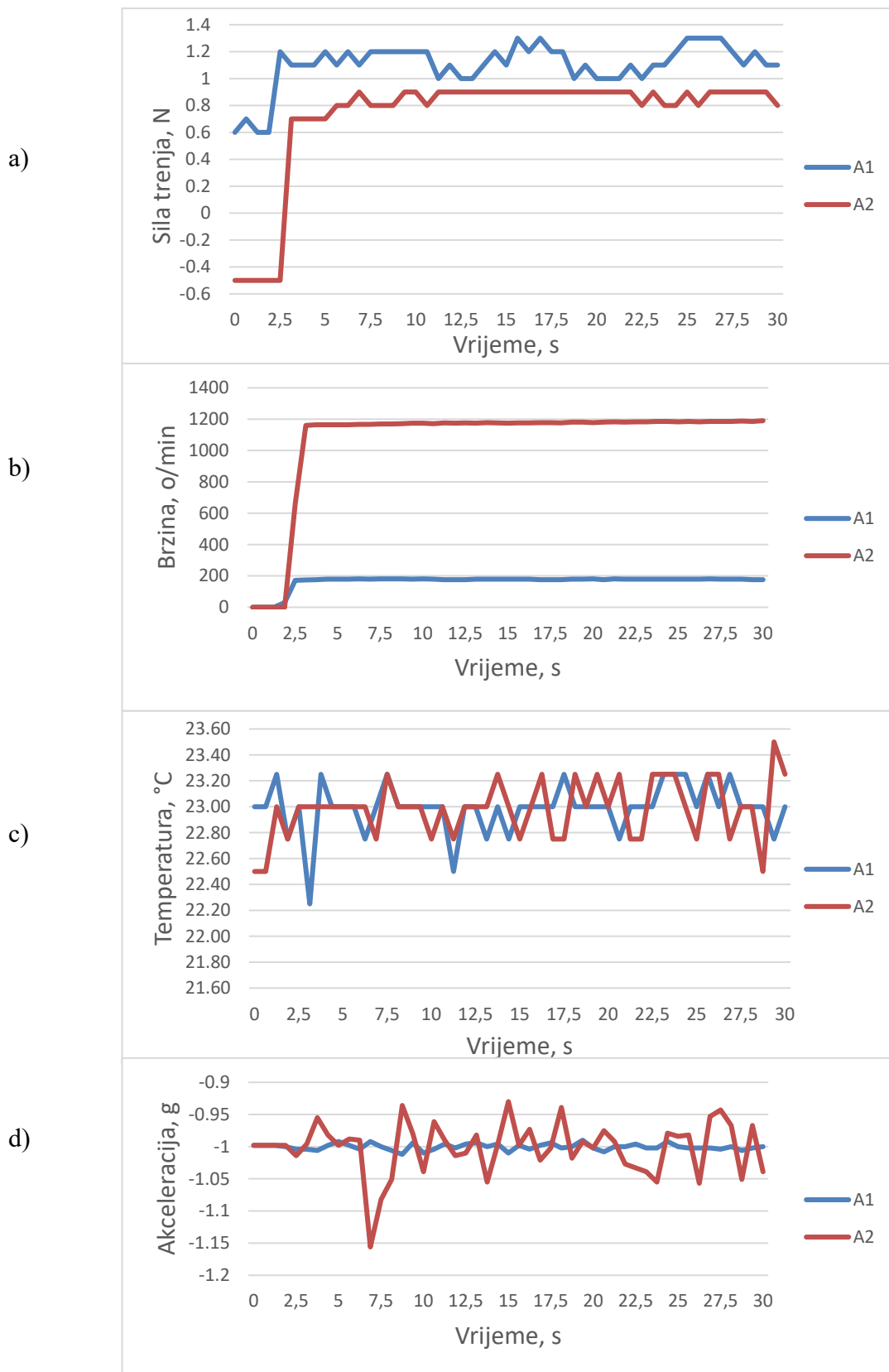
6.2. Ispitivanje faktora trenja

6.2.1. Ispitivanje tribopara „prizma/neprevučeni prsten“

Prosječna sila trenja tijekom rada uređaja za ispitivanje A1 iznosi 1,14 N, a pri A2 iznosi 0,87. Normalna sila tijekom oba ispitivanja je 3,845 N što je ostvareno masom utega i nosačem uzorka. Kada se sila trenja i normalna sila uvrste u jednadžbu (1) dobiva se za A1 koeficijent trenja 0,3, a za A2 0,22. Prosječna temperatura tijekom oba ispitivanja iznosi 23 °C. Prosječna brzina vrtnje vratila pri ispitivanju A1 iznosi 178,42 o/min, a pri A2 1176,82 o/min. Na dijagramu akceleracije može se vidjeti da su pri manjoj brzini ispitivanja mnogo manje vibracije između površina tribopara.



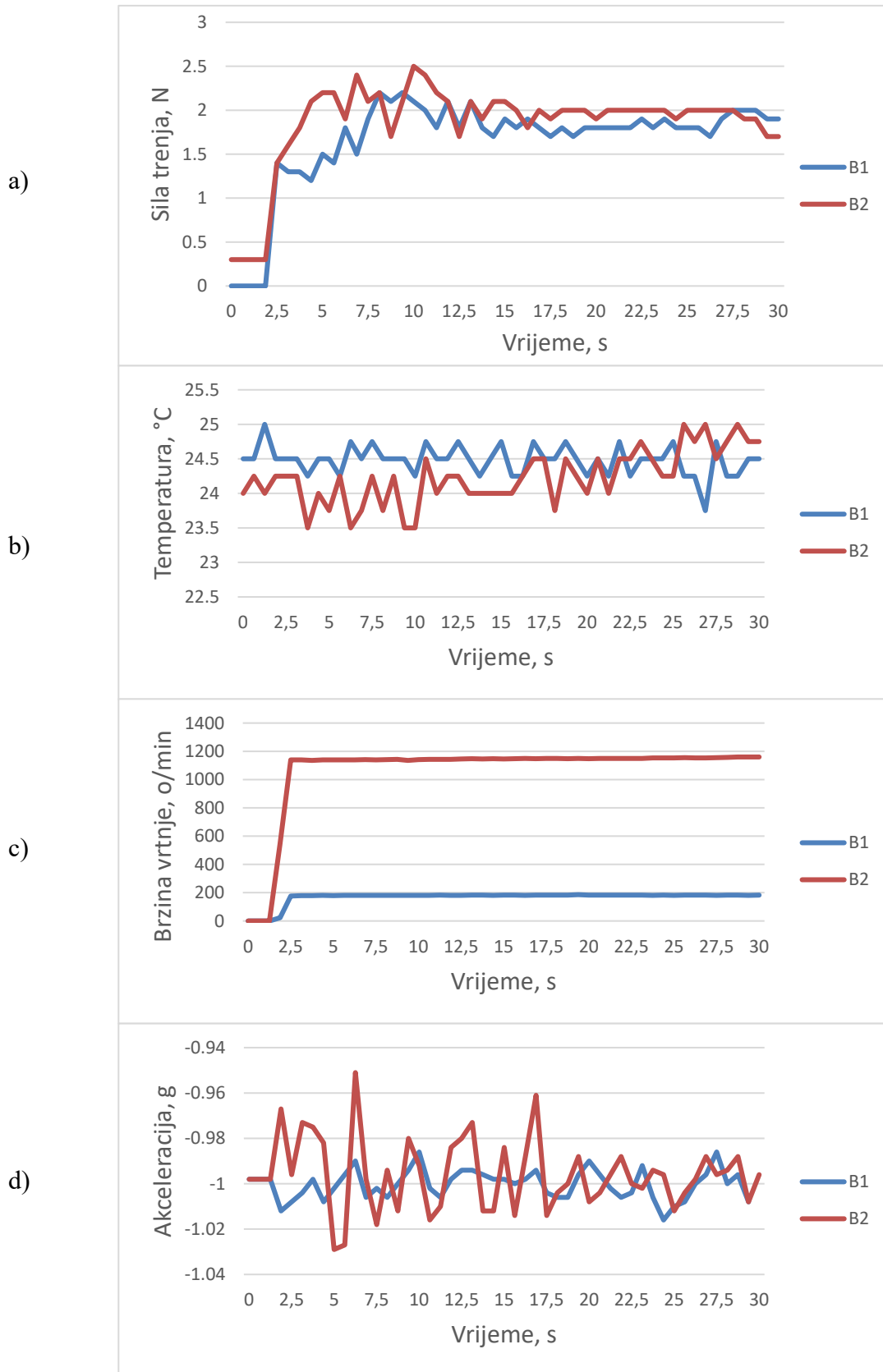
Slika 63. Izgled tribopara tijekom ispitivanja



Slika 64. Parametri ispitivanja triboparova A1 i A2 označenih prema tablici 2

6.2.3. Ispitivanje tribopara „prizma/prsten nitriran u plazmi“

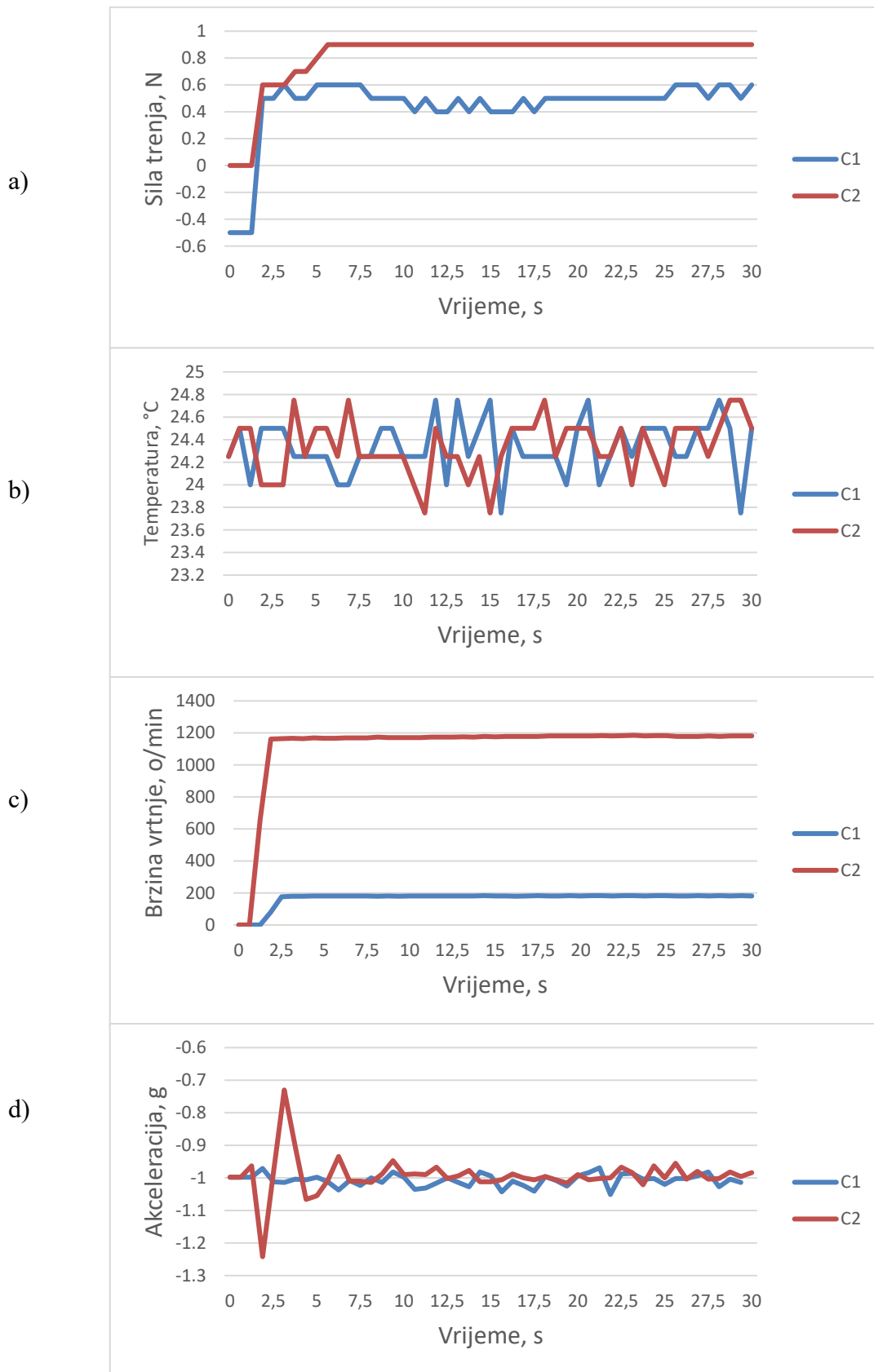
Prosječna sila trenja tijekom rada uređaja za ispitivanje B1 iznosi 1,80 N, a pri B2 iznosi 1,99 N. Normalna sila tijekom oba ispitivanja je 3,845 N što je ostvareno masom utega i nosačem uzorka. Kada se sila trenja i normalna sila uvrste u jednadžbu (1) dobiva se za B1 koeficijent trenja 0,47, a za B2 0,52. Prosječna temperatura tijekom ispitivanja B1 iznosi 24,5 °C, a tijekom B2 24,2 °C. Prosječna brzina vrtnje vratila pri ispitivanju B1 iznosi 181,84 o/min, a pri B2 1147,29 o/min. Na dijagramu akceleracije može se vidjeti da su pri manjoj brzini ispitivanja manje amplitude vibracija između površina tribopara.



Slika 65. Parametri ispitivanja triboparova B1 i B2 označenih prema tablici 2

6.2.5. Ispitivanje tribopara „prizma/prsten prevučen prevlakom TiN“

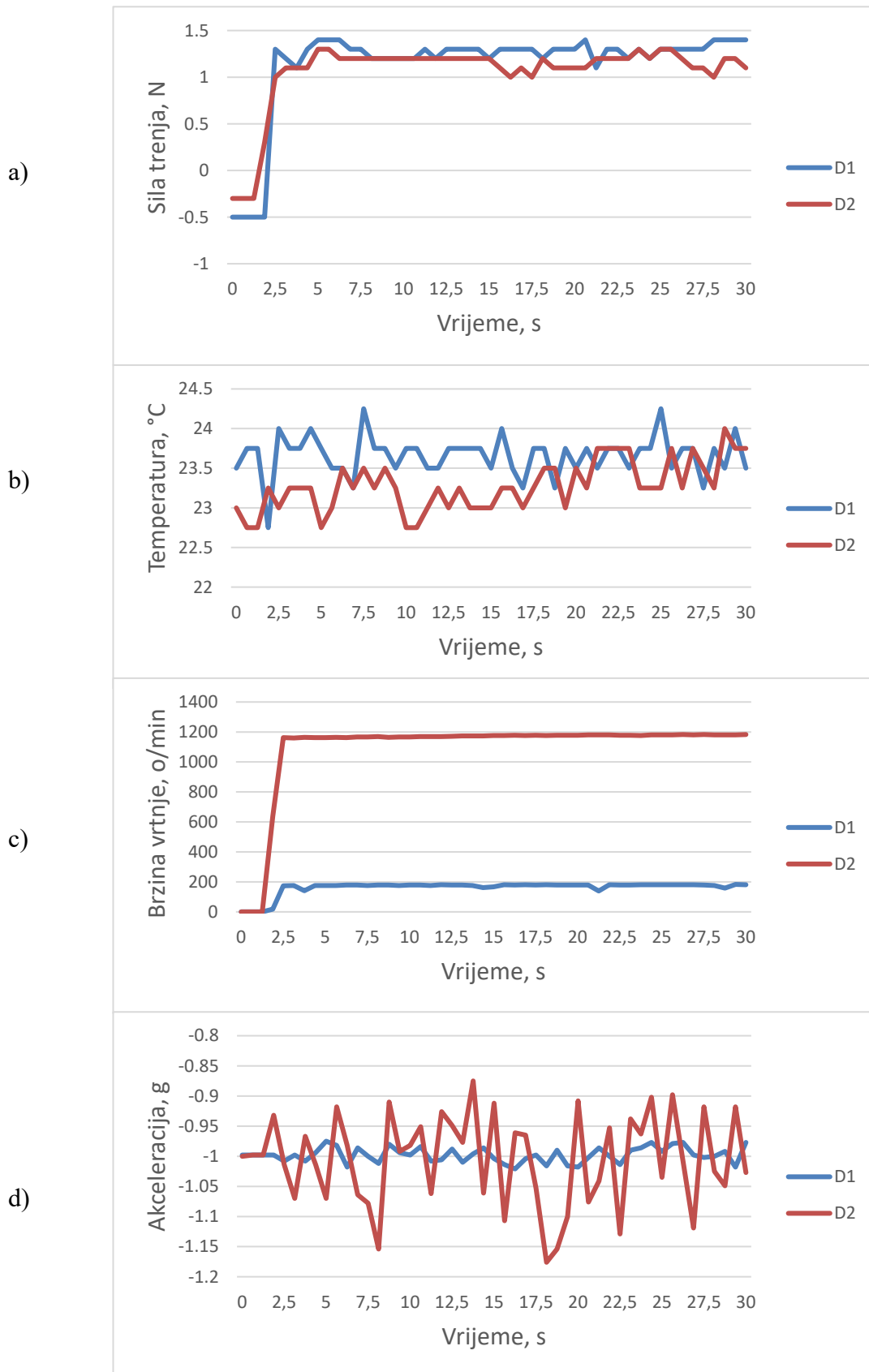
Prosječna sila trenja tijekom rada uređaja za ispitivanje C1 iznosi 0,51 N, a pri C2 iznosi 0,87 N. Normalna sila tijekom oba ispitivanja je 3,845 N što je ostvareno masom utega i nosačem uzorka. Kada se sila trenja i normalna sila uvrste u jednadžbu (1) dobiva se za C1 koeficijent trenja 0,13, a za C2 0,23. Prosječna temperatura tijekom oba ispitivanja iznosi 24,34 °C. Prosječna brzina vrtnje vratila pri ispitivanju C1 iznosi 181,2 o/min, a pri C2 1175,72 o/min. Na dijagramu akceleracije može se vidjeti da su pri većoj brzini u prvih 5 sekundi veće amplitude vibracije nakon čega se smanjuju i postaju sličnih vrijednosti kao pri manjoj brzini.



Slika 66. Parametri ispitivanja triboparova C1 i C2 označenih prema tablici 2

6.2.7. Ispitivanje tribopara „prizma/prsten prevučen prevlakom TiCN“

Prosječna sila trenja tijekom rada uređaja za ispitivanje D1 iznosi 1,28 N, a pri D2 iznosi 1,17 N. Normalna sila tijekom oba ispitivanja je 3,845 N što je ostvareno masom utega i nosačem uzorka. Kada se sila trenja i normalna sila uvrste u jednadžbu (1) dobiva se za D1 koeficijent trenja 0,33, a za D2 0,23. Prosječna temperatura tijekom ispitivanja D1 iznosi 23,66 °C, a tijekom D2 23,28 °C. Prosječna brzina vrtnje vratila pri ispitivanju D1 iznosi 176 o/min, a pri D2 1173,82 o/min. Na dijagramu akceleracije može se vidjeti da su pri manjoj brzini ispitivanja mnogo manje vibracije između površina tribopara.



Slika 67. Parametri ispitivanja triboparova D1 i D2 označenih prema tablici 2

Tablica 10. Prosječne vrijednosti parametara tijekom ispitivanja


Oznaka ispitivanja	Sila trenja, N	Koeficijent trenja	Temperatura, °C	Brzina, o/min
A1	1,14	0,30	23,00	178,42
A2	0,87	0,22	23,00	1176,82
B1	1,80	0,47	24,50	181,84
B2	1,99	0,52	24,20	1147,29
C1	0,51	0,13	24,34	181,20
C2	0,87	0,23	24,34	1175,72
D1	1,28	0,33	23,66	176,00
D2	1,17	0,23	23,28	1173,82

Iz tablice se može očitati da se najveći koeficijent trenja javlja kod ispitivanja B, odnosno tribopara prizme od ležajne bronce i prstena nitriranog u plazmi. Najmanji koeficijent trenja je kod ispitivanja C, odnosno tribopara prizme od ležajne bronce i prstena s titanij nitrid prevlakom posebice kod manje brzine od 180 o/min. Temperature su tijekom svih ispitivanja približno iste i brzine prate zadane vrijednosti.

6.3. Ispitivanje traga trošenja

Na svakoj prizmi nakon provedenog ispitivanja izmjeren je trag trošenja pomoću svjetlosnog mikroskopa, a rezultati su dani u tablici [Tablica 11].

Tablica 11. Određivanje širine traga trošenja

Oznaka ispitivanja	Izgled traga trošenja	Širina traga, mm
A1		$0,738 \pm 0,040$
A2		$1,031 \pm 0,417$
B1		$1,794 \pm 0,657$
B2		$0,844 \pm 0,105$
C1		$0,994 \pm 0,435$
C2		$1,373 \pm 0,302$
D1		$0,975 \pm 0,340$
D2		$1,447 \pm 0,407$

6.4. Diskusija rezultata

Na tribometru za ispitivanje metodom klizanja „prizme po prstenu“ ispitana su četiri tribopara pri dvjema brzinama vrtnje prstena, 180 o/min i 1200 o/min. Ispitivanja su provedena kako bi se utvrdio faktor trenja i širina trošenja na prizmi. Triboparove čine prizma od ležajne bronce i prstenovi od kojih je svaki u drugačijem stanju: kaljeno i popušteno, nitrirano u plazmi, prevučeni prevlakama PACVD TiN i PACVD TiCN.

Tijekom ispitivanja metodom klizanja „prizme po prstenu“ mjereni su parametri sile trenja, temperature, brzine vrtnje i akceleracije. Zatim je preko sile trenja i normalne sile kojom se pritišće prizma na prsten izračunat koeficijent trenja. Utvrđeno je da se najveći koeficijent trenja javlja kod tribopara prizme od ležajne bronce i prstena nitriranog u plazmi. Kod brzine vrtnje od približno 180 o/min koeficijent trenja iznosi 0,52, a pri brzini od približno 1200 o/min iznosi 0,47. Najmanji koeficijent trenja je kod tribopara prizme od ležajne bronce i prstena s titanij nitrid prevlakom, kod manje brzine od približno 180 o/min, iznosi 0,13. Temperature su tijekom svih ispitivanja približno iste. Pri mjerenju brzine nije bilo značajnih odstupanja i očitane vrijednosti su bile približne zadanima. Kod triboparova se može pomoću očitavanja akcelerometra vidjeti razlika u amplitudama vibracija između veće i manje brzine, gdje veće brzine imaju značajno veće amplitude. Iznimka je titanij nitrid kod kojega su nakon prvih 5 sekundi amplitude približno iste.

Ispitivanje traga trošenja pomoću svjetlosnog mikroskopa na prizmi od ležajne bronce provedeno je s deset očitavanja širine po tragu trošenja i računanjem aritmetičke sredine i standardne devijacije širine traga. Iz dobivenih podataka se vidi da je najširi trag trošenja nastao uslijed ispitivanja prstena nitriranog u plazmi pri brzini od približno 180 o/min, a on iznosi 1,794 mm. Najuži trag trošenja nastaje neprevučenim prstenom pri istoj brzini i iznosi 0,738 mm.

7. ZAKLJUČAK

U radu je opisan uređaj za ispitivanje trenja i trošenja metodom klizanja „prizme po prstenu“. Provedena je razrada konstrukcijskog i upravljačkog dijela te ispitivanje trenja i trošenja na izrađenom uređaju. Pogonski dio uređaja se sastoji od električnog odvijača koji daje brzinu okretaja od 180 o/min i stolne tokarilice Proxxon DB 250 koja daje brzinu okretaja od 1200 o/min. Na pogonski dio povezano je vratilo na koje se montira unutarnji ležajni prsten igličastog ležaja NTN 1R30X35X17. Prsten se za ispitivanje koristi u četiri različita stanja: kaljeno i popušteno, nitrirano u plazmi, prevučeni prevlakama PACVD TiN i PACVD TiCN. Prsten je pritisnut uzorkom koji čini prizma od ležajne bronce. Prizma je fiksirana držačem uzorka koji je dodatno opterećen utezima, time se dobiva ukupna masa 392 g, odnosno opterećenje normalnom silom prizme na prstenu od 3,845 N. Tijekom rada uređaja se javlja sila trenja između površina tribopara prizme i prstena, a ona se mjeri mjernom ćelijom, odnosno senzorom sile. Na uređaju se još nalaze senzor temperature čiji je termoelement u kontaktu s prizmom, akcelerometar koji se nalazi na držaču uzorka i senzor brzine koji očitava brzinu vrtnje vratila, odnosno prstena na vratilu. Svi senzori spajaju se na mikrokontroler Arduino Uno Rev3 koji obrađuje primljene signale i podatke šalje na računalo preko USB kabla gdje se pohranjuju u Excel tablici.

Za svaki tribopar provedeno je ispitivanje u trajanju 30 sekundi s prikupljanjem podataka u Excel tablici sa senzora sile trenja, temperature prizme, brzine vrtnje prstena i akceleracije prizme. Iz izračunatih vrijednosti faktora trenja nakon provedenih ispitivanja utvrđen je najveći koeficijent trenja kod tribopara sastavljenog od prizme od ležajne bronce i prstena nitriranog u plazmi pri brzini vrtnje prstena od 180 o/min. Najmanji koeficijent trenja utvrđen je kod tribopara sastavljenog od prizme od ležajne bronce i prstena s prevlakom PACVD TiN također kod brzine vrtnje prstena od približno 180 o/min.

Primjenom svjetlosnog mikroskopa izmjerena je širina traga trošenja na prizmi za svaki ispitani tribopar. Dobiveni podaci pokazuju da je najširi trag trošenja nastao ispitivanjem prstena nitriranog u plazmi pri brzini od približno 180 o/min. Najuzi trag trošenja je nastao neprevučanim prstenom pri istoj brzini.

Izrađeni tribometar za ispitivanje metodom klizanja „prizme po prstenu“ obavlja u potpunosti svoju funkciju i daje statistički precizne podatke za uvjete ispitivanja u kojima se očekuju sile trenja do 50 N i brzine vrtnje prstena do 6000 o/min uz zagrijavanja uzorka manja od 50 °C.

Unaprjeđenje uređaja moglo bi se napraviti na način da se koristi pogonski sustav kojemu se može zadati vremenski promjenjiva brzina vrtnje prstena te ostvariti automatski regulirano podmazivanje tribopara. Dodatni način unaprjeđenja je dodavanje pokretanja uređaja i mjernog sustava preko mikrokontrolera jer je u trenutnoj izvedbi ostvareno samo ručno pokretanje uređaja..

LITERATURA

- [1] Qiu M, Chen L, Li Y, Yan J. Bearing Tribology. Springer; 2017.
- [2] Hutchings I, Shipway P. 3 - Friction, In: Hutchings I., Shipway P., editors. Tribology (Second Edition): Butterworth-Heinemann; 2017., p. 37-77, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00003-9>.
- [3] Static Friction, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/frict2.html>, Pristupljeno: 15. listopada 2022.
- [4] Vučković K., Podloge uz predavanja iz kolegija „Elementi konstrukcija II“, Ležajevi, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2017.
- [5] Rolling Friction or Rolling Resistance, https://www.school-for-champions.com/science/friction_rolling.htm
- [6] friction, <https://www.britannica.com/science/velocity>, Pristupljeno: 20. listopada 2022.
- [7] Myshkin N K, Petrokovets M I, Kovalev A V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer, Tribology International, Volume 38, Issues 11–12, 2005., p. 910-921, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.016>.
- [8] Wear, <https://www.tribonet.org/wiki/wear/>, Pristupljeno: 27. listopada 2022.
- [9] maziva, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=39637>, Pristupljeno: 31. listopada 2022.
- [10] Gong H, Yu C, Zhang L, Xie G, Guo D, Luo J. Intelligent lubricating materials: A review, Composites Part B: Engineering, Volume 202, 2020., <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108450>.
- [11] Stachowiak G W, Batchelor A W, Stachowiak G B, 3 - Tribometers, In: Stachowiak G. W., Batchelor A. W., Stachowiak G. B., editors. Tribology Series: Elsevier; Volume 44, 2004., p. 25-78, [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(04\)80019-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(04)80019-1).
- [12] Four Ball Tester: <https://www.tribonet.org/wiki/four-ball-tester/>, Pristupljeno: 10. studenoga 2022.
- [13] Pin & Vee Block Test Machine: Pristupljeno: 10. studenoga 2022. http://www.eng.auburn.edu/~jacksr7/Dr_Jackson/Equipment_files/FalexPinVeeBlock.pdf, Pristupljeno: 10. studenoga 2022.
- [14] Mang, T. Timken Extreme Pressure Tester, Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_100750

- [15] Pin on Disk Test: <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>
- [16] Smazalova E, Houdkova Š, Švantner M. Tribological effects of discontinuous block-on-ring test, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic, 21.05.-23.05.2014. Dostupno online: <http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/17/reports/2593.pdf>
- [17] Block-On-Ring Wear Test: <https://nanovea.com/block-on-ring-sliding-wear-evaluation/>
- [18] Caliskan H, Panjan P, Kurbanoglu C. 3.16 Hard Coatings on Cutting Tools and Surface Finish, In: Hashmi M.S.J., editor. Comprehensive Materials Finishing: Elsevier; 2017., p. 230-242, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09178-5>.
- [19] Kovačić S. Utjecaj nitiranja i prevlačenja na svojstva alatnih čelika za topli rad [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [20] Mitterer C, Holler F, Reitberger D, Badisch E, Stoiber M, Lugmair C, Nöbauer R, Müller Th, Kullmer R. Industrial applications of PACVD hard coatings, Surface and Coatings Technology, Volumes 163–164; 2003., p. 716-722, [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00685-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00685-0).
- [21] Sakoman M. Razvoj PACVD prevlaka na nanostrukturiranim tvrdim metalima [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [22] Schaaf P, Kaspar J, Höche D. 9.13 - Laser Gas-Assisted Nitriding of Ti Alloys, In: Hashmi S., Ferreira Batalha G., J. Van Tyne C., Yilbas B., editors. Comprehensive Materials Processing: Elsevier; 2014., p. 261-278, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00912-2>.
- [23] Gupta K, Kumar Jain N, Laubscher R. Chapter 6 - Surface Property Enhancement of Gears, In: Gupta K., Kumar Jain N., Laubscher R., editors. Advanced Gear Manufacturing and Finishing: Academic Press; 2017., p. 167-196, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804460-5.00006-7>.
- [24] Diegel O. 10.02 - Additive Manufacturing: An Overview, In: Hashmi S., Ferreira Batalha G., J. Van Tyne C., Yilbas B., editors. Comprehensive Materials Processing: Elsevier; 2014., p. 3-18, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01000-1>.
- [25] Leary M. Chapter 1 - Introduction to AM, In: Leary M., editor. In Additive Manufacturing Materials and Technologies, Design for Additive Manufacturing: Elsevier; 2020., p. 1-6, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816721-2.00001-4>.
- [26] Šercer, M., Godec, D., Pilipović, A., Katalenić, M. Predavanja iz kolegija Suvremena aditivna proizvodnja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.

- [27] aditivna proizvodnja: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979>,
Pristupljeno: 21. studenoga 2022.
- [28] Arduino Uno Rev3: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>,
Pristupljeno: 26. studenoga 2022.
- [29] speed sensor: <https://joy-it.net/en/products/SEN-Speed>,
Pristupljeno: 26. studenoga 2022.
- [30] Load Cell (5 Kg): <https://joy-it.net/en/products/SEN-HX711-05>,
Pristupljeno: 26. studenoga 2022.
- [31] 3-AXIS DIGITAL ACCELERATION SENSOR MODULE - MMA8452:
<https://www.velleman.eu/products/view/?id=439582>,
Pristupljeno: 26. studenoga 2022.
- [32] MAX6675 K-type Thermocouple: <https://fluxworkshop.com/products/biaa100159-max6675-k-type-thermocouple-inc-probe?variant=32458600513596>,
Pristupljeno: 26. studenoga 2022.
- [33] Needle roller bearing 1R30X35X17 NTN 30x35x17: <https://simmering.pl/en/needle-roller-bearings/117882-needle-roller-bearing-1r30x35x17-ntn-30x35x17.html>,
Pristupljeno: 26. studenoga 2022.
- [34] TOOLCRAFT USB microscope: <https://www.conrad.com/p/toolcraft-usb-microscope-5-mp-digital-zoom-max-150-x-1713198>,
Pristupljeno: 26. studenoga 2022.
- [35] Wen S, Huang P. Tribology principles. Tsinghua University Press, Beijing, 2008.
- [36] Liu Z. Tribological theory and design. Wuhan University of Technology Press, Wuhan, 2009.
- [37] Quan Y. Engineering tribology. Zhejiang University Press, Hangzhou, 1994.
- [38] Yang M. Tribology design basis. China Machine Press, Beijing, 1992.
- [39] Meyers N.O. Characterization of surface roughness. *Wear*; 1962., p. 182–184
- [40] Bhushan B. Introduction to tribology. China Machine Press, Beijing, 2007.
- [41] Kennedy F.E. Frictional heating and contact temperatures. In: Bhushan, B., editor. *Modern Tribology Handbook*, vol. 1. CRC Press; 2001., p. 235–272
- [42] Meckleburg K.R. Forces in the Falex configuration, *Transactions ASLE*, Vol. 18; 1975., p. 97-104
- [43] Bowden F.P, Tabor D. The friction and lubrication of solids, Part 1, Oxford University Press, 1954.
- [44] Shipway P.H, Hutchings I.M. Influence of nozzle roughness on conditions in a gas-blast erosion rig, *Wear*, Vol. 162-164; 1993., p. 148-158

- [45] Fang L, Kong X.L, Su J.Y, Zhou Q.D. Movement patterns of abrasive particles in threebody abrasion, *Wear*, Vol. 162-164; 1993., p. 782-789
- [46] Rutherford K.L, Hutchings I.M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 25; 1997., p. 250-260
- [47] Gee M.G, Matharu C.S, Almond E.A, Eyre T.S. The measurement of sliding friction and wear of ceramics at high temperatures, *Wear*, Vol. 138; 1990., p. 169-187
- [48] Iwabuchi A, Tatsuyanagi Y, Yoshida K, Sugimoto M. Tribological properties of cryogenic materials at 4 K in liquid helium under fretting conditions, *Wear*, Vol. 159; 1992., p. 107-114.
- [49] Suzuki M, Moriyama M, Nishimura M, Hasegawa M. Friction and wear of selflubricating composites at temperatures up to 450°C in vacuum, *Wear*, Vol. 162-164; 1993., p. 471-479

PRILOZI

- I. Specifikacije komponenata upravljačkog sustava
- II. Programski kod za upravljanje
- III. Rezultati ispitivanja hrapavosti površina prizme i prstena

I. Specifikacije komponenata upravljačkog sustava

Arduino Uno Rev3

<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>

Board	Name	Arduino UNO R3
	SKU	A000066
Microcontroller	ATmega328P	
USB connector	USB-B	
Pins	Built-in LED Pin	13
	Digital I/O Pins	14
	Analog input pins	6
	PWM pins	6
Communication	UART	Yes
	I2C	Yes
	SPI	Yes
Power	I/O Voltage	5V
	Input voltage (nominal)	7-12V
	DC Current per I/O Pin	20 mA
	Power Supply Connector	Barrel Plug
Clock speed	Main Processor	ATmega328P 16 MHz
	USB-Serial Processor	ATmega16U2 16 MHz
Memory	ATmega328P	2KB SRAM, 32KB FLASH, 1KB EEPROM
Dimensions	Weight	25 g
	Width	53.4 mm
	Length	68.6 mm

Senzor sile Joy-IT HX711-05

https://joy-it.net/files/files/Produkte/SEN-HX711-05/SEN-HX711-05_Datasheet_2021-10-20.pdf

MAIN FEATURES

Model	HX711-05
Special feature	Integrated 24 bit A/D-converter
Measuring range	Up to 5 kg
Load cell accuracy	±0,02% F.S
Items delivered	Load cell, amplifier board, pin header (4 pins)

FURTHER SPECIFICATIONS

Supply voltage	2.6 ~ 5.25 V
Current consumption	< 1.5 mA
Interface	Serial; 2-wire
Dimensions PCB	34.2 x 20 x 3 mm
Dimensions load cell	75 x 15 x 14.2 mm
Cable length	25 cm
Weight	33.5 g

FURTHER DETAILS

Article No.	SEN-HX711-05
EAN	4250236822273
Customs Tariff No.	84239010

Senzor temperature MAX6675 K-type Thermocouple

<https://fluxworkshop.com/products/biaa100159-max6675-k-type-thermocouple-inc-probe?variant=32458600513596>

Flux SKU: BIAA100159	MPN: BIAA100159	Pin Pitch: 2.54mm
Length (mm): 32	UPC: Does Not Apply	Mounting Hole Size: M4
Width (mm): 16	Minimum Operating Temperature: 0°C	Format: SPI
Height (mm): 18	Maximum Operating Temperature: 800°C	Chipset MPN: MAX6675
Brand: Unbranded/Generic	Number of Items: 1	Noted Onboard Components: K-Type Thermocouple
Main Colour: Blue	Parts list: 1 50cm Heat shielded thermocouple 1 4pin 20cm F-F Jumper wire	Sensor Maximum Resolution: 0.25°
Country of Manufacture: China		

Pin	Description
SO	SPI Interface
CS	SPI Interface
SCK	SPI Interface
VCC	DC Input
GND	Ground

Senzor brzine Joy-IT LM393

<https://joy-it.net/files/files/Produkte/SEN-Speed/Datasheet-SEN-Speed.pdf>

MAIN FEATURES	
Model	Speedsensor LM393
Operating voltage	3,3 V - 5V DC
Signal output	digital
Groove width	5 mm
Special features	Output status indicator Hole for easy mounting
Dimensions	PCB :32 x 14 mm Disc: Ø 25,5mm (20 holes)
Items delivered	Speedsensor & perforated disc

Akcelerometar Velleman VMA208

https://www.velleman.eu/downloads/29/vma208_a4v02.pdf

1.95 V to 3.6 V supply voltage
 1.6 V to 3.6 V interface voltage
 +-2g/+4g/+8g dynamically selectable full-scale
 Output Data Rates (ODR) from 1.56 Hz to 800 Hz
 12-bit and 8-bit digital output
 I2C digital output interface (operates to 2.25 MHz with 4.7 kΩ pullup)
 two programmable interrupt pins for six interrupt sources
 three embedded channels of motion detection
 orientation (portrait/landscape) detection with set hysteresis
 high pass filter data available real-time
 current consumption: 6 μA - 165 μA

3.3V	Power output – 3.3 V output.
Vcc	Power supply – It should be between 3 and 5 V.
SDA	I2C data signal – Bi-directional data line. Voltage should not exceed power supply.
SCL	I2C clock signal – Master-controlled clock signal. Voltage should not exceed power supply.
SA0	I2C address – I2C least significant bit of the device I2C address.
I2	Interrupt 2 – Programmable interrupt. Can indicate data ready, orientation change, tap, and more.
I1	Interrupt 1 – Programmable interrupt. Can indicate data ready, orientation change, tap, and more.
GND	Ground – 0 V/common voltage.

II. Programski kod za upravljanje

```
#include <Arduino.h>
#include "HX711.h"
#include "TimerOne.h"
#define pin 2
#include "max6675.h"
#include <Wire.h>
#include <SFE_MMA8452Q.h>

MMA8452Q accel;

int PowerPin0 = 12;
int PowerPin1 = 13;

int soPin = 5; // SO=Serial Out
int csPin = 6; // CS = chip select CS pin
int sckPin = 7; // SCK = Serial Clock pin
MAX6675 thermocouple(sckPin, csPin, soPin); // create instance object of MAX6675

int wheel, counter;
float interval;
unsigned long previousMicros, usInterval, calc;

// HX711 circuit wiring
const int LOADCELL_DOUT_PIN = 3;
const int LOADCELL_SCK_PIN = 4;

HX711 scale;

void setup() {

  counter = 0;
  interval = 0.641;
  wheel = 20; // number of encoder disc holes

  calc = 60 / interval; // calculate interval to one minute
  usInterval = interval * 1000000; // convert interval to micro
  // seconds
  wheel = wheel * 2; // number of encoder disc wholes times 2

  pinMode(pin, INPUT); // setting pin 2 as input
  Timer1.initialize(usInterval);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin), count, CHANGE);

  Timer1.attachInterrupt(output);
  Serial.begin(9600);
```

```
pinMode(PowerPin0, OUTPUT);
digitalWrite(PowerPin0, HIGH);
pinMode(PowerPin1, OUTPUT);
digitalWrite(PowerPin1, HIGH);

scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
Serial.println(scale.read());

Serial.println(scale.read_average(20));

Serial.println(scale.get_value(5));

Serial.println(scale.get_units(5), 1);

scale.set_scale(-20788.4);

scale.tare();          // reset the scale to 0

Serial.println(scale.read());
Serial.println(scale.read_average(20));
Serial.println(scale.get_value(5));
Serial.println(scale.get_units(5), 1);

accel.init(SCALE_4G, ODR_1);

}

void count(){

  if (micros() - previousMicros >= 700) {
    counter++;
    previousMicros = micros();
  }
}

void output(){

  Timer1.detachInterrupt();
  int speed = ((counter)*calc) / wheel;
  // calculate round per minute

  Serial.print(speed);

  Serial.print(",");

  counter = 0;
  Timer1.attachInterrupt(output);
}
```




```
void loop() {  
  
    if (accel.available())  
    {  
        accel.read();  
        printCalculatedAccels();  
    }  
    Serial.print(scale.get_units(), 1);  
    Serial.print(",");  
    Serial.print(thermocouple.readCelsius());  
    Serial.print(",");  
  
    delay(641);  
}  
  
void printCalculatedAccels(){  
  
    Serial.print(accel.cx, 3);  
    Serial.print(",");  
    Serial.print(accel.cy, 3);  
    Serial.print(",");  
    Serial.print(accel.cz, 3);  
    Serial.print(",");  
    Serial.println();  
}
```

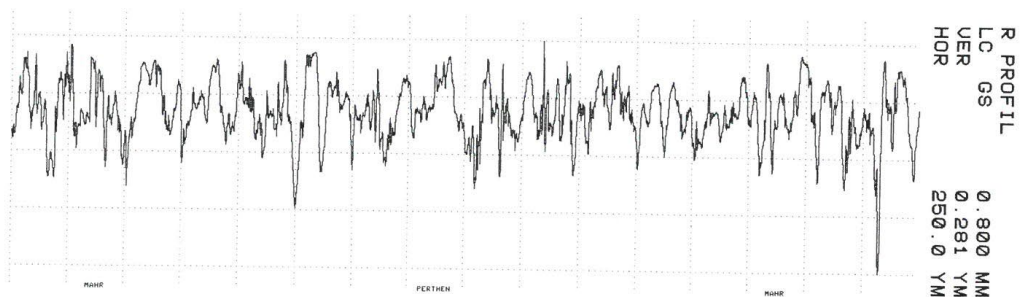
III. Rezultati ispitivanja hrapavosti površina prizme i prstena

Prizma od ležajne bronce (brušeno vodootpornim brusnim papirom #1000)

perthometer S8P 4.5

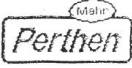
		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: BLOK CU-PB NR.: 15.06.2021. NAME: G.BARSIC MESS.-NR.: 5 T1 RHT 6-50 50 6	
LT	5.600 MM				
LM	4.000 MM				
UB	12.50 YM				

KENNWERT			STATISTIK N = 5							
	LC	GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TH
1										
2	RMAX	YM	0.963	0.192	0.500	1.197	0.697			
3	RZ	YM	0.724	0.107	0.293	0.854	0.562			
4	RA	YM	0.107	0.011	0.030	0.123	0.093			
5	RP	YM	0.355	0.037	0.101	0.414	0.312			
6	RPM	YM	0.278	0.031	0.082	0.320	0.237			
7	WT	YM	0.781	0.079	0.210	0.906	0.696			
8	RT	YM	1.006	0.177	0.436	1.197	0.761			
	PT	YM	1.385	0.121	0.288	1.485	1.197			

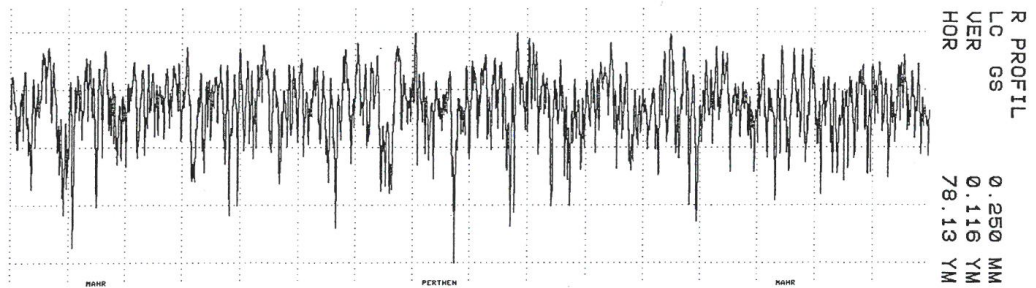


Neprevučeni prsten

perthometer S8P 4.5


		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: UZORAK Ø NR.: 18.2.2019. NAME: G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6
LT	1.750 MM		
LM	1.250 MM		
UB	12.50 YM		

KENNWERT				STATISTIK N = 6						
	LC	GS	0.250 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TH
1	RMAX		YM	0.470	0.059	0.167	0.535	0.368		
2	RZ		YM	0.400	0.039	0.098	0.451	0.353		
3	RA		YM	0.050	0.003	0.008	0.053	0.046		
4	RP		YM	0.150	0.003	0.008	0.154	0.146		
5	RPH		YM	0.138	0.007	0.019	0.146	0.127		
6	WT		YM	0.051	0.023	0.060	0.095	0.034		
7	RT		YM	0.478	0.048	0.135	0.542	0.407		
8	PT		YM	0.498	0.038	0.092	0.556	0.464		

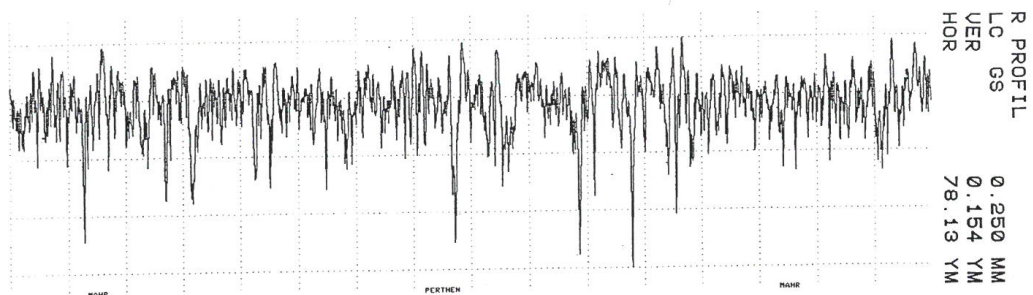


Prsten nitriran u plazmi

perthometer S8P 4.5


		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: UZORAK 3 NR.: 18.2.2019. NAME: G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6
LT	1.750 MM		
LM	1.250 MM		
UB	12.50 YM		

KENNWERT				STATISTIK N = 6						
	LC	GS	Ø.250 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TH
1	RMAX		YM	0.513	0.075	0.168	0.615	0.447		
2	RZ		YM	0.418	0.056	0.133	0.497	0.365		
3	RA		YM	0.052	0.003	0.005	0.055	0.050		
4	RP		YM	0.167	0.014	0.044	0.190	0.146		
5	RPH		YM	0.143	0.012	0.031	0.153	0.122		
6	WT		YM	0.093	0.005	0.025	0.265	0.040		
7	RT		YM	0.523	0.072	0.168	0.615	0.447		
8	PT		YM	0.571	0.105	0.256	0.698	0.443		

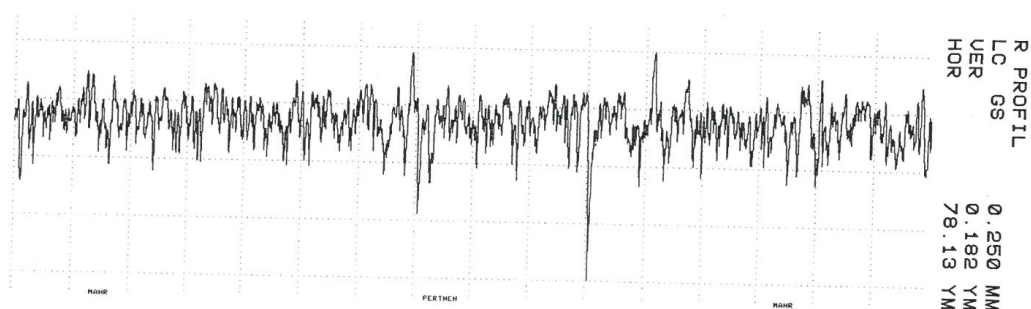


Prsten prevučen prevlakom PACVD TiN

perthometer S8P 4.5


		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: VANJSKI NR.: 28.01.2021. NAME: G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6	
LT	1.750 MM				
LM	1.250 MM				
UB	12.50 YM				

KENNWERT			STATISTIK N = 6							
	LC	GS	0.250 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX		YM	0.474	0.126	0.336	0.727	0.391		
2	RZ		YM	0.369	0.036	0.101	0.438	0.336		
3	RA		YM	0.045	0.002	0.005	0.048	0.043		
4	RP		YM	0.181	0.025	0.076	0.227	0.151		
5	RPM		YM	0.142	0.016	0.050	0.169	0.119		
6	WT		YM	0.051	0.007	0.020	0.060	0.040		
7	RT		YM	0.481	0.123	0.336	0.727	0.391		
8	PT		YM	0.495	0.116	0.314	0.723	0.409		



Prsten prevučen prevlakom PACVD TiCN

perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: CILINDAR S PREVLAKOM NR.: NAME: G. BARSIC MESS.-NR.: 5 T1 RHT 6-50 50 6
LT	5.600 MM		
LN	4.000 MM		
UB	12.50 YM		

KENNWERT			STATISTIK N = 5							
	LC	GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TH
1	RMAX	YM		1.526	0.377	0.931	2.072	1.141		
2	RZ	YM		1.106	0.215	0.522	1.329	0.807		
3	RA	YM		0.104	0.018	0.050	0.127	0.076		
4	RP	YM		0.462	0.090	0.228	0.603	0.375		
5	RPM	YM		0.368	0.050	0.132	0.453	0.321		
6	WT	YM		0.421	0.197	0.400	0.729	0.249		
7	RT	YM		1.629	0.358	0.063	2.163	1.300		
8	PT	YM		1.783	0.219	0.578	2.138	1.560		

