Nove laboratorijske metode ispitivanja triboloških svojstava

Perak, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:834168

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Perak

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Domagoj Perak

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se profesorici Suzani Jakovljević na mentorstvu i pomoći koju mi je ukazala tijekom pisanja ovog završnog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom dosadašnjeg studija.

Domagoj Perak

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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Domagoj Perak** Mat. br.: 0035213351

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Nove laboratorijske metode ispitivanja triboloških svojstava materijala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **New laboratory methods for testing tribological properties of materials**

Opis zadatka:

Tribologija je interdisciplinarna znanost o površinama u dodiru i relativnom gibanju što rezultira faktorom trenja i trošenjem površina materijala. Ova grana znanosti ima velik značaj u industriji zbog stalne težnje za smanjenjem gubitaka i za što sigurniji i pouzdaniji rad sustava. Brzi razvoj industrije uzrokuje nove izazove u razvijanju novih metoda ispitivanja triboloških karakteristika materijala.

U ovom radu je potrebno:
1) Prema dostupnoj literaturi dati pregled dosadašnjih istraživanja metoda ispitivanja triboloških karakteristika materijala.
2) Komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Suzana Jakovljević

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ…..……I

POPIS SLIKA……III

POPIS TABLICA……...V

POPIS OZNAKA……..VI

SAŽETAK……...……VII

SUMMARY……VIII

1. UVOD……..1

2. MEHANIZMI TROŠENJA…….2

2.1. Abrazija……2

2.2. Adhezija……...3

2.3. Umor površine…….4

2.4. Tribokorozija……...5

3. PROCESI TROŠENJA……6

3.1. Klizno trošenje……7

3.1.1. Klizno ispitivanje „četiri kuglice“……...7

3.1.1.1. Vakuumski tribouređaj „četiri kuglice“ za procjenu tekućih maziva u primjenama svemirske industrije……...9

3.1.2. Ispitivanje „prizma po prstenu“……12

3.1.2.1. Modificirani nanodijamanti (ND) kao dodatak komercijalnim uljima….13

3.1.3. Ispitivanje „kuglica po disku“……...18

3.1.3.1. Ispitivanje utjecaja amorfne prevlake ugljičnog nitrida u atmosferi dušika pomoću ispitivanja „kuglica po disku u dva koraka“ ……..19

3.1.4. Ispitivanje „valjčić po disku“……24

3.1.4.1. Simulacija istrošenih čestica kočnica nošenih zrakom pomoću uređaja valjčić po disku……....25

3.1.5. Test brazdanjem – *„scratch test“*……..28

3.1.5.1. Tribološka karakterizacija „jaspilita“testom brazdanja……...29

3.2. Kotljajuće trošenje……...35
3.2.1. Metoda dvostrukog diska (engl. „*twin disc*“)…….....36
3.2.1.1. Usporedba kuglice po disku i dvostrukog diska na trenje prilikom klizanja/kotrljanja……...36
3.3. Abrazijsko trošenje……...41
3.3.1. Taber abrazija……42
3.3.1.1. Modificirani Taber uređaj za ispitivanje stanja naprezanja i procesa trošenja čestica nošenih zrakom…….42
3.3.2. Ispitivanje trošenja kuglicom (engl. *„ball cratering“*)…….47
3.3.2.1. Ispitivanje trošenja kuglicom na duktilnim materijalima……48
3.4. Kavitacijska erozija……..51
3.4.1. Erozijsko ispitivanje vibracijskom kavitacijom……...….52
3.4.1.1. Kavitacijska erozija plazmom naštrcanih CoMoCrSi prevlaka……..52
4. ZAKLJUČAK……..57
5. LITERATURA…….58

POPIS SLIKA

Slika 1. Jedinični događaj abrazije [3].....2
Slika 2. Abrazija u dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [4].....3
Slika 3. Jedinični događaj adhezije [3].....4
Slika 4. Jedinični događaj umora površine [3].....4
Slika 5. Jedinični događaj tribokorozije [3].....5
Slika 6. Opći oblik procesa trošenja [3].....6
Slika 7. Shema tribosustava pri kliznom trošenju [1].....7
Slika 8. Shema uređaja „4 kuglice“ za klizno ispitivanje [5].....8
Slika 9. Zavarene kuglice [1].....8
Slika 10. Tragovi trošenja na donjim kuglicama [6].....8
Slika 11. Shema triboуređaja 4 kuglice korištenog u vakuumskom ispitivanju [7].....10
Slika 12. Podaci o trošenju ovisno o aksijalnom opterećenju [7].....11
Slika 13. Prikaz stupnjeva trošenja za tri komercijalna maziva u svem. ekspedicijama…12
Slika 14. Shema ispitivanja prizma po prstenu [8].....12
Slika 15. Područje istrošenosti kao funkcija koncetracija ND u ulju I 20A [9]..... 16
Slika 16. Rezultati trošenja i smanjenja temperatura za 0,01 % ND u načinu 1 [9].....16
Slika 17. Rezultati trošenja i smanjenja temperatura za 0,01 % ND ulja SAE 10W [9].....17
Slika 18. Rezultati trošenja i smanjenja temperatura za 0,01 % ND ulja I 20A [9].....17
Slika 19. Rezultat trošenja ovisno o vremenu 0,01% ND ulja Tp 22 [9].....17
Slika 20. Trag trošenja na uzorku [10].....18
Slika 21. Shema triboуređaja „kuglica po disku“ [1].....18
Slika 22. Prilagođeni triboуređaj „kuglica po disku“ s jedinicom za dovod plina [11].....20
Slika 23. Shematski prikaz testa kuglica po disku u dva koraka [11].....21
Slika 24. Izgled istrošene površine sa i bez uhodavanja [11].....22
Slika 25. Statički faktor trenja u struji dušika sa ili bez uhodavanja [11]..... 22
Slika 26. Atomska koncetracija početnih i istrošenih površina [11].....24
Slika 27. Ispitivanje valjčić po disku [12].....25
Slika 28. Shema ispitivanja trošenja čestica kočenja [13].....26
Slika 29. Shematski prikaz testa brazdanjem [1].....28
Slika 30. Trakasti oblik strukture jaspilita [14].....31
Slika 31. Oštećenje na hematitu i getitu te nastalo uglačavanje [14].....31
Slika 32. Nakupljanje poroziteta oko područja brazdanja [14].....32
Slika 33. Pucanje po rubu brazde hematita te usitnjavanje pukotina getita [14].....33
Slika 34. Linearno povećanje trošenja povećanjem opterećenja [14].....33
Slika 35. Povećanje faktora trenja s rastom opterećenja [14].....34
Slika 36. Utjecaj brzine na brazdanje [14].....34
Slika 37. Shema tribosustava kotrljajućeg trošenja [3].....35
Slika 38. Shema metode dvostrukog diska [6].....36
Slika 39. Prikaz uređaja kuglica po disku [15]…….....37
Slika 40. Kotrljajući valjčić po disku [15]…….....37
Slika 41. Tri topografije površina [15]……..38
Slika 42. Prikaz faktora trenja poliranih površina i topografija površine [15].....39
Slika 43. Shema abrazijskog trošenja [1].....41
Slika 44. Shema Taber uređaja [1].....42
Slika 45. Shema modificiranog Taber uređaja [16].....44

Slika 46. Prikaz modifikacija na poluzi [16]…….....44
Slika 47. Shema procesa ispitivanja modificiranim Taber uređajem [16].....45
Slika 48. Postavljeni kalibracijski test [16].....46
Slika 49. Shema metode ispitivanja kuglicom [1].....47
Slika 50. Shema metode ispitivanja slobodnom kuglom [17].....49
Slika 51. Morfologija abrazivnih čestica dobivena SEM analizom [17].....49
Slika 52. Shema tribosustava kavitacijske erozije [1].....51
Slika 53. Hielscherov uređaj [18].....52
Slika 54. Morfologija i raspodjela veličine čestice praha [19].....54
Slika 55. Presjek mikrostrukture prevlake i sitne pore [19].....55
Slika 56. Morfologija naštrcane prevlake [19].....55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste opterećenja kombiniranih materijala [9].....14

Tablica 2. Razlika primjesa početnih i modificiranih ND [9] 15

Tablica 3. Specifikacije indentora [14] 29

Tablica 4. Ulazni podaci ispitivanja [14].....30

Tablica 5. Procijenjene vrijednosti faktora k [17].....50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	sila
F_n	N	normalna komponenta sile
F_t	N	tangencijalna komponenta sile
μ	-	faktor trenja
V	m^3	volumen
δ	kg/m^3	gustoća
L	M	duljina klizanja
A	m^2	površina
R_a	μm	srednje artimetičko odstupanje
k	m^2/N	faktor trošenja

SAŽETAK

Bez obzira na izuzetan napredak tribologije, znanosti o površinama u dodiru koje rezultiraju trenjem i trošenjem samih materijala, ona i dalje ima veliki značaj u današnjoj industriji koja teži sve većem smanjenju gubitaka te što sigurnijem i pouzdanijem radu svakog sustava. Postojane standardne metode ispitivanja triboloških karakteristika nisu dovoljne za praćenje današnjih potreba koje se stavljaju pred njih. Uz konstantan napredak industrije, potrebno je i razvijati ispitivanja koja će pratiti njezin rast.

U ovom radu opisane su posebne primjene laboratorijskih ispitivanja triboloških svojstava materijala prilikom određenih procesa trošenja. Svaki proces trošenja sastoji se od dva ili više mehanizama trošenja, koji djeluju istovremeno ili u vremenskim intervalima, ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima.

Ključne riječi: tribologija, trenje, trošenje, površine, procesi trošenja, mehanizmi trošenja

SUMMARY

Despite of remarkable progress in tribology, there is still great importance of it in current industry which tendency is to minimize wear losses and improve safe operation of every system. Existing standard methods for examination of tribological characteristics are not sufficient in present needs that they are encountered by. Constant progress of industry needs to be followed by the same development in evolution of tribological examinations.

In this study, new laboratory methods for tribological properties of materials are described for every case of wear process. Every wear process consist of two or more wear mechanism which can have an impact in the same time, or can be divided in intervals, depending on types of tribosystem, relative movement and working conditions.

Key words: tribology, wear, industry, tribological properties, wear process, wear mechanism

1. UVOD

Od početka čovječanstva, trenje je predstavljalo vrlo bitan čimbenik u preživljavanju i obavljanju osnovnih životnih potreba kojima se čovjek susretao. Iako tada nisu znali objasniti tu pojavu, ljudi su ga itekako uspjeli iskoristiti na najbolji mogući način. Danas, kada smo u svakom pogledu upoznati s trenjem, ono predstavlja jednu od najvećih prepreka u industrijskom razvoju kojemu svijet teži. Prilikom svakog trenja dolazi do trošenja materija koje su u dodiru, a kako bi se bolje razumjele takve pojave, razvila se interdisciplinarna znanost – tribologija. Najjednostvanije rečeno, tribologija je znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja. Primjenu nalazi u svakodnevnom životu s kojim se susrećemo; od mehaničkih konstrukcija, obrade materijala pa i do primjena u medicinske svrhe s obzirom da je ljudsko tijelo jedan složeni tribosustav. Iako postoji neizmjeran broj primjera trošenja, dogovoreno su četiri osnovna mehanizma trošenja: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Kada se takva dva ili više mehanizama odvijaju istovremeno ili u određenom vremenskom slijedu, dolazi do procesa trošenja. Osnovni procesi trošenja nastali prema vrsti elemenata tribosustava, vrsti dodira, načinu opterećenja te obliku relativnog gibanja su: klizno trošenje, kotrljajuće trošenje, udarno trošenje, fretting, abrazija, erozija česticama, erozija kapljevinom i kavitacija. Upravo na temelju tih procesa su se i razvile laboratorijske metode za ispitivanje triboloških svojstava. Za svaki navedeni proces postoji više načina laboratorijskog ispitivanja te će za svaku od navedenih metoda biti predstavljena posebna primjena iste [1].

2. MEHANIZMI TROŠENJA

Trošenje se može definirati kao gubitak materijala s površine nekog krutog tijela zbog dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticama [2].

Četiri su osnovna mehanizma trošenja:

-abrazija

-adhezija

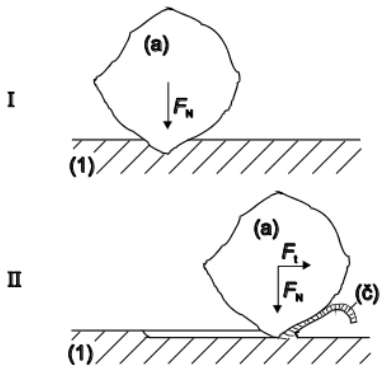
-umor površine

-tribokorozija

Svaki mehanizam trošenja opisuje se slijedom zbivanja koje dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. Takav slijed zbivanja naziva se jedinični događaj te on uvijek uključuje nastajanje pukotine te njihovo napredovanje [3].

2.1. Abrazija

Abrazija se može opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, slika 1.



Slika 1. Jedinični događaj abrazije [3]

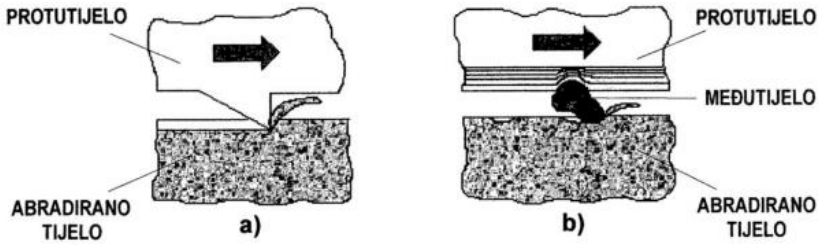
Jedinični događaj sastoji se od dvije faze:

1. Prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_n
2. Istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t

Ovisno o strukturi tribosustava u kojemu se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije, prikazana slikom 2. [4]:

a) Abrazija u dodiru dvaju tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abarzivno tijelo i abrazijsko protutijelo)

b) Abrazija u dodiru triju tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo), te međutijela (čestice) koja se gibaju između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski

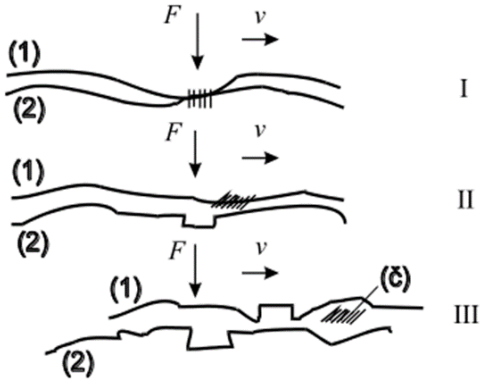


Slika 2. Abrazija u dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [4]

2.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju zbog procesa mikrozavarivanja krutih faza [2].

Jedinični događaj se može opisati u tri faze kao što je prikazano na slici 3 [3].



Slika 3. Jedinični događaj adhezije [3].

Faza I – nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu izbočina.

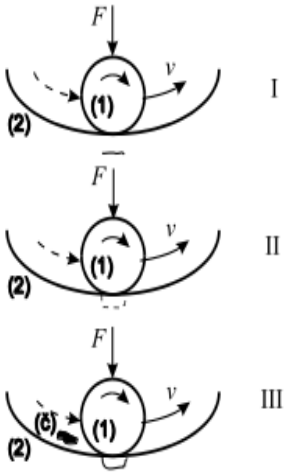
Faza II – raskidanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para.

Faza III – otkidanje čestice (eventualno).

2.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine zbog cikličkih promjena naprezanja [2].

Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 4 s tri faze [3].



Slika 4. Jedinični događaj umora površine [3]

Faza I - Stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine.

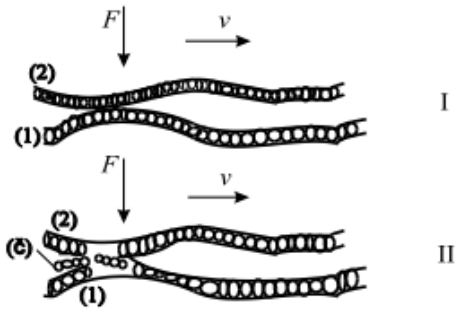
Faza II - Napredovanje mikropukotine.

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

2.4. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojemu prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem [2]

Jedinični događaj tribokorozije s dvije faze prikazuje slika 5 [3].



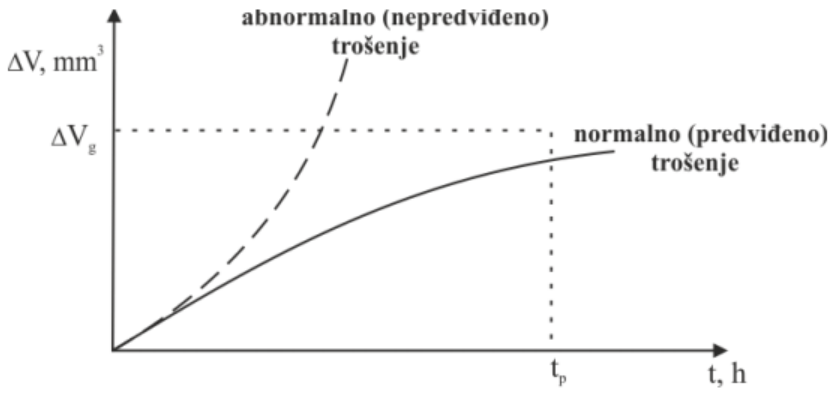
Slika 5. Jedinični događaj tribokorozije [3]

Faza I – stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije

Faza II – mjestimično razaranje sloja produkata korozije

3. PROCESI TROŠENJA

Cilj tribologije je primjenom odgovarajućih tribooloških mjera postići funkcionranje tribosustava u režimu tzv. normalnog trošenja, slika 6.



Slika 6. Opći oblik procesa trošenja [3]

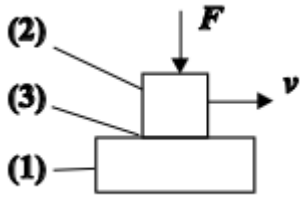
Kao što je već navedeno u uvodu, postoje sljedeći slučajevi trošenja [3]:

- Klizno trošenje
- Kotrljajuće trošenje
- Udarno trošenje
- Fretting
- Abrazija
- Erozija česticama
- Erozija kapljevinom
- Kavitacija

U nastavku će biti objašnjena većina navedenih postupaka, kao i standardne metode ispitivanja triboloških svojstava pri određenom procesu. Uz to, za svaku navedenu eksperimentalnu metodu bit će prikazana posebna primjena iste u raznim inustrijskim primjenama.

3.1. Klizno trošenje

Velik broj primjera trošenja pripada ovoj skupini trošenja. Shema tribosustava pri kliznom trošenju prikazana je na slici 7 [1].



Slika 7. Shema tribosustava pri kliznom trošenju [1]

(1) - funkcionalni dio

(2) - funkcionalni dio

(3) - međusredstvo (mazivo)

F – sila, N

v – brzina, m/s.

Relativno gibanje može se opisati kao klizanje. Stupnjevi opasnosti od pojedinih kehanizama trošenja pri kliznom trošenju, prema [3], jesu:

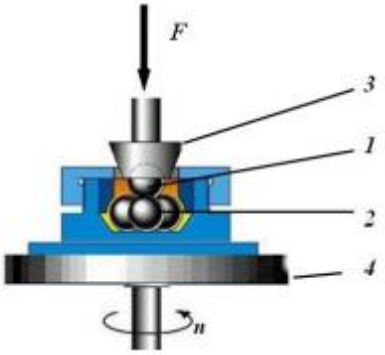
- Adhezija – jako visoki
- Umor površine – srednji
- Abrazija – niski
- Tribokorozija – najniži.

Pokazatelj otpornosti na trošenje je tribološka kompatibilnost materijala, odnosno prikladnost za rad u kliznom paru. Karakteristični primjeri kliznih parova su klizni ležaji, klizne vodilice, vreteno/matica, zglobovi i sl. Određivanje komatibinosti materijala za rad u kliznom paru se određuje eksperimentalnim putem.

3.1.1. Klizno ispitivanje „četiri kuglice“

Uređaj „četiri kuglice“ (engl. *„four ball tester“*) za klizno ispitivanje (IP 239)

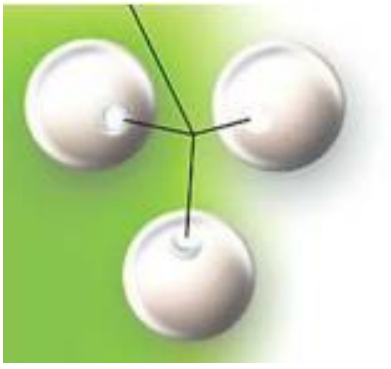
Shema metode prikazana je na slici 8.



Slika 8. Shema uređaja „4 kuglice“ za klizno ispitivanje [5]

Tribosustav se sastoji od tri stacionarne kuglice (2) učvršćene u držaču (4) koje opterećuju definiranom silom *F* gornju kuglicu (1). Gornja kuglica učvršćena je u stožastom držaču kuglice (3) i rotira definiranim brojem okretaja *n*. Sila *F* može biti konstantna ili kontinuirano rastuća. Ispitivanje se prekida kada se postignu zadani parametri (definirano vrijeme ispitivanja ili postignuti iznos sile) il dok ne dođe do međusobnog zavarivanja – slika 9. Trag trošenja, slika 10, mjeri se mikroskopom [1].

Slika 9. Zavarene kuglice [1]



Slika 10. Tragovi trošenja na donjim kuglicama [6]

Tijekom ispitivanja ovom metodom mjere se sljedeće karakteristike:

- Faktori trenja
- Normalna sila
- Temperatura maziva
- Brzina rotacije
- Trag trošenja na kuglicama
- Vrijeme trajanja ispitivanja

3.1.1.1. Vakuumski tribouređaj „četiri kuglice“ za procjenu tekućih maziva u primjenama svemirske industrije [7]

Razvoj novih satelita, svemirskih letjelica te općenito komponenti svemirikih postaja doveo je do unaprijeđenja mehaničkih pokretnih dijelova poput kliznih prstenova, nizova solarnih panela, zupčanika i sl. Poboljšane karakteristike maziva nisu zahtijevane samo zbog duljeg vijeka trajanja samih dijelova, nego i zbog pouzdanosti istih. Maziva su u svemirkoj upotrebi iz više razloga

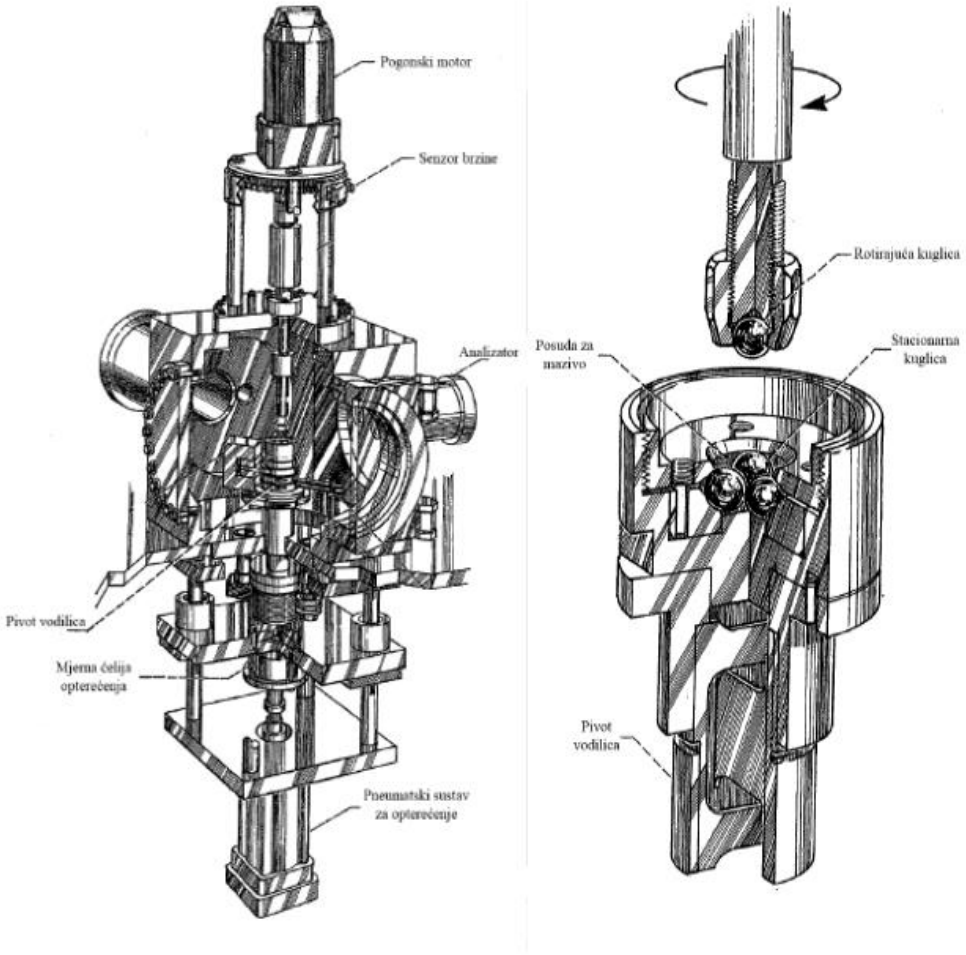
Neki od njih su: smanjenje trošenja u elastohidrodinamičkom podmazivanju, smanjene mehaničke buke, lakoća nadopunjavanja, relativna neosjetljivost na okoliš te čišćenje krhotina trošenja.

U radu [7] opisana je konstrukcija i način rada tribouređaja koji radi na principu metode „četiri kuglice“.

Uređaj procjenjuje tribološka svojstva tekućih maziva za primjenu u svemirskim ekspedicijama.

Uvjeti rada su: sobna tempereatura, opterećenja do 1000N, brzina vrtnje 500 okretaja po minuti, tlak $1x10^{-6}$ Pa.

Shema konstrukcije je prikazana na slici 11. Struktura tribouređaja je identična kao i na klasičnom četiri uređaju kuglice. Uređaj je postavljen u vakuumsku komoru kako bi se ispitivanje mogalo provesti pri ekstremno niskom tlaku. Vakuum je postignut turbomolekularnom pumpom, 140(l/s), te pomoćnom mehaničkom pumpom kako bi se mogao postići vakuum od otprilike $1x10^{-4}$ Pa do $1x10^{-6}$ Pa.



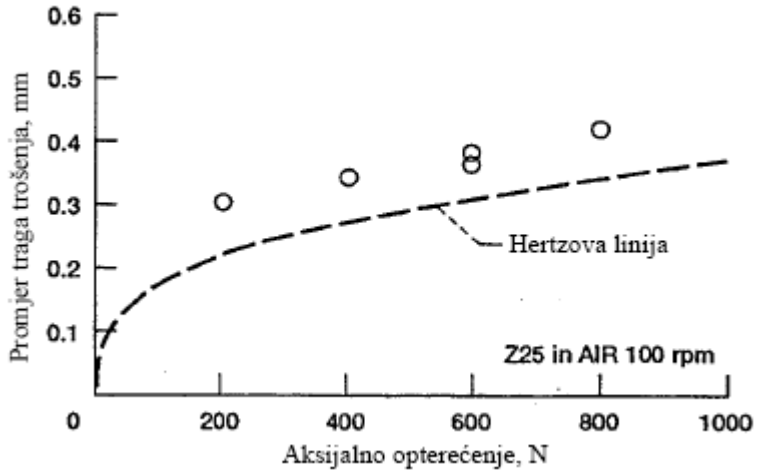
Slika 11. Shema tribouređaja 4 kuglice korištenog u vakuumskom ispitivanju [7].

Rotirajuća kuglica montirana je na vreteno koje je povezano s mehanizmom magnetskog rotacijskog zatvaranja s tekućinom (način brtvenja prilikom vakuumskog okoliša). Donje tri kuglice su fiksirane u držaču ugrađenom na postolju. Postolje se moze pomicati linearno prema gore (u smjeru osi z) koristeći pneumatski cilindar. Okno kroz koje se linearno pomiče postolje podupreno je pivot vodilicom (engl. *„flex pivot"*) unutar vakuumske komore preko kugličnih ležaja. Donji dio okna smješten je na postolju pri vanjskom dijelu vakuumske komore. Naprava za mjerenje sile smještena je između navedenog postolja i pneumatskog cilindra.

Prije početka ispitivanja obavezno je čišćenje kuglice i posude za mazivo. Kuglice su izrađene od AISI 440C nehrđajućeg čelika te očišćene brušenjem sitnim aluminijskim prahom (nominalni promjer 0,3 μm) pod mlazom vodem te naknadnim ispiranjem deioniziranom vodom. Zaostala voda na kuglicama obrisana je čistim filter papirom. Nakon čišćenja kuglice su držane u suhoj posudi u atmosferi dušika. Mazivo koje se ispituje stavljeno je u posudu za mazivo nakon što su

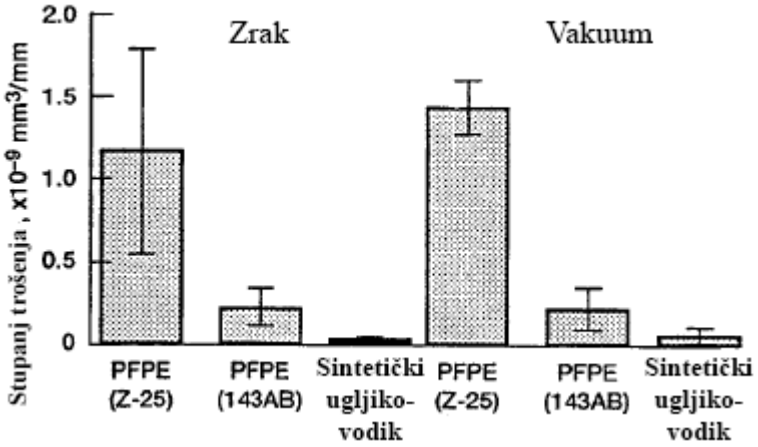
u njoj pričvršćene tri stacionarne kuglice. Posuda je stavljena u "staklenku" gdje je mehaničkim kompresorom postignut vakuum od otprilike 1 Pa. Nakon postizanja vakuuma, posuda za mazivo stavljena je unutar komore koja se zatim također podvrgava vakumiranju preko mehaničke pumpe, a zatim i turbomolekularne - taj postupak reducira stvaranje mjehurića te prskanje maziva koje bi moglo uzrokovati kontaminaciju komore. Kada je postignut vakuum od 10^{-5} Pa ili manje, započinje ispitivanje. Moment trenja kontinuirano je praćen tijekom cijelog eksperimenta. Trošenje materijala mjeri se nakon uklanjanja iz komore preko promjera oštećenja koje je nastalo na 3 stacionarne kuglice koristeći optički mikroskop. Postolje za ispitivanje uzorka na mikroskopu dizajnirano je tako da se ne moraju izvaditi kuglice iz posude što omogućava, ukoliko je potrebno, nastavak eksperimenta s istim kuglicama.

Slika 12 pokazuje podatke o tragu trošenja ovisnom o aksijalnom opterećenju u atmosferi zraka, brzini rotacije 100 okretaja po minuti i trajanju ispitivanja od 30 minuta. Upotrijebljeno mazivo je perfluoropolieter (mazivo u avionskoj industriji). Također su prikazani i izračunani promjeri dodira.



Slika 12. Podaci o trošenju ovisno o aksijalnom opterećenju [7].

Slika 13 prikazuje stupanj trošenja za tri komercijalna maziva koja se primjenjuju u svemirskim misijama u atmofsferi zraka i vakuuma. Uvjeti ispitivanja su: 25 ºC, aksijalno opterećenje 200N, brzina okretanja – 100 okretaja po minuti. Tri ispitivana maziva su: nerazgranati perflourpolieter (PFPE), razgranati PFPE te sintetički ugljikovodik koji je sadržavao antioksidant te komponentu za smanjenje trošenja.

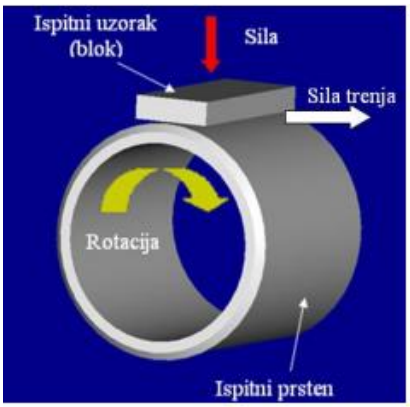


Slika 13. Prikaz stupnjeva trošenja za tri komercijalna maziva u svemirskim ekspedicijama [7].

Rezultati u atmosferi zraka i u vakuumu jasno razlučuju učinke reaktivnijeg nerazgrnatog PFPE (Z-35) i manje reaktivnog razgranatog PFPE (143 AB).

3.1.2. Ispitivanje „prizma po prstenu“

Na slici 14 prikazana je shema ispitivanja „prizma po prstenu“ [8].



Slika 14. Shema ispitivanja „prizma po prstenu“ [8].

Kao što je prikazano na slici 14, ispitivanje „prizma po prstenu“ ASTM G77 (engl. *„block on ring“*) sastoji se od stacionarnog ispitnog uzorka (bloka) koji je napravljen od ispitnog materijala te opterećen zadanom silom na rotirajući prsten. Ovom metodom određuje se otpornost materijala na klizno trošenje. Trag trošenja je linijski na ispitnom prstenu. Materijali većeg

otpora trošenju imat će manji gubitak volumena. Rezultati trošenja se prikazuju upravo kao gubitak volumena u mm^3 i za ispitni uzorak i za ispitni prsten [1].

Za ispitivanje maziva, temperatura ispitnog uzorka mjeri se termoparom postavljenim u posebnu udubinu u ispitnom uzorku [5].

Mjere se sljedeće karakteristike: gubitak mase ispitine prizme, širina traga trošenja, gubitak mase prstena, sila trenja i izdržljivost mazivnog filma. Ispitivanja se prekidaju kada se postigne zadano ispitno vrijeme ili zadani broj okretaja ispitnog prstena [1].

3.1.2.1. Modificirani nanodijamanti (ND) kao dodatak komercijalnim uljima [9]

Pogodnosti korištenja maziva s nanodijamntima kao aditiva se očituju u tome da je potreban jako mali maseni udio (0,1 - 0,5 %) čestica kako bi se znatno poboljšala tribološka svojstva. Načini na koje dolazi do poboljšanja svojstava su formiranje zaštitnog površinskog filma koji podnosi veća opterećenja i povećava toplinski kapacitet. Isto tako, spajanje nanočestica s dodirnim slojem rezultira otvrdnućem površine. Javlja se i efekt kugličnog ležaja gdje dolazi do kotrljanja nanočestica između površina te smanjenje oksidacije ulja pri visokim temperaturama. Jedan od glavnih problema koji se nameću pri korištenju nanočestica je mogućnost koagulacije istih zbog jakih kohezijskih sila te nastajanja nakupina veličine od 5 do 10 μm. Uspješna upotreba nanočestica uvelike ovisi o njihovoj veličini te koloidnoj stabilnosti. Dva načina su predložena za rješavanje ovog problema. Jedan od njih je surfaktant - površinski aktivna stvar koja smanjuje površinske napetosti u uljima. Ipak, upotreba takvih stabilizatora ne donosi uvijek pozitivne rezultate te njihov utjecaj na svojstva ulja treba biti dodatno istražen. Drugi način je i površinska modifikacija ND-a ultrazvučni tretiranjem. Površinske modifikacije i ultrazvučno tretiranje dopuštaju uvođenje ND-a u ulja bez značajnog nakupljanja. ND je u ulju raspršen u jako stabilnom koloidnom stanju u dugotrajnom periodu. Korištene su dvije veličine ND čestica prosječne veličine 96 i 270 nm. Za ispitivanje smanjenja trošenja zbog korištenja aditiva pri raznim opterećenjima te raznim tarnim parovima korišten je tribotest prizma po prstenu. Otpornost prema trošenju modificarnih nanočestica kao aditiva u ulju ocijenjena je prema izgledu istrošene površine i gubitka mase nakon ispitivanja.

ND korišteni u pokusu proizvedeni su detonacijskom sintezom u atmosferi osiromašenoj kisikom iz eksploziva koji su sadržavali ugljik. Ekstrakcija ND-a iz detonacijske čađe je podrazumijevala

mehaničko uklanjanje primjesa, a zatim i tretiranje sa NaOH. Na kraju je smjesa isprana s deioniziranom vodom na neutralni pH te osušena na 100 ºC. Dobiveni prah centrifugiranjem je podijeljen na 2 frakcije koje su nazvane F1 i F2. Otopina ulja s 1% masenog udjela ND je dobivena dodavanjem 0,5g F1 ili F2 frakcije na 57 mL ulja. Homogenizacija ND-a u ulju je potaknuta mehaničkim miješanjem te ultrazvučnom obradom preko "ultrazvučnog roga" koji je uronjen u otopinu. Koncetracija je zatim postupno razrijeđena dodavanjem ulja kako bi se postigao maseni udio ND od 0,1%.

Korišteno je nekoliko vrsta ulja za motore: motorno SAE 10W, industrijsko I 20A i ulje za turbine Tp22. Kako bi se spriječila sedimentacija, uzorci su čuvani 3 mjeseca prije ispitivanja.

Donji ispitini uzorak bio je prsten dimenzija 50 mm x 10 mm napravljen od ugljičnog čelika 45 (Si 0,17 - 0,37 , Mn 0,5-0,8%, Cu 0.25%, HV=2.7 GPa) što je ekvivaletno AISI 1045 čeliku. Gornji fiksirani dio(15 mm x 25mm) napravljen je od čelika Babitta (Sn 83%, Sb 11%, Cu 6%, 27 HB). Uzorci su polirani na hrapavost R_a=0,12 μm. Prsten, koji se rotirao konstantnom brzinom od 250 okr/min, bio je djelomično uronjen u posudu s 25mL uzorka ulja. U posudu je uronjen i termočlanak koji je mjerio temperaturu ulja tijekom ispitivanja. Vertikalno opterećenje postupno je dodavano preko nosača utega (vrste su pojašnjene u tablici 1 - za svaki vrstu ispitana su tri uzorka). Nakon ispitivanja, uzorci su isprani u ultrazvučnoj čistilici u benzinu te osušeni.

Tablica1. Vrste opterećenja kombiniranih materijala [9]

Vrsta	Kontaktni par	Opterećenje (kg)	Vrijeme (min)	Ulje
1	Čelik-čelik	5,5	30	SAE 10W
		24	30	I 20A
		36	45	
		58	45	
2	Čelik-čelik	6,5	10	
		23	10	I 20A
		32	10	
		40	30	
		60	30	
3	Čelik-Babit	5,5	240	I20 A
				Tp 22

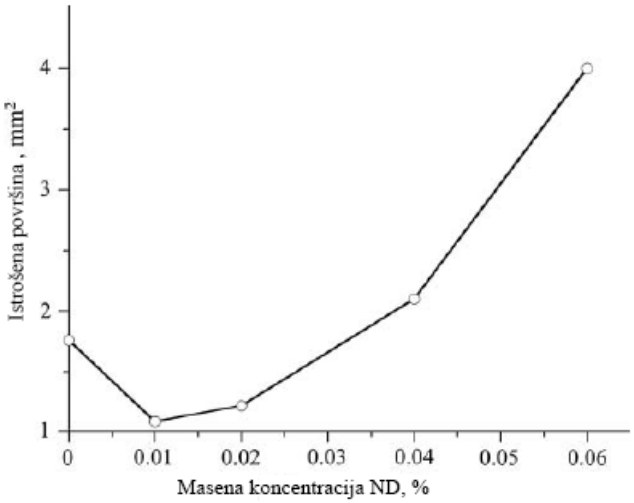
Trošenje se mjerilo gubitkom mase te izgledom površine uzoraka. Daljnje pročišćenje ND je postignuto uklanjanjem preostalih organskih komponenti i metalnih primjesa. Razlika primjesa između početnih i modificiranih ND prikazana je u tablici 2.

Tabela 2. Razlika primjesa početnih i modiciranih ND [9]

Element	Početni sastav ND	Modificirani sastav ND
Mg	0,21	-
Al	0,07	0,06
Si	0,22	0,15
P	0,05	0,04
S	0,07	0,02
K	0,01	-
Ca	0,77	0,02
Cr	0,03	0,02
Fe	0,6	0,36
Ni	0,01	0,01
CU	0,04	0,01

Nakon sušenja, F2 frakcija je u obliku crnog, a F2 u obliku sivog praha. Veličina primarnih kristala iznosila je oko 4 nm. Usporedba dvaju frakcija pokazala je da one sadrže različite količine ugljika koji nije dijamntni. F1 je sadržavao 3 puta manje ne dijamantnog ugljika poput grafita i amorfnog ugljika u usporedbi s F2 frakcijom. Zbog jake kohezijske energije, primarni ND kristali se nagomilavaju u veće čestice, koje je gotovo nemoguće razdvojiti konvencionalnim mehaničkim ili ultrazvučnim metodama. Srednji promjeri ND su 96,1 nm za F1 te 270 nm za F2 frakciju. Unatoč parcijalnoj koagulaciji, ND su u uljnoj suspenziji bili stabilni dugo vremena.

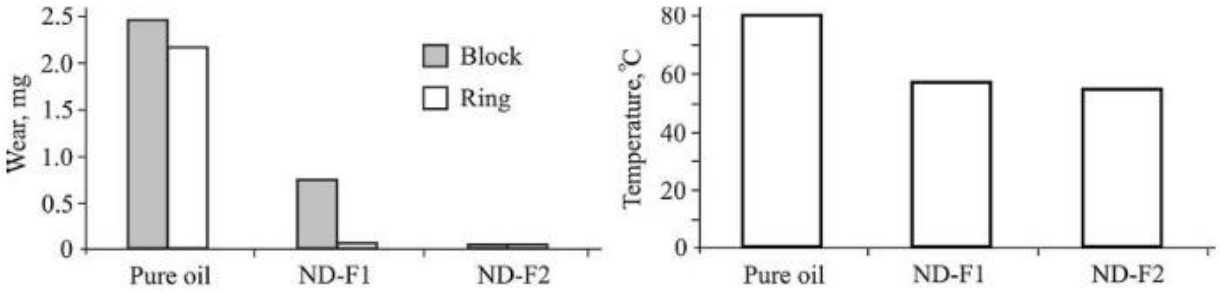
Homogena disperzija i koloidna stabilnost omogućili su konstantnu koncetraciju nanočestica u volumenu ulja izbjegavajući pritom negativne efekte nastajanja bogatih ili siromašnoih zona ND-a. Količina ND u ulju igra važnu uloga zbog toga što pretjerana koncetracija tvrdih čestica moze dovesti do intezivnog trošenja zbog štetnog abrazijskog efekta. Područje istrošenosti kao funkcija koncetracije ND u ulju I20A je prikazana u slici 15.



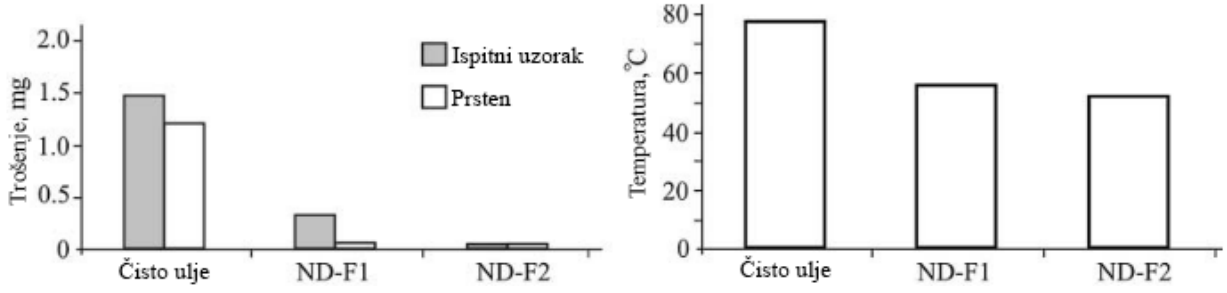
Slika 15. Područje istrošenosti kao funkcija koncetracije ND u ulju I20A [9]

Može se uočiti da se koncetracijom od 0,06 ili 0,04 % ND povećalo trošenje površine čelika. Koncetracija od 0,01% pokazala se optimalnom za minimalno trošenje.

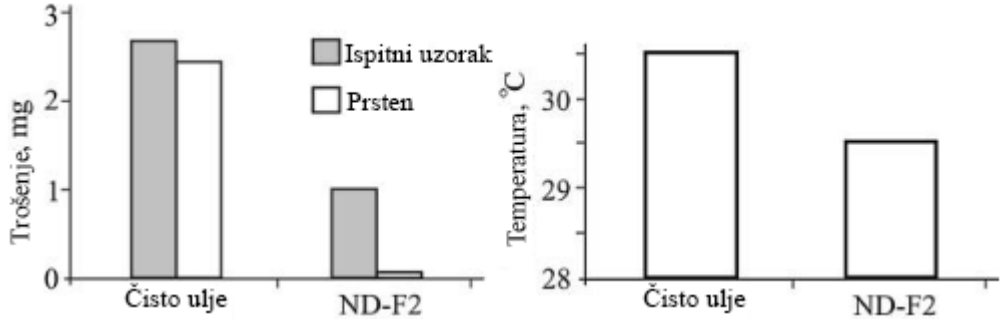
Rezultati predstavljeni na slikama 16,17,18 i 19 pokazali su poboljšanja uzrokovana korištenjem nanodijamanata. Svojstva maziva su se očitovala u funkciji smanjena trošenja te smanjenja temperature ulja neovisno od veličinama čestica, materijalima u dodiru ili uvjetima ispitivanja.



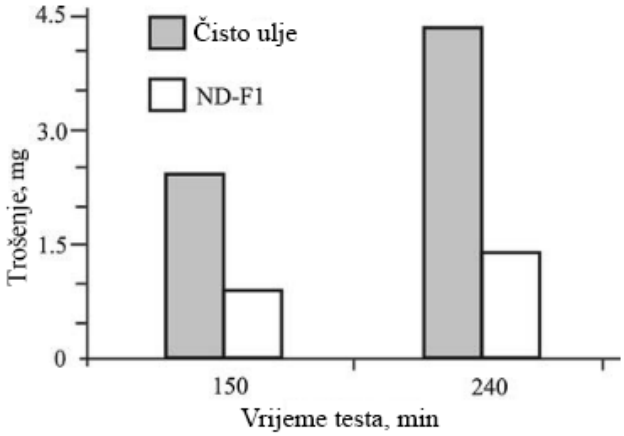
Slika 16. Rezultati trošenja i smanjenja temperature za 0,01% ND u vrsti ispitivanja 1 [9].



Slika 17. Rezultati trošenja i smanjenja temperature za 0,01% ND ulja SAE 10W [9].



Slika 18. Rezultati trošenja i smanjenja temperature u vrsti ispitivanja 3 za 0,01% ND ulja I 20A [9].



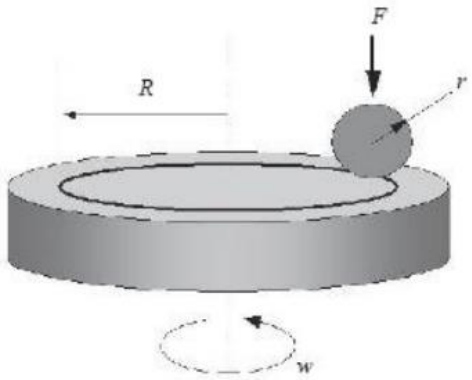
Slika 19. Rezultati trošenja ovisno o vremenu za 0,01% ND za vrstu ispitivanja 3 ulja Tp 22 [9].

Modifikacija površine detonacijom nanodijamanta i UZV tretmanom omogućili su ukomponiranje nanočestica u komercijalna ulja bez značajnog nagomilavanja. Modificirane ND čestice pokazale su izvrsnu koloidnu stabilnost tijekom dugotrajnog pohranjivanja (do 12 mjeseci). ND čestice u ulju poboljšavaju tribološka svojstva materijala, te smanjuju i trošenje i temperaturu ulja u usporedbi s čistim uljima.

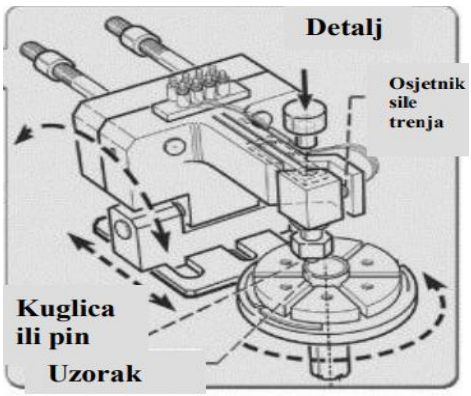
Nije pokazana značajna razlika u utjecaju na tribološka svojstva između veličina čestica 96 i 270 nm. Mehanizam zaštite od trošenja se očituje u stvaranju tvrdog i poroznog sloja između kontaktnih površina.

3.1.3. Ispitivanje „kuglica po disku“

U metodi „kuglica po disku“ (engl. *„ball on disc test“*), tribometar se sastoji od diska na kojemu se nalazi uzorak i koji se okreće zadanom brzinom, te nosača s kuglicom koja poznatom silom *F* pritišće uzorak. Takvo isptivanje ostavlja kružni trag na disku (uzorku) te se radijus dodira može mijenjati [1]. Na slici 20 prikazan je trag trošenja na uzorku, a na slici 21 i shema tribouređaja „kuglica po disku“.



Slika 20. Trag trošenja na uzorku [10].



Slika 21. Shema tribouređaja „kuglica po disku“ [1].

Temperature ispitivanja mogu se kretati od -40 do 800 ºC u kontroliranoj atmosferi s kontroliranom vlagom u zraku. Uzorci se mogu podmazivati, a postizivo opterećenje iznosi i do 1000 N. Brzina klizanja kuglice po uzorku može dosegnuti vrijednost do 14 m/s. Materijali koji se ispituju su metal ili keramika. Trenje se mjeri kontinuirano tijekom ispitivanja, a trošenje se određuje analizom mikrostrukture te ispitivanjem profilometrije nakon provedenog ispitivanja [1].

3.1.3.1. Ispitivanje utjecaja amorfne prevlake ugljičnog nitrida u atmosferi dušika pomoću ispitivanja „kuglica po disku u dva koraka" [11]

Amorfna prevlaka ugljičnog nitrida smatra se obećavajućom prevlakom u zahtijevanim primjenama u industriji zbog svojih odličnih tribooloških svojstava kao što su niski faktor trenja te visoka otpornost trošenju. Trenje CNx prevlaka izrazito je povezano s okolišnim plinovima - faktori trenja u zraku i kisiku su obično vrijednosti iznad 0,1, dok u struji dušika su oko 0,01 pa čak i 0,001. Međutim, još uvijek nisu skroz razjašnjeni mehanizmi trenja između CNx prevlaka u atmosferi N_2. Efekt uhodavanja u procesu trošenja prevlake ugljičnog nitrida u struji dušikovog plina istražen je pomoću ispitivanja „kuglice po disku u dva koraka". „Istrošena" Si_3N_4 kuglica iz prvog koraka, tj. uhodovanja (slika 23), zamijenjena je novom Si_3N_5 kuglicom prevučenom CNx prevlakom u naknadnom klizanju po disku u struji dušikovog plina. Ovaj način ispitivanja u dva koraka pokazao se jednostavnom, ali efektivnom tehnikom za postizanje stabilnog i niskog trenja. Faktor trenja između CNx dodirnih površina u struji dušikovog plina se višestruko smanjio s 0,07 bez uhodovanja do 0,025 koristeći uhodovanje u dva koraka.

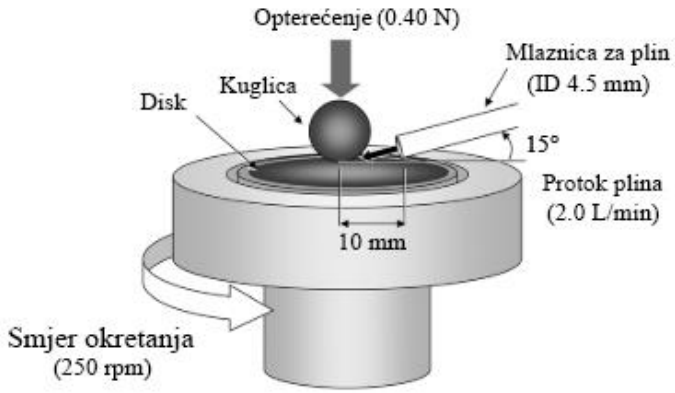
Pozitivan efekt dušikovog plina na smanjenje trenja CNx prevlaka je dodatno poboljšan prethodinim uhodavanjem prije dovođenja dušika na kliznu površinu. Točnije, brzo smanjenje faktora trenja s 0,1 na 0,02 pri dodirnoj površini Si_3N_4 kuglice i diska istog materijala prevučenog NCx prevlakom postignuto je upuhivanjem N_2 plina nakon tisućitog kruga do kada je trajao proces uhodavanja u atmosferi zraka. Još veća promjena u faktoru trenja očituje se ukoliko je pri uhodavanju korišten kisik kao plin prvih 50 krugova s istim materijalima kuglice i diska, a nakon toga dušik gdje se faktor trenja drastično smanjio na 0,005 u dodirnoj površini. Može se zaključiti da povijest klizanja u atmosferi zraka ili kisika znatno utječe na trenje u dušikovoj atmosferi.

Kako bi se razjasnio nizak stupanj trenja CNx prevlaka u dušikovoj atmosferi nakon procesa uhodavanja, obratila se pozornost na promjene sastava i strukturne promjene površine kuglice, kao i na formiranje uniformne i homogene prevlake bogate ugljikom koja je jedan od glavnih razloga postizanja stabilnog i niskog trenja CNx prevlaka pod strujom dušika. Isto vrijedi i za površinu diska.

Ugljično nitridna prevlaka postiže se taloženjem potpomognutim ionskim snopom (engl. *ion beam-assisted deposition*) pri sobnoj temperaturi. Podloge na koje su nanošene CNx prevlake su Si_3N_4 disk promjera 30 mm i debljine 4 mm te SiN_4 kuglica promjera 8 mm. Prije postavljanja u komoru za taloženje ionima, podloge su očišćene u UZV kupki pomoću acetona, etanola i deionizirane vode u trajanju od 20 minuta.

Neposredno prije taloženja, podloge u dodatno čišćene prskanjem dušikovim ionima kroz pet minuta kako bi se uklonili oksidi i ostali apsorbirani spojevi na površini. Brzina taloženja ugljika je oko 2 nm/s. Ukupna debljina prevlake iznosila je 400 nm.

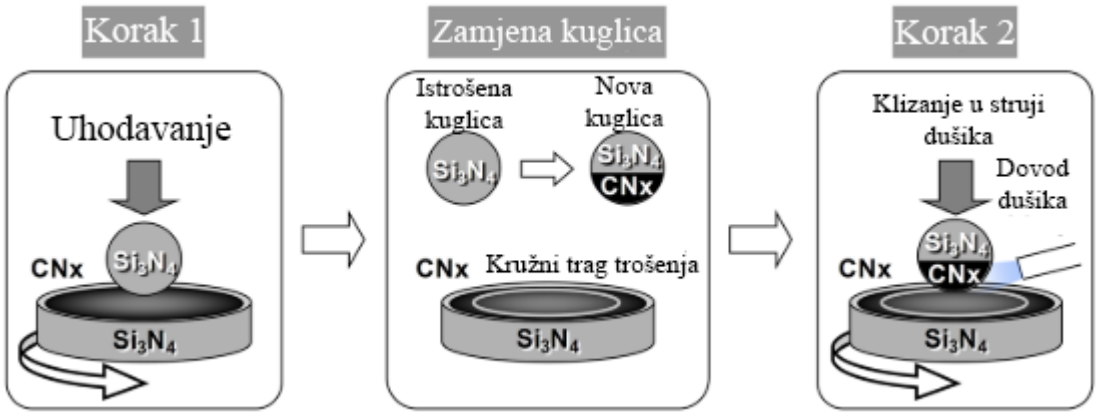
Ispitivanje na trošenje klizanjem postiglo se korištenjem prilagođenog triboуređaja "kuglica po disku" s jedinicom za dovod plina kao što je prikazano na slici 22.



Slika 22. Prilagođeni triboуređaj „kuglica po disku“ s jedinicom za dovod plina [11].

Atmosfera oko kontaktne površine kontrolirana je direktnim upuhivanjem plina preko plinske mlaznice promjera 4,5 mm okomito postavljene na držač kuglice, s vertikalnim kutom od 10º te udaljenošću 10 mm od kontaktne točke kuglice i diska. Dva tipa plina visoke čistoće korištena su u tribotestu: 99,9995 vol.% dušik te 99,9 vol.% kisik. Ispitivanje je izvedeno pri suhom zraku (relativna vlažnost od 10%), pri okolišnom zraku (relativna vlažnost od 30%) te pri vlažnom

zraku (relativna vlažnost od 50%). Ispitivanje „kuglica po disku u dva koraka“ korišteno u eksperimentu NXc prevlaka shematski je prikazano na slici 23.

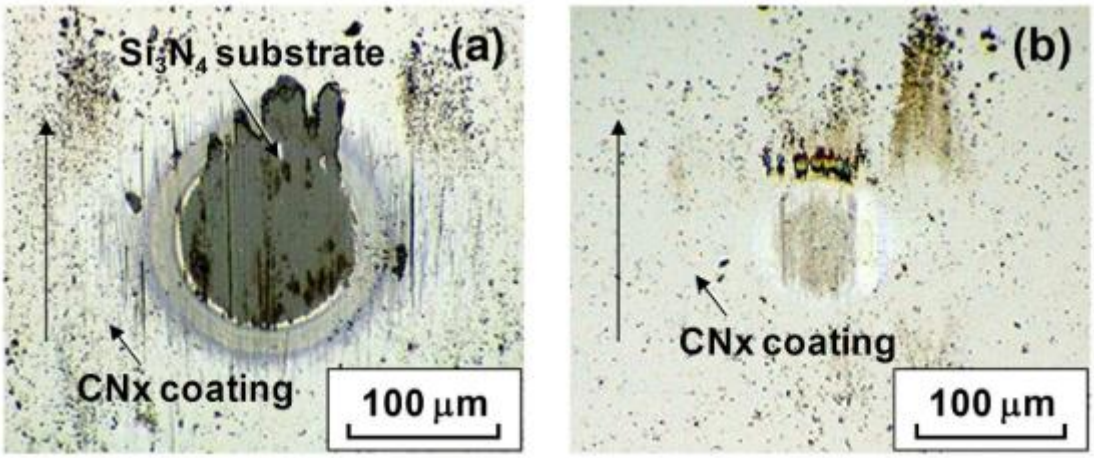


Slika 23. Shematski prikaz ispitivanja „kuglica po disku u dva koraka“ [11].

Nakon korištenja Si_3N_4 kuglice u prvom koraku te uhodavanja, ona se zamjenjuje istom kuglicom prevučenom Cnx prevlakom. Atmosfere plina korištene u prvom koraku postignute su upihivanjem dušika, kisiika ili bez upuhivanja plina, tj pri okolišnom zraku. Broj krugova u uhodavanju iznosio je od 0 do 1000 (0, 50, 100, 250, 500 i 1000). Efekt uhodavanja, izražen kroz razne utjecaje poput okolišne atmosfere ili broja krugova, očitovao se u statičkom faktoru trenja u drugome koraku.

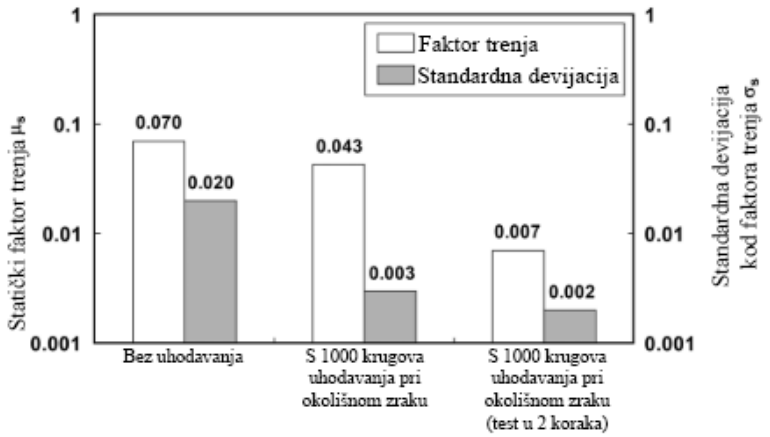
Diskovi prevučeni CNx prevlakom okretali su se ispod učvršćenog uzorka Si_3N_4 kuglice sa ili bez CNx prevlake pri sobnoj temp koja je bila između 18 i 23 ºC. Opterećenje koje je postignuto preko držača kuglice iznosilo je 0,4N stvarajući tako maksimalan Hertzov tlak od 517 MPa u dodiru između materijala koji su prevučeni CNx prevlakama (kuglica/disk). Promjer traga trošenja na disku iznosio je između 16 i 24 mm, što odgovara kliznoj brzini do 0,21-0,31 m/s pri konstanstnoj brzini 250 okr/min. Ispitivanje klizanja u drugome koraku trajao je 40 min (10000 krugova). Kako bi se razjasnila uloga hrapavosti površine diska u uhodavanju, tj. prvom koraku, Si_3N_4 disk prevučen CNx prevlakom ispoliran je s R_a=34 nm na R_a=3 nm.

Izgled istrošene površine kuglice prevučene CNx pokazan je na slici 24.



Slika 24. Izgled istrošene površine kuglice bez (a) i sa uhodavanjem (b) [11].

Bez uhodavanja, faktor trenja pod strujom dušika smanjio se s 0,5 na 0,1 nakon 1000 krugova. Na slici 24a može se vidjeti potrošena CNx prevlaka nakon ispitivanja klizanja bez uhodavanja. Faktor trenja dodatno se smanjio ukoliko je prethodno bila faza uhodavanja. Nakon uhodavanja od 1000 krugova pri okolišnom zraku, faktor trenja smanjio se na vrijednost manju od 0,05 pri upuhivanju struje dušika. U slučaju kada se postupak provodio u 2 koraka, tj kada je u prvom koraku provedeno uhodavanje od 1000 krugova pomoću Si_3N_4 kuglice bez prevlake, a zatim u drugom koraku kuglica prevučena CNx prevlakom, postignut je faktor trenja 0,01. Također, korištenjem postupka uhodavanja, sloj CNx prevlake i dalje je bio postojan na kuglici. Na slici 25 prikazan je statički faktor trenja između kuglice i diska koji su prevučeni CNx prevlakom u struji dušika sa ili bez uhodavanja.



Slika 25. Statički faktor trenja u struji dušika sa ili bez uhodavanja [11].

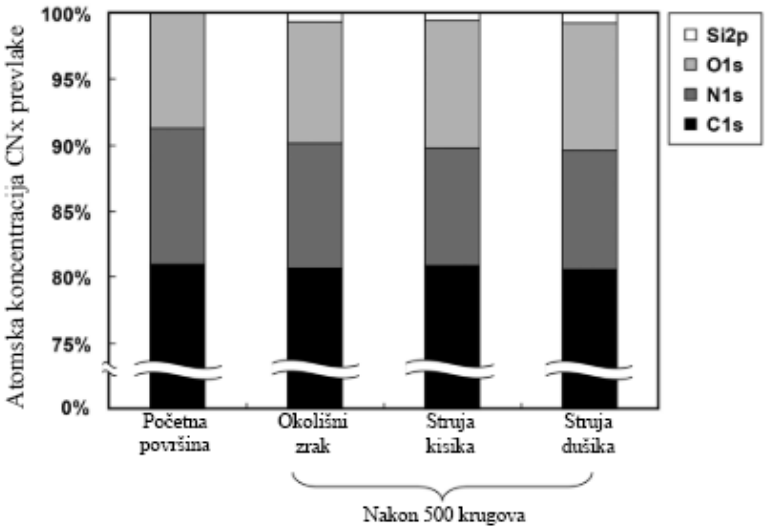
Statički faktor trenja značajno se smanjio s vrijednosti 0,07, koja je postignuta bez uhodavanja, na vrijednost 0,025 nakon uhodovanja. Nešto manji faktori trenja postignuti pri okolišnom zraku uz uhodovanje, iako se vrijednosti razlikuju ovisno o broju krugova i okolišne atmosfere. Specifično, nakon 500 krugova uhodavanja pri okolišnom zraku, postignut je najmanji faktor trenja od 0,004.

U uobičajenim primjenama nakon 10 krugova okretaja kuglice po disku došlo bi do oštećenja i odlamanja prevlake. Ispitivanje u 2 koraka pokazao se jedinstvenim rješenjem za duže očuvanje kontaktne površine CNx prevlaka uz upuhivanje struje dušika. Prilikom uhodavanja mikroneravnine na dodirnoj površini su uklonjene te je uspostvaljena glatka površina koja je dovela do smanjenja sile trenja. Kako bi se provjerio utjecaj mikroneravnina, Si_3N_4 disk prevučen slojem CNx dodatno je poliran prije uhodavanja - polirani disk uspješno je spriječio nestabilno trenje čak i bez uhodavanja te smanjio faktor trenja nego što je to bio slučaj kod nepoliranog diska.

Visok faktor trenja prilikom procesa klizanja može se pripisati ulasku sitnih čestica između dodirnih površina čime se povećava sila potrebna za svladavanja trenja. Unatoč poliranju, ono samo ne može i dalje osigurati niži faktor trenja od ispitivanja kuglice po disku u dva koraka. Utjecaj poliranih površina nije glavni razlog postizanja niskog faktora trenja u ispitivanju u 2 koraka.

Najmanji faktor trenja pokazao se pri relativnoj vlažnosti od 30%. Time je pokazano da, osim utjecaja okolišnog plina, i vlaga može bitno utjecati na tribološko ponašanje CNx prevlaka u struji dušika.

Kako bi se razjasnila promjena sastava površine diska nakon uhodovanja, istrošene površine su nakon 500 krugova uhodovanja u atmosferi dušika, kisika ili okolišnog zraka analizirane rendgenskom fotoelektronskom spektroskopijom XPS, a atomska koncetracija početnih i istrošenih površina je prikazana na slici 26.



Slika 26. Atomska koncetracija početnih i istrošenih površina [11].

„Kuglica po disku u dva koraka“ pokazala se kao obećavajuća metoda za postizanje stabilnog trenja malog iznosa CNx prevlaka u struji dušika. Faktor trenja uvelike se smanjio s vrijednosti 0,07 koja je postignuta bez uhodavanja, do vrijednosti 0,025 uz uhodavanje. Specifično, najmanji faktor trenja postigao se u struji dušika nakon 500 krugova uhodavanja CNx diska pomoću Si_3N_4 kuglice pri okolišnom zraku (30% relativne vlažnosti) te je tada iznosio 0,004. Stabilnost i nizak faktor trenja ispitanih prevlaka pripisuje se stvaranju lubrikantskih gornjih slojeva na površini diska tijekom uhodavanja, što rezultira stvaranju grafitne strukture na površini koja osigurava niski i stabilni faktor trenja.

3.1.4. Ispitivanje „valjčić“ po disku

Na slici 27 prikazano je ispitivanje valjčić po disku (engl. *„pin on disc“*). Kao što shema prikazuje, uređaj se sastoji od diska koji se rotira zadanom brzinom, uzorka pričvršćenog na disk, nosača valjčića, utega kojim se ostvaruje normlana sila uz mogući elektronički senzor za mjerenje sile trenja [1].

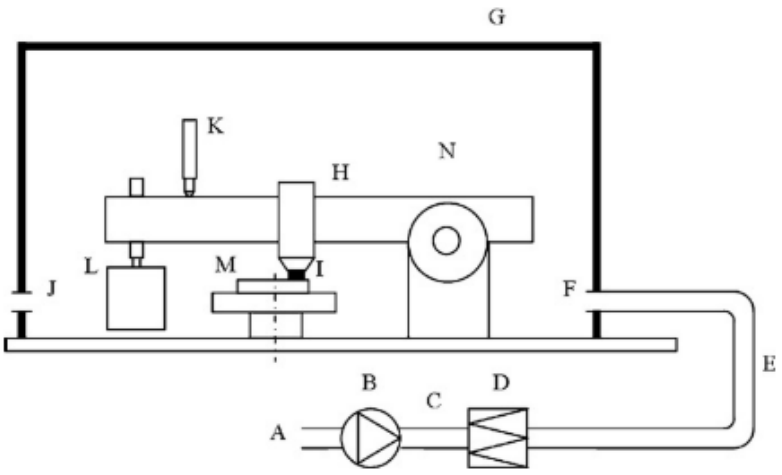
Slika 27. Ispitivanje valjčić po disku [12]

Ovim načinom ispitivanja mjeri se broj okretaja diska, trošenje ispitnog uzorka i abraziva, faktor trošenja te temperatura. Može se provesti u suhom ili podmazivajućem okruženju. Ispitivanje traje dok se ne postigne zadano vrijeme ili broj okretaja diska.

3.1.4.1. Simulacija istrošenih čestica kočnica nošenih zrakom pomoću uređaja valjčić po disku [13]

Diskovi kočnica na modernim autima ne mogu biti izolirani od okolišnog zraka. Tijekom kočenja dolazi do trošenja kočionog diska, ali i kočionih obloga na kočionim kliještima što rezultira sitnim česticama trošenja. Takve čestice trošenja zalijepe se na kočioni sustav ili postanu zrakom nošene. Osim što postoje regulacije koje ograničavaju količinu i veličinu takvih čestica u zraku, iste čestice stvaraju i estetski problem s obzirom da se zalijepe i na vidljive površine naplatka kotača. Ukoliko se ispituju zrakom nošene čestice kočionog diska na terenu, one se teško mogu razlikovati od čestica nastalih trošenjem iz drugih izvora poput kontakta auta i ceste gdje dolazi do trošenja nekih konstrukcijskih dijelova. Zbog takvih i sličnih razloga daje se prednost ispitivanju u laboratoriju gdje se može kontrolirati čistoća zraka. U radu [12] opisano je ispitivanje trošenja NAO (engl. *non asbestos organic*) i LM (engl. *low metallic*) kočionih obloga po disku od sivog ljeva.

Ispitivanje je provedeno koristeći tribouređaj "valjčić po disku" s horizontalnim rotirajućim diskom i valjčićem na kojeg djeluje normalna sila. Slika 28 prikazuje shemu ispitivanja. Uređaj je konvencionalnog tipa koji je moguće koristiti za ispitivanja trenja i trošenja raznih kombinacija materijala. Ispitivanje se odvijalo pri konstantnoj normalnoj sili do 100N i konstantnoj brzini okretanja do 440 okr/min. Preko mjerne ćelije određena je tangencijalna sila koja djeluje na valjak. Faktor trenja izračunat je preko izmjerene tangencijalne sile koje se podijelila s primijenjenom normalnom silom. Trošenje ispitnih uzoraka određeno je dvjema različitim metodama. Gubitak mase izmjeren je vaganjem uzoraka prije i nakon ispitivanja. Ukupno trošenje valjčića i diska mjerilo se u svakom trenutku ispitivanja pomoću osjetnika pomicanja (K) u smjeru osi z. Tribouređaj je smješten u klimatiziranoj komori s kontrolom čistoće zraka koja omogućava postizanje različitih temperatura i stupnjeva vlažnosti. Ventilator (B) usisava zrak iz prostorije u komoru, preko instrumenta za mjerenje protoka i filtera, do ulaza u komoru. Svi navedeni dijelovi sustava povezani su savitljivim cijevima te je sve zabrtvljeno kako bi se spriječio izlaz zraka. Zrak u komori je dobro izmiješan zbog kompliciranog oblika tribouređaja i visokog stupnja protoka zraka. Miješanje je prenosilo čestice trošenja do mjesta sakupljanja istih na izlazu iz komore(J).



Slika 28. Shema ispitivanja trošenja čestica kočenja, (A) zrak prostorije, (B) ventilator, (C) mjerač protoka zraka, (D) filter zraka, (E) savitljiva cijev, (F) ulaz u komoru, (G) komora, (H) uređaj valjčić po disku, (I) valjčić, (J) izlaz iz komore, (K) osjetnik pomicanja, (L) uteg, (M) rotirajući disk, (N) zrak unutar komore [13].

Ventilator je upuhivao zrak brzinom od 7,7 m^3/h ili 2,1 l/s. Volumen komore je iznosio 0,135 m3, a volumen tribouređaja 0,035 m^3, čime je omogućen protok zraka od 7,7 od 9,2 m^3/h. Sistem

je konfiguriran na način da puhanje varira između 2 i 50 m^3/h. Unutar komore nalazi se pneumatska cijev povezana s triboуređajem. Stlačen zrak, koji je prethodno pročišćen kroz filter, upuhuje se na kontaktnu površinu preko dvije mlaznice. Cilj toga je minimizirati broj čestica "zaglavljenih" na ispitnom materijalu te simulacija protoka zraka na disku kao u stvarnom okruženju. Zrak i čestice iz komore su transportirane do otvora za izlaz promjera 80 mm gdje se nalazio mjerni uređaj čestica. Kao glavni mjerni instrument čestica korišten je Grimm 1.109 Aerosol Spectrometer koji mjeri čestice veličine od 0,25 do 32 mikrometra u 31 podintervalu koncetracije od 1 do $2x10^6$ čestica/dm3 pri protoku zraka od 72 dm^3/h. Osim navedenog instrumenta, korišteni su i drugi mjerni instrumenti raspršivanja poput TSI DustTrak koji je mjerenja provodio na temelju koncetracije mase po volumenu (kg/m3) i dr. Cijeli sistem, uključujući i korišteni triboуređaj, provjeren je prije svakog ispitivanja pokretanjem sustava bez kontakta valjčića i diska. Kriterij početka ispitivanja je nepostojanje čestica unutar komore što se obično postizalo kroz 5-10 min.

Za ispitivanje se koristio disk izrezan iz rotora kočnice promjera 43 mm i debljine 6 mm te valjčići promjera 10mm i visine 15-17 mm koji su uzeti kao uzorak kočionih obloga.

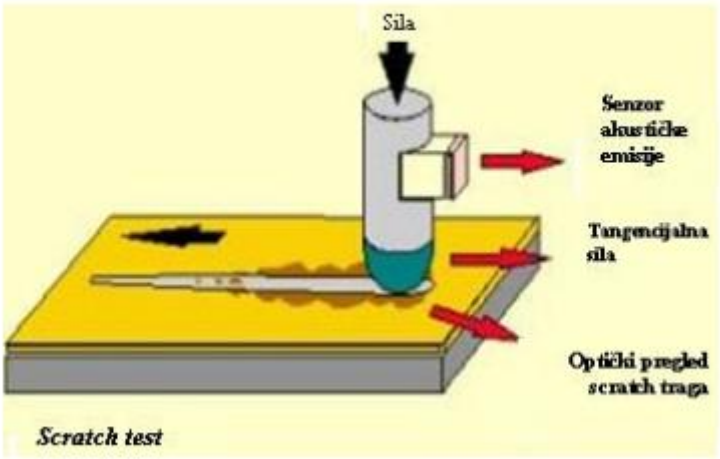
Četiri materijala prednjih i zadnjih kočionih obloga korišteni su kao uzorci za valjčiće - 2 LM materijala (*"low metallic"*) s EU tržišta i 2 NAO (*non-asbestos organic*) materijala s američkog tržišta. Uzorci diska dobiveni su tehnikom rezanja vodenim mlazom, dok je kod kočionih obloga problem predstavljala poroznost i kemijski sastav materijala te se se prvo morali izrazati pilom, a zatim i oblikovati u zahtijevani cilindrični oblik. Kontaktne površine uzoraka ostale su nepromijenjene, tj. nisu podvrgnute nikakvim dodatnim mehaničkim obradama. Uzorci diska su očišćeni UZV propanom i metanolom neposredno prije ispitivanja, a uzorci kočionih obloga zbog poroznosti i mogućnosti razgradnje su izloženi mlazu suhog zraka radi uklanjanja prašine. Uvjeti ispitivanja simulirali su gradski promet. Disk se rotirao maksimalnom brzinom koju triboуređaj može postići, tj. pri 440 okr/min. Promjer traga trošenja na disku iznosio je 30 mm, dajući pritom brzinu klizanja od 0,7 m/s. Postigao se kontaktni pritisak od 1,2 MPa što se smatra tipičnim tlakom pri laganom kočenju koje smanjuje brzinu vozila, ali ga ne zaustavlja. Uzorci su bili u kontaktu 60 min te je postignut put od 2520 m. Temperatura je bila između 23 i 25 ºC, a relativna vlažnost između 35 i 55 %. Za svaku kombinaciju materijala proveden je jedno ispitivanje.

Obloge s malim udjelom metala (LM) pokazala su veći faktor trenja, veće trošenje i koncetraciju čestica trošenja. NAO obloge demonstrirale su stabilni faktor trenja, dostižući taj stupanj nakon samo nekoliko minuta, dok je kod LM materijala faktor trenja rastao kroz dulji dio ispitivanja.

Glavni nedostatak predstavlja maksimalna brzina okretanja tribouređaja koja korespondira brzini vozila od 7km/h. Osim toga, nedostatak je i maksimalno opterećenje od 1,2 MPa koje je dovoljno za smanjivanje brzine, ali ne za potpuno zaustavljanje vozila.

3.1.5. Test brazdanjem – „scratch test“

Kako bi dobili kvalitarivne informacije o čvrstoći veze između prevlake i podloge ili podloge i podloge, te uvid u otpornost tribosustava na abraziju, koristi se test brazdanjem. Slika 29 predstavlja shematski prikaz „scratch testera“.



Slika 29. Shematski prikaz testa brazdanjem [1].

Po površini uzorka povlači se dijamantni utiskivač Rockwell C silom koja kontinuirano raste. Ukoliko se istodobno uzorak pomiče konstatnom brzinom, dolazi do istiskivanja materijala te ljuštenja ili kidanja prevlake zbog naprezanja na mjestu dodira. Normalna sila pri kojoj dolazi do prvog oštećenja naziva se kritična sila. Zbog primjenjivosti za prevlake debljine od 0,1 do 20 μm, ovaj test pokriva široko područje primjene [1].

3.1.5.1. Tribološka karakterizacija „jaspilita“testom brazdanja [14]

Geološka istraživanja su neophodna za napredak rudarske industrije. Optimalni način bušenja ruda je pomoću svrdla s dijamantnim vrhom. Svrdlo se sastoji od metalne matrice impregnirane dijamantima. Funkcija matrice je potpora dijamantima prilikom izlaganja procesu rezanja kamena. Poznato je da su glavne varijable koje utječu na efikasnost svrdla brzina rotacije, normalno opterećenje, protok tekućine za bušenje te priroda iste tekućine. Osim metalne matrice, litologije, morfologije, bitan faktor u izvedbi traženih operacija predstavalja i gustoća dijamantnog krunskog dijela. Jaspilit je trakasta željezna formacija, sitnozrnata i visoko otporna na trošenje prema čemu dijamantni vrh ima slabu učinkovitost. Kako bi se bolje razumjelo tribološko ponašanje, linearnim testom brazdanja provedena su ispitivanja te time dodatno okarakterizirana svojstva materijala. Osim brazdanja, površina uzorka analizirana je SEM-om i optičkim mikroskopom.

Ispitivani uzorci jaspilita izrezani su u dimenzije 60x50x20mm te polirani dijamantnom pastom veličine čestica 1 μm, a zatim očišćeni acetonom u UZV uređaju te osušeni. Ispitivanje je provedeno pri opterećenju od 0,2-200N s rezolucijom od 10 mN. Frekvencija prikupljanja podataka bila je 50Hz. U ispitivanju su se koristila tri indentora: Vickers, Rockwell C i Knoop, sa specifikacijama prikazanim u tablici 3.

Tablica 3. Specifikacije indentora [14]

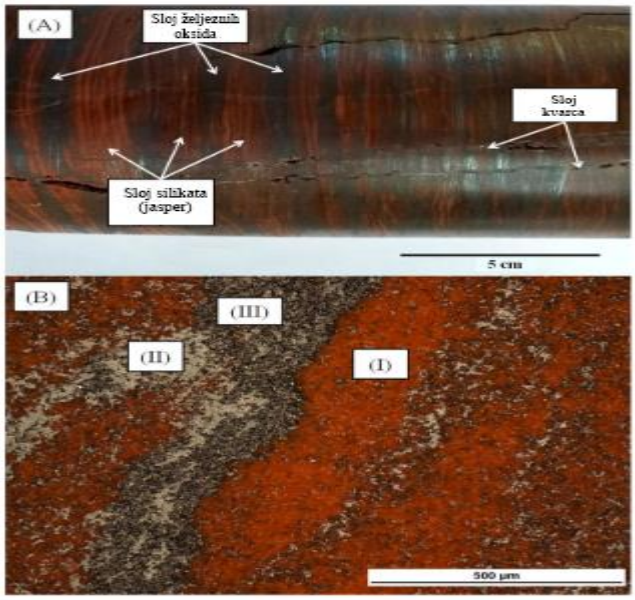
Indentor	Konfiguracija	Radijus vrha	Upadni kut	Interval opterećenja
Rockwell C	-	200 μm	30°	2-90 N
Vickers	Rub paralelan brazdanju	0,5 μm	16°	0,2-10 N
Vickers (istrošeni)	Rub paralelan brazdanju	-	16°	0,2-10 N
Knoop	Rub paralelan brazdanju	200 μm	3°45′	0,2-8 N

Tablica 4 pokazuje ulazne podatke ispitivanja.

Tablica 4. Ulazni podaci ispitivanja [14]

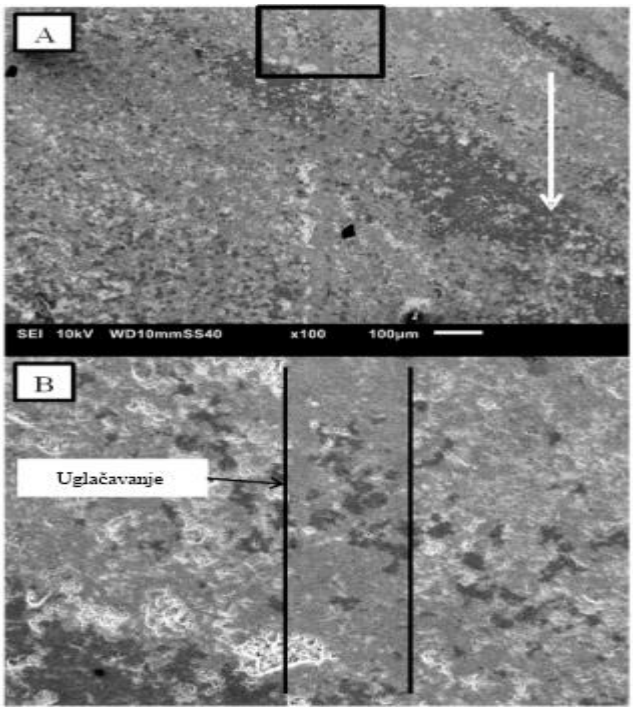
Test	Pojas	Indentor	Opterećenje [N]	Brzina [mm/s]	Okruženje	Udaljenost između brazdi
CLMT (kontinuirani linearni test)	Željezni oksid i kvarc	Svi	0,2-90	0,05	suho	500%
Efekt normalnog opterećenja	Željezni oksid i kvarc	Vickers (oba)	0,2-10	0,05	suho	500%
Efekt udaljenosti između brazdi	Željezni oksid i kvarc	Vickers (oba)	5	0,05	suho	500-100%
Efekt brzine	Željezni oksidi	Vickers (neistrošeni)	0,15-1	0,01, 0,1 i 1	suho	500%
Efekt okruženja	Željezni oksidi	Vickers (neistrošeni)	0,2 i 1	0,05	suho, destilirana voda i otopina bentonita	500%

Duljine tragova (brazdi) su između 5 i 10 mm. Na svakom ispitivanom uzorku napravljeno je deset brazdi. Na slici 30 može se jasno vidjeti trakasti oblik strukture jaspilita. Uočeno da je i da se željezne oksidne trake sastoje od 2 mikrokonstituenta, svjetlijeg (hematit s većom koncetracijom željeza od kisika) i tamnijeg (getit s većom koncetracijom kisika od željeza).



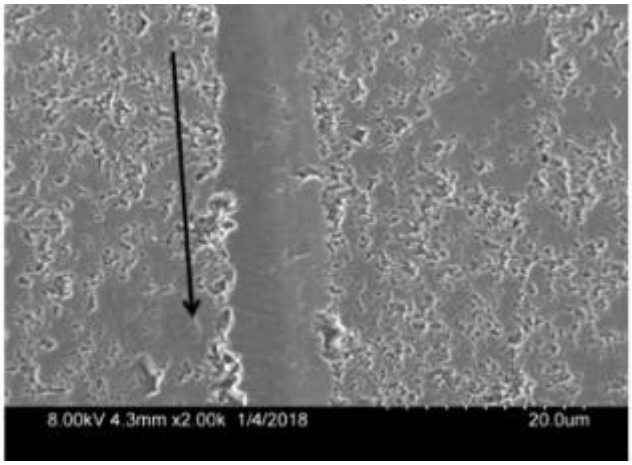
Slika 30. Trakasti oblik strukture jaspilita [14].

Kao što se može vidjeti na slici 31, nastalo oštećenje na hematitu i getitu je vrlo malo ili ga nema uopće. Prevladava mehanizam uglačavanja.



Slika 31. Oštećenje na hematitu i getitu te nastalo uglačavanje [14].

Slika 32 prikazuje nakupljanje poroziteta oko područja brazdanja uzrokovano plastičnom deformacijom što govori da je dominantni mehanizam "plastično oranje" (engl. *„plastic ploughing“*).

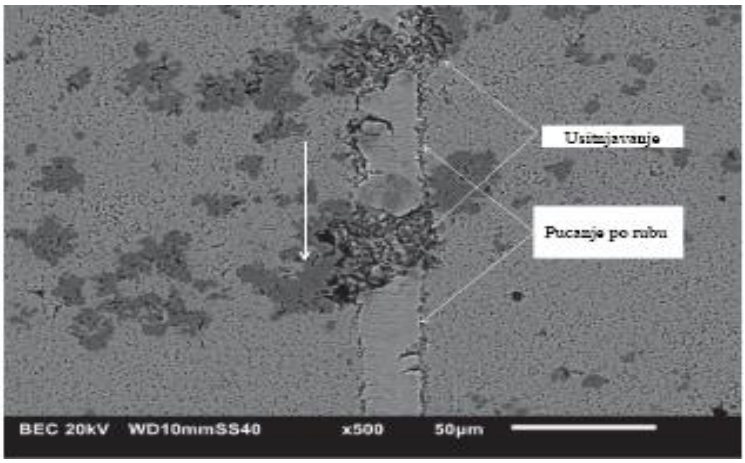


Slika 32. Nakupljanje poroziteta oko područja brazdanja [14].

U ispitivanju s istrošenim Vickersovim indenterom na trakama željeznog oksida, povećanje opterećenja dovelo je do nukleacije/propagacije pukotina u brazdi, okomito na smjer brazdanja. Prilikom ispitivanja jaspera s Rockwellovim indentorom nije došlo do oštećenja pri nižim opterećenjima, a pri 9N na mineralu pojavile su se pukotine i tragovi trošenja. Sve kombinacije minerala i indentora, s progresivnim povećanjem opterećenja, dovele su odvajanja materijala, tj. stvaranja pukotina paralelnih s tragom.

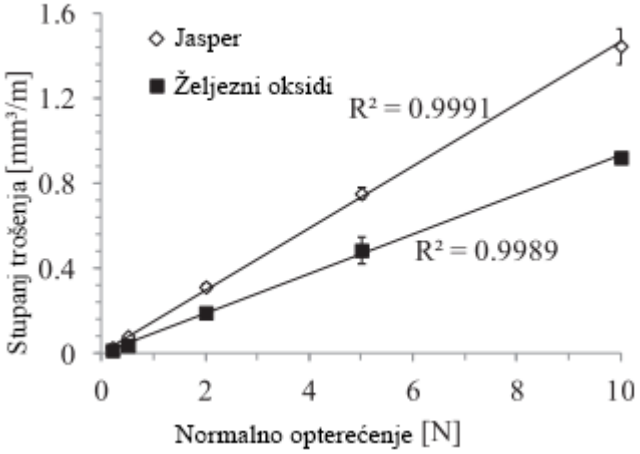
Analizom dobivenih rezultata ispitivanja može se zaključiti da je oštar indentor te okomit položaj indentora na ispitivanu površinu doveo do većeg trenja i manjih kritičnih naprezanja. Oštar indentor može generirati elastično-plastično polje naprezanja, što rezultira većim trošenjem. Mali kut prodiranja indentora uzrokuje elastične deformacije i manji faktor trenja. Na taj način može se zaključiti i duktilno ponašanje minerala koji su podvrgnuti brazdanjem Knoopovim indenterom, koji unatoč što je oštar, ima mali upadni kut (3°45'). Bitno je naglasiti da je u početku Rockwellov indentor imao sferični oblik kontaktne površine te je zbog toga upadni kut povećan s normalnim opterećenjem, dovodeći do manje ozbiljnih mehanizama pri nižim opterećenjima. Isto tako, pukotine i plastične deformacije su posljedica gubitka energije, što se može objasniti povećanim faktorom trenja u težim mehanizmima trošenja (gdje je pucanje dominantno) i u željeznim oksidima (gdje je dominantna plastična deformacija). Još jedan vidljiv

segment ispitivanja je niže kritično opterećenje za getit. Ovaj mineral ima slabe vodikove veze, što rezultira manjom otpornošću prema trošenju s obzirom na druge minerale koji imaju kovalentne ili ionske veze. Na slici 33 može se vidjeti takvo ponašanje gdje kod hematita dolazi do pucanja po rubu brazde, dok kod getita dolazi do odvajanja materijala.



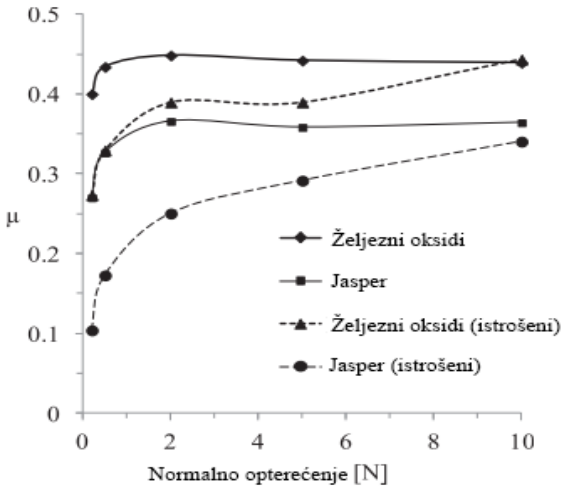
Slika 33. Pucanje po rubu brazde hematita te ustinjavanje pukotina getita [14].

Slika 34 prikazuje linearno povećanje razine trošenja povećanjem normalnog opterećenja. To se može poistovjetit s metalnim materijalima podvrgnutim brazdanju.



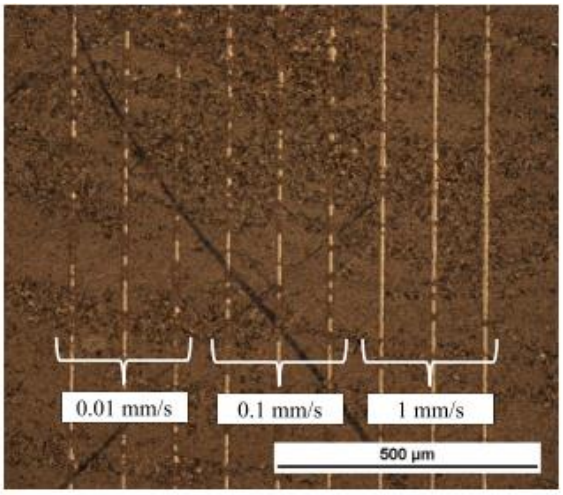
Slika 34. Linearno povećanje trošenja povećanjem opterećenja [14].

Može se uočiti i progresivni rast faktora trenja (slika 35) povećanjem normalnog opterećenja kod istrošenih indentora, dostižući vrijednosti bliske onima kao kod oštrih indentora pri 10N.



Slika 35. Povećanje faktora trenja s rastom opterećenja [14].

Istražujući utjecaj različitih brzina, može se uočiti povećanje svijetlih zona u ispitivanjima s povećanim brzinama (slika 36), osim ispitivanja s normalnim opterećenjem od 1N gdje nije došlo do promjena. Svijetla područja okarakterizirana su mehanizmom usitnjavanja. Brzina nema utjecaja na trenje.



Slika 36. Utjecaj brzine na brazdanje [14].

U glavnim mineralima jaspilita (jasper, hematit i getit), propagacija pukotine nije rasprostranjena što dovodi do zaključka da brzina provođenja brazdanja ne utječe značajno na stupanj trošenja.

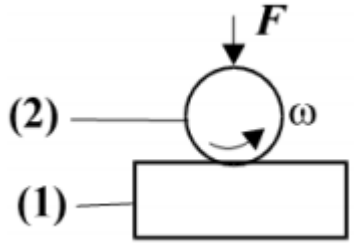
Pucanje po rubovima brazda prisutno je u svim uvjetima okoliša pod normalnim opterećenjem od 0,2 N, a izostaje u ispitivanjima s opterećenjem od 1N gdje je dominantan mehanizam usitnjavanja. Prisutnost maziva povećala je odvajanje materijala. Oba maziva korištena u ispitivanju povećavaju stupanj trošenja, ali je izraženije kod opterećenja od 0,2 N. Upotrebom maziva dolazi do smanjenja površinske tvrdoće te je samim time potrebno uložiti manji rad za lom različitiih vrsta kamenja. Promatrajući trenje, nije primijećena razlika između suhog i ispitivanja s mazivima.

Getit i hematit su pokazali elastilno ponašanje pri brazdanju i veće trenje s manjim promjenama opterećenja.

Jasper je pokazao krhkost na brazdanje, dok je kvarc pokazao opsežna lomljenja uzrokovajući pritom odvajanja okolnih minerala. Indenteri s manjim radijusom zaobljenosti i većim kutom upada postigli su manje promjene opterećenja i veće trenje na svim mineralima. Za primijenjena opterećenja, nije uočen utjecaj razmaka između brazdi. Tendencija da se smanji trošenje povećanjem brzine brazdanja je dokazana, ali brzina nije imala utjecaja na trenje.

3.2. Kotrljajuće trošenje

Ovaj oblik trošenja javlja se pri uzastopnom kotrljajućem dodiru nekonformnih površina. Slika 37 prikazuje shemu tribosustava kotrljajućeg trošenja.

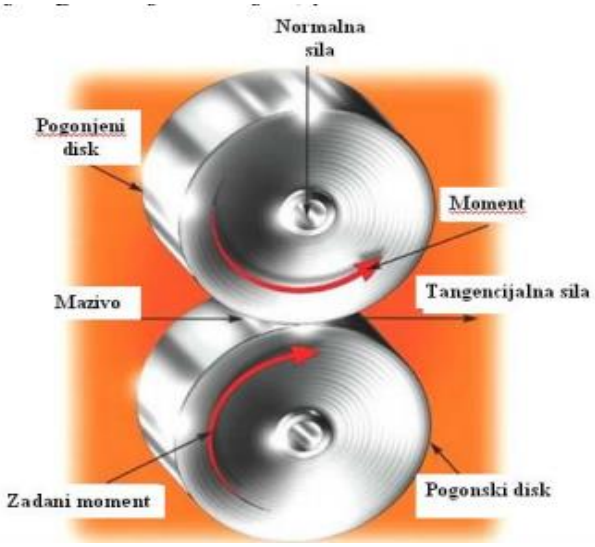


Slika 37. Shema tribosustava kotrljajućeg trošenja[3].

Relativno gibanje se opisuje kao kotrljanje. Stupnjevi opasnosti od mehanizama trošenja su: umor površine – jako visok, abrazija – nizak, adhezija – nizak, tribokorozija – najniži. Primjeri ovog procesa trošenja su: kotrljajući ležaji, zupčanici, kotač/tračnica [1].

3.2.1. Metoda dvostrukog diska (engl. „twin disc“)

Za određivanje iznosa kliznog i kotrljajućeg trošenja materijala, prevlaka ili maziva koristi se moetoda dvostrukog diska. Shema metode prikazana je na slici 38.



Slika 38. Shema metode dvostrukog diska [6]

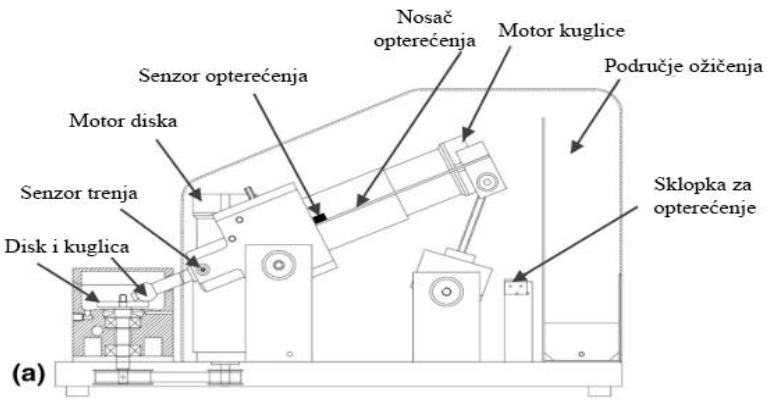
Tribouređaj se sastoji od dva diska koja se opterećuju hidraulički. Opterećenje može biti konstantno ili rastuće. Mjere se sljedeće karakteristike: postignuto opterećenje, faktor trenja, trošenje, gubitak mase diskova, temperatura maziva i izdržljivost mazivnog filma. Ispitivanje se prekida kada se postigne zadana vrijednost faktora trenja ili zadano vrijeme ispitivanja [1].

3.2.1.1. Usporedba kuglice po disku i dvostrukog diska na trenje prilikom klizanja/kotrljanja [15]

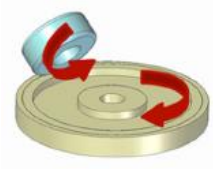
Klizajući/kotrljajući kontakt zupčanika često se simulira testom kuglica po disku ili metodom 2 diska, u kojima su obje komponente tribouređaja pokretane odvojenim motorima. Ti uređaji olakšavaju kontrolu čimbenika koji utječu na rezultate, uključujući kontaktni pritisak, polumjere, brzinu okretanja. Nedostatak obje konfiguracije što je ciklička priroda kontakta zupčanika zamijenjena s mirnim uvjetima. Prednost metoda dvostrukog diska je što omogućuje razmjerni kontakt onome u stvarnom odnosu zupčanika. Štoviše, ova metoda se smatra točnijom za simulaciju trenja koje se javlja u ponašanju zupčanika. Dijelovi korišteni u metodi kuglica po

disku su prihvatljiviji cijenom, te nije potrebna posebna konstrukcija postolja. Svrha ovog rada [15] je uspoređivanje dva navedena uređaja kako bi se istaknule glavne razlike u ponašanju površina/lubrikanata u kontaktu. Kontaktne površine su oblikovane i polirane, te se obje pogone uz 2 lubrikanta, EAL (engl. *ester-based enviromentally adapted lubricant*) i komercijalno PAO (engl. *polyalphaolefin*) mazivo.

Uređaj kuglica po disku prikazan je na slici 39. Valjci promjera 17,48 mm i radijusa rubova 1 mm, napravljeni su od standardnog 100Cr6 čelika za ležajeve (750HV=60HRC). Površina diska s vanjskim promjerom od 46 mm napravljena je od 16MnCr5 pougljičenim čelikom za zupčanike(60 ± 2 HRC). Ispitivalo se trošenje i trenje postignuto na uređaju kuglica po disku, koji je specificiran na način da je kuglica zamijenjena valjčićem (slika 40) kako bi se mogao postići kontaktni pritisak veći od 1,25 GPa. Ovo je djelomično nastavak na prijašnje studije gdje su se ispitivala ista svojstva, ali na uređaju dvostrukog diska.

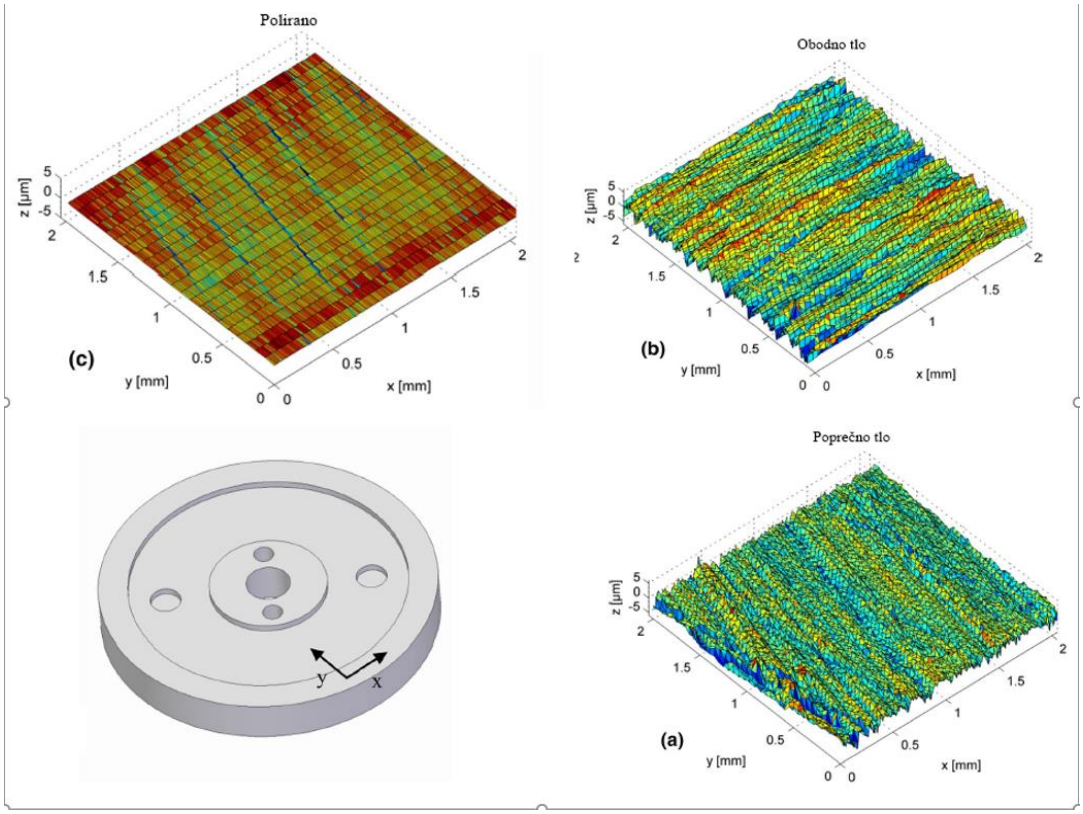


Slika 39. Prikaz uređaja kuglica po disku [15].



Slika 40. Kotrljajući valjčić po disku [15].

Diskovi su obrađeni na način da svaki ima različitu topografiju površine (obodnu topografiju gdje su mikroneravnine paralelne s rubom diska, poprečnu topografiju gdje su mikroneravnine okomite na rub diska i poliranu porvšinu) kao što prikazuje slika 41.



Slika 31. Tri topografije površina: poprečna topografija (a), obodna topografija (b), polirana površina (c) [15].

Za obodno i poprečno tlo R_a je iznosio 0,97 µm, a za polirano 0,05 µm. Ispitivanje trošenja bez uhodavanja provedeno je s konstantnom brzinom kotrljanja, opterećenjem i omjerom klizanja i kotrljanja. Ispitano je pet kombinacija površina/mazivo i svako ispitivanje ponovljeno je tri puta. Obodno tlo jedino je ispitano s komercijalnim mazivom i služilo je kao referenca za računske simulacije. Svi parametri ispitivanja, osim temperature maziva, približno su jednaki parametrima korištenim u prethodno provedenom ispitivanju dvostrukog diska. Konfiguracija dvostrukog diska nije dopuštala kontrolu temperature, stoga je ulazna temperatura maziva koje se dovodilo na gornji disk bila jednaka sobnoj temperaturi, 20 ± 2 ºC. U ispitivanju kuglica po disku temperatura maziva iznosila je 90 ºC što je bliže radnoj temperaturi zupčanika, a broj krugova diska namješten je na 33000 (jednako kao i kod bržeg diska u ispitivanju dvostrukog diska).

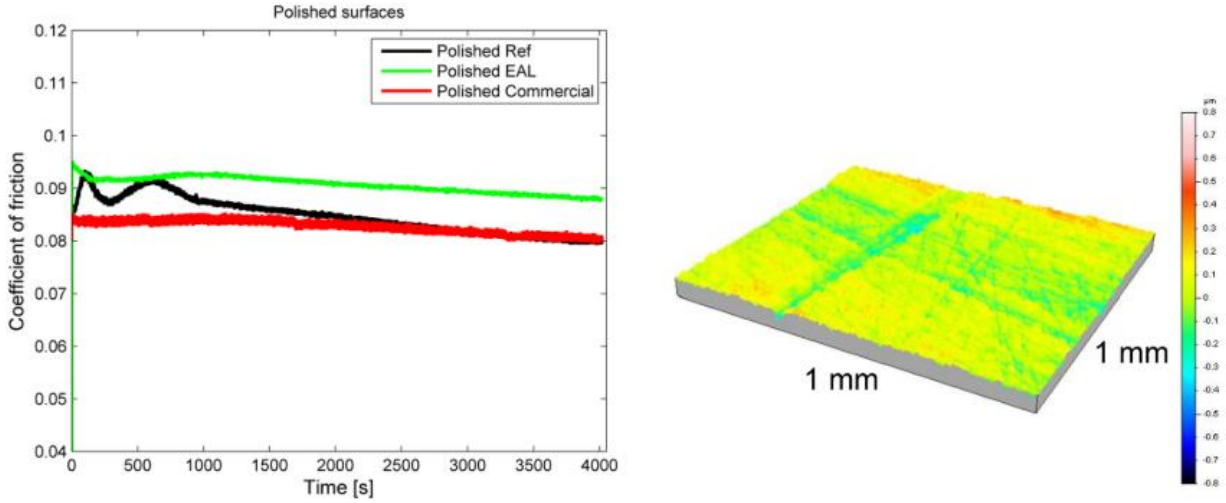
Klizanje je iznosilo 10 %, što je približno jednako vrijednosti u radnim uvjetima zupčanika. Opterećenje od 28 N dovedeno je kako bi se postigao maksimalan Hertzov pritisak od 2,2GPa. Svi parametri ispitivanja držali su se konstantnima kako se dobili što dosljedniji rezultati.

U usporedbi s referentim uljem, površina tla pokazuje različito ponašanje nego kad je ispitana s dva modificirana ulja. Nedostatak aditiva u referentnom ulju doveo je do značajnog kontakta

metal od metal. Disk s obodnom površinom tla imao je nešto niži faktor trenja nego s poprečnom površinom tla. Disk s obodnom površinom ispitan je samo s komercijalnim lubrikantom.

Za polirani disk, referetno ulje nije sadržavalo aditive te je pokazalo slično ponašanje kao i modificirano ulje. Ispitivanje trošenja kuglice po disku odvijalo se konstantnom brzinom kotrljanja. Referentno ulje pokazuje najveću početnu vrijednost trenja, ali isto tako i strmi pad nakon prvih 800 s. Ostale kombinacije ne pokazuju takvo ponašanje. Umjesto toga, nakon inicijalnog pada trenja u prvih 100-200 krugova, trenje postaje konstantno. Obodna površina tla pokazuje otprilike 3% manji faktor trenja s obzirom na poprečnu površinu. Ispitivanje buke, koje se nije mjerio, pokazalo je veliku razliku s obzirom da je poprečna površina bila glasnija. Topografija na slici 48 pokazuje trag trošenja na poprečnoj površini s referentim uljem; širina je skoro 200 μm.

Polirani diskovi ispitani su u različitom režimu maziva i pokazuju manje trenje uspoređujući s brušenim diskovima. Trenje s referentnim uljem i dalje ima fluktuacijski start i završava s niskim faktorom trenja. Slika 42 pokazuje trag trošenja poliranih površina testiranih referentim uljem, širina traga je skoro 80 μm, slična Hertzovoj širini kontakta.



Slika 42. Prikaz faktora trenja poliranih površina u ovisnosti o vremenu ispitivanja(lijevo) i topgrafija površine (desno) [15].

Povećavanjem klizanja, faktor trenja različitih površina prvo se povećava zbog povećane površine klizanja, a zatim pri vrijednosti od 0,2 dolazi do zasićenja te prestaje rasti. Stvarna kontaktna površina je 245 puta veća u uređaju dvostrukog diska, no bez obzira na to kontaktni pritisak je skoro identičan i nikada ne prelazi 4 GPa.

Ispitivanje trošenja pri konstantnoj brzini kotrljanja pokazuje jasnu razliku u dodirnom ponašanju između modificiranih i referentih ulja. U početku ispitivanja referentna ulja pokazuju nestabilan faktor trenja koje se povezuje s promjenama mehanizama trošenja. Referento ulje nije u mugoćnosti razdvojiti površine. Pri završetku ispitivanja, faktor trenja postaje nizak što upućuje konforman dodir površina – površine su više prilagođene jedna drugoj. Aditivi maziva, kojih nema u referentom ulju, kontroliraju proces trošenja kreirajući granične slojeve koji smanjuju trošenje. Za brušene diskove, još jedan od razloga za različito dodirno ponašanje u različitim mazivima je razlika u površinskom graničnom sloju. Kemijska analiza površine (GDOES) napravljena na površini 2 diska nakon ispitivanja pokazala je da EAL stvara deblji reaktivni površinski sloj nego komercijalno ulje, no taj deblji sloj nije smanjio trenje.

Eksperimentalno mijenjanje orijentacije teksture površine s poprečnog tla na obodni rezultiralo je smanjenim faktorom trenja. Nisu pronađene mjerljive razlike u trošenju, a glavni trag trošenja bio je sličan za oba načina teksture za isti lubrikant. Izračunati faktor trenja do omjera klizanja od 0,1% također je nešto niži kod obodnog tipa s obzirom na poprečni, iako nakon 0,1% omjera klizanja, trenje se brže poveća nego kod poprečnog tipa. To se može objasnit tako što je stvarna dodirna površina veća kod poprečnog tipa. Pojava plastične deformacije utječe na proračun, ali dok su ti tlakovi ograničeni na male dijelove dodirnih površina, njihov utjecaj na ukupni kontakt je neznatan. Ipak, visoka vrijednost plastičnih deformacija sugerira da je stvarna dodirna površina podcijenjena za obje teksture. Međutim, u provedenim računalnim simulacijama, plastična deformacija kontaktnog modela neće znatno utjecati na rezultate s obzirom da efekt maziva nadmašuje tu pojavu. Izračunato trenje za grube površine je skoro identično glatkim područjima što je potpuno drugačije od podataka utvrđenih eksperimentom-to se može objasniti da računalo ne predstavlja stvarni utjecaj maziva. Osim toga, različiti rezultati su posljedica i drugačije usmjerenosti površine.

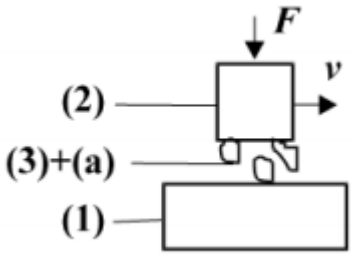
Diskovi obodnih površina imaju veće trenje pod svim uvjetima od poprečnih tipova zato što obodni položaj dopušta odlazak maziva s površine kroz žljebove čime površina ostaje u nedostatku maziva.

Izračunati faktor trenja na kuglici po disku raste brže nego na dvostrukom disku. To je najviše povezano zbog razlike u dodirnoj geometriji, s obzirom da hrapavost površine nije uključena u simulacijama. Treba napomenuti da izračunati faktor trenja nije namijenjen direktnoj usporedbi s eksperimentalnim rezultatima zbog toga što simulacije ne uzimaju stvarnu sliku djelovanja maziva.

Eksperimentalna mjerenja i računalne simulacije pokazale su da kuglica po disku i dvostruki disk pokazuju iste trendove trenja. Prema tome, obje metode se mogu koristiti za vrednovanje maziva na temelju njihovih svojstava povezanih s trošenjem. Ipak, rezultati trenja su se razlikovali za faktor 2 kada su triboуređaji postavljeni na isto opterećenje. Ti rezultati se poklapaju s rezultatima dobivenim simulacijom pri malim omjerima klizanja, koji pokazuju da je razlika prvotno uzrokovana drugačijom geometrijom površina. Uspoređujući s dvostrukim diskom, trošenje je bilo teško za detektirati na uređaju kuglica po disku iako su bili podvrgnuti ispitivanju u režimu graničnog podmazivanja. Stoga, utjecaj hrapavosti i maziva nije mogao biti istražen na trošenje.

3.3. Abrazijsko trošenje

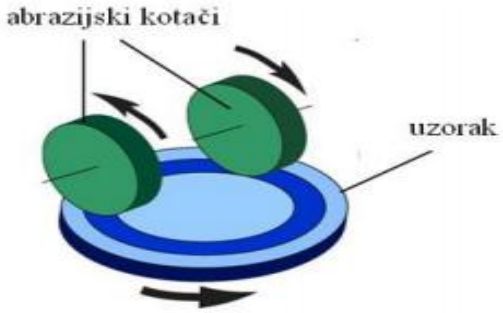
Abrazijsko trošenje je istiskivanje materijala izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Karakteristika ove vrste trošenja je prisutnost tvrdih abrazivnih čestica uglavnom mineralnog podrijetla, pa se ponekad naziva i mineralno trošenje. Shema tribosustava abrazijskog trošenja prikazana je na slici 43**.** Relativno gibanje se može opisati kao klizanje. Stupanj opasnosti od pojedinih mehanizma trošenja: abrazija – jako visoki, umor površine – niski, tribokorozija – najniži.



Slika 43. Shema abrazijskog trošenja, gdje je: (1) - funkcionalni dio, (2) - funkcionalni dio, (3) - međusredstvo (mazivo), (a) – abraziv, F – sila, N, v – brzina, m/s [1].

3.3.1. Taber abrazija

Taber uređaj namijenjen je za opisivanje trošenja ravnih uzoraka. Njime se ispituje otpornost na abraziju različitih vrsta prevlaka u suhom ili vlažnom okruženju [1]. Shema uređaja prikazana je na slici 44.



Slika 44. Shema Taber uređaja [1].

Prilikom ispitivanja mjeri se broj okretaja potrebnog za oštećivanje površinskog sloja te Taber indeks trošenja kao funkcija gubitka mase i broja okretaja.

3.3.1.1. Modificirani Taber uređaj za ispitivanje stanja naprezanja i procesa trošenja čestica nošenih zrakom [16]

Još od izuma i uvođenja Taber uređaja za abraziju iz 1930., ovaj uređaj postao je izuzetno popularan instrument za ispitivanje abrazije i otpornosti trošenju za širok spektar materijala (plastika, prevlake, laminati, koža, papit, keramika itd.). Uz odabir bilo koje površine za ispitivanje, ovaj test također nema ograničenja u vidu veličina samih uzoraka. Štoviše, niska cijena svrstava ovo ispitivanje među dostupne testove za manja poduzeća ili laboratorije.

Trenutni izazovi kemijskog stvaranja nanoproizvoda su predviđanje relacije struktura/djelovanje dizajniranih nanočestica prozvedenih kemijskim inženjerstvom sa primjenom u prevlakama ili krutim tvarima.

U radu [16] analiziralo se sljedeće:

1. nedostatak standardnog Taber 5750 uređaja za linearnu abraziju za otkrivanje cjelokupnog naprezanja (tj. mjerenje tangencijalnog naprezanja uz povećanje normalnog) postojanog tijekom linearne abrazije

2. prethodni utjecaj naprezanja u kreiranju čestica nošenih zrakom

Kao rezultat modificiranog Taber uređaja kako je već objašnjeno, moguće je istovremeno mjerenje naprezanja i čestica ispuštenih u zrak. Takva modifikacija ispitana je uz opis, kalibraciju te prijašnje slične studije.

Kako bi se opisalo naprezanje koje je izazvano na samoj površini, koristi se sljedeća jednadžba: $E_w = F_T \times L$. Ona navodi energiju trošenja E_w kao utjecajni parametar na trošenje. U navedenoj jednadžbi, F_T je tangencijalna sila koja djeluje tijekom abrazije. E_w je energija raspršena tijekom trošenja novih površina i čestica.

Tijekom modeliranja 2 tijela u abraziji, pokazano je da je E_w niža prilikom rezanja ili lomljenja.

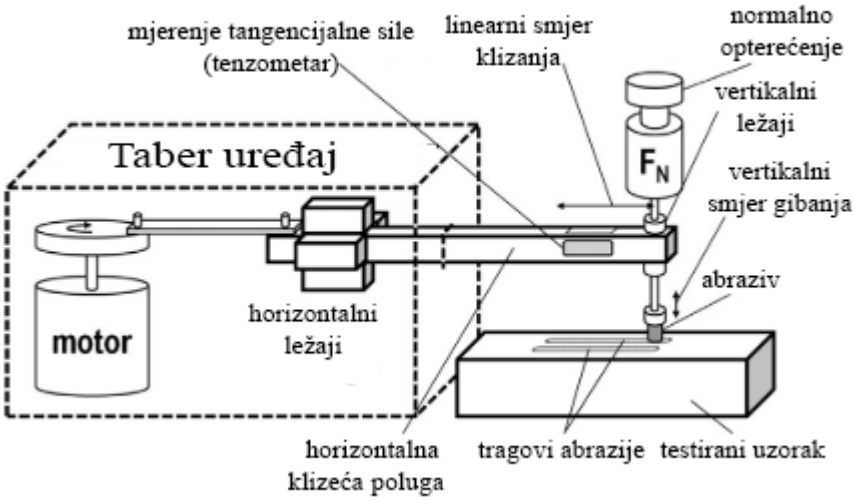
Osim toga, pokazano je da čestice nošene zrakom direktno ovise o E_w. Iz gore navedene jednadžbe, za računanje E_w, iznos F_T postaje neophodan.

Standardni linearni Taber uređaj za ispitivanje abrazije (Model 5750) uključuje horizontalnu polugu preko koje se linearni pokreti ostvaruju. Slika 45 prikazuje shematski prikaz uređaja.

Precizini kuglični ležaj koji nosi klinasto vratilo priključen je na kraju poluge te omogućuje slobodno vertikalno kretanje abrazera, koji je učvršćen na klinastom vratilu preko trna.

Utezi su postavljeni na vrhu poluge kako bi se preko njih nanijela sila F_n u okomitom smjeru (os z na slici 44) na podlogu (osi x i y). U standardnoj metodi nepoznata sila F_T je horizontalno donesena na površinu preko motora.

U ovoj metodi, gdje je svrha dobivanje podataka o F_T sili, koriste se 2 modifikacije; zamjena standardne nehrđajuće čelične poluge s aluminijskom i montaža uređaja za mjerenje naprezanja na gornjoj površini aluminijske poluge.



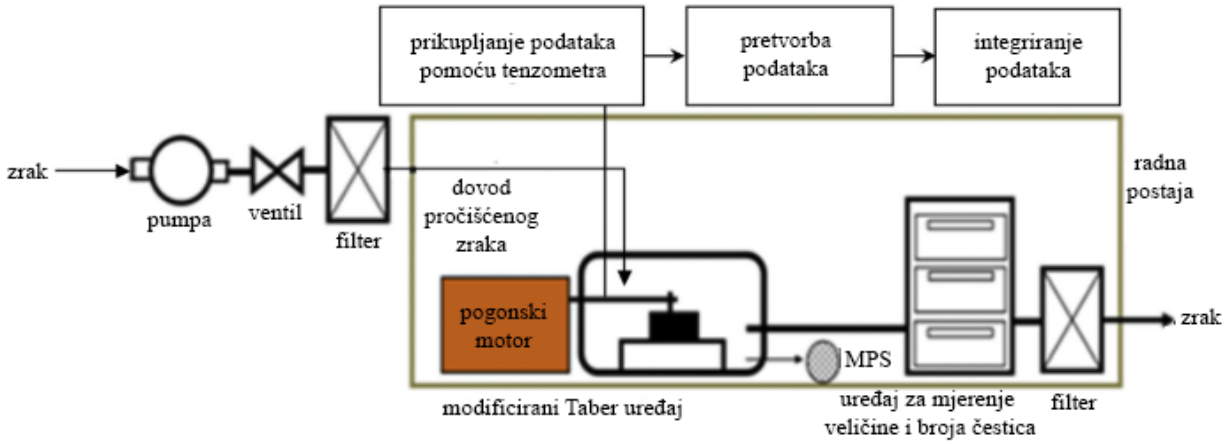
Slika 45. Shema modificiranog Taber uređaja [16].

Slika 46 prikazuje ove dvije modifikacije. Element 1 na Slici 2 prikazuje novu aluminijsku polugu izrađenu od Aluminij 2024 legure. Ovaj materijal je poznat po odličnoj obradivosti te otpornosti umoru materijala.

Slika 46. Prikaz modifikacija na poluzi [16].

Mehanička svojstva ovog sloja su: R_e=140 Mpa, E=73 Gpa, Poissonov faktor: 0,42. Element 2 je ljepilo za stvrdnjavanje pod nazivom Z70. Ono spaja uređaj za mjerenje s aluminijskoj ručkom. Element 3 debljine 0,05 mm i širine 60mm je međusloj u povezivanju. Njegova uloga je sprječavanje dodira bilo kojeg drugog materijala s polugom osim uređaja za mjerenje. Element 4 je komponenta za mjerenje (LY13-1.5/350; HBM GmbH, Germany). Sastoji se od 1,5 mm dugačke aktivne elektromreže te 5,7mm dugačkog nosača te mreže. Element 5 je poliuretanski premaz koji služi kao zaštitni sloj tenzometru. Štiti od vanjskih utjecaja poput vlage ili mehaničkih oštećenja.

Slika 47 prikazuje cjelokupan proces eksperimenta koji uključuje ispitivanje trošenja, ali ujedno i analizu čestica trošenja.

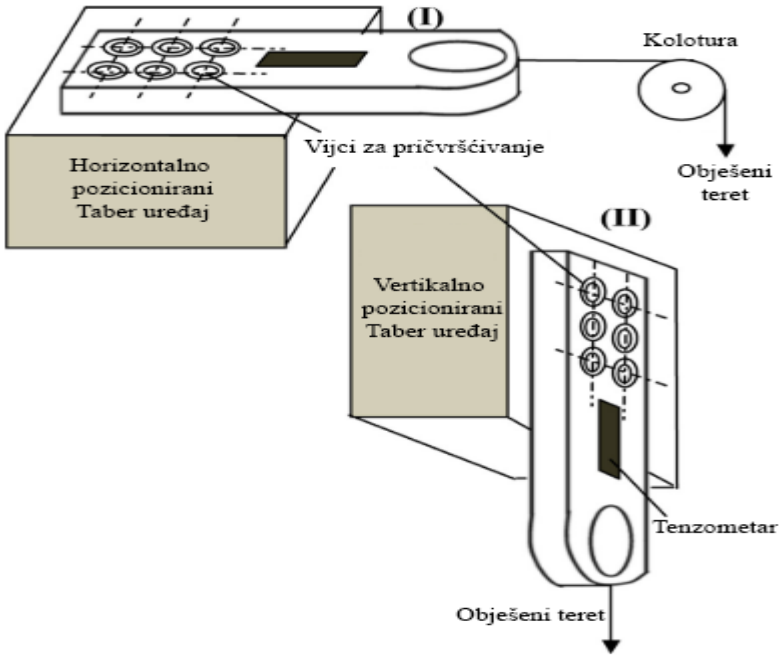


Slika 47. Shema procesa ispitivanja modificiranim Taber uređajem [16].

Zrak bez prisutnih čestica dolazi u izolirano radni mjesto Taber uređaja. Motor za pokretanje nalazi se izvan komore za ispitivanje, dok je horizontalana poluga unutar. To isključuje mogućnost utjecaja čestica nastalih radom motora. Čestice nošene zrakom nastale tijekom abrazijskog trošenja analizirane su koristeći: kondenzacijski brojač čestica (CPC; Model 3775; TSI Inc.,USA; raspon mjerenja: 4nm do 3mikrometra), aerodinamični mjerač čestica (APS; Model 3321; raspon mjerenja: 0,5 do 20mikrometara), skenirajući mobilni mjerač čestica (SMPS: Model DMA 3081 i CPC 3775, raspon mjerenja 15-600 nm) i mini uzorkivač čestica koji je korišten za prikupljanje čestica tehnikom filtracije na poroznim rešetkama (te čestice su se kasnije koristile za daljnju analizu TEM mikroskopom ili za druga kvalitativna ispitivanja).

Pravilno mjerenje F_T osigurano je tenzometrom (engl. *„strain gauge“*, Model EspressoDAQ DQ 430; Germany) koji je serijski spojen s uređajem za mjerenje naprezanja čime je osigurana pouzdanost ispitivanja. Dva jednostavna i pouzdana načina upotrijebljena su za provjeru pouzdanosti korištenih modifikacija. Kao što je prikazano na slici 48, ispitivanje trenja 1 uključuje opterećenje utegom preko koloture držeći pritom uređaj horizontalno što je uobičajena pozicija.

U ispitivanju 2 opterećenje se direktno nanosi, tj. bez koloture te Taber uređaj stoji vertikalno. Ovo osigurava kalibraciju tenzometra u istim uvjetima koji se događaju u stvarnosti.



Slika 48. Postavljeni kalibracijski test [16].

Tenzometar je postavljen pri naponu od 1 V, frekvencijom prikupljanja informacija 500Hz, okolnom temperaturom te relativnom vlažnosti od otprilike 60%. Kako bi se provjerila ispravnost modifikacija na Taber uređaju, abrazijsko ispitivanje je provedeno na zidanoj cigli. Prvo tispitivanje provelo se koristeći modificirani uređaj,a drugo koristeći komercijalni linearni tribometar (ModelTE77; Plint Inc). Uvjeti ispitivanja su bili: brzina abrazije od 60 o/min, Taber H38 abrazer i konstantna sila F_n=8 N. Uspoređeni su rezultati nakon 10 ciklusa abrazija. Usporedbom je uočeno da je F_T sila modiciranog uređaja bila nešto niža od komercijalnog uređaja. (4,3N naspram 4,5N u negtivnom režimu rada, te 4,2N naspram 4,6N u pozitivnom režimu rada).

Prethodno objašnjeni modicirani uređaj korišten je u različitim studijama ispitivanja tangencijalne sile ispitujući pritom različite parove materijala i abraziva. U radu [16] ispitana su tri tribopara: aluminijsko-silikatna zidna cigla s Taber H38 abrazivom, šperploča ili iverica s Taber H38 abrazivom, te nehrđajući čelik s Taber CS17 abrazivom. Brzina ispitivanja bila je 60 okr/min s konstanstnom normalnom silom od 9 N. Ispitivanja su ponavljana 3 puta te je svaki sadržavao 10 ciklusa abrazije. F_T srednje za čelik iznosi 5,98 ±0,3N uz abraziv CS17; 5,22±0,3 N za cigla-H38 par i 4,43±0,3N za iverica-H38 par.

Ispitane površine analizirane su profilometrom (Model 400; Precision Devices Inc., USA) i SEM mikroskop. Rezultati su pokazali da u slučaju trošenja cigle dolazi do krhkog loma površine što

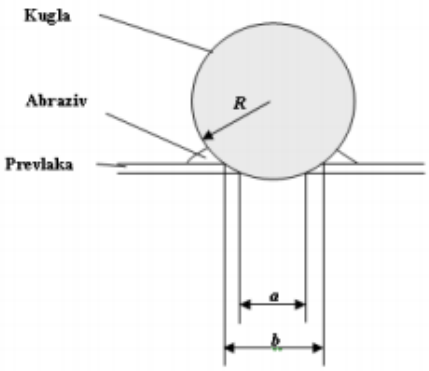
je u skladu s krhkim svojstvom takvog materijala. Kod ispitivanja čelika, abrazijsko trošenje očituje se se u plastičnoj deformaciji. SEM analiza pokazala je razvoj brazdi nastalih utjecajem abrazivnih zrna.

U slučajevima rezanja ili lomljenja materijala (kao kod cigle ili iverice), F_T srednje pokazuje niže vrijednosti, ali veći broj čestica te širi raspon veličina. Ovu relaciju bi trebalo dodatno ispitati kako bi se povećalo predviđanje aerosolizacije čestica trošenja kada su poznati uvjeti trošenja.

U radu [16] prikazano je kako standardni Taber uređaj može biti opremljen tenzometrom kako bi se dobila cjelokupna slika naprezanja tijekom abrazijskog trošenja. Dodatno, Taber uređaj može biti i opremljen uređajem za mjerenje veličina i koncetracije čestica trošenja u isto vrijeme. Ovo predstavlja velik napredak u odnosu na standardni Taber uređaj koji ima ograničenu učinkovitost u situacijama kada je potrebno točno poznavanje stanja naprezanja ili energije trošenja.

3.3.2. Ispitivanje trošenja kuglicom (engl. „ball cratering“)

U ovoj metodi ispitivanja trošenja kugla pznatih dimenzija, koja može biti slobodna ili učvršćena, u dodiru je s prevlakom i okreće se određenom brzinom uz dodavanje abraziva. Prilikom djelovanja sile dolazi do trošenja prevlake i stvaranja kratera (traga trošenja) na površini uzorka [1]. Shemu metode prikazuje slika 49.



Slika 49. Shema metode ispitivanja trošenja kuglicom, gdje *a* predstavlja promjer traga trošenja u osnovnom materijalu, mm i *b* vanjski promjer traga trošenja, mm [1].

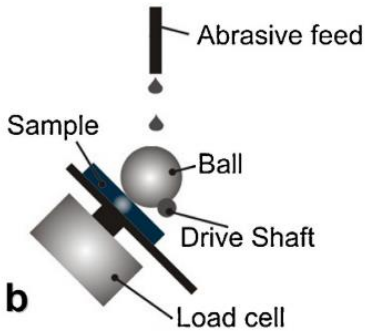
Vrlo jednostavno može se izračunati potrošeni volumen prevlake, u jedinici vremena ili po jedinici puta, prateći i mjereći promjenu dimenzija nastalog traga trošenja na prevlaci.

3.3.2.1. Ispitivanje trošenja kuglicom na duktilnim materijalima [17]

Mikro abrazivni test, nazvan i ispitivanje trošenja kuglicom, uobičajeno je korišten za ispitivanje tvrdih materijala ili otpornosti trošenja prevlaka. U ovom radu, test je korišten za ispitivanje metalnih uzoraka. Otpornost na trošenje abrazijom važno je svojstvo u širkoj primjeni u inženjerstvu. Ispitivanje trošenja kuglicom omogućava kvantitavnu procjenu ovog svojstva čak i za vrlo male volumene materijala. Tehnika se sastoji od rotacije kuglice radijusa R pri konstantnom kontaktu s poliranom površinom uz djelovanje normalne sile. Tijekom ispitivanja, abrazivna otopina se ispušta između kuglice i površine. S obzirom da je geometrija kratera trošenja na površini sferičnog oblika, volumen krater može biti dobiven iz odnosa promjera kratera i promjera kuglice. Za homogene materijale, faktor trošenja može biti izračunat iz jednostavnog modela koji je ekvivalentan Archardovoj jednadžbi: $V/N=k\times L$. U ovoj jednadžbi, L predstavlja duljinu klizanja kuglice, a k faktor trošenja. Način trošenja ovisi o kretanju abrazivnih čestica prilikom dodira kuglice i i površine. Troslojni abrazijski mehanizam se pojavljuje kada abrazivne čestice ostanu slobodne te se kotrljaju uzduž dodirne površine sfere i uzorka. U ovom slučaju, krater pokazuje homogeni trag trošenja te usmjerene brazde nisu promatrane. Drugi slučaj je dvoslojni mehanizam abrazije te je on prisutan kada su abrazivne čestice pričvršćene na kuglicu ili površinu uzorka, stvarajući pritom brazde i tragove ogrebotina. Pri dvoslojnom mehanizmu volumen uklonjenog materijala ne može biti direktno izračunat iz početnog oblika kuglice. Zbog toga ovaj mehanizam dvoslojne abrazije bi se trebao svesti na minimum. Postoji nekolike studija koje su proučavale abrazijsko brazdanje povezano s pričvršćivanjem abrazivnih čestica na kuglicu, no posljedice ove pojave na faktor trošenja nisu detaljno istražene. U ovome radu predstavit će se rezultati za ispitivanje trošenja kuglicom na duktilnim mekanim materijalima gdje je očekivana pojava naljepljivanja abrazivnih čestica na površini brazde. Glavni cilj ovog ispitivanja je procjena efekta pričvršćivanja abrazivnih čestica na faktor trošenja.

Trošenje aluminija, bakra, AISI 1020 čelika, AISI 1045 čelika i kaljenog AISI 1045 čelika (toplinski tretirano pri 900 ºC tijekom 30 minuta te hlađeno u mineralnom ulju) ispitano je metodom trošenja kuglicom. Za uspredbu , ista eksperimentalna procedura je primijenjena na keramički uzorak mulita. Vickersova tvrdoća izmjerena je koristeći uređaj za mikrotvrdoću (Shimadzu A-108) s opterećenjem od 300g (2,94 N).

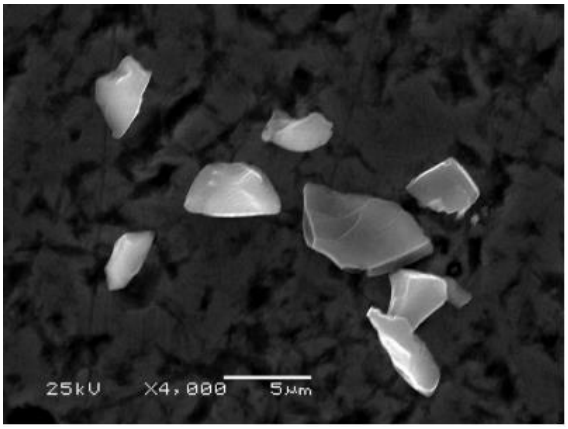
Ispitivanje trošenja kuglicom je napravljeno koristeći metodu sa slobodnom kuglicom i pogonskim vratilom, gdje je kugla pokrenuta trenjem preko pogonskog vratila (slika 50). Normalna sila izmjerena je preko mjerne ćelije pozicionirane ispod postolja uzorka, a njezina vrijednost je prilagođena nagibu postolja koji osigurava okomito djelovanje težine kugle na ispitani uzorak. Maksimalna sila korištena u eksperimentu ne premašuje 0,7N. Kuglica načinjena od tvrdog čelika te promjera 25,41 mm je korištena u pokusu. Za svaki ispitivani materijal, prvi krater se nije uzimao u obzir kako bi se osiguralo da kugla ima iste uvjete za svaki uzastopni krater.



Slika 50. Shema metode ispitivanja trošenja sa slobodnom kuglom [17].

Prije ispitivanja, svi uzorci su polirani koristeću vodenu otopinu aluminijskog praha (0,4 μm veličine čestice) te očišćeni kroz UZV kupku u destiliranoj vodi i etanolu kroz 20min.

Na svakoj površini napravljeno je 11 kratera s duljinama klizanja od 0,4m do 4,0m (5-50 okretaja kugle s tangencijalnom brzinom od 0,05 m/s). Abrazivna otopina praha silicijeva karbida (0,75 g/cm3) je nanošena na kontaktnu površinu brzinom od 1 kapljica/okretu kuglice. Morfologija abrazivnih čestica okarakterizirana je pomoću SEM mikroskopa (Slika 51).



Slika 51. Morfologija abrazivnih čestica dobivena SEM analizom [17].

Normalna sila je bila konstantna tijekom ispitivanja te su svi krateri na istom uzorku napravljeni pod jednakim opterećenjem. Vrijednost normalne iznosila je između 0,265 N i 0,285 N za sva ispitivanja, osim za aluminij koji je najmekši materijal od svih ispitanih. U tom slučaju normalna sila iznosila je 0,220N kako bi se reducirale pukotine unutar samih kratera, tj. spriječilo formiranje brazdi. Također, dodatna ispitivanja s 0,132N i 0,315N su učinjena na AISI 1045 čeliku kako bi se istražio utjecaj normalne sile na koncetraciju abrazivnih čestica zarobljenih u kraterima.

Tablica 5. Procijenjene vrijednosti faktora "k" za duljine klizanja *L*<1 i *L*>1 m [17].

Uzorak	Vickersova tvrdoća (GPa)	Faktor trošenja (m^2/N)	
		L<1 m	*L*>1 m
Aluminij	1,72	$10x10^{-12}$	$9x10^{-12}$
Bakar	2	$5x10^{-12}$	$4x10^{-12}$
AISI 1020 čelik	2,86	$5x10^{-12}$	$3x10^{-12}$
AISI 1045 čelik	2,94	$5x10^{-12}$	$2x10^{-12}$
AISI 1045 kaljeni čelik	8,83	$2x10^{-12}$	$2x10^{-12}$
Mulit	8,58	$5x10^{-12}$	$5x10^{-12}$
Nehrđajući čelik	9,02		

Kao što se može vidjeti u tablici 5, faktori trošenja metalnih uzoraka su istog reda veličine kao i uzorci keramike i kaljenog čelika, a tvrdoća uzoraka keramike i kaljenog čelika je tri do četiri puta veća nego uzoraka manje tvrdoće. Može se pretpostaviti da je „nepravilno“ mali faktor trošenja materijala povezan s naljepljivanjem abrazivnih čestica na površinu kratera, usporavajući tako abraziju površine metala.

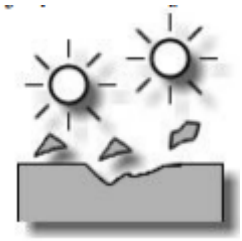
Gustoća SiC čestica naljepljenih na kratere mekših materijala veća je nego kod tvrđih materijala. Kod tvrđeg čelika (AISI 1045), otpornost plastičnim deformacijama dovodi do formiranja plitkih udubljenja koja smanjuju adheziju abrazivnih čestica. Suprotno od toga, kod mekših materijala, slaba otpornost plastičnim deformacijama dopušta cjelokupno ukopavanje abrazivnih čestica.

Kritična normalna sila (N_c) je definirana kao minimalni iznos normalne sile potreban za stvaranje brazdi unutar kratera. Ona ovisi o tvrdoći materijala te je važan parametar za mekanije i duktilnije materijale. Rezultati dobiveni ovom studijom pokazuju jaki utjecaj naljepljivanja silicijevog karbida na stvaranje kratera na duktilnim materijalima. Formiranje brazdi za sile veće od kritične povećava vjerojatnost ugradnje abrazivnih čestica na površinu uzorka, što može utjecati na mjerenja faktora trošenja. Abrazivne čestice naljepljenje unutar udubina trošenja

modificiraju ponašanje površine materijala tijekom ispitivanja, dovodeći pritom do „umjetnog“ smanjena faktora trošenja. Za duktilne materijale, uočeno je da naljepljivanje abrazivnih čestica na površinu kratera te formiranje brazdi dovode do neprirodnog smanjenja faktora trošenja za duljine klizanja veće od 1 m. Za veće duljine, kugla kliže preko površine prevučene SiC te je stoga vrijednost faktora trošenja povezana s ovim sastavom. S obzirom na postojanje kritične sile, koja ovisi o tvrdoći i čvrstoći materijala, nastajanje brazdi uočeno je iznad njezine vrijedsnoti. Kada se ispitivanje trošenja kuglicom provodi na duktilnim materijalima, normalna sila bi trebala biti manja od kritične kako bi se smanjio utjecaj naljepljivanja abrazivnih čestica na površinu uzorka što utječe na mjerenje faktora trošenja.

3.4. Kavitacijska erozija

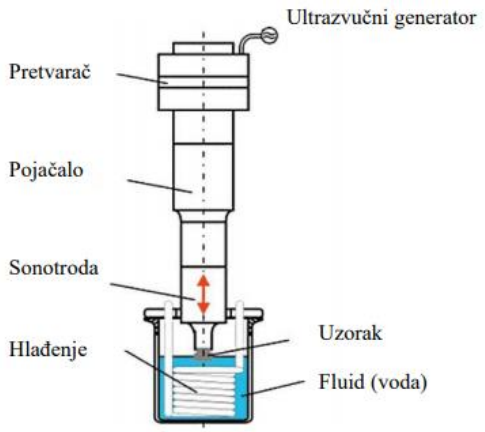
Ovaj oblik erozije nastaje zbog nagle implozije, tj. Promjene tlaka i faze, kavitiranog mjehurića koji implodira velikom brzinom stvarajući tako viskoke lokalne tlakove u kratkom vremenu na malom području [2]. Prilikom te pojave pojave dolazi do velikog naprezanja na površini materijala ukoliko mjehurić implodira u njezinoj blizini. Shema kavitacijske erozije prikazana je na slici 52. Relativno gibanje se može opisati kao strujanje. Opasnost od pojedinih mehanizama trošenja: umor površine – jako visoka, tribokorozija – niska.



Slika 52. Shema tribosustava kavitacijske erozije [1].

3.4.1. Erozijsko ispitivanje vibracijskom kavitacijom

Na slici 53 prikazan je uređaj za ispitivanje vibracijskom kavitacijom.



Slika 53. Hielscherov uređaj za ispitivanje kavitacijskom erozijom [18].

3.4.1.1. Kavitacijska erozija plazmom naštrcanih CoMoCrSi prevlaka [19]

Puno dijelova mehaničkih sustava koji rade u okruženju neke tekućine uključeno je u procese kavitacijske erozije. Mnoge komponenete poput propeleri motora bordova, turbine ili pumpe, podložni su ovom procesu. Općenito, tvrde prevlake nanešene ili navarivanjem ili toplinskim putevima, koriste se za zaštitu osnovnog materijala od kavitacijske erozije. U radu [19] provedena su kavitacijska ispitivanja standradnim ultrazvučnim uređajem CoMoCrSi prevlaka proivedenih plazma naštrcavanjem.

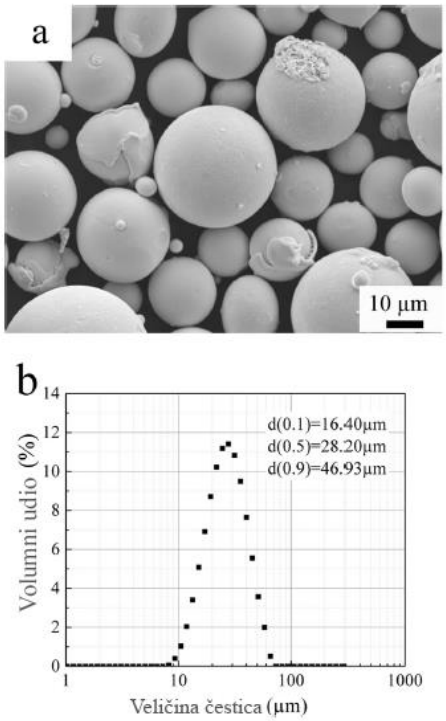
CoMoCrSi prevlaka nanešena je APS (*Air plasma spraying*) postupkom naštrcavanja na čelični podlogu, nakon čega je podvrgnuta trosatnoj toplinskoj obradi pojedinačno pri temperaturama od 800 i 1000 ºC . Prije ultarzvučnog ispitivanja kavitacijske erozije, presjek prevlake promatran je SEM mikroskopom te analiziran XRD difrakcijom. 3D profili su napravljeni kako bi se istražio erozijski mehanizam i na očuvanoj i erodiranoj površini. Kao rezultat, pokazano je da toplinska obrada može značajno smanjiti dubinu erozije CoMoCrSi prevlaka te se nastala kavitacijska oštećenja na mjestima slabije prionjivosti naštrcanih kapi. Komercijalni CoMoCrSi prah (Plasma-TecniAG, Switzerland) pripremljen plinskom atomizacijom korišten je kao sirovina za naštrcavanje. Prevlake su nanešene na ugljični čelik (C22E) u obliku diska promjera 25mm.

Podloga je očišćena ultrazvučno u alkoholnoj kupki te pjeskarena česticama korunda neposredno prije taloženja kako bi se povećalo prianjanje prevlake. Prevlake su nanešene upotrebom plazma naštrcavanja koristeći Sulzer-Metco F4 plazma pištolj. Ar-H_2 mješavina je korištena kao plin plazme. Argon se također koristio kao nosač praha prevlake pri brzini strujanja od 3,5 slpm (standardna litra po minuti). Nakon naštrcavanja, prevlake su izložene zagrijavanju u trajanju od 3 sata pri temperaturama od 800 i 1000 ºC. Uzorci su izrezani te pripremljeni za daljnje analiziranje poprečnog presjeka uzoraka te tvrdoće samih prevlaka. Veličina čestica praha izmjerena je laserskom difrakcijskom metodom (Mastersizer 2000, Malvern, England) . SEM metodom analizirani su uzorci, profil prevlake te morgologija površine nakon ispitivanja erozije. Analiza elemenata prevlake provedena je EDS metodom. Fazni sastav praha i naštrcane prevlake ispitan je rendgenskom difrakcijom (Bruker AXS D8 focus, Germany). Mikrotvrdoća naštrcane prevlake se izmjerila Vicekrsovom metodom na poliranom presjeku pomoću Leitzovog testera za mikrotvrdoću s opterećenjem od 300g tijekom 15 s. Provedeno je deset mjerenja kako bi se izračunala prosječna vrijednost tvrdoće ispitivanih uzoraka.

Poroznost prevlake procijenjena je analizom slike na poliranim presjecima pomoću SEM mikroskopa te zatim analizom pomoću programa IMAGE J. 10 optičkih mikroprikaza pri povećanju od 300 x na nasumično odabranim mjestima su korišteni za procjenu prosječne vrijednosti. 3D površina dobivena je ALTUSURF 500-ALTIMET uređajem za profile s dodatkom optičkog senzora. Profili su dobiveni nakon 0 i 114 minute kavitacije kako bi se okarakteriziralo napredovanje oštećenja površine. Ispitivanje kavitacijske erozije je napravljeno prema ASTM G32 standardu u destiliranoj vodi pri temp 22±1 ºC. Frekvencija rada je iznosila 20kHz s amplitodm od 45 μm koristeći pobuđivalicu promjera 13 mm. Udaljenost između vrha i ispitivanog uzorka iznosila je 0,5 mm. Uzorci su polirani na hrapavost od 0,5 μm, a zatim ultrazvučno očišćeni u kupci alkohola prije ispitivanja. Gubitak mase uzoraka mjerio se analitičkom vagom preciznosti 0,1mg nakon 1., 4., 9., 24., 54. i 114. minute kavitacijske erozije.

Srednja dubina erozije (MDE) je dobivena pomoću jednadžbe 1: $MDE(\mu m) = \Delta w / 1000\ \delta \times A$, gdje je Δw gubitak mase u mg, A predstavlja izloženu površinu u mm^2 , a δ gustoću materijala u g/cm^3.

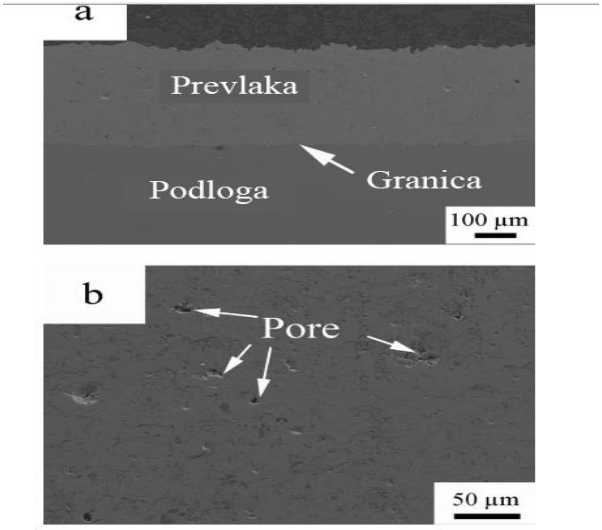
Slika 54 ilustrira morfologiju i raspodjelu veličine čestica praha.



Slika 54. Morfologija i raspodjela veličine čestica praha [19].

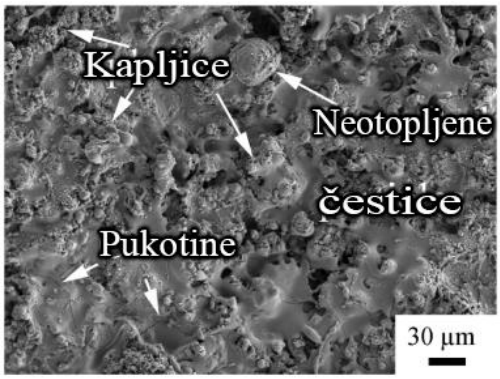
Na slici 54a može se vidjeti da čestice pokazuju jednolik sferičan oblik s nekolicinom sitnih čestica. Raspodjela veličine CoMoCrSi praha je između 16,40 i 46,93 μm s prosječnom veličinom od 30,18 μm. Slika 55a prikazuje presjek mikrostrukture APS naštrcane prevlake. Prevlaka pokazuje gustu mikrostrukturu te vrlo dobru prionjivost na podlogu. Nisu primijećene značajnije pukotine unutar prevlake niti u dodiru s podlogom.

Pri većim povećanjima mogu se uočiti sitne pore kao što prikazuje slika 55b.



Slika 55. Presjek mikrostrukture prevlake (a) i sitne pore (b) [19].

Izmjerena mikrotvrdoća naštrcanih prevlaka je 498 ± 22 HV0,3. Nakon toplinske obrade pri 800 i 1000 ºC, mikrotvrdoća se povećala na 685±21 HV0,3 i 755±33HV0,3 za redom navedene temperature. Izgled naštrcane površine prevlake prikazan je na slici 56.



Slika 56. Morfologija naštrcane prevlake [19].

Naštrcana prevlaka pokazuje MDE od 49,7µm nakon 114 minuta izloženosti. Tijekom ispitivanja kavitacijske erozije, ultrazvučno zračenje inducira oblak kavitacije iznad površine ispitivanog uzorka. Kada se dogodi pucanje mjehurića, udarni valovi transmitiraju se prema

površini, a u međuvremenu dolazi do nukleacije novih mjehurića blizu površine ispitivanja. Mjehurići počinju oscilirati te dolazi do stvaranja mikromlaza u trenutku kada udarni val dođe do njih. Pucanje mjehurića, uz mikromlaz velike udarne brzine, inducira visoki pritisak na samu površinu uzorka. Kao rezultat, dolazi do uklanjanja kapljica slabe adhezije s površine te inicijalne pukotine počinju rasti. Nastali pritisak može dovesti do raslojavanja napuknutih čestice. Nakon toplisnke obrade, adhezijske zone koje su sadržavale naštrcane kapljice dodatno su se povezale zbog atomske difuzije. Temeljeno na prijašnjim istraživanjima, dolazi do težeg raslojavanja granica te sjeckanja unutar čestica tijekom procesa kavitacijske erzoije. Nadalje, dolazi do povećanje tvrdoće prevlake nakon toplinske obrade. Početna hrapavost prije kavitacije iznosila je R_a=0,43 μm. Nakon kavitacije, dolazi do pojave jamica, rasta pora te ispitivana površina postaje grublja. Nakon izloženosti od 114 minuta, dubine nekih šupljina su se povećale do otprilike 30 μm te je R_a narasla na 4,31 μm. Očekivano je da se gubitak mase ubrzavao kako su rasle pukotine i pore. Veličina mikromlaza kavitacije može biti manja od 2 μm te stoga porozne regije imaju manju otpornost na eroziju nego područja bez oštećenja, a samim time inicijalne pukotine postaju sve dublje kako vrijeme izloženosti protiče. Neke pore su u početku ispitivanja bile ispunjene naštrcanim kapima. Nakon 114 minuta izloženosti erozijskoj kavitaciji nije pronađena niti jedna takva tvorevina unutar pora.

Promatrane prevlake pokazuju gustu mikrostrukturu s određenim inicijalnim porama i pukotinama. Tijekom ispitivanja zaključeno je da kod CoMoCrSi prevlaka ne dolazi do perioda inkubacije. Nakon 114 minuta izloženosti kavitacijskoj eroziji srednja dubina šupljina iznosila je 49 μm aproksimativno. Jačanje granica čestica postignuto je toplinskom obradom pri 800 i 1000 ºC, što je dovelo do smanjenja MDE u usporedbi s naštrcanom prevlakom. Mikrostrukturnim ispitivanjem uzoraka uočene su 2 pojave zaslužne za oštećenja na ispitanim prevlakama: uklanjanje kapljica slabe adhezije s površinom koje su formirane plazma naštrcavanjem te raslojavanje dijelova kao posljedice pucanja mjehurića.

4. ZAKLJUČAK

Nakon navedenih specifičnih laboratorijskih metoda može se zaključiti da istraživanje triboloških svojstava nema granice. Od svemirske tehnologije, geologije, automobilske industrije i drugih navedenih područja primjene ovih metoda, tribologija je kao znanost o trošenju materijala dodatno pokazala vrlo veliki utjecaj u napretku današnjih industrija. S obzirom na kontinuirani rast i razvoj same industrije kao takve, tribologija i tribološke metode ispitivanja će zasigurno morati pratiti zahtijeve koje industrija, ali i druga područja primjene poput medicine, stavljaju pred nju.

LITERATURA

[1] K. Grilec, S. Jakovljević, G. Marić; Tribologija u strojarstvu, FSB, Zagreb, 2017.

[2] Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication – tribology, OECD Publications, Paris 1969.

[3] V. Ivušić, „Tribologija“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.

[4] G. Heffer, „Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih čestica“, Disertacija, FSB, Zagreb, 2002.

[5] S.D. Bagi: Effect od additive morphology & chemistry on wear & friction of greases uunder spectrum loading (Master thesis), University od Texas at Arlington, USA, 2012.

[6] http://www.machinerylubrication.com, 18.1.2021.

[7] Masuko, M., Jones Jr, W. R., Jansen, R., Ebihara, B., Pepper, S. V., & Helmick, L. S. (1993). A vacuum four-ball tribometer to evaluate liquid lubricants for space applications.

[8] http://www.extremecoating.com/weartestg77.html, 16.1.2021.

[9] Puzyr, A. P., Burov, A. E., Selyutin, G. E., Voroshilov, V. A., & Bondar, V. S. (2012). Modified nanodiamonds as antiwear additives to commercial oils. Tribology Transactions, 55(1), 149-154.

[10] I. Sulima, P. Klimczyk, P. Malczewski: Efect of TiB2 Particles on the tribological Properties od Stainless Steel Matrix Composites, Acta Metallurgica Sinica, 27 (2014),12-18

[11] Verma, S., Kumar, V., & Gupta, K. D. (2012). Performance analysis of flexible multirecess hydrostatic journal bearing operating with micropolar lubricant. Lubrication Science, 24(6), 273-292.

[12] http://triblab.teipir.gr/en/pg000.html, 18.1.2021.

[13] Wahlström, J., Söderberg, A., Olander, L., Jansson, A., & Olofsson, U. (2010). A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes. Wear, 268(5-6), 763-769.

[14] Magnol, R. V., Macedo, M. Q., de Macêdo, M. C. S., & Scandian, C. (2019). Tribological characterization of jaspilite by linear scratch test. Wear, 426, 142-150.

[15] Bergseth, E., Zhu, Y., & Söderberg, A. (2020). Study of surface roughness on friction in rolling/sliding contacts: ball-on-disc versus twin-disc. Tribology Letters, 68, 1-15.

[16] Morgeneyer, M., Shandilya, N., Chen, Y. M., & Le Bihan, O. (2015). Use of a modified Taber abrasion apparatus for investigating the complete stress state during abrasion and in-process wear particle aerosol generation. Chemical Engineering Research and Design, 93, 251-256.

[17] Camerini, R. V., De Souza, R. B., De Carli, F., Pereira, A. S., & Balzaretti, N. M. (2011). Ball cratering test on ductile materials. Wear, 271(5-6), 770-774.

[18] http://hielscher.com/ultrasonics/astm_g32-92.htm. 20.1.2021.

[19] Wang, Y., Liu, J., Kang, N., Darut, G., Poirier, T., Stella, J., ... & Planche, M. P. (2016). Cavitation erosion of plasma-sprayed CoMoCrSi coatings. Tribology International, 102, 429-435.