

Ispitivanje utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala suhe spojke

Miklik, Alen

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:235:120257>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Alen Miklik

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Matija Hoić

Student:

Alen Miklik

Zagreb, 2020.

Izjava

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

Alen Miklik

Zahvala

*Na početku, zahvaljujem se **prof. dr. sc. Jošku Deuru** što mi je pružio priliku raditi na projektu u sklopu kojeg je napravljen ovaj diplomski rad. Također se zahvaljujem na svim danim uputama i savjetima koji su pridonijeli kvaliteti rada.*

*Zahvaljujem se tvrtki **Ford Motor Company** na resursima koji su omogućili provedbu ispitivanja, a time i realizaciju ovog rada.*

*Najsrdajnije se zahvaljujem svom mentoru, **doc. dr. sc. Matiji Hoiću** na ukazanom povjerenju, nesebičnom odvajanju vremena te brojnim uputama i prijedlozima tijekom izrade ovog rada koji su znatno pridonijeli njegovoj kvaliteti. Poseban naglasak moram staviti na pomoć i savjete vezane uz interpretaciju dobivenih rezultata.*

Zahvaljujem se najbližim prijateljima što su mi uljepšali studentske dane i koji su bili uz mene u dobrim, ali i teškim trenucima kroz moj studij. Vi znate koji ste.

*Na kraju, posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, **Jasni i Darku**, što su mi omogućili školovanje i pružali podršku tokom svih godina. Na tome sam vam neizmjereno zahvalan.*

Alen Miklik

“Better a little which is well done, than a great deal imperfectly.”

Platon



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Alen Miklik**

Mat. br.: 0035201978

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala suhe spojke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of influence of temperature on the dynamics of wear of an automotive dry friction material**

Opis zadatka:

Za potrebe ispitivanja trošenja tarnog materijala suhe automobilske spojke na Fakultetu je razvijen ispitni postav sa CNC karakteristikama koji omogućava precizno upravljanje radnim parametrima. Stroj je razvijen tako da koristi čitave tarne ploče kao ispitne uzorke.

Cilj zadatka je provesti ispitivanje utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala suhe spojke. Rad treba sadržavati:

- 1) Opći pregled automobilskih suhih spojki i pripadajućih tarnih materijala;
- 2) Teorijski pregled trošenja u uvjetima suhog klizanja;
- 3) Pregled utjecaja temperature na trošenje i trenje s naglaskom na dinamičke efekte;
- 4) Opis strukture i mogućnosti ciljanog ispitnog stroja;
- 5) Plan mjerenja, provedbu ispitivanja i analizu rezultata za slučajeve:
 - a. promjene razine temperature u očekivanom rasponu radnih temperatura (do 240°C)
 - b. povećanja temperature do pojave efekta temperaturnog zamora (eng. *fading*)
- 6) Prijedlog daljnjih ispitivanja na predmetnom području temeljem dobivenih rezultata


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

Zadatak zadan:
14. studenoga 2019.

Datum predaje rada:
16. siječnja 2020.

Predviđeni datum obrane:
20. – 24.1.2020.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Matija Hoić

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ AUTOMOBILSKIH SPOJKI	2
3. MODERNE AUTOMOBILSKE SPOJKE	6
3.1. Princip rada suhe tarne spojke	7
3.2. Zamašnjak spojke.....	10
3.3. Potisna ploča spojke.....	11
3.4. Tanjurasta opruga spojke	12
3.5. Tarna ploča spojke	13
3.6. Mehanizam za kompenzaciju trošenja tarne ploče	16
3.7. Aktuatorski mehanizam spojke.....	18
3.8. Proračun okretnog momenta spojke.....	19
4. TARNI MATERIJALI SUHIH SPOJKI.....	22
4.1. Zahtjevi tarnih materijala	22
4.2. Sastav tarnih materijala.....	24
4.2.1. Grafitne čestice	24
4.2.2. Sinterirani/keramički metali	25
4.2.3. Vlakna.....	25
4.2.4. Veziva.....	27

4.2.5.	Punila	28
4.2.6.	Modifikatori trenja.....	28
4.3.	Tehnologija proizvodnje tarnih obloga	29
4.3.1.	Kalupljenje.....	29
4.3.2.	Tkanje i namatanje.....	29
5.	TROŠENJE MATERIJALA TARNIH OBLOGA SPOJKE	30
5.1.	Trenje klizanja.....	30
5.2.	Mehanizmi trošenja.....	33
5.2.1.	Abrazija.....	34
5.2.2.	Adhezija.....	35
5.2.3.	Umor površine	36
5.2.4.	Tribokorozija	37
5.3.	Modeliranje trošenja	38
5.4.	Utjecajni faktori na trenje i trošenje.....	40
5.4.1.	Utjecaj temperature na trenje i trošenje	41
6.	ISPITNI POSTAV	47
6.1.	Struktura ispitnog postava.....	48
6.1.1.	Vertikalna os	50
6.1.2.	Rotacijska os	52
6.1.3.	Sustav vodenog hlađenja	52
6.1.4.	Sustav ventilacije	53
6.2.	Princip rada ispitnog postava	54
6.3.	Mjerenje trošenja na temelju razlike u masi	57
7.	TROŠENJE TARNOG MATERIJALA SPOJKE U OČEKIVANOM RASPONU RADNIH TEMPERATURA.....	58
7.1.	Početno sušenje tarnog materijala i proces uhodavanja spojke	59

7.2.	Utjecaj vlage na dinamiku trošenja tarne ploče #31	61
7.3.	Gubitak vlage uslijed sušenja na visokim temperaturama	63
7.4.	Sušenje tarne ploče #31 na različitim temperaturama	64
7.5.	Kompenzacija trošenja tarne ploče #31	66
7.6.	Detaljna karakterizacija utjecaja vlage na trošenje tarnog materijala.....	68
7.7.	Prijedlog daljnjih ispitivanja u cilju karakterizacije utjecaja vlage na dinamiku trošenja tarnog materijala	72
8.	TROŠENJE TARNOG MATERIJALA SPOJKE PRI VISOKIM TEMPERATURAMA DO POJAVE EFEKTA TEMPERATURNOG ZAMORA	74
8.1.	Inicijalna ispitivanja trošenja pri visokim temperaturama	74
8.2.	Ispitivanje trošenja tarne ploče #36	79
8.3.	Ispitivanje trošenja tarne ploče #37	83
8.4.	Prijedlog daljnjih ispitivanja u cilju karakterizacije utjecaja visokih temperatura na dinamiku trošenja tarnog materijala	86
9.	ZAKLJUČAK	87
	LITERATURA	90
	PRILOZI.....	94

POPIS SLIKA

Slika 1. Remenska spojka Benzovog vozila iz 1886. godine ([1]).....	2
Slika 2. Konusna spojka: a) prostorni prikaz; b) poprečni presjek ([1])	3
Slika 3. Suha lamelna spojka sa zakovanim tarnim oblogama ([1])	4
Slika 4. Izvedba suhe spojke s jednom tarnom pločom (lamelom) i zavojnim oprugama ([1])	5
Slika 5. Suha tarne spojka u uključenom (lijevo) i isključenom (desno) položaju ([5]).....	8
Slika 6. Suha tarne spojka s: a) potisnim; b) povlačnim ležajem ([6])	9
Slika 7. Zamašnjak spojke ([8])	10
Slika 8. Izvedbe dvomasenog zamašnjaka spojke ([9])	11
Slika 9. Ovisnost potisne (tlačne) sile o hodu potisne ploče	12
Slika 10. Ovisnost sile odvajanja o hodu potisnog ležaja ([4]).....	13
Slika 11. Tarne ploča suhe spojke ([1]).....	14
Slika 12. Elastični elementi između tarnih obloga: a) jednostruka; b) dvostruka valovita opruga ([1]).....	15
Slika 13. Krivulja prigušivanja torzijskih vibracija.....	16
Slika 14. Moguće pozicije mehanizma za kompenzaciju trošenja tarne ploče ([6]).....	17
Slika 15. Usporedba konvencionalne spojke (lijevo) i spojke s mehanizmom za kompenzaciju trošenja (SAC) (desno) ([10]).....	17
Slika 16. Vrste sustava za isključivanje spojke konvencionalne ručne transmisije ([11]).....	18
Slika 17. Tarne ploča s geometrijskim oznakama	19
Slika 18. Konfliktnost zahtjeva u razvoju tarnih materijala ([13]).....	23
Slika 19. Utjecaj brzine vrtnje na vlačno naprezanje tarnih obloga ([13]).....	23
Slika 20. Granulirani grafit ([14])	24
Slika 21. Sinterirane tarne obloge za spojke trkaćih automobila ([15]).....	25
Slika 22. Tarne ploča s oblogama od para-aramidnih vlakana - Kevlar® ([16]).....	26
Slika 23. Tarne obloga sa staklenim vlaknima ([17])	27
Slika 24. Tijek proizvodnje tarnih obloga metodom tkanja i namatanja ([13])	29
Slika 25. Trenje klizanja.....	30
Slika 26. Jedinični događaj procesa klizanja.....	31
Slika 27. Toplina nastala klizanjem dvaju tijela ([19])	32
Slika 28. Jedinični događaj abrazije	34

Slika 29. Oštećenje (žljebovi) tarne ploče #20 metalnim žicama	35
Slika 30. Jedinični događaj adhezije	35
Slika 31. Jedinični događaj umora površine.....	36
Slika 32. Jedinični događaj tribokorozije	37
Slika 33. Utjecaj temperature na stupanj trošenja i koeficijent trenja tarnog materijala kočionih obloga dobivenog metalurgijom praha ([20])	38
Slika 34. Međuovisnost faktora i parametara koji definiraju proces trenja.....	40
Slika 35. Koeficijent trenja u procesu uhodavanja i u normalnim uvjetima rada spojke.....	42
Slika 36. Promjena koeficijenta trenja pri pojavi efekta temperaturnog zamora materijala	42
Slika 37. Formirani tarni sloj na organskom tarnom materijalu snimljen skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) ([20]).....	43
Slika 38. Utjecaj temperature na stupanj trošenja i koeficijent trenja organskog tarnog materijala kočionih obloga ([20]).....	44
Slika 39. Istrošena tarne površina snimljena SEM mikroskopom ([29])	45
Slika 40. Utjecaj temperature na dinamički koeficijent trenja tarnog materijala suhe dvostruke spojke ([30])	46
Slika 41. Shematski prikaz ispitnog postava ([32]).....	48
Slika 42. Stvarna izvedba ispitnog postava (lijevo) i detalj rotacijske i vertikalne osi (desno)	49
Slika 43. Vertikalna os s inicijalnom izvedbom (lijevo) i s tri troosna senzora (desno) ([32])	51
Slika 44. Uzdužni presjek (lijevo) ([32]) i stvarna izvedba (desno) rotacijske osi	52
Slika 45. Rashladna jedinica (lijevo) i pogonski sustav vodenog hlađenja (desno).....	53
Slika 46. Ventilacijski sustav ispitnog postava	54
Slika 47. Kvalitativni prikaz faza radnog ciklusa ispitnog stroja ([32])	55
Slika 48. Precizna vaga za mjerenje razlike mase tarne ploče	57
Slika 49. Promjena brzine vrtnje i temperature u jednom radnom ciklusu	58
Slika 50. Sušenje tarne ploče u električnoj pećnici	59
Slika 51. Stabilizacija stupnja trošenja i koeficijenta trenja za različite tarne ploče.....	60
Slika 52. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarne ploče #31	61
Slika 53. Ovisnost relativne razlike mase o kumulativnoj energiji za tarne ploče #31	62
Slika 54. Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #35 uslijed sušenja	63
Slika 55. Raspored sušenja tarne ploče #31 u električnoj pećnici.....	64

Slika 56. Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #31 uslijed sušenja.....	65
Slika 57. Kompenzirani dio razlike mase tarne ploče #31	66
Slika 58. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #31 nakon provedene kompenzacije trošenja	67
Slika 59. Raspored promjene radne temperature (gore) s očekivanom promjenom stupnja trošenja (dolje).....	68
Slika 60. Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #38 i #39	69
Slika 61. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #38	70
Slika 62. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #38 nakon provedene kompenzacije trošenja	71
Slika 63. Tarna ploča #35 nakon sušenja u električnoj pećnici.....	72
Slika 64. Rastopljeni klizni ležaj tarne ploče #39 nakon sušenja u električnoj pećnici	73
Slika 65. Plan provođenja ispitivanja trošenja tarnog materijala pri visokim temperaturama do pojave efekta temperaturnog zamora	75
Slika 66. Ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #20	77
Slika 67. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #20	77
Slika 68. Stabilizacija stupnja trošenja i koeficijenta trenja za tarnu ploču #36	80
Slika 69. Ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #36	81
Slika 70. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #36	81
Slika 71. Ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #37	84
Slika 72. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #37	84
Slika 73. Detaljan prikaz radnih parametara u svakom radnom ciklusu	85

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavni radni parametri tribometra ([32]).....	50
Tablica 2. Set radnih parametara procesa uhodavanja spojke.....	60
Tablica 3. Promijenjeni radni parametri procesa uhodavanja	61
Tablica 4. Radni parametri za tarnu ploču #20	76
Tablica 5. Radni parametri za tarnu ploču #36	80
Tablica 6. Radni parametri za tarnu ploču #37	83

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	Površina tarnih obloga
d	mm	Vertikalni pomak reaktivnog diska
$E_{\text{dis}}, U_{\text{dis}}$	J	Raspršena energija
E_{max}	J	Maksimalna kinetička energija
E_{min}	J	Minimalna kinetička energija
F, F_{tr}	N	Sila trenja
F_1	N	Otpor na elastičnu deformaciju
F_2	N	Otpor na plastičnu deformaciju
F_3	N	Otpor na brazdanje
F_4	N	Otpor na kidanje adhezijskih veza
F_a	N	Normalna sila koja djeluje na potisnu ploču
F_n, N	N	Normalna sila
F_t	N	Tangencijalna sila
F_z	N	Normalna sila na tribometru
$F_{z\text{max}}$	N	Maksimalna dopuštena normalna sila na tribometru
F_{zR0}	N	Početna normalna sila na tribometru
H	-	Tvrdoća tarnog materijala
K	-	Koeficijent trošenja
K_{el}	-	Koeficijent električne inercije
L	mm	Relativna površinska klizna udaljenost
M_z	Nm	Okretni moment na tribometru
n_c	min^{-1}	Brzina vrtnje ulaznog vratila transmisije
N_{cik}	-	Broj radnih ciklusa
n_e	min^{-1}	Brzina vrtnje motora
p	Pa	Površinski pritisak
p_{in}	Pa	Tlak rashladne tekućine u ulaznoj grani
p_{out}	Pa	Tlak rashladne tekućine u izlaznoj grani
r_1	mm	Unutarnji radijus tarne ploče

r_2	mm	Vanjski radijus tarne ploče
r_{eff}	mm	Efektivni radijus tarne ploče
T	Nmm	Okretni moment kojeg spojka može prenijeti
t_1	s	Vremenski interval prve faze radnog ciklusa
t_2	s	Vremenski interval druge faze radnog ciklusa
T_{cool}	°C	Temperatura rashladnog diska
T_d	°C	Temperatura reaktivnog diska
t_{delay}	s	Vrijeme pauze između dva uzastopna ciklusa
T_{in}	°C	Temperatura rashladne tekućine u ulaznoj grani
T_{out}	°C	Temperatura rashladne tekućine u izlaznoj grani
t_{slip}	s	Ukupno vrijeme klizanja
U_{akum}	J	Unutarnja (akumulirana) energija kliznog sustava
U_{ul}	J	Ulazna energija kliznog sustava
v, v_{kl}	m/s	Brzina klizanja
V_w	mm ³	Volumen trošenja tarnih obloga
w	mm ³ /MJ	Stupanj trošenja
x	mm	Udaljenost od centra tarne ploče
z	-	Broj tarnih ploča
Δm	kg	Razlika mase spojke
Δm_{comp}	kg	Kompenzirana razlika mase
Δm_{dr}	kg	Razlika mase dobivena sušenjem u električnoj pećnici
Δm_{exp}	kg	Razlika mase dobivena trošenjem na tribometru
ΔV_w	mm ³	Razlika volumena spojke uslijed trošenja
μ	-	Koeficijent trenja
μ_d	-	Dinamički koeficijent trenja
μ_s	-	Statički koeficijent trenja
ρ	kg/m ³	Gustoća tarnog materijala
φ_{pmp}	°	Kutna pozicija servomotora pumpe
φ_r	°	Kutna pozicija servomotora rotacijske osi
φ_v	°	Kutna pozicija servomotora vertikalne osi
ω_{pmp}	min ⁻¹	Brzina vrtnje servomotora pumpe
ω_r	min ⁻¹	Brzina vrtnje servomotora rotacijske osi

ω_{rmax}	min^{-1}	Maksimalna brzina vrtnje servomotora rotacijske osi
ω_{v}	min^{-1}	Brzina vrtnje servomotora vertikalne osi

SAŽETAK

Suha tarna spojka je važan mehanički sklop koji se široko koristi u automobilskoj primjeni. Spojke se koriste za upravljanje prijenosa okretnog momenta između motora s unutarnjim izgaranjem i transmisije. To se postiže isključivanjem i uključivanjem spojke koja predstavlja razdvojivu vezu između koljenastog vratila i ulaznog vratila transmisije. Toplina generirana trenjem klizanja nastaje prilikom uključivanja spojke. Kao rezultat tome temperatura dodirnih površina se brzo povećava zbog razlike u brzini vrtnje između pogonskih i gonjenih elemenata spojke. Zbog sve većih energijskih zahtjeva u pogledu okretnog momenta i temperature koji se postavljaju na sustave spojke, postalo je potrebno steći veću kontrolu nad njihovim tribološkim karakteristikama (koeficijent trenja i stupanj trošenja) kako bi se poboljšao razvoj učinkovitijih spojki.

U ovom radu provedeno je ispitivanje utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala automobilske suhe tarne spojke. Kroz teorijska poglavalja dan je opći pregled automobilskih suhih spojki i pripadajućih tarnih materijala. Također su objašnjene vrste mehanizama trošenja koji se javljaju tijekom rada suhe tarne spojke, kao i utjecaj temperature na trenje i trošenje tarnog materijala. Ispitivanja su provedena na tribometru sa CNC karakteristikama koji koristi čitave tarne ploče kao ispitne uzorke i koji omogućava precizno upravljanje radnim parametrima kao što su normalna sila, brzina klizanja i temperatura. Provedena su dva seta ispitivanja: u jednom je radna temperatura mijenjana u očekivanom rasponu radnih temperatura spojke (do 240°C), dok je u drugom radna temperatura postepeno povećavana do pojave efekta temperaturnog zamora materijala (eng. *fading*). Na kraju, rezultati provedenih ispitivanja i njihova interpretacija zaključuju rad.

Ključne riječi: automobilska suha spojka, *disc-on-disc* tribometar, tarni materijal, temperatura, trenje, trošenje, *fading*

SUMMARY

Dry friction clutch is an essential mechanical assembly which is widely used in the automotive application. Clutches are used to control the torque flow between internal combustion engine and transmission. This is achieved by separating and coupling the clutch which represent a detachable link between crankshaft and transmission input shaft. Frictional heat is generated when the clutch starts to engage. As a result of this operation the contact surfaces temperature is increased rapidly due to the difference in speed between the driving and driven parts of the clutch. Due to the increasing energy demands (torque and temperature) over the clutch systems, it has become necessary to gain more control over their tribological characteristics (friction coefficient and wear rate) to improve the development of more efficient clutches.

In this Thesis characterization of influence of temperature on the dynamics of wear of an automotive dry friction material is conducted. Through the theoretical chapters, a general overview of automotive dry clutches and associated friction materials is given. Types of wear mechanisms that occur during the operation of a dry friction clutch as well as the temperature influence on friction and wear of friction material are also explained. The experiments were performed on a CNC disc-on-disc tribometer that allows precise control of operating parameters such as normal force, slip speed, and temperature. Two sets of experiments were performed: in one the operating temperature was changed within the expected range of clutch operating temperatures (to 240°C), while in the other, the operating temperature was gradually increased until the effect of the temperature fatigue of the material known as fading occurred. At the end, the results of conducted experiments and their interpretation conclude the thesis.

Key words: automotive dry clutch, disc-on-disc tribometer, friction material, temperature, friction, wear, fading

1. UVOD

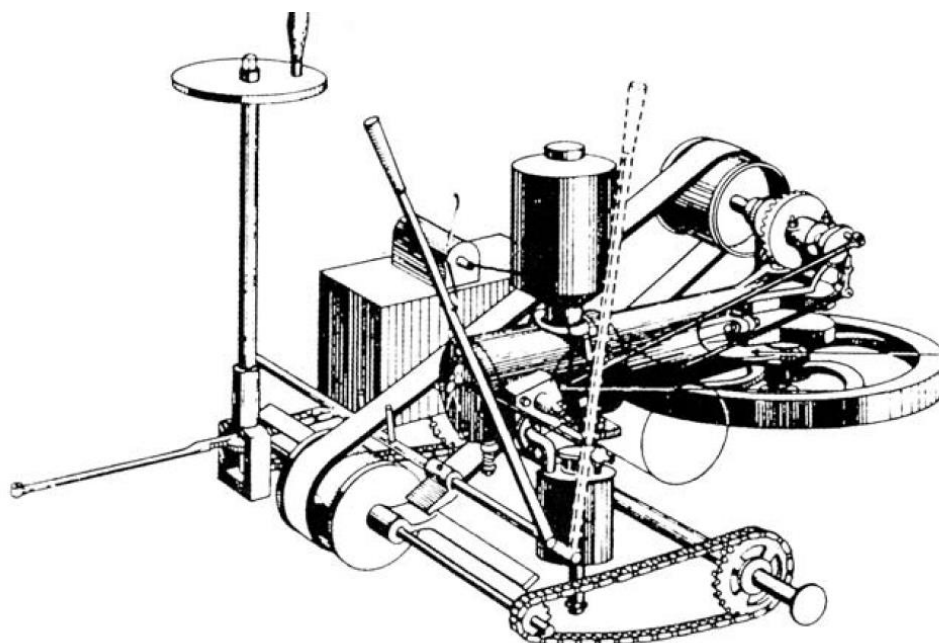
Na današnja moderna putnička vozila postavljaju se izazovni zahtjevi u pogledu niske potrošnje goriva, a analogno time i niska emisija štetnih plinova, udobnosti i performansi. Stoga, u cilju zadovoljavanja navedenih zahtjeva, razvoj i unaprjeđenje komponenti pogonskog sustava je i dalje u fokusu automobilske industrije. Snaga, odnosno okretni moment, se od motora s unutarnjim izgaranjem do transmisije, bilo u osobnim automobilima, autobusima, kamionima ili drugim vozilima, prenosi preko razdvojive mehaničke komponente koja se naziva spojkom. Spojka predstavlja jednu od najvažnijih komponenti pogonskog sustava koja ima značajan utjecaj na pokretanje vozila i kvalitetu procesa promjene stupnja prijenosa. Prilikom uključivanja spojke, uslijed različite brzine vrtnje pogonske i gonjene strane, najprije dolazi do klizanja tarne ploče između potisne ploče i zamašnjaka, dok nakon uključivanja spojke više nema relativnog gibanja komponenti spojke. Svaki mehanički sustav koji je u relativnog gibanju, pa tako i spojka, u svom radu pokazuje trošenje. Klizni kontakt između višekomponentnog tarnog materijala i sivog lijeva, koji ovisi o tarnim svojstvima tribološkog para, potreban je kako bi se prenio okretni moment s pogonske na gonjenu stranu. Koeficijent trenja tarnog para treba biti relativno velik i što je najvažnije stabilan, u rasponu od 0,3 do 0,6. Ostala svojstva, kao što su mehanička i toplinska čvrstoća, zajedno s niskim stupnjem trošenja trebaju simultano biti zadovoljena kako bi se osigurao dug radni vijek komponenata pogonskog sustava i udobnost za vozača i putnike.

Detaljno poznavanje procesa trošenja komponenata spojke omogućava poboljšanje robusnosti sustava upravljanja te time produljenje radnog vijeka same spojke. Odgovarajući model trošenja omogućava procjenu i predviđanje trošenja tarnog materijala spojke. Identifikacija modela trošenja predstavlja zahtjevan zadatak budući da trošenje tarnih materijala nije u potpunosti istraženo i jednoznačno objašnjeno, dok s druge strane prikupljanje podataka potrebnih za opisivanje trošenja kod stvarne izvedbe spojke predstavlja dodatni problem zbog nemogućnosti ugradnje senzora u kompaktno kućište transmisije. Stoga, ispitivanja trošenja tarnog materijala uglavnom se provode u laboratorijima na uređajima namijenjenim za ispitivanje trenja i trošenja koji se nazivaju tribometrima. U ovom diplomskom radu provedeno je ispitivanje utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala automobilske suhe tarne spojke na ispitnom postavu, odnosno tribometru, razvijenom na Fakultetu.

2. POVIJESNI RAZVOJ AUTOMOBILSKIH SPOJKI

Tijekom više od 100 godina automobilske povijesti gotovo sve komponente prošle su kroz svoj tehnološki razvoj. Pouzdanost, niski troškovi proizvodnje, jednostavno održavanje, a u zadnje vrijeme i ekološki zahtjevi, su i dalje temeljni zahtjevi za daljnji razvoj novih i boljih rješenja. Osnovne ideje i principi rada poznati su od prije, no kontinuirano usavršavanje materijala i proizvodnih postupaka omogućava daljnji razvoj i postizanje boljih tehnoloških rješenja. Kao i sve ostale komponente, automobilske spojke su također prošle te i dalje prolaze kroz tehnološki razvoj.

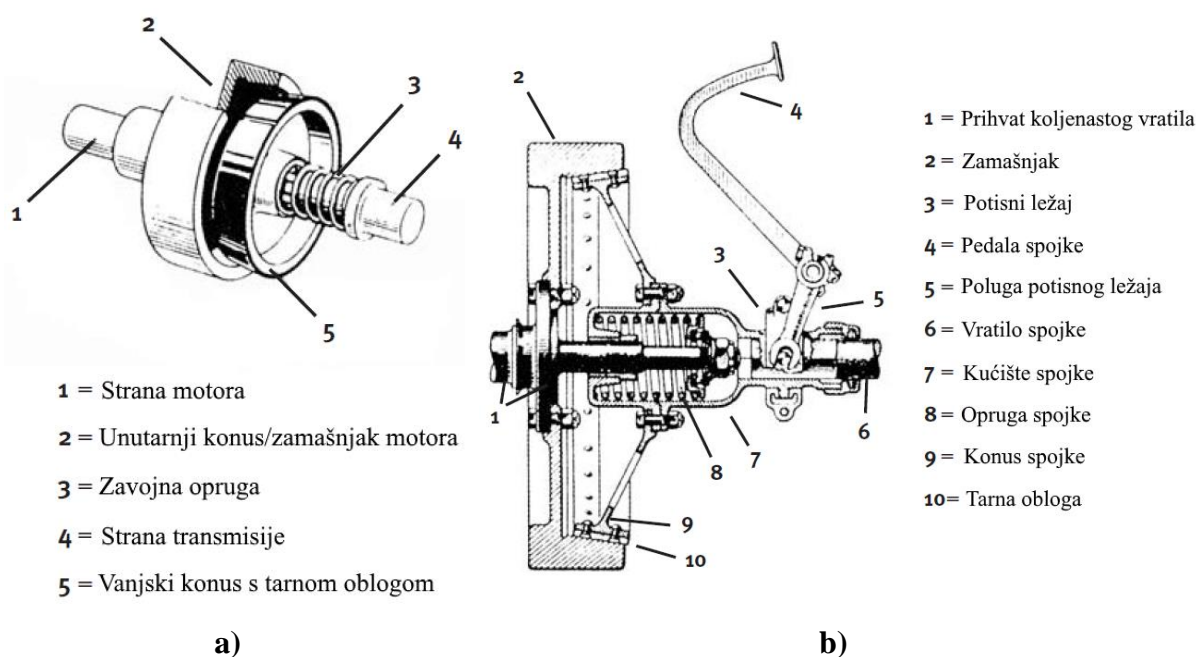
Izum motora s unutarnjim izgaranjem praktično je omogućio cestovna vozila budući da su parni strojevi bili nepovoljni zbog male gustoće snage, a elektromotori zbog niskog kapaciteta ondašnjih baterija. Nedostaci motora s unutarnjim izgaranjem su potreban vanjski izvor snage za pokretanje i lošija momentna karakteristika pri niskim brzinama vrtnje. Prvi nedostatak je riješen ugradnjom elektropokretača, dok je višestupanjska transmisija omogućila ostvarivanje pogodnog okretnog momenta u cijelom rasponu brzine vrtnje, pri čemu su oba nedostatka pogodovala ugradnji spojke. Međutim, zbog složenosti takvih sustava, mnoga lakša vozila su u samom početku razvoja automobila bila pokretana guranjem, budući da takva vozila nisu imala spojku kojom bi se prekinuo prijenos snage na transmisiju prilikom pokretanja.



Slika 1. Remenska spojka Benzovog vozila iz 1886. godine ([1])

Načela rada prvih automobilskih spojki potječu iz mehaniziranih tvornica tadašnjeg razdoblja. Analogno remenima korištenim na strojevima u tvornicama, ravni kožni remeni korišteni su kod prvih automobilskih spojki (Slika 1.). Napinjanje kožnog remena izvedeno je preko valjka koji je povezan s polugom. Tako napet remen zatim prenosi okretni moment s remenice motora na remenicu transmisije, odnosno spojka je uključena. Opuštanjem poluge, odnosno valjka, remen postaje labav i proklizuje između remenica te više ne prenosi okretni moment motora, odnosno spojka je isključena. Remeni su najčešće bili izrađeni od životinjske kože ili pamuka. Međutim, performanse i pouzdanost vozila bili su upitni budući da je uslijed visokih temperatura došlo do pojave efekta temperaturnog zamora (eng. *fading*), a time i do opadanja koeficijenta trenja remena i povećanog trošenja samog remena, što je zahtijevalo česte popravke i zamjenu remena ([2]).

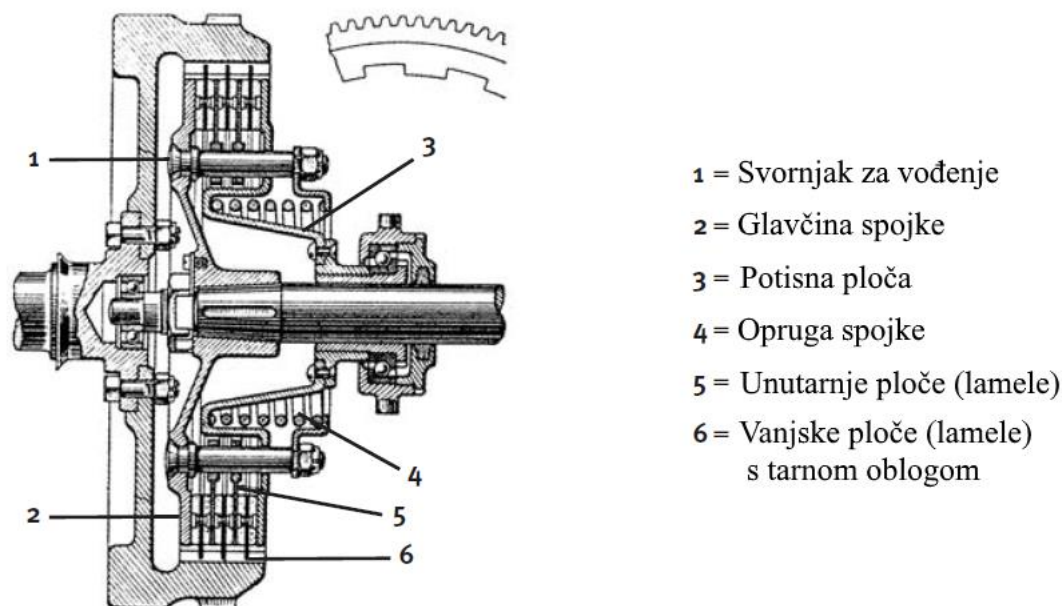
Ograničenja u načelu rada takvih spojki zajedno s lošim karakteristikama korištenih tarnih materijala dovela su do razvoja konusne spojke koja je postala dominantna u automobilskoj industriji dugi niz godina. Konusna spojka (Slika 2.) sastoji se od unutarnjeg konusa koji ujedno ima i ulogu zamašnjaka motora, vanjskog konusa koji po svom obodu ima pričvršćen tarni materijal (tada korištena uglavnom devina dlaka) te mehanizma za uključivanje, odnosno isključivanje spojke. Upotreba konusnih spojki omogućila je korištenje jačih motora u automobilima budući da se mogao prenijeti veći okretni moment nego kod remenskih spojki, a i ugradbene dimenzije same spojke su se znatno smanjile.



Slika 2. Konusna spojka: a) prostorni prikaz; b) poprečni presjek ([1])

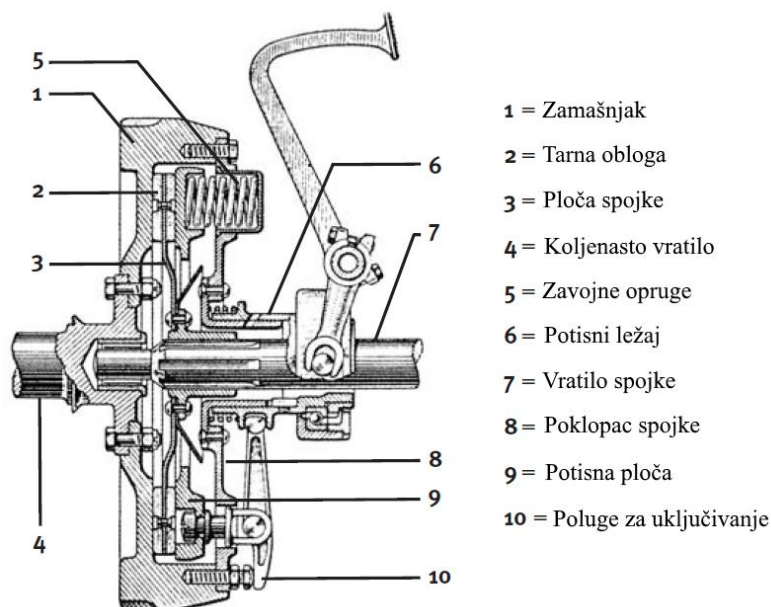
Devinu dlaku kao tarni materijal ubrzo je zamijenila kožna traka koja se prije montaže umakala u ricinusovo ulje kako bi joj se povećala otpornost prema vlazi, masti i ulju ([1]), a također i prema toplinskom naprezanju i trošenju kojem je bila izložena tijekom eksploatacije. Kasnijim razvojem konusne spojke tarni materijal se zakovicama učvršćivao na površinu konusa koja je bila napregnuta preko zavojnih opruga kako bi se postiglo nježnije uključivanje spojke. Daljnjim razvojem tarnih materijala inženjeri su umjesto organskih materijala počeli primjenjivati tarne obloge izrađene od metalnih materijala koji su se pokazali znatno izdržljivijim i pouzdanijim. Međutim, jedan od glavnih nedostataka konusnih spojki je zaglavljivanje vanjskog i unutarnjeg konusa uslijed visokih temperatura koje nastaju pri uključivanju spojke ([2]).

Spojka s lamelama, koja je zapravo prethodnik današnjih suhih spojki s jednom tarnom pločom (lamelom) koje se koriste u konvencionalnim automobilima, implementirana je u vozila oko 1925. godine ([2]). Glavna prednost lamelnih spojki je što se omogućava nježno kretanje vozila bez trzaja što je bio jedan od glavnih nedostataka konusne spojke. Lamelna spojka (Slika 3.) sastoji se od više tarnih ploča – lamela koje su postavljene u parove. U ranijim izvedbama par lamela sastojao se od čelične i brončane ploče ([2]), dok su se u kasnijim izvedbama počele koristiti tarne obloge od sinter materijala. Međutim, lamelne spojke se uglavnom izvode kao podmazane (tzv. mokre spojke) budući da uslijed zagrijavanja može doći do zaljepljivanja tarnih ploča te se ploče ne bi mogle razdvojiti i spojka bi ostala trajno uključena.



Slika 3. Suha lamelna spojka sa zakovanim tarnim oblogama ([1])

Iako je francuski proizvođač automobila De Dion-Bouton predstavio princip rada suhih spojki s jednom tarnom pločom (lamelom) već 1904. godine ([1]), zbog korištenja neadekvatnih materijala tarnih obloga i dalje su upotrebljavane mokre lamelne spojke. Nakon razvoja tarnih materijala, a posebice nakon pojave na tržištu Ferodo® azbestnih tarnih obloga, suhe spojke s jednom tarnom pločom doživjele su svoj uspjeh te su ubrzo potisnule ranije korištene konusne i lamelne spojke. Prednosti takvih spojki u odnosu na ranije korištene spojke bile su očite: mala masa tarne ploče omogućavala je lakše zaustavljanje ploče što je za rezultat imalo bolju promjenu stupnja prijenosa, kućišta spojki bila su znatno jednostavnija budući da više nije trebalo voditi brigu o brtvljenju, a znatno manji broj elemenata produljilo je životni vijek spojke.



Slika 4. Izvedba suhe spojke s jednom tarnom pločom (lamelom) i zavojnim oprugama ([1])

Ranije izvedbe suhih spojki s jednom tarnom pločom imale su jednu zavojnu oprugu smještenu u centru rotacije tarne ploče. Zbog velike potisne sile potrebne za isključivanje spojke, jedna centralno smještena opruga ubrzo je zamijenjena s više manjih zavojnih opruga (najčešće 6) smještenih po obodu potisne ploče (Slika 4.). Iako se kod takvih izvedbi potisna sila mogla mijenjati različitim izborom zavojnih opruga, veliki nedostatak predstavljale su deformacije zavojnih opruga uslijed djelovanja centrifugalne sile pri većim brzinama vrtnje. Nejednakost izrade zavojnih opruga uzrokuje nejednolik pritisak potisne ploče. Danas se spojke sa zavojnim oprugama ugrađuju na teška teretna vozila, traktore i slično, dok se u osobnim vozilima ne koriste.

3. MODERNE AUTOMOBILSKE SPOJKE

Suhe tarne spojke su mehanički sklopovi koji pripadaju kategoriji uključno/isključnih spojki, a koji omogućavaju uključivanje ili isključivanje prijenosa snage rotacijskog gibanja između pogonskog i gonjenog sustava, pri čemu pogonski i gonjeni sustav za slučaj otvorene spojke (kada nema prijenosa snage) općenito imaju različite brzine vrtnje ([3]). Kako je rečeno u uvodnom dijelu, u ovom radu naglasak će se dati na suhe automobilske spojke s tarnom pločom. Najpoznatija primjena suhих tarnih spojki su različiti sustavi transmisija motornih vozila s fiksnim stupnjevima prijenosa koji su najčešće pogonjeni motorima s unutarnjim izgaranjem. Isključivanjem spojke omogućava se pokretanje i rad motora bez prijenosa snage na stranu transmisije (kotače), te isto tako prekidanje prijenosa snage tijekom vožnje koji je nužan za izmjenu stupnjeva prijenosa. Uobičajeni sustavi transmisija koji koriste suhu tarnu spojku su ([3]):

- konvencionalne ručne transmisije (eng. *Manual Transmission* - MT);
- ručne transmisije s elektronički upravljanim spojkama – tzv. e-spojke (eng. *Electronic Clutch* - e-clutch);
- automatizirane ručne transmisije (eng. *Automated Manual Transmission* - AMT);
- transmisije s dvostrukim spojkama (eng. *Dual Clutch Transmission* - DCT);
- vrste transmisija za hibridna električna vozila (eng. *Hybrid Electric Vehicles* - HEV).

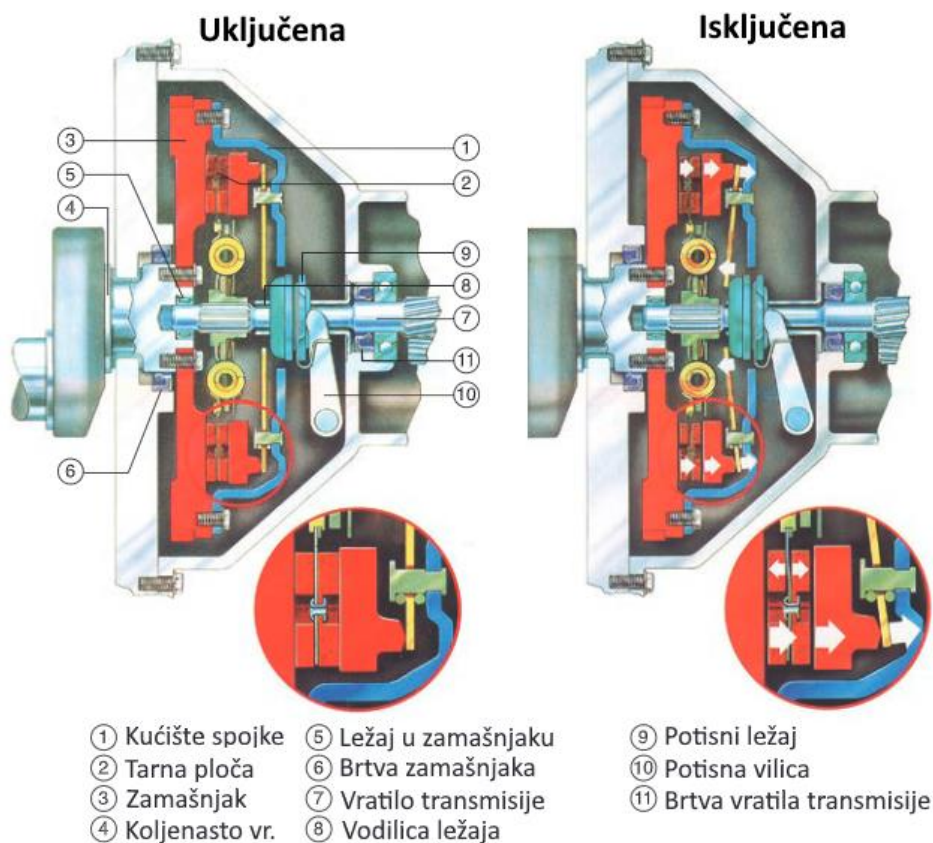
Konvencionalna ručna transmisija (MT) je najstariji tip transmisije sa suhim spojkama kod koje je između motora i diferencijala postavljen sklop nekoliko parova zupčanika s različitim prijenosnim omjerima te spojka koja omogućuje prekid prijenosa okretnog momenta (tokom promjene stupnja prijenosa) sa koljenastog vratila motora na ulazno vratilo transmisije ([3]). Prekid prijenosa okretnog momenta, odnosno isključivanje spojke, kao i promjenu stupnja prijenosa, vrši vozač te je posljedično kvaliteta i ekonomičnost vožnje pod velikim utjecajem sposobnosti vozača. Slično kao i kod konvencionalnih ručnih transmisija, kod ručnih transmisija s elektronički upravljanom spojkom (e-clutch), vozač kod pokretanja/zaustavljanja vozila te izmjene stupnja prijenosa pritišće papučicu spojke, no umjesto neposredne mehaničke veze prema uključnom ležaju, papučica je spojena na element koji proizvodi (emulira) silu tereta, te je ugrađen senzor položaja papučice spojke ([3]). Signal sa senzora pozicije papučice spojke dostavlja se sustavu elektronskog upravljanja zajedno s ostalim relevantnim

informacijama vezanim uz gibanje vozila. Na temelju informacije o poziciji papučice koja predstavlja želju vozača za uključivanjem/isključivanjem spojke te ostalih informacija, sustav određuje poziciju i brzinu gibanja potisnog ležaja koji će dati kvalitetno uključivanje/isključivanje spojke. Uključivanje same spojke vrši se aktuatorskim mehanizmom pogonjenim mehaničkim izvorom snage ([3]). Automatizirane ručne transmisije (AMT) daljnji su stupanj automatiziranosti manualne transmisije u odnosu na one s elektronski upravljanim spojkom kod kojih, pored servoupravljanog aktuatora spojke postoji i servoupravljeni aktuator koji mijenja stupnjeve prijenosa ([3]). U ovom slučaju, vozač na raspolaganju za upravljanje brzinom vozila ima samo papučicu akceleratora kojom daje informaciju o ubrzanju vozila koje želi ostvariti. Transmisije s dvostrukim spojkama (DCT) uobičajeno se opisuju kao skup dvije standardne ručne transmisije ugrađene u isto kućište, pri čemu jedan komplet spojke i zupčanika predstavlja neparne, a drugi komplet parne stupnjeve prijenosa ([3]). Ovakav raspored omogućuje uključivanje sljedećeg stupnja prijenosa dok se snaga još uvijek prenosi u prethodnom stupnju, te se potom paralelno isključuje jedna i uključuje druga spojka, čime se postiže neprekinut prijenos okretnog momenta te postizanje boljih performansi samog vozila. Važno je napomenuti kako su kod ovih transmisija obje spojke prirodno otvorene, za razliku od jednostrukih spojki koje su prirodno zatvorene, a otvaraju se djelovanjem vanjske sile, kako bi se spriječilo oštećenje transmisije uslijed gubitka napajanja. Na temelju dvostrukih spojki razvijena su i rješenja pogona hibridnih električnih vozila (HEV) u paralelnoj konfiguraciji, pri čemu se električni motor spaja neposredno na ulazno vratilo mjenjačke kutije ([3]).

3.1. Princip rada suhe tarne spojke

Suhe tarne spojke koje se ugrađuju u osobne automobile prenose okretni moment motora trenjem klizanja između pogonskog i gonjenog dijela. Pogonski dio spojke na motornim vozilima uključuje zamašnjak, potisnu ploču, kućište spojke i tlačnu oprugu/opruge koji su povezani s koljenastim vratilom motora, dok je gonjeni dio spojke tarne ploča koja je uzdužno pomična i montirana na vratilu spojke. Okretni moment, odnosno snaga koju prenose ove spojke, ovisi o ostvarenoj tlačnoj sili kojom su tarne površine međusobno priljubljene, koeficijentu trenja tarnih obloga i potisne ploče, odnosno zamašnjaka, srednjem radijusu tarne ploče i broju tarnih ploča. Ovisno o tome kako se ostvaruje tlačna sila, tarne spojke mogu biti: mehaničke, hidrauličke, elektromagnetske i pneumatske ([4]). Mehaničke tarne spojke tlačnu silu ostvaruju preko opruga koje djeluju na potisnu ploču. Ovisno o vrsti opruge koja se koristi za ostvarivanje potrebne tlačne sile, spojke mogu imati tanjuraste ili zavojne opruge. Kako je u

ovom radu naglasak dan na automobilske suhe tarne spojke, u daljnjem tekstu obrađivati će se spojke koje potrebnu tlačnu silu ostvaruju tanjurastom oprugom, iako je princip rada jednak i za spojke sa zavojnim oprugama.

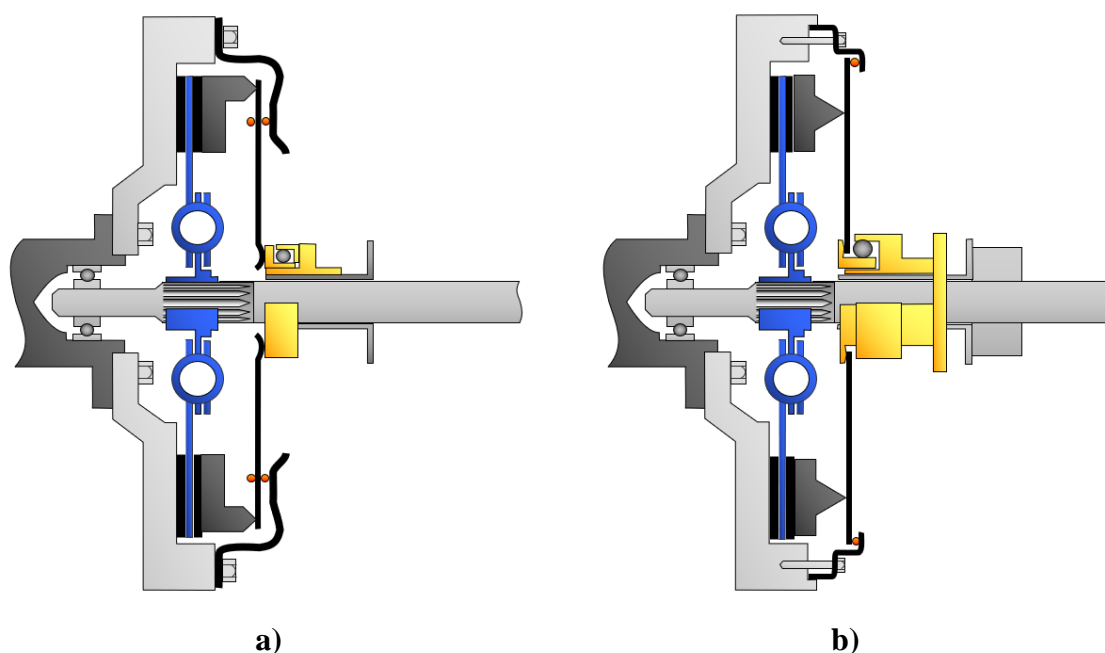


Slika 5. Suha tarne spojka u uključenom (lijevo) i isključenom (desno) položaju ([5])

Na Slici 5. prikazana je suha tarne spojka s jednom tarnom pločom i tanjurastom oprugom kao elementom za ostvarivanje potrebne tlačne sile. Osnovni princip rada tarnih spojki u prijenosu snage je djelovanje normalne sile u aksijalnom smjeru spojke (duž osi rotacije spojke), koja u kombinaciji s koeficijentom trenja generira silu trenja između elemenata spojke vezanih uz pogonski mehanizam (strana motora) i elemenata spojke vezanih uz gonjeni mehanizam (strana transmisije). Ova sila trenja djeluje na radijusu čime se generira okretni moment kojeg spojka može prenijeti ([3]). Ugrađena tanjurasta opruga s radijalnim prorezima poduprta je s dva oslona prstena koji su pričvršćeni razmačnim zaticima na više mjesta po obodu kućišta spojke ([4]). Pritom tanjurasta opruga ima dvostruko djelovanje; osim što djeluje kao opruga, tanjurasta opruga i osloni prsteni tvore dvokraku polugu pri čemu se potrebna sila na potisnom ležaju multiplicira za prijenosni omjer poluge (uobičajene izvedbe spojki imaju prijenosni omjer poluge oko 4 ([3])). Kod spojki sa zavojnim oprugama nužne su zasebne

poluge što komplicira konstrukcijsku izvedbu i uvodi varijacije u krutosti po obodu. U uključenom položaju spojke (Slika 5. – lijevo), tanjurasta opruga je tako izvijena da pritišće potisnu ploču na tarne obloge. Pritiskom na papučicu spojke potisna vilica gurne potisni ležaj prema zamašnjaku motora na jezičke tanjuraste opruge. Tanjurasta opruga se izvije na drugu stranu (efekt dvokrake poluge) i odvoji potisnu ploču od tarnih obloga (tangencijalne lisnate opruge između potisne ploče i kućišta spojke odvajaju potisnu ploču ([4])). Prijenos snage je prekinut i pojavljuje se zračnost između elemenata spojke (Slika 5. – desno).

Kako spojka rotira a sustav za isključivanje spojke miruje, između tanjuraste opruge i hvatišta mehanizma za isključivanje postavljen je aksijalni valjni ležaj koji se uobičajeno naziva uključnim ležajem ([3]). Isključivanje (otvaranje) spojke može se ostvariti djelovanjem normalne sile na tanjurastu oprugu u smjeru motora preko potisnog ležaja (eng. *Push-Type*, Slika 6. a)) ili povlačenjem tanjuraste opruge pomoću povlačnog ležaja (eng. *Pull-Type*, Slika 6. b)). U slučaju povlačnog ležaja, tanjurasta opruga je jednokraka poluga oslonjena svojim vanjskim rubom na kućište spojke preko oslonog prstena, dok su pritom jezički tanjuraste opruge zahvaćeni u utor uključnog ležaja.



Slika 6. Suha tarna spojka s: a) potisnim; b) povlačnim ležajem ([6])

Sa stajališta aksijalnog opterećenja spojke i deformiranja tanjuraste opruge povoljniji je povlačni tip spojke, ali je otežano formiranje povlačnog ležaja koji može biti opterećen vlačnom silom kao i montaža takve spojke ([3]). Također, povlačni tip spojke zahtijeva veću aksijalnu

zračnost između povlačnog ležaja i strane transmisije budući da se ležaj prilikom isključivanja spojke povlači prema strani transmisije. Neovisno o tome isključuje li se spojka potiskivanjem ili povlačenjem uključnog ležaja, konstrukcija suhe tarne spojke izvedena je tako da je opružni elementi prirodno zatvaraju, odnosno spojka je prirodno zatvorena ([3]). Ukoliko ne postoji sila na uključnom ležaju, spojka je zatvorena (uključena) i okretni moment se prenosi s koljenastog vratila motora preko spojke na ulazno vratilo mjenjačke kutije.

3.2. Zamašnjak spojke

Funkcija zamašnjaka je smirivanje oscilacija brzine vrtnje koljenastog vratila uzrokovanih nejednolikim okretnim momentom, te na taj način postizanje mirnijeg hoda motora. Kada je moment motora veći od njegove srednje vrijednosti, brzina vrtnje motora se povećava sve dok se ne iscrpi višak momenta u odnosu na srednju vrijednost. Isto tako, moment motora koji je manji od srednje vrijednosti usporava (koči) koljenasto vratilo sve dok manjak momenta ne dosegne nulu. Pri najvećoj kutnoj brzini rotirajuće mase imaju najveću kinetičku energiju E_{\max} , a pri najmanjoj najmanju energiju E_{\min} . Stoga, kinetička energija zamašnjaka (i svih rotirajućih masa) mijenja se između granica E_{\max} i E_{\min} ([7]). Kada je spojka zatvorena, strana zamašnjaka prema spojki je u dodiru s tarnom pločom čime se ostvaruje tarni par.



Slika 7. Zamašnjak spojke ([8])

Dvomaseni zamašnjak (eng. *Dual Mass Flywheel* - DMF) je vrsta zamašnjaka koja se primjenjuje s ciljem amortizacije torzijskih vibracija generiranih na motoru prema transmisiji i,

posljedično, prema kotačima, a kojima je uzrok takti rad motora (tj. postojanja pulsa razvijene snage samo u jednom od četiri takta motora) ([3]). Prednost dvomasenog zamašnjaka je prigušivanje torzijskih vibracija na svim brzinama vrtnje što povećava udobnost vožnje. Negativne karakteristike uključuju smanjenje ubrzanja vozila zbog povećanja mase, povećani troškovi proizvodnje te potencijalni problemi s prostorom uslijed povećane aksijalne dimenzija zamašnjaka ([3]). U novije vrijeme sve veći broj vozila koristi motore s prednabijanjem koji generiraju visoki okretni moment pri niskim i srednjim brzinama vrtnje. Kako su to uvjeti u kojima se javljaju izražene torzijske vibracije, primjena dvomasenih zamašnjaka je sve veća.



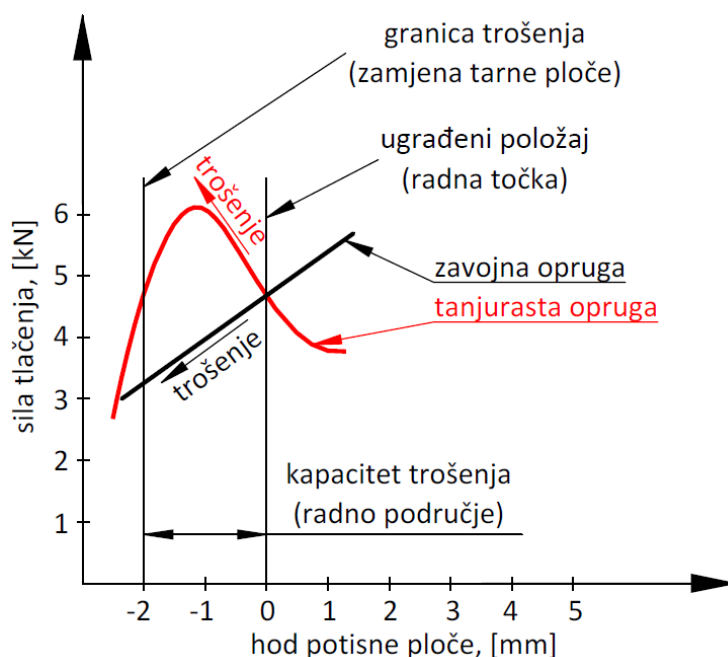
Slika 8. Izvedbe dvomasenog zamašnjaka spojke ([9])

3.3. Potisna ploča spojke

Uloga potisne ploče je ravnomjerno prenošenje potisne sile s tanjuraste opruge na tarnu ploču (tarne obloge) kako bi se ostvario prijenos okretnog momenta s motora na transmisiju. Potisna ploča povezana je s kućištem spojke po obodu preko tangencijalnih lisnatih opruga koje odvajaju potisnu ploču od tarne ploče nakon isključivanja (otvaranja) spojke. Uslijed trenja klizanja dolazi do zagrijavanja tarne i potisne ploče. Povećanjem mase potisne ploče postiže se veći toplinski kapacitet potisne ploče, međutim, za rasterećenje tangencijalnih lisnatih opruga pogodnije je da masa potisne ploče bude što manja. Stoga, prilikom konstruiranja potisne ploče potrebno je odabrati kompromis. Visoko toplinski opterećene potisne ploče najčešće se izvode s orebrenjem na suprotnoj strani, dok se kućište spojke izvodi s otvorima za strujanje zraka.

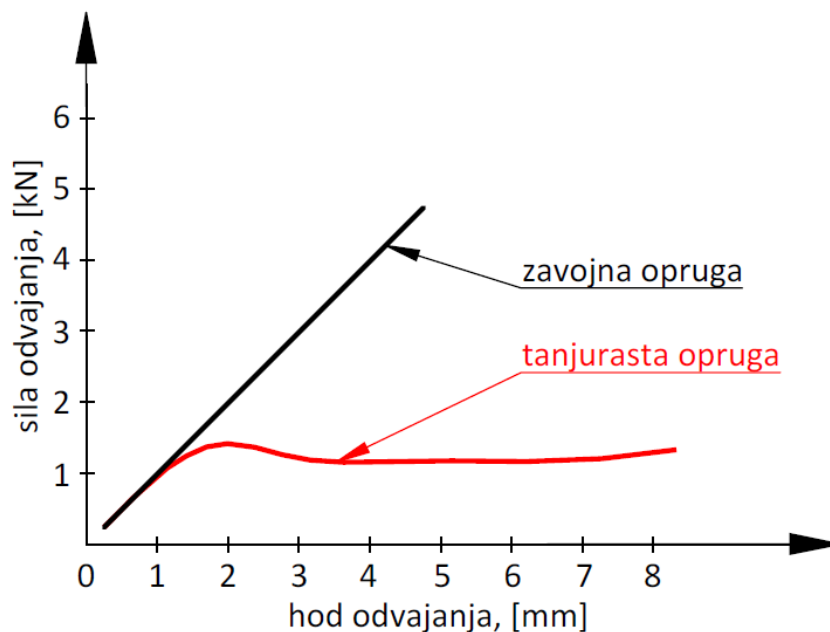
3.4. Tanjurasta opruga spojke

Suhe tarne spojke s tanjurastom oprugom kao elementom za ostvarivanje potrebne tlačne sile karakterizira mala ugradbena debljina i relativno mala težina, jednostavna ugradnja i održavanje te rad spojke na velikom broju okretaja zbog zanemarivog utjecaja deformacije tanjuraste opruge uslijed centrifugalnog opterećenja. Tanjurasta opruga ima radijalne proreze, a poduprta je s dva oslona prstena koji su pričvršćeni zaticima po obodu kućišta spojke. Kako je ranije spomenuto, tanjurasta opruga i osloni prsteni tvore dvokraku polugu najčešće prijenosnog omjera 4 ([3]), pri čemu je u uključenom položaju spojke tanjurasta opruga izvijena tako da pritišće potisnu ploču na tarne obloge. U isključenom položaju spojke, tanjurasta opruga izvijena je na drugu stranu te uslijed prestanka djelovanja tlačne sile tanjuraste opruge, tangencijalne lisnate opruge odvajaju potisnu ploču od tarnih obloga (tarne ploče).



Slika 9. Ovisnost potisne (tlačne) sile o hodu potisne ploče

Na Slici 9. prikazan je dijagram ovisnosti potisne (tlačne) sile o hodu potisne ploče, odnosno trošenju tarnih obloga. Prema dijagramu je vidljivo kako kod spojki sa zavojnim oprugama potisna sila ploče linearno opada s trošenjem tarnih obloga u radu budući da dolazi do produljenja zavojnih opruga. Nasuprot tome, kod spojki s tanjurastom oprugom potisna sila prvo progresivno raste, da bi u drugom dijelu regresivno padala. Na graničnom istrošenju tarnih obloga, potisna sila gotovo je jednakog iznosa kao i kod novih, nepotrošenih obloga. U praksi to znači da trošenjem tarnih obloga neće doći do proklizavanja spojke uslijed pada potisne sile.



Slika 10. Ovisnost sile odvajanja o hodu potisnog ležaja ([4])

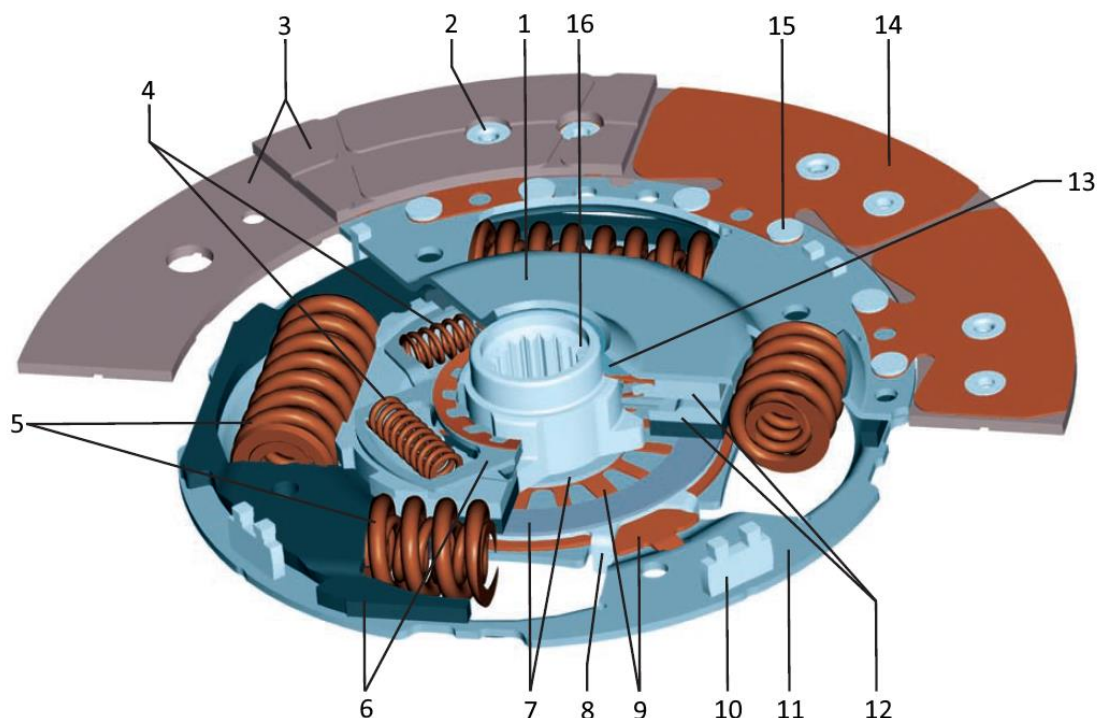
Na Slici 10. prikazan je dijagram ovisnosti sile odvajanja o hodu potisnog ležaja (odvajanja). Kod spojki sa zavojnim oprugama sila odvajanja raste linearno, odnosno što je papučica spojke više pritisnuta to je teža (“tvrđa“). S druge strane, kod spojki s tanjurastom oprugom, sila odvajanja u početku raste linearno kao i kod spojki sa zavojnim oprugama. Daljnjim spuštanjem papučice spojke, nakon izvijanja tanjuraste opruge, sila odvajanja ostaje približno konstantna i znatno manjeg iznosa nego kod zavojnih opruga. Ukoliko se radi o konvencionalnoj ručnoj transmisiji gdje vozač upravlja radom spojke, u praksi to znači da će se vozač znatno manje umoriti u uvjetima gradske vožnje (“stani-kreni“) gdje se traži često uključivanje i isključivanje spojke.

Bolja opružna karakteristika tanjuraste opruge, uz isto tako manju masu, veću preciznost izrade, jednostavniju instalaciju, bolju toplinsku otpornost i boljeg hlađenja zbog efekta ventilacije (radijalni prerezi tanjuraste opruge omogućavaju strujanje zraka), daju znatnu prednost primjeni tanjurastim oprugama nad zavojnim oprugama u automobilskim spojka.

3.5. Tarna ploča spojke

Tarna ploča je ključna komponenta spojke o kojoj ovisi radni vijek same spojke. Zadaci tarne ploče su omogućiti prijenos okretnog momenta sa zamašnjaka motora na ulazno vratilo transmisije uz istovremeno mekano uključivanje bez trzaja i prigušivanje torzijskih vibracija koje nastaju kao posljedica promjenjivog zakretnog momenta pojedinih cilindara. Osnovni

dijelovi tarne ploče (Slika 11.) su ozubljena glavčina s obodom, prigušivač torzijskih vibracija, nosač tarnih obloga, elastična podloga i tarne obloge.



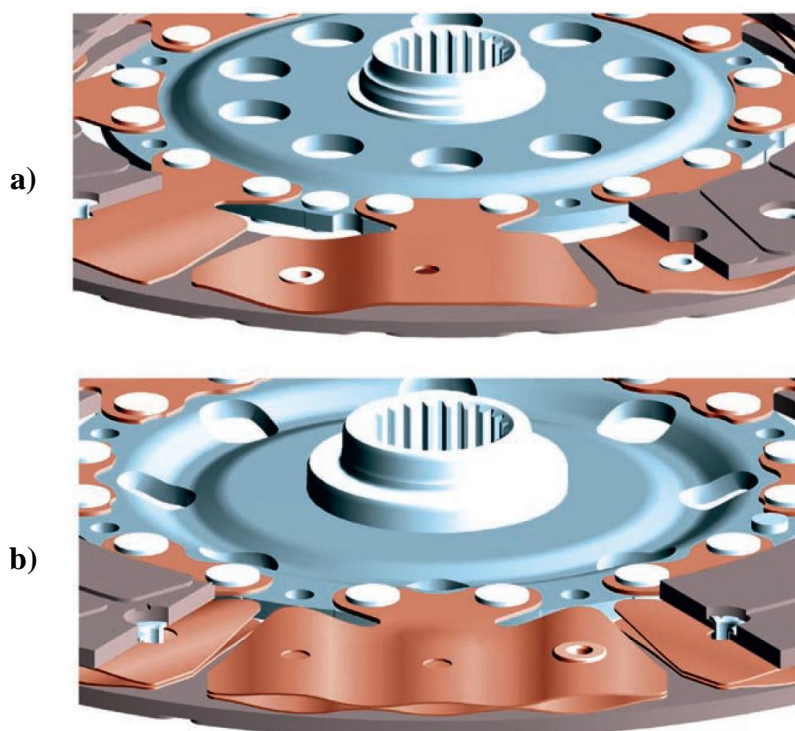
1-vanjski disk	5-kompresijske opruge (tvrde)	9-tanjuraste opruge	13-centrirni konus
2-zakovica tarne obloge	6-tarna prirubnica	10-distancer	14-valovita opruga
3-tarna obloga	7-tarni prsteni	11-spojni disk	15-zakovica valovite opruge
4-kompresijske opruge (mekane)	8-nosivi prsten	12-sklop prigušnika (za meki dio karakteristike)	16-glavčina

Slika 11. Tarna ploča suhe spojke ([1])

Zadatak tarnih obloga, odnosno materijala od kojeg su izrađene tarne obloge, je osigurati koeficijent trenja koji je potreban za prijenos okretnog momenta motora. Što je koeficijent trenja tarnih obloga veći, to se može prenijeti veći okretni moment sa zamašnjaka motora na ulazno vratilo transmisije, a spojke pri tom mogu biti manjih dimenzija i mase. Materijali iz kojih se izrađuju tarne obloge moraju biti otporni na različite mehanizme trošenja, postojani pri visokim temperaturama i moraju imati što veći koeficijent trenja koji je ravnomjieran u što širem temperaturnom području.

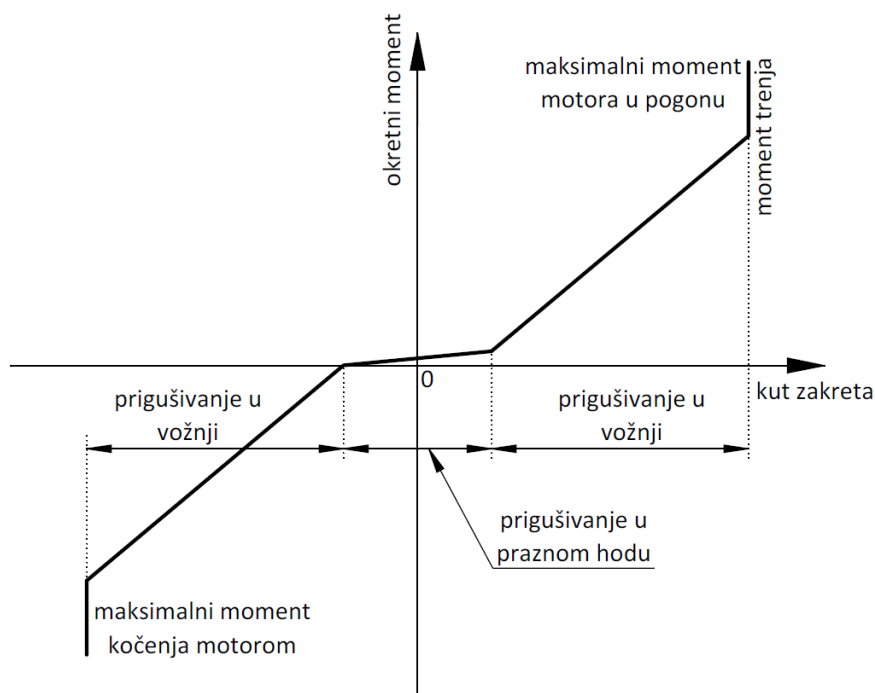
Jednostavna tarne ploča nema niti prigušivač torzijskih vibracija, niti ima elastične elemente između tarnih obloga i nosača (valovite opruge). S druge strane, složene tarne ploče uz prigušivač torzijskih vibracija imaju i elastičnu podlogu na kojoj se nalaze tarne obloge. Zadatak elastične podloge (Slika 12.) je ostvarivanje mekog pokretanja vozila bez trzaja; pri

pokretanju vozila tarne obloge meko hvataju i, u uključenom položaju spojke, cijelom površinom ravnomjerno naliježu na zamašnjak motora i potisnu ploču ([4]).



Slika 12. Elastični elementi između tarnih obloga: a) jednostruka; b) dvostruka valovita opruga ([1])

Prigušivanje torzijskih vibracija produljuje radni vijek motora i mjenjača, a izvedeno je zavojnim oprugama različitih krutosti i tarnim prigušnikom. Prigušivač torzijskih vibracija izveden je na način da je vanjski disk s unutarnjim diskom koji je vezan s glavčinom spojen preko seta cirkularno postavljenih zavojnih opruga i tarnih elemenata između vanjskog i unutarnjeg diska ([3]). Male tanjuraste opruge između unutarnjeg i vanjskog diska osiguravaju normalnu silu koja generira trenje na tarnim elementima, pri čemu se energija vibracija pretvara u toplinu. Primjena višestrukih opruga različitih krutosti u serijskom spoju daje ukupno nelinearnu karakteristiku koja je takva da u uvjetima malog momenta dopušta značajni hod motora uz mali hod ulaznog vratila transmisije (mala krutost opruge), pri čemu se sprječava pojava tzv. “*gear rattle*“ efekta koji je karakterističan za uvjete praznog hoda (malog momenta), a nastaje zbog zračnosti između zubi u zahvatu zupčaničkog para u mjenjačkoj kutiji. Kod značajnijih momenata, krutost opruge je također značajnija te je ponašanje pogona slično onome bez prigušivača torzijskih vibracija. Ovisno o veličini torzijskih vibracija koje se žele prigušiti, moguće je primijeniti različite kombinacije tarnih ploča i dvomasenih zamašnjaka.



Slika 13. Krivulja prigušivanja torzijskih vibracija

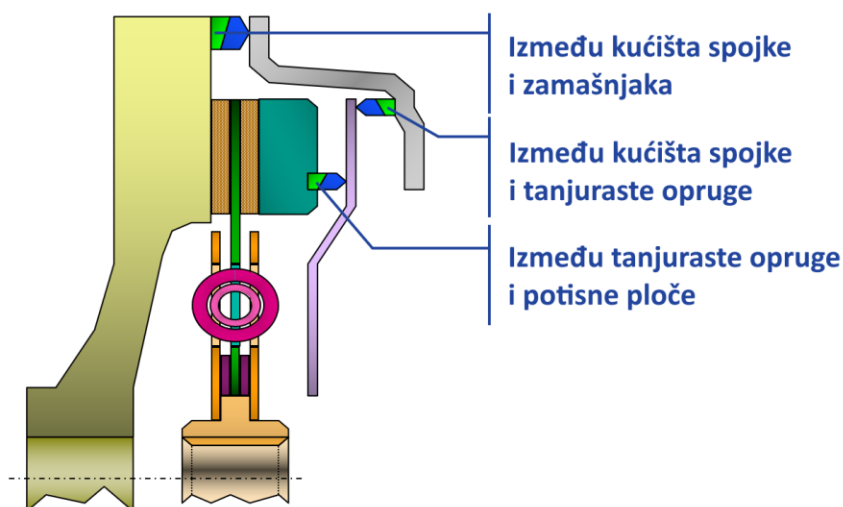
Primjenom različitih zavojnih opruga, materijala i dimenzija tarnih prstena te tanjurastih opruga prigušivača (generiranje normalne sile), mogu se po volji mijenjati karakteristike sustava za prigušivanje torzijskih vibracija.

3.6. Mehanizam za kompenzaciju trošenja tarne ploče

Trošenje tarnih ploča ima značajan utjecaj na dinamiku spojke, a očituje se kao smanjenje debljine tarne ploče. Kod konvencionalnih automobilskih spojki s jednom tarnom pločom posljedica trošenja tarne ploče je promjena (pomicanje) početne pozicije potisne ploče prema strani zamašnjaka. Potrebni hod potisnog (uključnog) ležaja se povećava te bi umjesto početnih 1,5 mm kao kod nove tarne ploče porastao na 3,5 mm, odnosno hod potisnog ležaja povećao bi se za istrošenu debljinu tarne ploče [3]. Zbog efekta dvokrake poluge, na strani potisnog ležaja hod bi se povećao za umnožak povećanja hoda potisne ploče i prijenosnog omjera poluge tanjuraste opruge koji tipično iznosi 4. Aktuatorski mehanizam, bilo da je pogonjen papučicom spojke ili servomotorom, može samo manjim dijelom kompenzirati trošenje tarne ploče povećanjem hoda uključnog ležaja uslijed prostornih ograničenja.

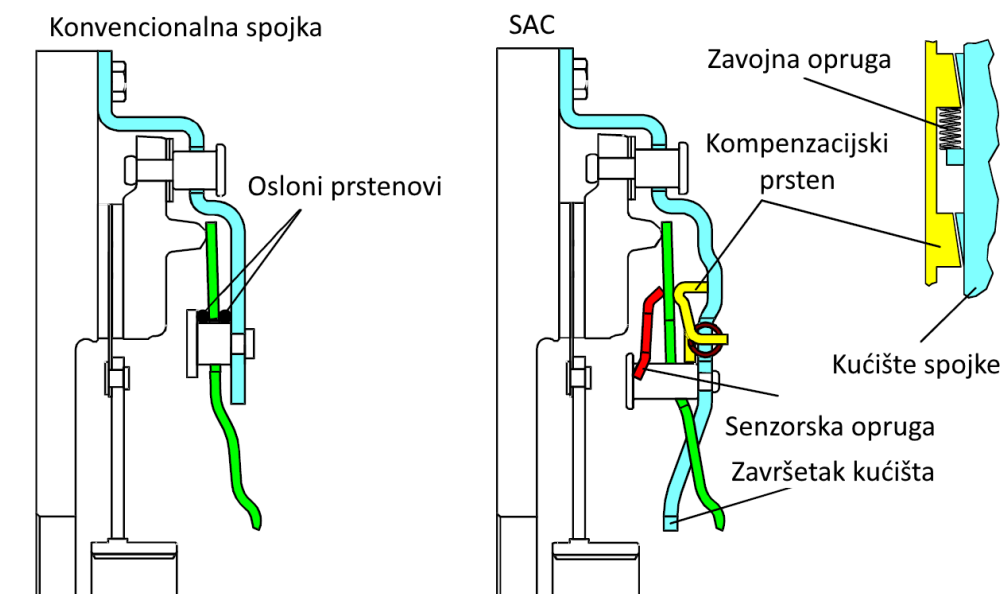
Kako bi se produljio životni vijek spojke, pojedini modeli suhих spojki imaju ugrađene mehanizme za kompenzaciju trošenja tarne ploče. Ovakve spojke imaju složeniju strukturu, no njihov princip rada je isti kao i kod suhих spojki bez mehanizma za kompenzaciju trošenja.

Različiti proizvođači spojki koriste različite strukture mehanizama kojima je osnovna ideja općenito ista, ali se razlikuju ovisno o poziciji mehanizma u sklopu spojke (Slika 14.).



Slika 14. Moguće pozicije mehanizma za kompenzaciju trošenja tarne ploče ([6])

Mehanizam za kompenzaciju trošenja treba promijeniti početnu aksijalnu poziciju oslonaca poluge tanjuraste opruge (bilo na zamašnjaku, kućištu spojke ili na potisnoj ploči) kako bi prednaprezanje i hod tanjuraste opruge ostali (približno) jednaki onima kod nove spojke. Drugim riječima, mehanizmi za kompenzaciju trošenja “podebljavaju” aksijalnu dimenziju drugih komponenti spojke kako bi nadoknadili smanjenje debljine tarne ploče ([3]).

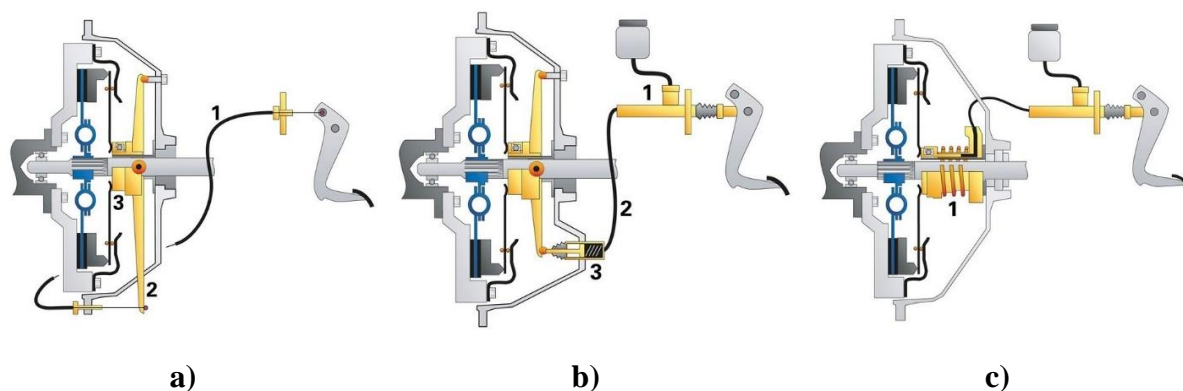


Slika 15. Usporedba konvencionalne spojke (lijevo) i spojke s mehanizmom za kompenzaciju trošenja (SAC) (desno) ([10])

Na Slici 15. prikazana je usporedba konvencionalne spojke i spojke s mehanizmom za kompenzaciju trošenja proizvođača LuK, koja nosi naziv SAC (eng. *Self-Adjusting Clutch*). Za razliku od konvencionalnih spojki kod kojih se s povećanjem trošenja tarne ploče (tarnih obloga) povećava potisna sila, spojke sa SAC mehanizmom kompenziraju takvo trošenje na način da glavna tanjurasta opruga nije trajno pričvršćena razmačnim zaticima na kućište spojke, već je prislonjena na kompenzacijski prsten. Aksijalni položaj glavne tanjuraste opruge mijenja se sa povećanjem trošenja te potisna sila ostaje približno jednaka kao i kod novih tarnih ploča.

3.7. Aktuatorski mehanizam spojke

Isključivanje, odnosno uključivanje, spojke vrši se djelovanjem uključnog ležaja na tanjurastu oprugu spojke, pri čemu aktuatorski mehanizam treba prenijeti silu uključivanja od izvora snage za uključivanje/isključivanje spojke do uključnog ležaja ([3]). U slučaju konvencionalnih ručnih transmisija (MT) izvor snage je vozač budući da stopalom pritišće papučicu spojke pri čemu neposredno djeluje na uključni ležaj, dok je kod ručnih transmisija s elektronički upravljanim spojkama (e-clutch), automatiziranih ručnih transmisija (AMT) i transmisija s dvostrukim spojkama (DCT) izvor snage servoupravljeni aktuator. Ukoliko je izvor snage sam vozač (konvencionalne ručne transmisije), prijenos snage sa papučice spojke na uključni ležaj uobičajeno se vrši jednim od tri mehanizma ([11]): čeličnim užetom i polugom (Slika 16. a)), hidrauličkim prijenosom i polugom (Slika 16. b)) ili hidrauličkim prijenosom s neposrednim radnim cilindrom (Slika 16. c)).



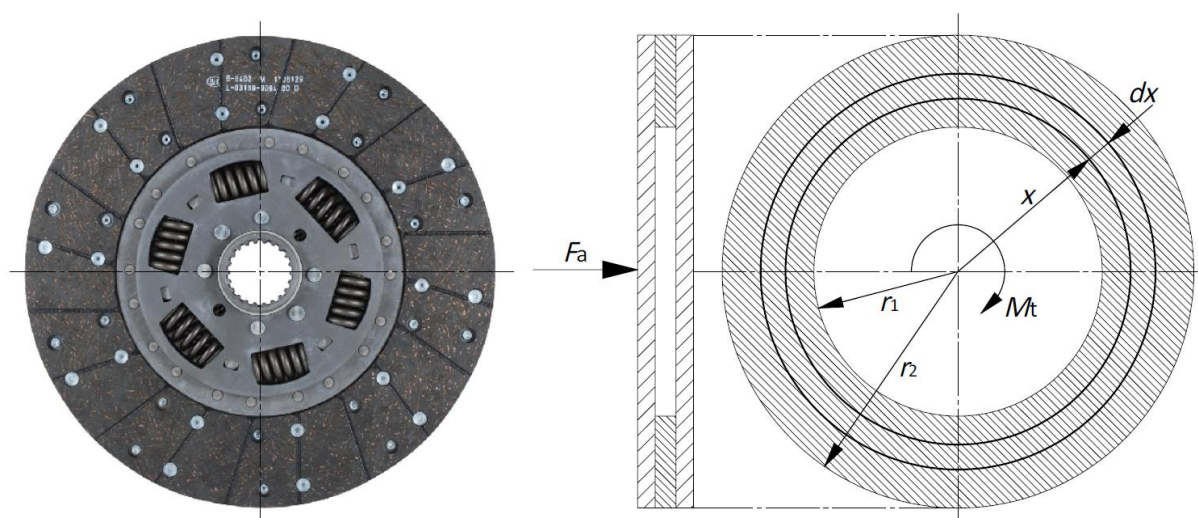
Slika 16. Vrste sustava za isključivanje spojke konvencionalne ručne transmisije ([11])

Kod izvedbe aktuatorskog mehanizma s čeličnim užetom i polugom (Slika 16. a)), prijenos snage s papučice spojke ostvaren je čisto mehanički preko čeličnog užeta do poluge koja potom djeluje na uključni ležaj. U sustavima opremljenim s glavnim/radnim cilindrom

(eng. *Master/Slave cylinder*), prijenos snage ostvaren je hidraulički pri čemu je nositelj energije tlak radnog fluida (Slika 16. b)). Pritiskom papučice spojke djeluje se na glavni hidraulički cilindar koji je smješten neposredno ispod papučice spojke. U zatvorenom hidrauličkom sustavu, glavni cilindar stvara povećanje tlaka radnog fluida koji se preko crijeva prenosi do radnog cilindra. Klip radnog cilindra pomiče polugu koja potom djeluje na uključni ležaj. Kod izvedbe sustava s koncentrično postavljenim radnim cilindrom (eng. *Concentric Slave Cylinder – CSC*), radni cilindar je izravno pričvršćen na strani transmisije (Slika 16. c)). Tlak radnog fluida generiran glavnim cilindrom preko papučice spojke prenosi se preko crijeva do radnog cilindra. Klip radnog cilindra klizi po vodećoj čahuri te potiskuje uključni ležaj i tlačni prsten na tanjurastu oprugu ([4]). Budući da pri uključenoj spojci nema tlaka radnog fluida, a da bi se spriječio nastanak šuma uslijed razlike u brzini vrtnje tanjuraste opruge i uključnog ležaja, naponska opruga radnog cilindra potiskuje uključni ležaj, odnosno tlačni prsten, određenom malom silom na tanjurastu oprugu.

3.8. Proračun okretnog momenta spojke

Svaka spojka definirana je veličinom okretnog momenta kojeg može prenijeti sa zamašnjaka motora na ulazno vratilo transmisije. Kako je ranije rečeno, veličina okretnog momenta kojeg spojka može prenijeti ovisi o normalnoj (tlačnoj) sili opruga, koeficijentu trenja između tarnih obloga i potisne ploče, odnosno zamašnjaka, srednjem radijusu tarnih obloga (površini tarne ploče) i broju tarnih ploča. Kako bi se odredio iznos okretnog momenta kojeg spojka može prenijeti, najprije je potrebno pogledati geometriju tarne ploče (Slika 17.).



Slika 17. Tarna ploča s geometrijskim oznakama

Unutar površine tarnih obloga definirano je elementarno područje dx , na udaljenosti x od centra ploče. Oznake prema Slici 17. su sljedeće:

- F_a [N] – normalna sila koja djeluje na potisnu ploču;
- T [Nmm] – okretni moment kojeg spojka može prenijeti;
- r_1 [mm] – unutarnji radijus tarne površine;
- r_2 [mm] – vanjski radijus tarne površine.

Površinski pritisak koji djeluje na površinu tarnih obloga jednak je:

$$p = \frac{F_a}{A}. \quad (1)$$

Ako se pretpostavi da je površina zakovica kojima su tarne obloge pričvršćene na vanjski disk zanemariva, površina tarnih obloga jednaka je:

$$A = A_2 - A_1 = \pi(r_2^2 - r_1^2). \quad (2)$$

Uvrštavanjem izraza (2) u izraz (1) slijedi površinski pritisak:

$$p = \frac{F_a}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (3)$$

Elementarna površina određuje se prema izrazu:

$$dA = 2\pi x dx. \quad (4)$$

Elementarna normalna sila koja djeluje na elementarnoj površini dA određuje se prema izrazu:

$$dN = p dA. \quad (5)$$

Uvrštavanjem izraza (3) i (4) u izraz (5) slijedi elementarna normalna sila:

$$dN = \frac{2F_a x dx}{r_2^2 - r_1^2}. \quad (6)$$

Elementarna sila trenja dF određuje se prema izrazu:

$$dF = \mu dN, \quad (7)$$

gdje je μ koeficijent trenja tarnih obloga.

Uvrštavanjem izraza (6) u izraz (7) slijedi elementarna sila trenja:

$$dF = \frac{2\mu F_a x dx}{r_2^2 - r_1^2}. \quad (8)$$

Elementarni okretni moment dT određuje se prema izrazu:

$$dT = x dF. \quad (9)$$

Uvrštavanjem izraza (8) u izraz (9) slijedi elementarni okretni moment:

$$dT = \frac{2\mu F_a x^2 dx}{r_2^2 - r_1^2}. \quad (10)$$

Integriranjem izraza (10) od unutarnjeg do vanjskog radijusa tarne površine slijedi okretni moment kojeg može prenijeti spojka s jednom tarnom pločom:

$$T = \int_{r_1}^{r_2} dT = \frac{2\mu F_a}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} x^2 dx = \frac{2}{3} \mu \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} F_a. \quad (11)$$

Ukoliko spojka ima više – z tarnih ploča, tada okretni moment kojeg spojka može prenijeti iznosi:

$$T = z \frac{2}{3} \mu \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} F_a. \quad (12)$$

Iz izraza (12) može se vidjeti kako je okretni moment kojeg spojka može prenijeti proporcionalan broju tarnih ploča. Naime, kako bi se mogao prenijeti veći okretni moment potrebno je povećati silu opruge, koeficijent trenja, broj tarnih obloga (ploča) ili radijus tarnih obloga (lamele). Povećanjem sile opruge povećava se opterećenje aksijalnog ležaja koljenastog vratila, a u slučaju uključivanja spojke bez hidrauličkog sustava povećava se sila na papučici spojke koju vozač treba savladati. Koeficijent trenja tarnog materijala ne može se značajno povećati, osim uporabom tarnih ploča od posebnih materijala (primjerice keramičke tarne obloge) na račun smanjenja udobnosti vožnje. Kako svaka dodatna tarne ploča povećava hod potisne ploče, a time i hod papučice spojke, ukoliko je potrebno, najčešće se povećava radijus tarne ploče budući da se okretni moment povećava s trećom potencijom radijusa.

4. TARNI MATERIJALI SUHIH SPOJKI

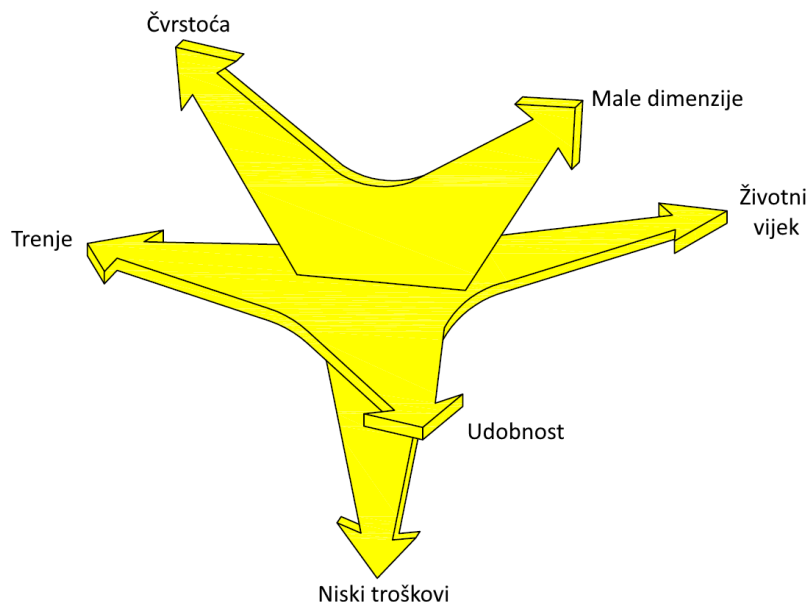
Tarni materijali suhih spojki, ujedno cjenovno najskuplji dio same spojke, imaju značajan utjecaj na rad spojke budući da njihov sastav i struktura značajno utječu na operativne karakteristike rada spojke ([12]). Tarne obloge se za tarnu ploču spojke mogu vezati obostrano zakovicama ili ljepilom. Većina tarnih obloga u suhim spojkama izrađena je s nizom radijalnih kanala (proreza) koji omogućavaju izbacivanje ostataka tarnog materijala nastalog uslijed trošenja i poboljšavaju hlađenje tarnih obloga.

4.1. Zahtjevi tarnih materijala

Posljednjih godina sve veći zahtjevi postavljaju se na tarne materijale spojki kako bi se postigle što bolje performanse vozila uz što niže proizvodne troškove. Klasičan znanstveni pristup razvoju tarnih materijala zamijenjen je višebrojnim ispitivanjima (metoda pokušaja i pogrešaka) na ispitnim postavima (eng. *testbeds*) u laboratorijima, ali i u stvarnim uvjetima vožnje na vozilima, kako bi se predvidjelo stvarno ponašanje tarnih materijala u eksploataciji. Takav pristup razvoju tarnih materijala omogućava inženjerima obuhvaćanje svih faktora koji se javljaju tijekom eksploatacije te koji utječu na svojstva i ponašanje tarnih materijala. Također, ispitivanja na ispitnim postavima omogućuju validaciju matematičkih modela prethodno simuliranih na računalu. U cilju postizanja zadovoljavajućih rezultata tijekom eksploatacije, tarni materijal treba zadovoljiti sljedeće karakteristike:

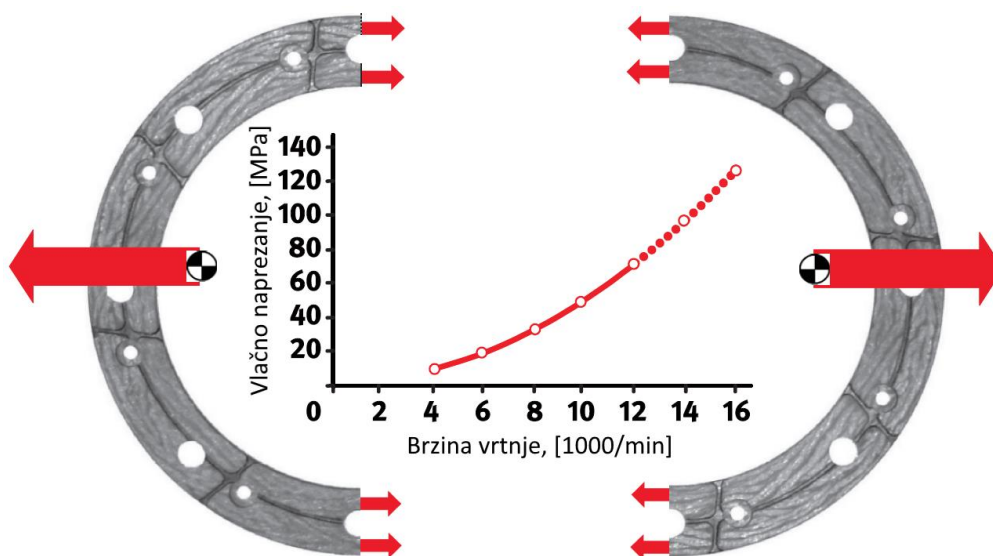
- visok i postojan koeficijent trenja;
- otpornost prema trošenju;
- udobnost pri uključivanju;
- mehanička otpornost;
- mala rotacijska masa;
- niska cijena;
- termička postojanost (otpornost),
- dobra toplinska provodljivost,
- dug životni vijek;
- jednostavna mogućnost proizvodnje;
- ekološka prihvatljivost.

Često pojedina karakteristika (zahtjev) tarnog materijala spojke negativno utječe na drugu, stoga je potrebno pronaći određeni kompromis kako bi se izabrao što bolji tarni materijal (Slika 18.).



Slika 18. Konfliktnost zahtjeva u razvoju tarnih materijala ([13])

U praksi, tarne obloge su izložene velikim centrifugalnim silama uslijed visokih brzina vrtnje motora. Kako bi spojka zadovoljila sve uvjete kojima je izložena tijekom eksploatacije, tarne obloge moraju imati visok strukturalni integritet. Povremena izloženost visokim temperaturama može uzrokovati trajno opadanje čvrstoće (integriteta) tarnih obloga ([13]).



Slika 19. Utjecaj brzine vrtnje na vlačno naprezanje tarnih obloga ([13])

4.2. Sastav tarnih materijala

Sastav materijala tarnih obloga čini veći broj zasebnih komponenti. Većina komponenti koje tvore tarni materijal mogu se uvrstiti u jednu ili više sljedećih kategorija ([2]):

- grafitne čestice;
- sinterirani/keramički metali;
- vlakna;
- veziva;
- punila;
- modifikatori trenja.

Tehnologija proizvodnje često određuje koje komponente će se koristiti za izradu tarnih obloga, te jednako tako ograničava one koje se ne mogu koristiti. Primjerice, ista komponenta u različitim tehnologijama proizvodnje imati će za posljedicu tarni materijal različitih svojstava.

4.2.1. Grafitne čestice

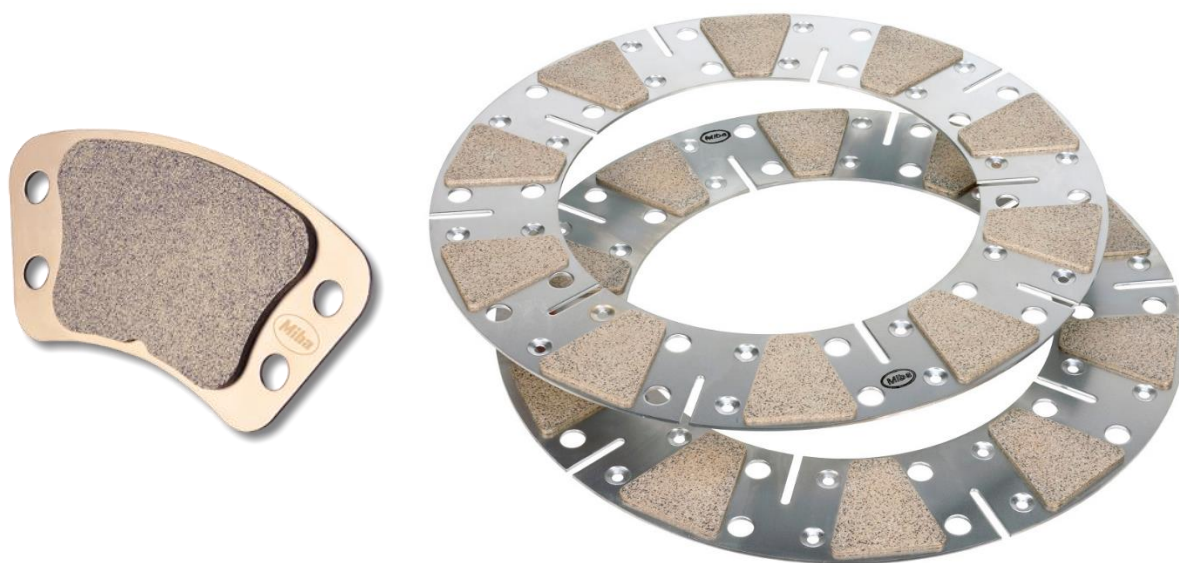
Granulirani grafit (Slika 20.) potrebno je razmatrati kao zasebnu komponentu zbog njegove široke primjene i visokog udjela u sastavu tarnih materijala ([2]). Grafitne čestice se jednostavno obrađuju, cjenovno su prihvatljive, nisu abrazivne prema dodirnim površinama i održavaju visok koeficijent trenja pri povišenim temperaturama. U sastavu s dovoljno velikom količinom vlakana, dobiveni tarni materijal je gotovo univerzalno prihvaćen zbog povoljnih svojstava. Grafitne čestice se također koriste u malom udjelu kod negrafitnih tarnih materijala kao modifikatori trenja zamjenjujući molibden disulfid ([2]).



Slika 20. Granulirani grafit ([14])

4.2.2. Sinterirani/keramički metali

Metalni prahovi zagrijani do točke fuzije čestica poznati su u industriji kao sinterirani metali i keramički materijali ([2]). Primjenjuju se zbog visoke energije apsorpiranja i toplinske otpornosti. Takvi materijali obično sadrže bakar, željezo, aluminij, kositar, olovo i ostale tipove prahova i punila. Međutim, zbog visokog omjera statičkog i dinamičkog trenja (μ_s/μ_d) koji za posljedicu ima grubo (iznenadno) uključivanje spojke, te zbog visoke abrazije prema dodirnim površinama, visoke specifične gustoće i cijene u usporedbi s organskim materijalima, sinterirani metali se uglavnom ne koriste za tarne obloge automobilskih spojki ([2]). Tarne obloge izrađene od keramičkih materijala su vrlo otporne na trošenje te mogu podnijeti vrlo visoke temperature, čak i do 500°C, a da pritom ne dođe do opadanja koeficijenta trenja (eng. *fading*). Stoga se keramičke tarne obloge koriste za spojke trkaćih automobila kod kojih učestalo isključivanje/uključivanje spojke uzrokuje visoke temperature, dok udobnost nije kriterij. Tarne obloge izrađene od ovih materijala najčešće su trapezoidnog oblika (Slika 21), a uglavnom su direktno sinterirane na tarnoj ploči ili su pričvršćene zakovicama za tarnu ploču spojke.



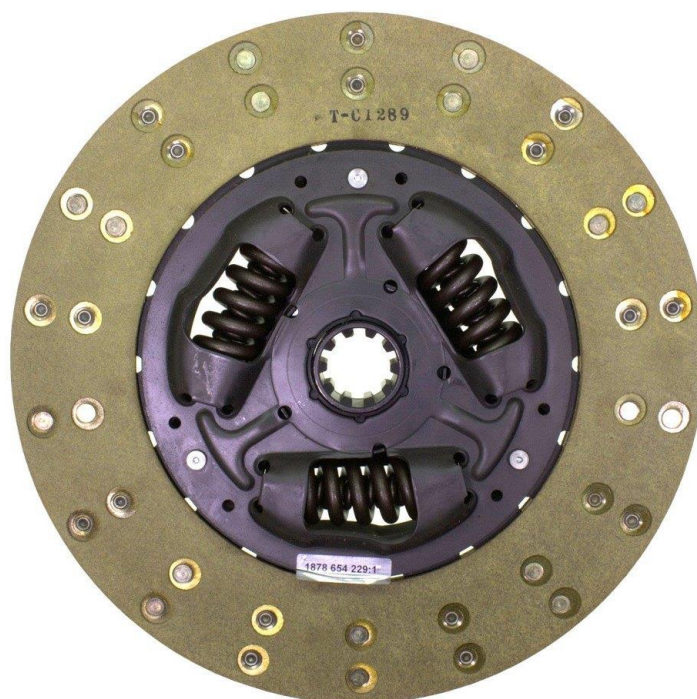
Slika 21. Sinterirane tarne obloge za spojke trkaćih automobila ([15])

4.2.3. Vlakna

Kod materijala tarnih obloga ojačanja su uglavnom vlakna (eng. *fibers*). Najčešće primjenjivana vlakna za ojačanje su ([2]): stakloplastika, akrilna vlakna, rajonska vlakna, aramidna vlakna, para-aramidna vlakna (komercijalna imena Kevlar® i Twaron®), mineralna vlakna, pamučna vlakna, keramička i ugljična vlakna. U prošlosti, azbest je bio široko

primjenjivano vlakno za tarne obloge spojki i kočnica. Međutim, njegova kancerogena svojstva zabranila su mu daljnju upotrebu, iako i dalje velik broj starih vozila sadrži azbest kao sastavnu komponentu tarnih obloga.

Povoljne karakteristike vlakana uključuju nisku cijenu, visoku čvrstoću, toplinsku otpornost, fleksibilnost i sposobnost što boljeg kemijskog i/ili mehaničkog prijanjanja (vezanja) uz smolu ili gumu ([2]). Para-aramidna vlakna (Slika 22.) se zbog vrlo visoke vlačne i smične čvrstoće sve više primjenjuju unatoč visokoj cijeni, lošoj kemijskoj adheziji s punilima i poteškoćama pri proizvodnji. Općenito, vlakna povećavaju vlačnu čvrstoću tarnom materijalu i poboljšavaju smičnu otpornost djelujući protiv mikroskopskih neravnina dodirnih površina. To rezultira visokim koeficijentom dinamičkog trenja i niskim trošenjem ([2]).



Slika 22. Tarna ploča s oblogama od para-aramidnih vlakana - Kevlar® ([16])

Usmjerenost vlakana u ravnini i smjeru djelovanja sile trenja u potpunosti iskorištava svojstva vlakana. Upravo u tom smjeru vlačna i smična čvrstoća vlakana djeluju na usporavanje relativnog gibanja između dodirnih površina (eng. *slip*) i ostvaruju koeficijent trenja. Kada su vlakna usmjerena poprečno u odnosu na djelovanje sile trenja, tada sila trenja djeluje protiv prijanjanja vlakana i matrice umjesto na vlačnu i smičnu čvrstoću vlakana. Kako je čvrstoća matrice manja nego vlačna i smična čvrstoća vlakana, usporavanje relativnog gibanja između

dodirnih površina je manje što za posljedicu ima niži koeficijent trenja tarnog materijala. Usmjereni (izotropni) vlakna u usporedbi s nasumičnim (anizotropnim) vlaknima daju najbolja mehanička svojstva tarne obloge u orijentiranom smjeru ([2]).



Slika 23. Tarna obloga sa staklenim vlaknima ([17])

Budući da centrifugalna sila koja opterećuje tarne obloge raste s kvadratom brzine vrtnje, visoka vlačna čvrstoća vlakana i njihova orijentacija u smjeru djelovanja sile trenja poboljšavaju strukturalni integritet tarnih obloga pri povišenim brzinama vrtnje (eng. *Centrifugal Burst Strength* - “*hoop strength*“). Vlakna orijentirana u ravnini djelovanja sile trenja mogu poboljšati otpornost prema trošenju, dok metalna vlakna orijentirana okomito u odnosu na ravninu djelovanja sile trenja imaju tendenciju odvođenja topline s tarnih obloga ([2]). Nasumična vlakna pokazuju jednoličnija, ali lošija tarna svojstva za razliku od usmjerenih vlakana. Kako provrta za zakovice u tarnim oblogama nepovoljno utječu na integritet tarne obloge, pravilna usmjerenost i vrsta vlakana mogu smanjiti utjecaj zarezno djelovanja.

4.2.4. Veziva

Veziva (eng. *binders*) su oni materijali koji povezuju vlakna i ostale čestice (komponente) u matricu kako bi se postigla kompozitna struktura. U osnovni, ono što se traži

od veziva (smola) je toplinska otpornost (postojanost), cjenovna prihvatljivost, jednostavna proizvodnja i adhezijska kompatibilnost s ostalim komponentama ([2]). Svojstva veziva indirektno utječu na svojstva tarnih materijala, odnosno na koeficijent trenja i stupanj trošenja (eng. *wear rate*). Najčešća veziva su fenolna ili modificirana fenolna smola, stiren-butadien i smjese od nitrilne gume. Gumene smjese zahtijevaju sredstva za stvrdnjavanje (primjerice sumpor), ubrzivače, antioksidanse i stabilizatore. Iako su fenolne smole postale općeprihvaćene u materijalima tarnih obloga, gumom modificirani fenoli, epoksiji, silikoni, fluoropolimeri, elastomeri i poliamidi se sve više upotrebljavaju budući da mijenjaju svojstva tarnih materijala. Tako primjerice, gumeni modifikatori povećavaju koeficijent trenja pri niskim temperaturama na cijenu toplinske otpornosti pri visokim temperaturama, a fluoropolimeri (npr. Teflon®) mijenjaju elastomere zbog povećanja toplinske otpornosti na cijenu koeficijenta trenja na svim energijskim razinama ([2]).

4.2.5. *Punila*

Punila (eng. *fillers*) se općenito odnose na čestice koje dodaju cjenovno prihvatljiv volumen tarnom materijalu. Punila mogu sadržavati različite materijale kao što su glina i dijatomejska zemlja, kao i čađu. Drvene čestice, željezni oksidi i ljuske orašastih plodova također se upotrebljavaju kao punila ([2]). Udio punila u tarnom materijalu ne bi trebao biti veći od 20%, već bi udio vlakana i veziva trebao biti što veći kako bi kompenzirao manju količinu punila te ujedno poboljšao ukupna svojstva tarnog materija.

4.2.6. *Modifikatori trenja*

Lubrikatori (eng. *lubricators*) su spojevi koji se dodaju u sastav tarnog materijala kako bi promijenili utjecaj ostalih komponenata. Tipični lubrikatori su: grafit, Teflon®, molibden disulfid, antimon trisulfid i olovni sulfid ([2]). Primjerice, lubrikatori mogu promijeniti odnos između statičkog i dinamičkog koeficijenta trenja (μ_s/μ_d) ([2]), ili mogu utjecati na abrazivno djelovanje između površina u dodiru i time smanjiti trošenje.

Pojačivači trenja (eng. *friction enhancers*) također spadaju u skupinu modifikatora trenja, a sastoje se od različitih materijala. Iako najveći utjecaj na tarna svojstva materijala imaju vlakna i veziva (smole) u organskom sastavu, dodatkom čestica barita i kianita, spojeva antimona, metalnih oksida, metalnih žica i čestica, keramičkih čestica, brašna od oraha i orašastih plodova, talka, olova i kombinacije navedenih, moguće je povoljno utjecati na tarna svojstva materijala ([2]).

4.3. Tehnologija proizvodnje tarnih obloga

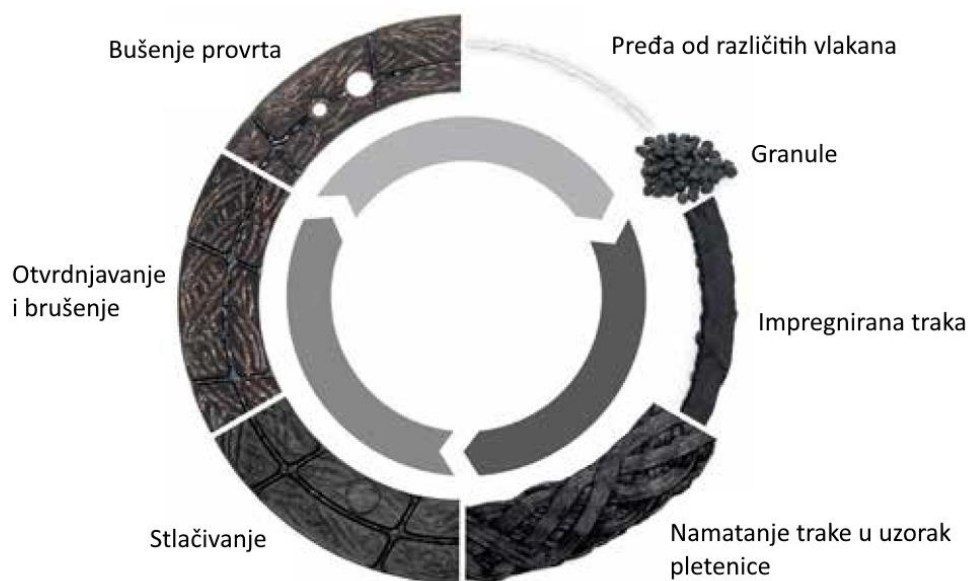
Tarne obloge uobičajeno se proizvode kalupljenjem ili tkanjem i namatanjem.

4.3.1. Kalupljenje

Uobičajena metoda proizvodnje tarnih obloga je kalupljenje (eng. *molding*). Materijali (komponente) su međusobno pomiješani i stavljeni u šupljinu kalupa. Klip zatim tlači smjesu u prstenasti (najčešće) oblik tarne obloge. Pri tlačenju smjese, vlakna se orijentiraju u smjeru toka smjese kroz kalup. Različita mehanička svojstva tarnih obloga postižu se ovisno o tome struji li smjesa oko svornjaka koji formiraju provrt za zakovice ili se tarne obloga izrađuje iz punog oblika u kojem se naknadno izrađuju provrti za zakovice ([2]). Za izradu tarnih obloga iz organskih materijala, kalup se prethodno zagrijava kako bi se veziva (smola) otopila i povezala zajedno s vlaknima. Ukoliko se tarne obloge izrađuju od sinteriranih metalnih materijala, tada se ne koristi trajno vezivo, već se stlačena (zbijena) obloga nakon kalupa zagrijava na temperaturu fuzije metalnih čestica pri čemu nastaje popularno zvan keramički materijal ([2]).

4.3.2. Tkanje i namatanje

Kod ove tehnologije proizvodnje tarnih obloga koriste se različite vrste smoli, impregniranih pređa i traka. Pređa se tkaju u materijal koji postaje smolom impregnirana traka ([2]). Takva traka se zatim obodno plete (namata) na način da se tvori uzorak pletenice, a potom slijedi stlačivanje. Nakon otvrdnjavanja i brušenja slijedi bušenje provrta za zakovice.



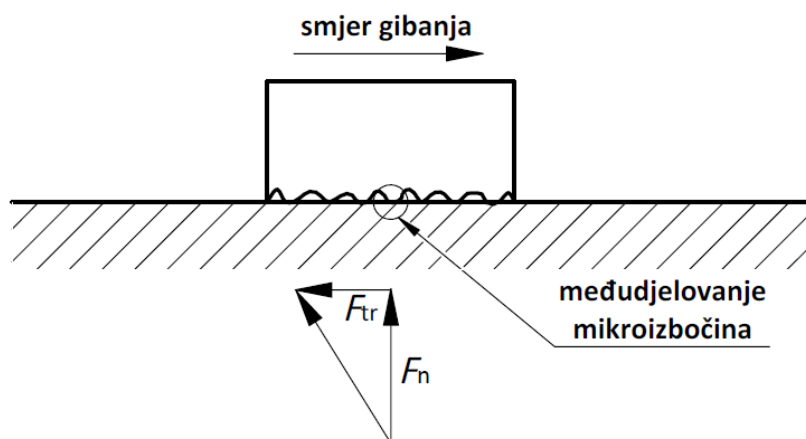
Slika 24. Tijek proizvodnje tarnih obloga metodom tkanja i namatanja ([13])

5. TROŠENJE MATERIJALA TARNIH OBLOGA SPOJKE

Tarne obloge spojki su jedne od najjače opterećenih komponenti transmisijskog sustava vozila. Najčešće zakovane za tarnu ploču spojke, u vezi s potisnom pločom i zamašnjakom, tarne obloge sudjeluju u prijenosu okretnog momenta sa koljenastog vratila motora na ulazno vratilo transmisije. Prilikom uključivanja spojke, uslijed različite brzine vrtnje pogonske i gonjene strane, najprije dolazi do klizanja tarne ploče između potisne ploče i zamašnjaka, dok nakon uključivanja spojke više nema relativnog gibanja komponenti spojke. Prilikom sinkronizacije, uslijed klizanja tarne ploče razvija se toplina kao posljedica trenja između elemenata spojke. Osim nastale topline, različiti mehanizmi trošenja djeluju na trošenje materijala tarnih obloga. Prethodno spomenute pojave (trenje, trošenje i toplina) ne pojavljuju se samo u mehaničkim tarnim sustavima poput ležaja, zupčanika, kočnica, spojki, vodilica i slično, već ih je lako uočiti u svakom pokretu u prirodi i u svakodnevnom životu. Te pojave pojavljuju se u dodirnim površinama tijela koja su u međusobnom dodiru i koja se relativno gibaju jedna u odnosu na drugu. Nauka posvećena tim pojavama naziva se tribologija.

5.1. Trenje klizanja

Prema definiciji, trenje je sila ili otpor koji se suprotstavlja relativnom gibanju krutih tijela u dodiru ([18]). Djeluje paralelno s dodirnom površinom, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog gibanja. Trenje klizanja nastaje između dva elementa tribosustava (Slika 25.).



Slika 25. Trenje klizanja

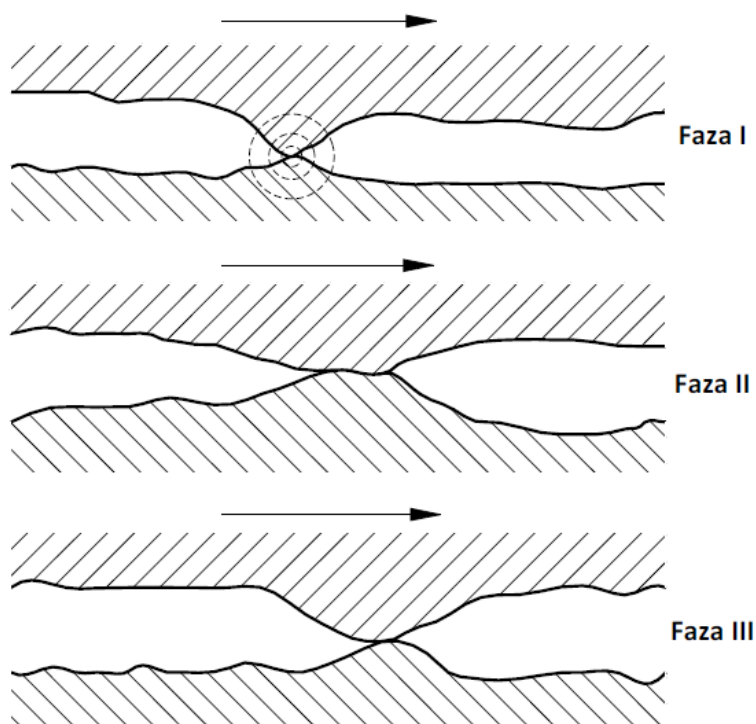
Iako je u većini slučajeva, u mnogobrojnim i različitim pokretnim elementima strojeva, uređaja i postrojenja, trenje štetna i nepoželjna pojava, kod spojki to nije slučaj budući da se

okretni moment, odnosno snaga, motora prenosi trenjem klizanja između pogonskog (zamašnjak) i gonjenog (ulazno vratilo transmisije) dijela. Kao posljedica trenja na površinama u dodiru dolazi do trošenja i zagrijavanja materijala površina. Utrošena mehanička energija prelazi u nepoželjnu i izgubljenu toplinsku energiju ([18]).

Kod suhog dodira između dva tijela sila trenja proporcionalna je normalnom opterećenju:

$$F_{tr} = \mu F_n. \quad (13)$$

Zbog postojanja hrapavosti (neravnina) na površini materijala, stvarni dodir dviju površina razlikuje se od prividnog, geometrijskog ([18]). Na Slici 26. prikazan je jedinični događaj procesa klizanja, tj. slijed zbivanja od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina. Klizanjem jedne površine u odnosu na drugu, u trenutku dodira (Faza I) dviju mikroizbočina dolazi do elastične i plastične deformacije zahvaćenih mikroizbočina, pri čemu nastaje brazdanje. U drugoj fazi dolazi do adhezijskog spajanja tih mikroizbočina, dok se daljnjim klizanjem (Faza III) ostvareni spoj raskida te se javlja elastični povrat mikroizbočina.



Slika 26. Jedinični događaj procesa klizanja

Sila trenja klizanja sastoji se od zbroja četiriju komponenti koje su i same zbroj pojedinačnih komponenti koje djeluju na svakom dodiru mikroizbočina ([18]):

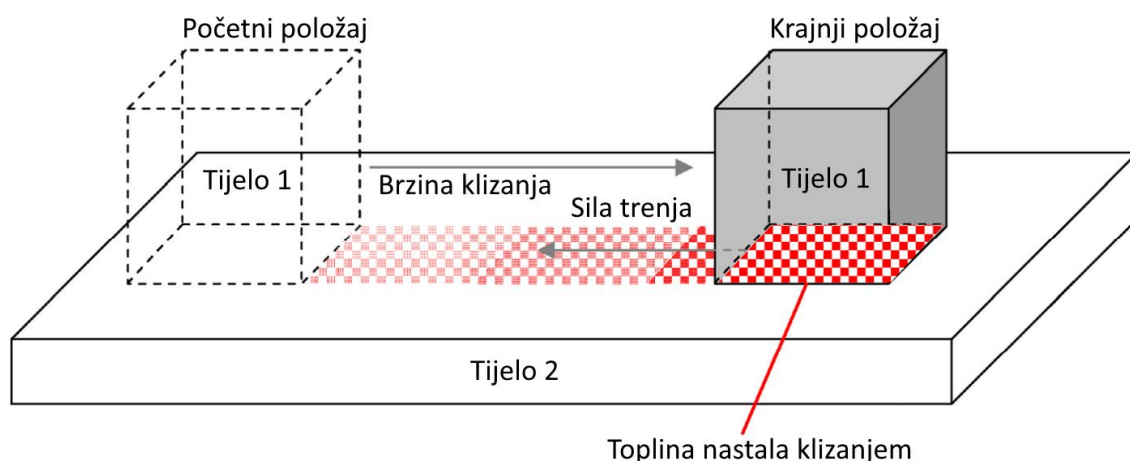
$$F_{tr} = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4, \quad (14)$$

gdje su:

- ΣF_1 – otpor na elastičnu deformaciju;
- ΣF_2 – otpor na plastičnu deformaciju;
- ΣF_3 – otpor na brazdanje;
- ΣF_4 – otpor na kidanje adhezijskih veza.

Otpor na elastičnu deformaciju proporcionalan je modulima elastičnosti materijala čije površine relativno klize jedna u odnosu na drugu, otpor na plastičnu deformaciju ovisi o njihovim granicama tečenja, otpor na brazdanje ovisi o njihovim duktilnostima i o brzini relativnog gibanja, a otpor na kidanje adhezijskih veza ovisi o jačini adhezijske veze (Van der Waals, elektrostatička, metalna i kovalentna) uspostavljene između materijala kliznog para ([18]).

Pri uključivanju spojke, za vrijeme klizanja tarne ploče između zamašnjaka i potisne ploče, razvijaju se visoke temperature koje uzrokuju povećano trošenje, površinske pukotine, pa čak i trajno oštećenje tarne ploče. U nekim slučajevima, takvi radni uvjeti mogu dovesti do potpunog oštećenja tarnih obloga, a time i cijele spojke, znatno prije očekivanog radnog vijeka. Toplina nastala klizanjem dvaju tijela podići će temperaturu kontaktnih površina kao posljedica pojave trenja između njih (Slika 27.).



Slika 27. Toplina nastala klizanjem dvaju tijela ([19])

Prvi zakon termodinamike definira da je promjena ulazne energije kliznog sustava U_{ul} jednaka zbroju unutarnje (akumulirane) energije sustava U_{akum} i raspršene energije u okolinu U_{dis} :

$$U_{ul} = U_{akum} + U_{dis}. \quad (15)$$

Ulazna energija kliznog sustava U_{ul} jednaka je umnošku sile trenja F_{tr} i brzine klizanja v_{kl} . Kako se brzina klizanja v_{kl} sve više povećava, sve manje i manje energije trenja (otprilike 5%) koristi se (pohranjuje u materijalu) za stvaranje mikrostrukturnih grešaka kao što su dislokacije, transformacije faza, širenje pukotina, stvaranje čestica trošenja, propagiranje pukotina i slično ([19]). Ostatak energije se raspršuje (disipira) kao toplina ili uzrokuje otapanje kliznih površina. Energija (toplina) koja se ne može dovoljno brzo odvesti s kliznih površina uzrokuje lokalni porast temperature kliznih površina. Prema ([19], [20]), temperature koje nastaju tijekom klizanja mogu se podijeliti u dvije skupine: lokalni maksimum temperature javlja se na vrhovima mikroizbočina ukoliko je dodir kliznih površina samo na nekoliko mjesta, i prosječna vrijednost temperature iznad nazivne kontaktne zone.

5.2. Mehanizmi trošenja

Trošenje materijala tarnih obloga može se klasificirati kao blago ili teško ([21]). U slučaju blagog trošenja, proces se odvija na vanjskim površinskim slojevima pri čemu površina ostaje glatka i najčešće prekrivena oksidom koji nastaje tijekom klizanja. Blago trošenje rezultira sitnim česticama veličine nanometra. Kod teškog trošenja, površine su deformirane te nastaju čestice trošenja veličine do nekoliko stotina mikrometra. Stoga, najjednostavniji način klasifikacije trošenja jest prema veličini nastalih čestica trošenja.

Iako postoji jako velik broj slučajeva trošenja, većina autora ([21], [18]) suglasna je da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja:

- abrazija (eng. *abrasive wear*);
- adhezija (eng. *adhesive wear*);
- umor površine (eng. *surface fatigue*);
- tribokorozija (eng. *tribocorrosion*).

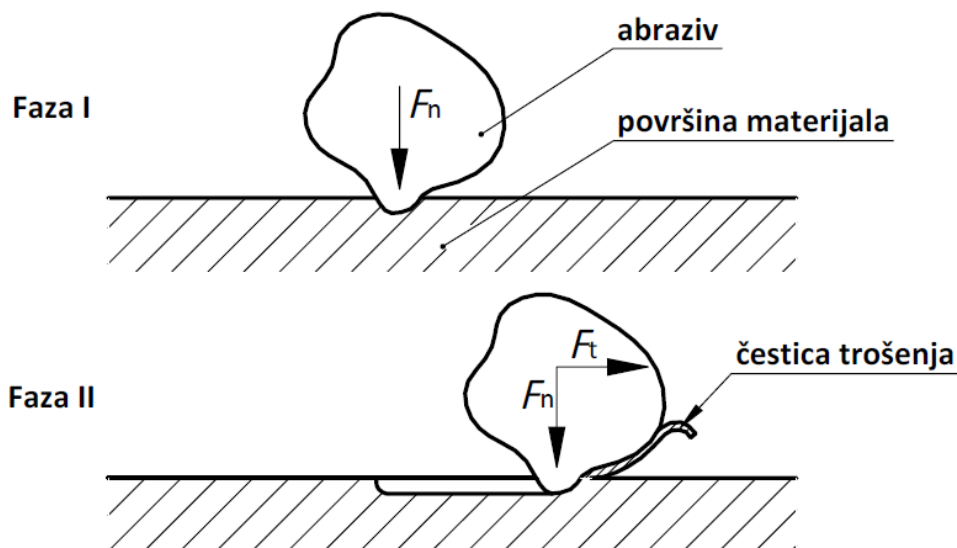
Trošenje u tribosustavu uglavnom uključuje složenu međuovisnost između nekoliko različitih mehanizama trošenja. Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima ([18]). Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina. U nastavku će se objasniti osnovni mehanizmi trošenja s pripadajućim jediničnim događajima.

5.2.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama ([18]). Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, pri čemu se jedinični događaj abrazije može prikazati s dvije faze (Slika 28.). U prvoj fazi dolazi do prodiranja abraziva u površinu materijala pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_n . Daljnjim klizanjem (Faza II) uzrokuje se istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t . Ovisno o strukturi tribosustava u kojem se javlja abrazija, razlikuju se dva oblika abrazije ([18]):

- abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela: abrazivnog tijela i abrazijskog protutijela;
- abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivnog tijela i abrazijskog protutijela), te međutijela (čestice trošenja) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

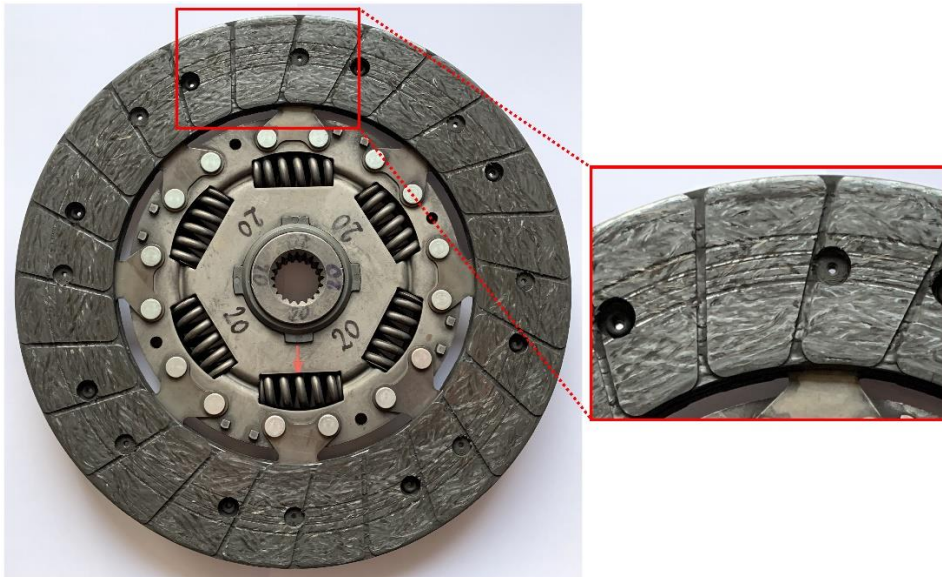
Prema provedenim istraživanjima ([18]), abrazivno trošenje materijala u dodiru s tri tijela je znatno manje nego trošenje u dodiru s dva tijela, budući da čestice trošenja provode samo oko 10% ukupnog vremena u trošenju materijala, dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.



Slika 28. Jedinični događaj abrazije

Kompozitna struktura materijala tarnih obloga, osim što se sastoji od veziva (smole), vlakana i punila, sastoji se od pojačivača trenja koji su najčešće izvedeni kao metalne žice. Pri

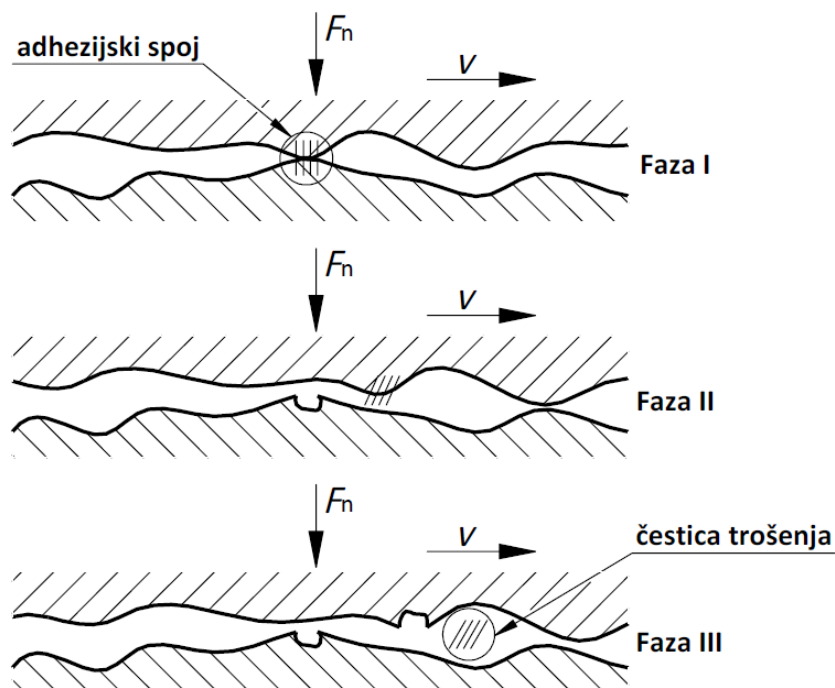
visokim radnim temperaturama, uslijed povećanog trošenja metalne žice se odlamaju i djeluju kao abraziv zavaren na potisnu ploču/zamašnjak uzrokujući oštećenje (žljebove) tarne ploče.



Slika 29. Oštećenje (žljebovi) tarne ploče #20 metalnim žicama

5.2.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza ([18]).



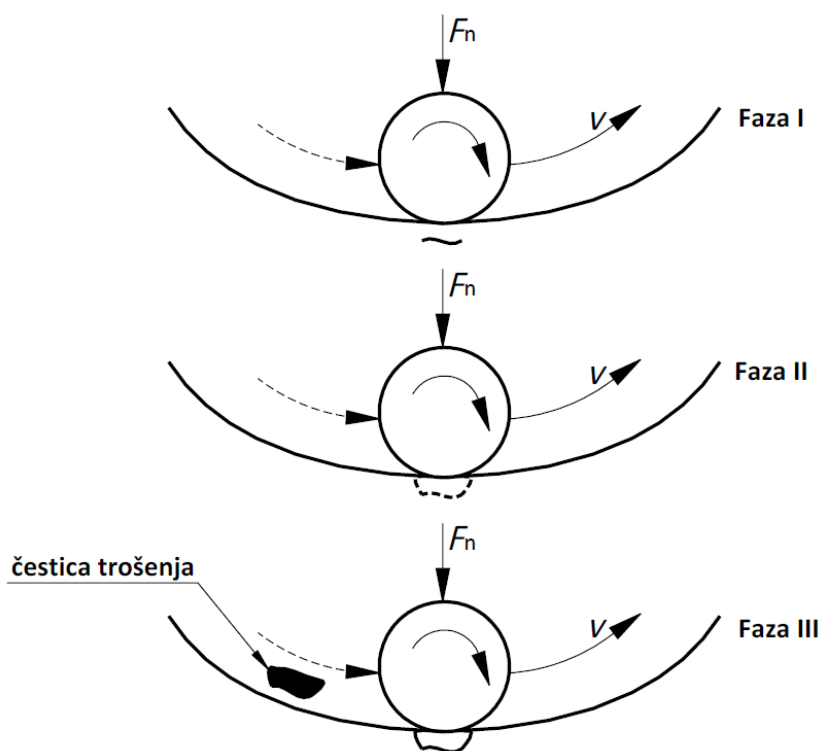
Slika 30. Jedinični događaj adhezije

Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze prikazane na Slici 30. U prvoj fazi adhezijskog trošenja dolazi do nastajanja adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira mikroizbočina uslijed djelovanja normalne komponente opterećenja F_n . Daljnjim klizanjem površine brzinom v (Faza II) dolazi do raskidanja adhezijskog spoja, pri čemu čestica trošenja ostaje spontano “nalijepljena“ na jednom članu kliznog para. U trećoj fazi eventualno nastupa otkidanje čestice trošenja s površine kliznog para. Oblik čestice trošenja ovisi o uvjetima klizanja, a uglavnom je listićastog oblika ([18]). Čestice trošenja iščupane s jedne klizne površine ostaju privremeno ili trajno “nalijepljene“, odnosno navarene, na drugu kliznu površinu.

Oštećenje tarne ploče odlomljenim metalnim žicama (Slika 29.) može se opisati kao istovremeno djelovanje različitih mehanizama trošenja; abrazije i adhezije. Uslijed normalne komponente opterećenja F_n dolazi do zavarivanja odlomljene metalne žice na potisnu ploču/zamašnjak (adhezija), pri čemu ta metalna žica postaje abraziv i vrši abrazivno trošenje.

5.2.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja ([18]). Jedinični događaj umora površine može se opisati u tri faze prikazane na Slici 31.

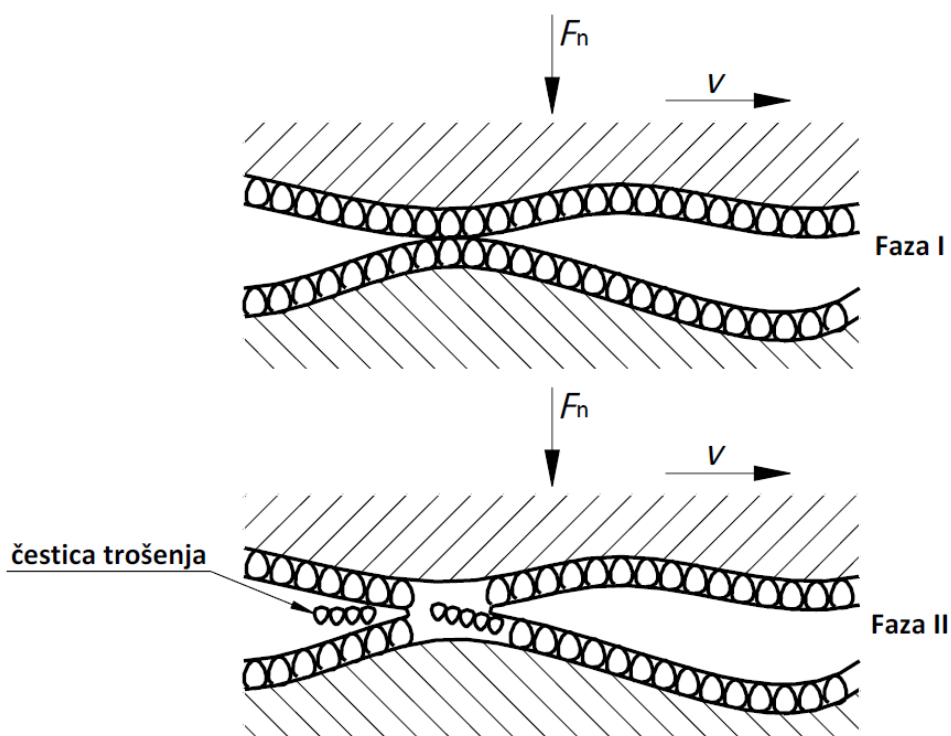


Slika 31. Jedinični događaj umora površine

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertz-ovo naprezanje) uvijek ispod same površine. Ova faza je tzv. faza inkubacije jer praktički ne dolazi do nikakvog odvajanja čestice. U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od tog trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Stoga se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva rupičenje (eng. *pitting*) ([18]).

5.2.4. Tribokorozija

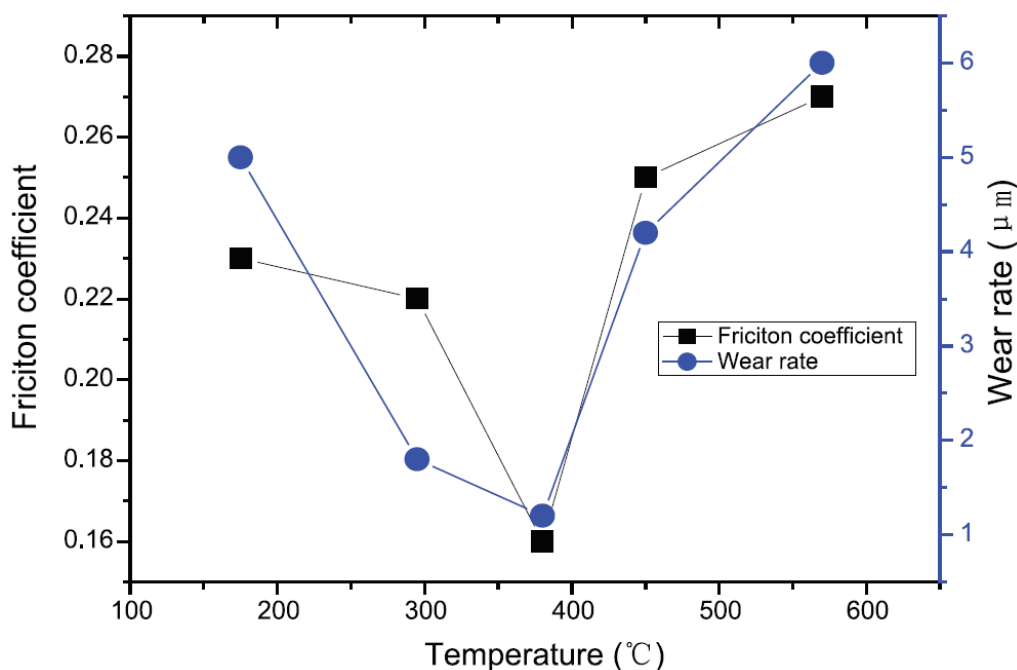
Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem ([18]). Jedinični događaj tribokorozije može se opisati u dvije faze prikazane na Slici 32. U prvoj fazi dolazi do stvaranja (ili obnavljanja) sloja produkata korozije, dok u drugoj fazi nastaje mjestimično razaranje sloja produkata korozije i stvaranje čestica trošenja.



Slika 32. Jedinični događaj tribokorozije

Tribokorozija je u pravilu “poželjan“ mehanizam trošenja jer slojevi produkata korozije zaštićuju klizne površine. Kod ispitivanja tarnog materijala kočionih obloga dobivenog metalurgijom praha, uočeno je kako se pri porastu temperature stvara oksidacijski sloj koji ima

svojstva podmazivanja pri čemu dolazi do opadanja stupnja trošenja i koeficijenta trenja. Daljnjim zagrijavanjem oksidacijski sloj se raspada te stupanj trošenja i koeficijent trenja rastu.



Slika 33. Utjecaj temperature na stupanj trošenja i koeficijent trenja tarnog materijala kočionih obloga dobivenog metalurgijom praha ([20])

5.3. Modeliranje trošenja

Trošenje je dinamički proces povezan s promjenama u dodirnim površinama tijela koja se relativno gibaju jedno u odnosu na drugo kao rezultat mehaničke interakcije među njima ([22]). Prema ([21]), trošenje je progresivni gubitak materijala s površina tijela u dodiru koji nastaje kao posljedica relativnog gibanja jednog tijela u odnosu na drugo, pri čemu je trenje glavno sredstvo kontrole unosa energije. Trošenje materijala tarnih obloga primarno se očituje smanjenjem debljine tarne ploče. Proces trošenja ovisi o mnogim faktorima i parametrima kao što su geometrija dodirnih površina, normalna sila, relativna brzina, tvrdoća materijala i drugo. Trošenje mehaničkih dijelova se u većini slučajeva smatra glavnim uzrokom pogoršanja kvalitete rada i performansi uređaja. Upravo se zbog toga dugi niz godina provode istraživanja o procesu trošenja i njegovom modeliranju. Jedan od prvih znanstvenika koji je istraživao procese trošenja bio je Archard, koji je predstavio linearni model trošenja metala ([22]). Archard je pretpostavio da svaki put kada dvije neravnine dođu u kontakt da bi ostvarili spoj, postoji konstantna vjerojatnost da će se stvoriti adhezivni fragment ([23]). Trošenje suhih spojki odnosi se na adhezivno trošenje dviju glatkih suhih površina koje se obično modelira

koristeći Archardov zakon. Archardov zakon definira da je volumen trošenja V_w proporcionalan tvrdoći materijala H , kontaktnoj sili F_n i relativnoj površinskoj kliznoj udaljenosti L ([24]):

$$V_w = K \left(\frac{F_n L}{3H} \right), \quad (16)$$

pri čemu je K koeficijent trošenja. Kontaktna sila F_n jednaka je omjeru tangencijalne sile F_t i koeficijenta trenja μ :

$$F_n = \frac{F_t}{\mu}. \quad (17)$$

Tangencijalna sila F_t množena s kliznom udaljenosti L daje raspršenu (disipiranu) energiju:

$$E_{\text{dis}} = F_t L. \quad (18)$$

Uvrštavanjem izraza (17) i (18) u izraz (16) slijedi volumen trošenja:

$$V_w = \frac{K}{3H\mu} E_{\text{dis}}. \quad (19)$$

Kako su koeficijent trošenja K , tvrdoća materijala H i koeficijent trenja μ temperaturno ovisni, moguće ih je zamijeniti s jednim temperaturno ovisnim koeficijentom uzimajući pri tome u obzir da je faktor skaliranja jednak 3 ([24]). Takav temperaturno ovisan koeficijent naziva se stupanj trošenja:

$$K, H, \mu = f(T) \rightarrow w(T). \quad (20)$$

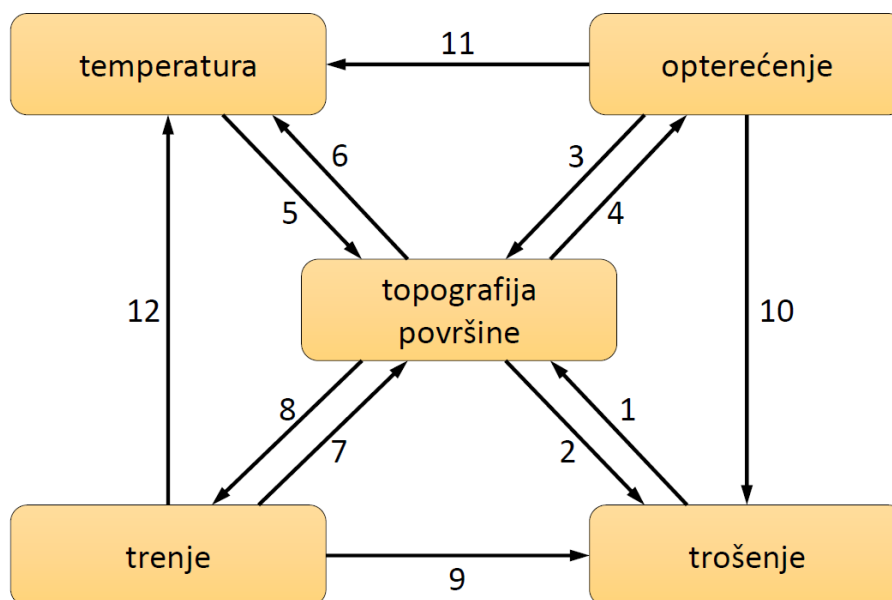
Volumen trošenja moguće je odrediti pomoću stupnja trošenja i raspršene energije:

$$V_w = w(T) E_{\text{dis}}. \quad (21)$$

Iz izraza (21) vidljivo je kako se uz poznatu raspršenu energiju dobivenu iz brzine klizanja i okretnog momenta te temperaturno ovisnog stupnja trošenja, može procijeniti volumen trošenja. Zbog izrazito kompleksne fizikalne pozadine, stupanj trošenja se obično određuje eksperimentalno trošenjem cijele tarne ploče (eng. *disc-on-disc*) ili trošenjem ispitnog uzorka tarne ploče (eng. *pin-on-disc*). U oba slučaja, trošenje je moguće odrediti mjerenjem razlike debljine tarne ploče, ili češće, mjerenjem razlike mase (eng. *weighing method*) ([24]).

5.4. Utjecajni faktori na trenje i trošenje

U uključenom položaju spojka prenosi kinetičku energiju rotirajućeg koljenastog vratila do transmisije, a u konačnici i do pogonskih kotača. Bilo kakvo klizanje između pogonskih i gonjenih elemenata spojke, primjerice tijekom pokretanja zaustavljenog vozila ili promjene stupnja prijenosa, rezultira povećanjem temperature budući da se dio kinetičke energije (ovisno o razlici brzina) pretvara u toplinu. Dio nastale topline se potom prenosi provođenjem (kondukcijom) i strujanjem (konvekcijom) na okolne elemente spojke, dok dio topline uzrokuje fizikalno-kemijske reakcije u materijalu tarnih obloga što rezultira promjenom svojstava i trošenja materijala ([20]). Proces trošenja ovisi o mnogo faktora i parametara kao što su: geometrija dodirnih površina, temperatura, normalna sila, okretni moment, relativna brzina (klizanja), tvrdoća materijala i slično. Kako su pojedini faktori i parametri međusobno ovisni, primjerice veća relativna brzina klizanja rezultirati će većom temperaturom, nije jednostavno promatrati utjecaj samo jednog faktora i parametra na trošenje, a time i na koeficijent trenja tarnog materijala. Međutim, kako funkcionalnost same spojke ovisi o materijalu tarnih obloga, potrebno je promatrati utjecaj faktora i parametara na topografiju površine materijala. Prema definiciji, topografija površine obuhvaća komponente teksture te ostale nepravilnosti kao što je odstupanje od oblika ([25]), pri čemu je hrapavost jedna od komponenti teksture.



Slika 34. Međuovisnost faktora i parametara koji definiraju proces trenja

Na Slici 34. prikazana je temeljna međuovisnost između opterećenja, temperature, trenja, trošenja i topografije površine. Pojedine ovisnosti mogu se objasniti kao ([26]):

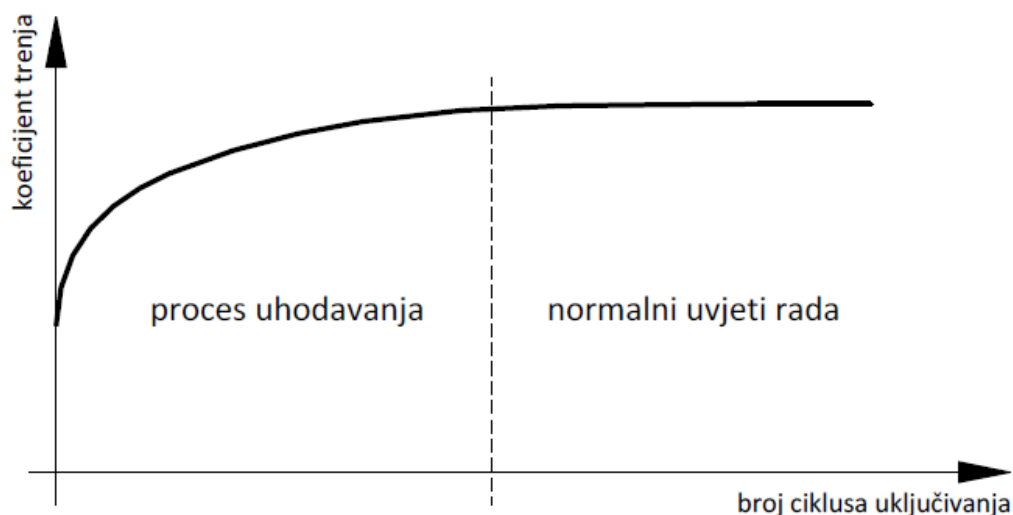
1. trošenje oblikuje topografiju površine budući da čestice trošenja formiraju slojeve;
2. trošenje tvrdih područja je manje nego mekih područja;
3. opterećenje uzrokuje elastične i plastične deformacije površine, koje pritom mijenjaju topografiju površine;
4. topografija površine određuje raspodjelu opterećenja na površini;
5. temperatura utječe na formiranje slojeva;
6. toplina nastaje na tvrdim slojevima;
7. proces trenja između neravnina definiran je topografijom površine;
8. tvrdi slojevi prenose glavni dio snage trenja;
9. dio snage trenja uzrokuje stvaranje čestica trošenja;
10. stupanj trošenja je u korelaciji s opterećenjem;
11. nastajanje topline je u korelaciji s opterećenjem;
12. dio snage trenja uzrokuje nastajanje topline.

Kako se u ovom radu naglasak daje na utjecaj temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala suhe spojke, u nastavku će se dati pregled literature vezane uz utjecaj temperature. Iako je velik broj istraživanja utjecaja temperature na trenje i trošenje tarnog materijala proveden za organske materijale kočionih obloga, dobiveni rezultati pokazuju sličnost s rezultatima dobivenim ispitivanjem organskih materijala tarnih obloga spojki, budući da se organski materijali sastoje od istih osnovnih komponenti (vezivo, vlakna, punila i modifikatori trenja). Stoga, zakonitosti utvrđene kod organskih materijala kočionih obloga mogu se primijeniti na organske materijale tarnih obloga spojki.

5.4.1. Utjecaj temperature na trenje i trošenje

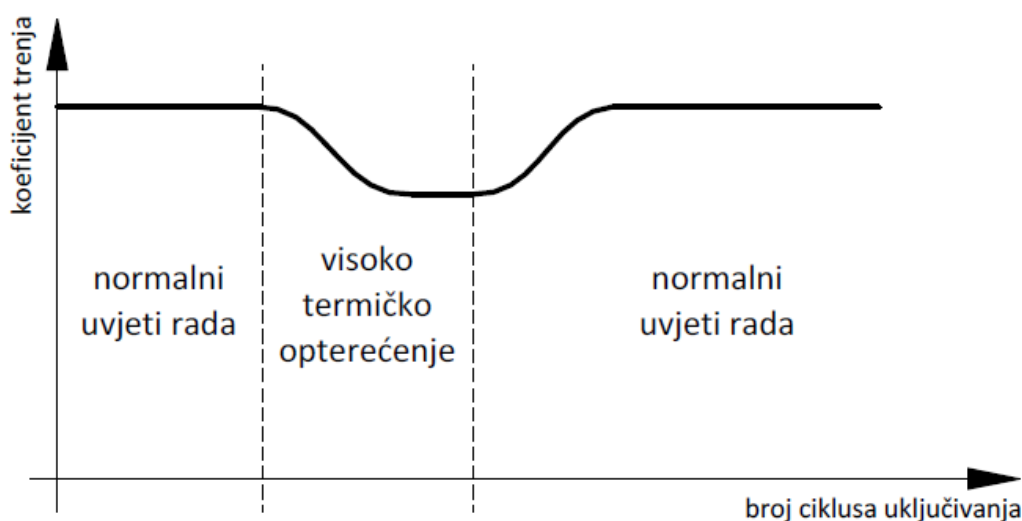
Kako je prethodno objašnjeno, nastala toplina uslijed klizanja elemenata spojke uzrokuje porast temperature koja utječe na trenje i trošenje tarnog materijala. Raspodjela temperature po površini tarnog materijala nije jednolika; temperatura vrhova neravnina (mikroizbočina) može biti znatno veća od one na površini što rezultira formiranjem lokalnih zona povećane temperature, dok raspodjela temperature unutar tarnog materijala ovisi o termofizikalnim svojstvima samog tarnog materijala ([20]). Osim što utječe na oksidaciju, toplinsku čvrstoću i toplinsku plastičnost tarnog materijala, temperatura uzrokuje promjenu mikrostrukture (difuzija i adsorpcija molekula ili atoma na površini) i strukturnu faznu transformaciju tarnog materijala ([20]).

Proces uhadavanja spojke (eng. *run-in process*) pripada skupini privremenih dinamičkih procesa koji se javlja na početku rada novog sklopa spojke. Na početku rada nove spojke dolazi do formiranja tarnog sloja sastavljenog od čestica trošenja između tarne ploče i potisne ploče, odnosno zamašnjaka. Na početku procesa uhadavanja spojke, debljina tarnih obloga će se smanjivati (trošiti) znatno više nego u normalnim uvjetima rada zbog veće hrapavosti površine. Koeficijent trenja će se stabilizirati nakon formiranja tarnog sloja ([27]) (Slika 35.).



Slika 35. Koeficijent trenja u procesu uhadavanja i u normalnim uvjetima rada spojke

Koeficijent trenja počinje opadati uslijed visokog termičkog opterećenja pri čemu sastav materijala tarnih obloga definira temperaturni prag, odnosno temperaturu iznad koje dolazi do pojave efekta temperaturnog zamora (eng. *fading*) (Slika 36.).



Slika 36. Promjena koeficijenta trenja pri pojavi efekta temperaturnog zamora materijala

Visoke temperature uzrokuju oštećenje tarnog sloja i termalnu degradaciju tarnog materijala koje rezultira opadanjem koeficijenta trenja. Ukoliko je spojka bila kratkotrajno izložena visokom termičkom opterećenju, koeficijent trenja će se postepeno vratiti na svoju početnu vrijednost. Daljnjim radom spojke u normalnim uvjetima rada dolazi do obnavljanja tarnog sloja slično kao u procesu uhodavanja. Taj proces naziva se restauracija (eng. *regeneration*). Ukoliko je pak spojka kontinuirano izložena visokom termičkom opterećenju (iznad 400°C), tarne obloge zajedno s potisnom pločom i zamašnjakom postaju trajno oštećene. Koeficijent trenja iznenada opada na vrlo nisku vrijednost ($\mu \approx 0,1$) te dolazi do neželjenog proklizavanja spojke. Proklizavanje spojke dodatno uzrokuje povećanje temperature pri čemu se oštećenje dodatno povećava. Ovaj efekt naziva se termalna destrukcija materijala ([27]).

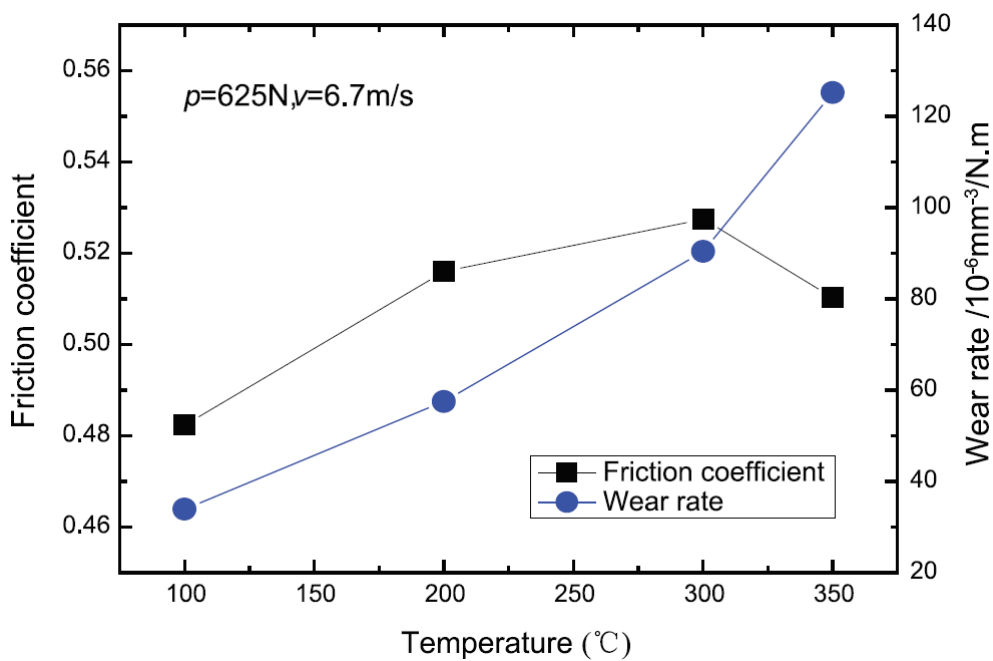
Prema istraživanju organskih tarnih materijala kočionih obloga ([20]), uočeno je kako se trenje i trošenje mijenjaju s promjenom temperature. Pri niskim temperaturama, na površini tarnog materijala prisutne su čvrste neravnine (mikroizbočine) i male čestice trošenja. Pri povišenim temperaturama najprije dolazi do omekšanja matrice (smole) pri čemu se smanjuje čvrstoća vezivanja. Uslijed slabljenja matrice, vlakna izlaze na površinu materijala pri čemu dolazi do formiranja tarnog sloja (crvena elipsa na Slici 35.).



Slika 37. Formirani tarni sloj na organskom tarnom materijalu snimljen skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) ([20])

Daljnjim povećanjem temperature tarni sloj se deformira, lomi i guli s površine pri čemu nastaju sitne krhotine koje smanjuju trenje, povećavaju trošenje, a ponekad mogu uzrokovati vibracije i buku ([20]). Na kraju, kada temperatura površine tarnog materijala dostigne

temperaturu termalne degradacije, dolazi do pojave efekta temperaturnog zamora materijala pri čemu koeficijent trenja iznenada opada, a stupanj trošenja znatno poraste. Osim termalne degradacije, organski materijali otpuštaju plinove pri čemu se formiraju plinski mjehurići koji dodatno smanjuju trenje ([20]).



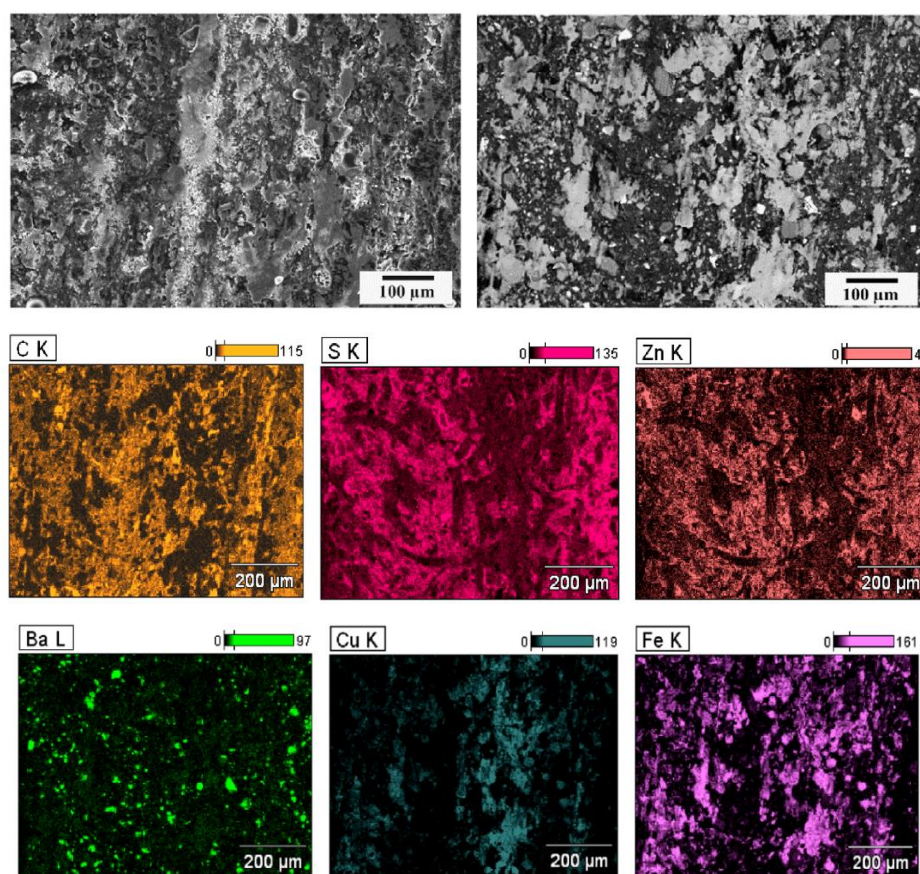
Slika 38. Utjecaj temperature na stupanj trošenja i koeficijent trenja organskog tarnog materijala kočionih obloga ([20])

Općenito, s povećanjem temperature koeficijent trenja postepeno raste. Nakon dostizanja određene temperature, koeficijent trenja iznenada opada zbog pojave efekta temperaturnog zamora. Za razliku od koeficijenta trenja, stupanj trošenja kontinuirano raste s povećanjem temperature. Trošenje je znatno više izraženije što je temperatura veća (Slika 38.).

Prema istraživanju utjecaja temperature na fenolnu smolu kao sastavnu komponentu organskog tarnog materijala spojki ([28]), uočeno je kako koeficijent trenja postepeno raste do 240°C nakon čega počinje opadati, dok povećanjem temperature iznad 330°C koeficijent trenja drastično pada na vrlo nisku vrijednost ($\mu \approx 0,1$). Ispitivanje je provedeno s malim ispitnim uzorkom ($25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 10\text{mm}$) tarne obloge na *pin-on-disc* tribometru. S porastom temperature i površinske klizne udaljenosti, na površini tarnog materijala formira se tarni sloj sastavljen od čestica trošenja tarnih obloga i potisne ploče. Formirani tarni sloj je stabilan te osigurava najveći koeficijent trenja tarne ploče ([28]). Analiza rendgenskim spektrom pokazuje veći udio kisika i željeza nakon provedbe ispitivanja pri 200°C što implicira na prijelaz željeznih

čestica s potisne ploče tribometra na tarne obloge. Takvo trošenje predstavlja kombinaciju oksidacijskog (tribokorozija), abrazivnog i adhezijskog trošenja ([28]). Tijekom ispitivanja pri temperaturi od 240°C zamijećen je neugodan miris i mala količina dima. Daljnjim porastom temperature dim postaje gušći, a neugodan miris jačeg intenziteta. Razlog tome je što pri 240°C dolazi do termalne degradacije fenolne smole pri čemu kao produkti nastaju fluidi i plinovi. Termalna degradacija fenolne smole smanjuje čvrstoću vezivanja vlakana i ostalih komponenata tarnog materijala. Analiza rendgenskim spektrom pokazuje drastično smanjenje udjela kisika i željeza na površini tarnog materijala nakon 350°C, što objašnjava kako se prethodno formirani stabilni tarni sloj lomi i guli s površine tarnog materijala. Nastali plinovi (primjerice CO, CO₂, CH₄) uslijed termalne degradacije fenolne smole stvaraju lokalne plinske mjehuriće, pri čemu dolazi do abrazivnog trošenja uz pomoć tekućih, odnosno plinskih slojeva ([28]). Stoga, koeficijent trenja drastično opada pri povećanju temperature uslijed termalne degradacije fenolne smole i efekta podmazivanja uslijed nastalih fluida i plinova.

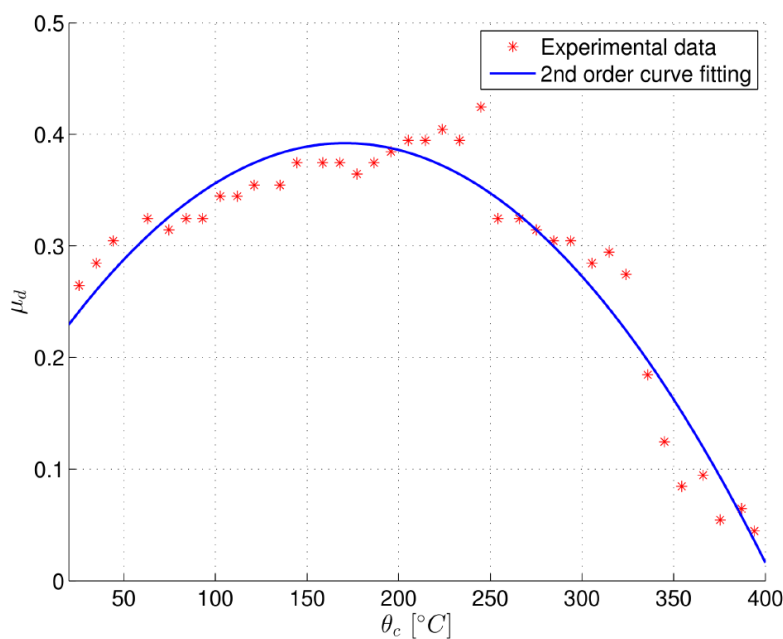
Prijelaz čestica željeza s potisne ploče na tarne obloge uočen je i pri istraživanju utjecaja blagog i jakog trošenja na formiranje i stabilnost tarnog sloja kod spojki ([29]).



Slika 39. Istrošena tar na površina snimljena SEM mikroskopom ([29])

Na Slici 39. prikazana je istrošena površina tarnih obloga snimljena skenirajućim elektronskim mikroskopom (eng. *Scanning Electron Microscope* - SEM) zajedno s udjelima pojedinih elemenata. Vidljivo je kako se na istrošenoj tarnoj površini nalaze čestice željeza s potisne ploče koje zajedno s ostalim česticama trošenja formiraju tarni sloj. Kao i kod prethodno opisanog istraživanja utjecaja temperature na fenolnu smolu, u ovom istraživanju ispitivanja su provedena na *pin-on-disc* tribometru. Rezultati ispitivanja pokazuju kako je kod blagog trošenja tarni sloj relativno debeo i kontinuirano rasprostranjen. Pri prijelazu s blagog na jako trošenje uočeno je kako se na površini tarnih obloga nalazi manji udio čestica željeza nego kod blagog trošenja što implicira na razaranje tarnog sloja. Naime, u slučaju jakog trošenja tarni sloj je znatno tanji i lošije formiran po površini tarnih obloga, pri čemu pojedine promjene mogu jednostavno uzrokovati njegovo razaranje. Zaključeno je kako tarni sloj ima ulogu krutog lubrikanta koji smanjuje stupanj trošenja ([29]).

Rezultati dobiveni ispitivanjem trošenja tarnih obloga suhe dvostruke spojke ([30]) pokazuju prethodno opisani trend trenja, odnosno s povećanjem temperature dinamički koeficijent trenja najprije raste do neke maksimalne vrijednosti, dok nakon određene temperature počinje drastično opadati uslijed efekta temperaturnog zamora (Slika 40.). Poznavanje (predviđanje) promjene koeficijenta trenja u ovisnosti o temperaturi ima veliku ulogu pri modeliranju sustava upravljanja radom spojke.



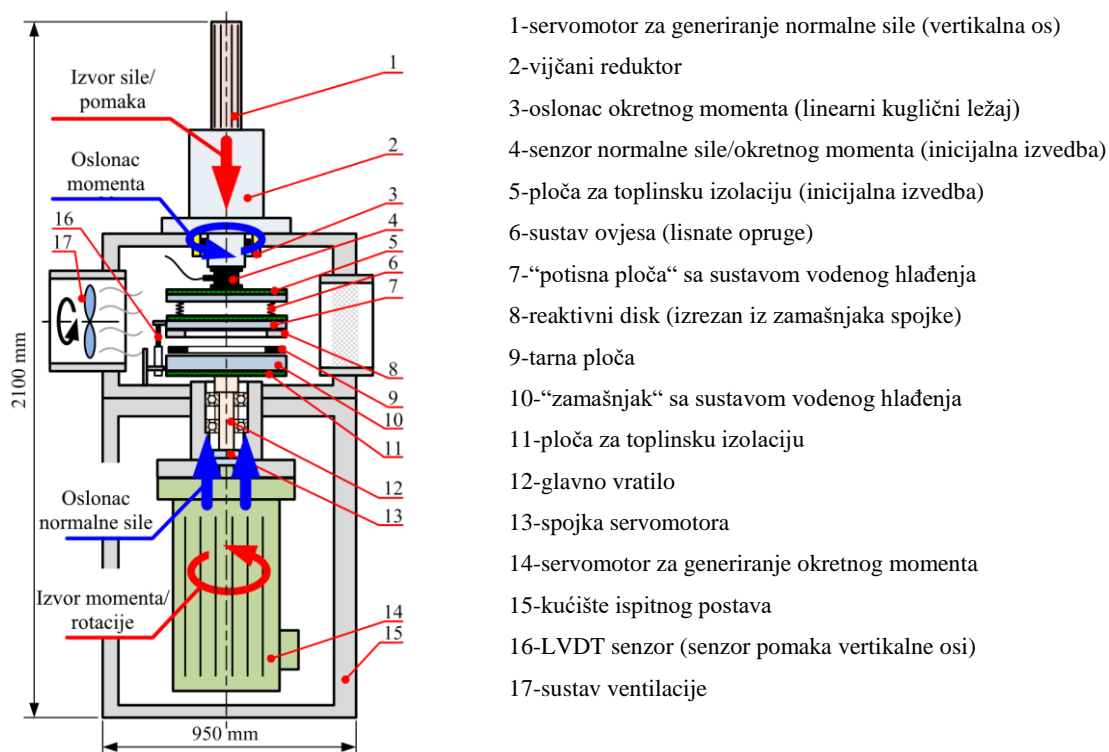
Slika 40. Utjecaj temperature na dinamički koeficijent trenja tarnog materijala suhe dvostruke spojke ([30])

6. ISPITNI POSTAV

U prvoj fazi razvoja, svojstva tarnog materijala procjenjuju se testovima koji se provode na dinamometru u laboratoriju. Dinamometar je mehanički uređaj koji omogućava kontinuirano mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje ciljanog rotacijskog stroja. Ovisno o primjeni spojke, testovi se provode pri niskoj i visokoj vrijednosti gustoće energije ($25-150 \text{ J/cm}^2$), pri čemu temperatura može dosegnuti 500°C ([29]). Nakon prve faze, tarni materijal se testira na vozilima kako bi se provjerila izdržljivost spojke i definirala veličina (kapacitet) okretnog momenta kojeg ona može prenijeti, te da bi se ujedno potvrdili podaci dobiveni ispitivanjem u laboratoriju. Zbog velikog broja sirovih materijala, kompleksnosti strukture tarnih materijala, različitih procesnih (testnih) parametara i dugih ispitivanja na dinamometru, razvoj novih tarnih materijala predstavlja vremenski dug i cjenovno skup proces ([29]). Kako bi se smanjilo potrebno vrijeme i trošak razvoja, istraživanje svojstava tarnog materijala provodi se na uređaju koji se naziva tribometar. Tribometar je mehanički uređaj koji se koristi za ispitivanje tarnih svojstava kontakta između ispitivanih materijala, sa ili bez maziva i/ili dodatkom abrazivnih čestica prisutnih u kliznom kontaktu ([31]). Za razliku od dinamometra, tribometar se koristi samo za ispitivanje trenja i trošenja, stoga ne uključuje nužno ništa osim komponenti u tarnom kontaktu pri čemu se postižu preciznija (npr. mjerenje normalne sile, temperature, pomaka itd.) i brža (dodatni sustav hlađenja) mjerenja. U slučaju automobilskih suhih tarnih spojki, tribometar se može primijeniti za eksperimentalnu karakterizaciju osjetljivosti spojke na trešenje (eng. *shudder effect*), određivanje koeficijenta trenja (COF) i stupnja trošenja. Tako dobiveni eksperimentalni podaci zatim se mogu primijeniti u fazi konstruiranja spojke ili pri parametriziranju matematičkog modela ([31]). U primjeni su šest općih vrsta tribometara, no dva od njih su najprimjerenija za provedbu ispitivanja trošenja spojke zbog sličnosti međusobnog gibanja tarnog para: tribometar s uzorkom na disku (eng. *pin-on-disc tribometer*) i tribometar koji koristi čitave tarne ploče kao ispitne uzorke (eng. *disc-on-disc tribometer*). Iako se za ispitivanje svojstava tarnih materijala češće koriste tribometri s uzorkom na disku zbog jednostavnije strukture samog uređaja, tako dobiveni podaci ponekad ne obuhvaćaju sve utjecajne faktore koji se mogu javiti u stvarnoj eksploataciji. U sklopu ovog diplomskog rada, a u svrhu što realnijeg simuliranja rada automobilske suhe spojke, za ispitivanje utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala suhe spojke korišten je tribometar s čitavim tarnim pločama kao ispitnim uzorcima.

6.1. Struktura ispitnog postava

Za potrebe ispitivanja trošenja tarnog materijala suhe automobilske spojke na Fakultetu je razvijen ispitni postav sa CNC karakteristikama koji omogućava precizno upravljanje radnim parametrima. Normalna sila, brzina klizanja i temperatura, kao glavni utjecajni parametri, precizno su kontrolirani tijekom eksperimenta primjenom vertikalne i rotacijske servo-osi te sustava hlađenja vodom ugrađenim u obje osi ([32]).

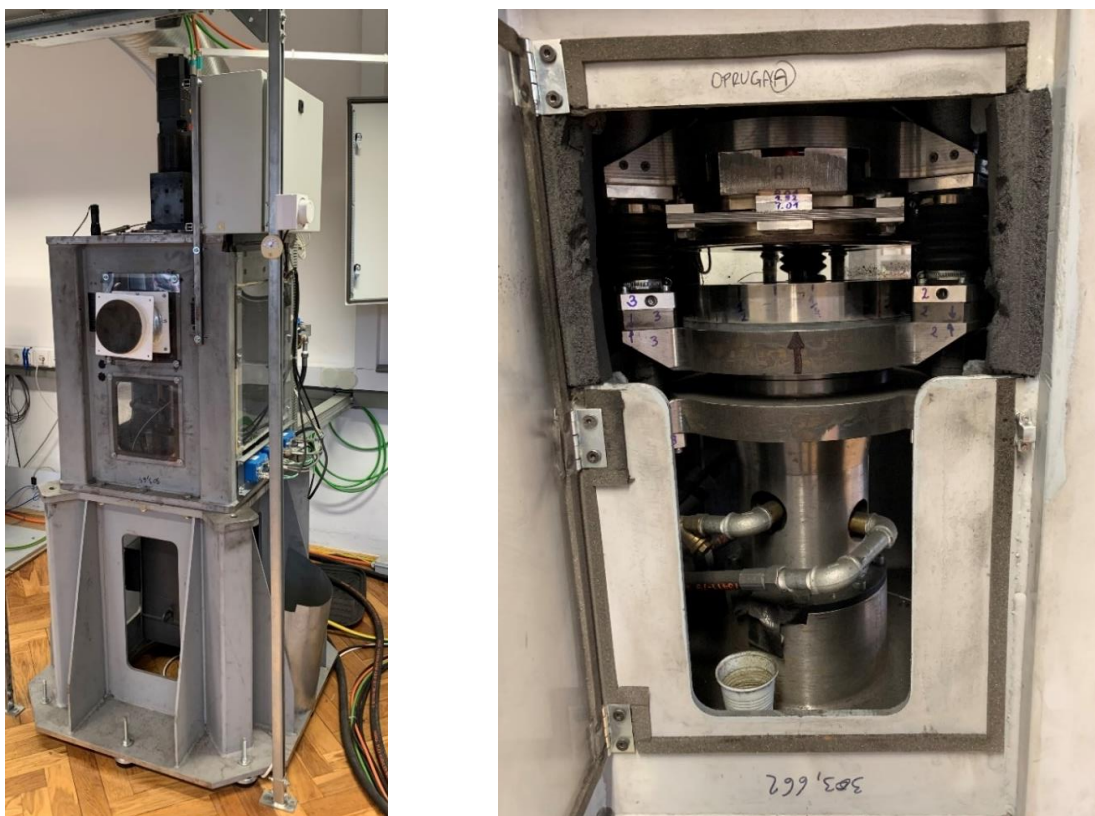


Slika 41. Shematski prikaz ispitnog postava ([32])

Na Slici 41. prikazana je struktura razvijenog *disc-on-disc* tribometra zajedno s glavnim dijelovima, odnosno sklopovima. Tribometar se sastoji od nerotacijskog reaktivnog diska (8) i rotacijskog diska (10) između kojih se postavlja tarna ploča (9). Nerotacijski disk vezan je uz promjenjivi izvor normalne/aksijalne sile (vertikalna os), dok je rotacijski disk vezan s izvorom promjenjivog okretnog momenta (rotacijska os). Reaktivni disk izrezan je iz zamašnjaka spojke koji je vijčanim spojem preko vijenaca pričvršćen na "potisnu ploču" kroz koju je omogućeno strujanje rashladne tekućine zbog održavanja temperature (hlađenja) tijekom eksperimenta. Zamašnjak, odnosno izrezani reaktivni disk, i tarna ploča (ispitni uzorak) pripadaju istom modelu spojke, odnosno zajedno će se ugrađivati u komercijalnom vozilu. Tarna ploča postavlja se na rotacijski disk (stol) koji ima ulogu zamašnjaka, dok se nerotacijski disk, koji ima ulogu potisne ploče, pomiče isključivo linearno. Takvom izvedbom postiže se niz prednosti ([32]):

- minimalno zagrijavanje ležajeva rotacijske osi zbog niske toplinske vodljivosti tarnog materijala;
- senzor temperature može se smjestiti u metalni disk (tj. reaktivni disk) čime se isključuje potreba za telemetrijskom opremom;
- rotacija tarne ploče omogućava uklanjanje nastalih čestica trošenja preko niza radijalnih kanala (proreza) pomoću centrifugalne sile, tj. čestice trošenja se uklanjaju na isti način kao i kod stvarne spojke.

Potrebno je napomenuti kako se kod ovako razvijenog tribometra kontakt ostvaruje na jednoj tarnoj površini, za razliku od stvarne spojke kod koje su obje strane tarne ploče u kontaktu: jedna strana s potisnom pločom, a druga sa zamašnjakom.



Slika 42. Stvarna izvedba ispitnog postava (lijevo) i detalj rotacijske i vertikalne osi (desno)

U Tablici 1. dani su glavni radni parametri tribometra, dok je na Slici 42. prikazan tribometar (lijevo) zajedno s detaljem rotacijske i vertikalne osi (desno) između kojih se postavlja tarna ploča kao ispitni uzorak. Tribometar se može podijeliti na nekoliko podsustava: podsustav vertikalne i rotacijske osi, podsustav hlađenja i podsustav ventilacije, koji će se opisati u nastavku.

Tablica 1. Glavni radni parametri tribometra ([32])

Vertikalna os	Maksimalna brzina vrtnje motora	3000 min ⁻¹
	Nazivni okretni moment motora	2,15 Nm
	Maksimalni okretni moment motora	10 Nm
	Pomak vijčanog pogona	1 mm po okretaju
	Maksimalna ostvariva normalna sila	10 kN
	Maksimalna temperatura	350 °C
	Maksimalni vertikalni pomak	50 mm
	Mjerljiv vertikalni pomak	5 mm
Rotacijska os	Maksimalna brzina vrtnje motora	3000 min ⁻¹
	Nazivni okretni moment motora	110 Nm
	Maksimalni okretni moment motora	270 Nm
Sustav hlađenja	Snaga hlađenja	6 kW
Ventilacijski sustav	Najveći protok	1100 m ³ /h

6.1.1. Vertikalna os

Vertikalna os temelji se na električnom servomotoru (1) relativno male snage i reduktoru (2) koji pretvara rotacijsku brzinu/okretni moment servomotora u translacijsku brzinu/silu. Planetarni vijčani reduktor primjenjuje se zbog velike gustoće snage, krutosti i velikog prijenosnog omjera ([32]). Oslonac okretnog momenta (3) izveden je kao linearni kuglični ležaj kako bi se spriječilo opterećenje reduktora okretnim momentom rotacijske osi. Inicijalna izvedba tribometra (Slika 43. – lijevo) imala je jedan dvoosni piezoelektrični senzor normalne sile, odnosno okretnog momenta (4). Uočeno je kako jedan senzor nije prikladan za mjerenje svih opterećenja koja se javljaju tijekom eksperimenta. U redizajnu tribometra, jedan dvoosni senzor opterećenja zamijenjen je s tri troosna senzora sile međusobno razmaknutih za 120° koji su pričvršćeni na gornje zvonu vertikalne osi (Slika 43. – desno), pri čemu je ukupna normalna sila F_z jednaka zbroju pojedinih komponenti normalnih sila na svakom senzoru:

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3}, \quad (22)$$

dok je okretni moment M_z jednak zbroju okretnih momenata kojeg čine pojedine komponente tangencijalnih sila na svakom senzoru na radijusu na kojem su razmješteni senzori:

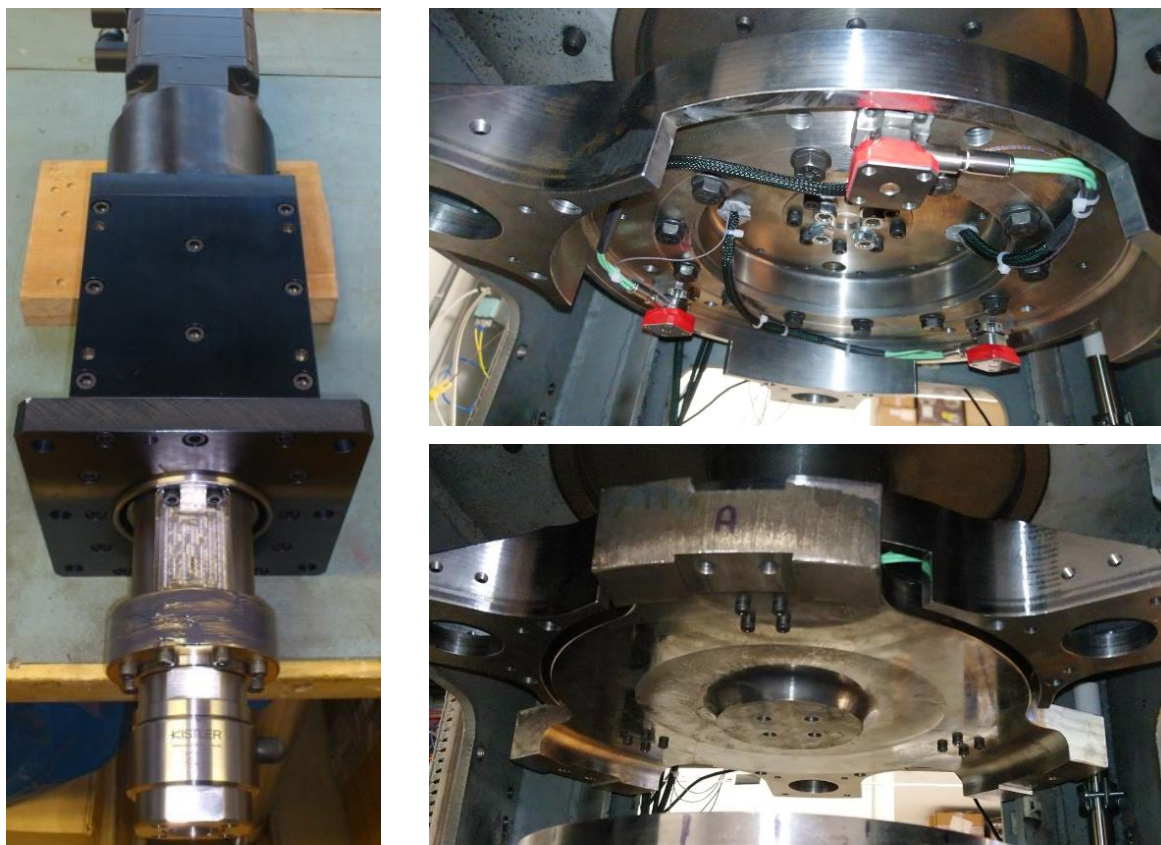
$$M_z = (F_{y1} + F_{y2} + F_{y3}) \cdot 0,125. \quad (23)$$

Budući da u redizajnu tribometra nema paralelnih veza s kućištem tribometra, troosni senzori mjere cjelokupnu normalnu silu, odnosno okretni moment. Tako dobivene vrijednosti

normalne sile i okretnog momenta omogućavaju izravan izračun koeficijenta trenja između reaktivnog diska i tarne ploče:

$$\mu = \frac{M_z}{r_{\text{eff}} F_z}, \quad (24)$$

gdje je $r_{\text{eff}} = 100$ mm efektivni radijus tarne ploče.

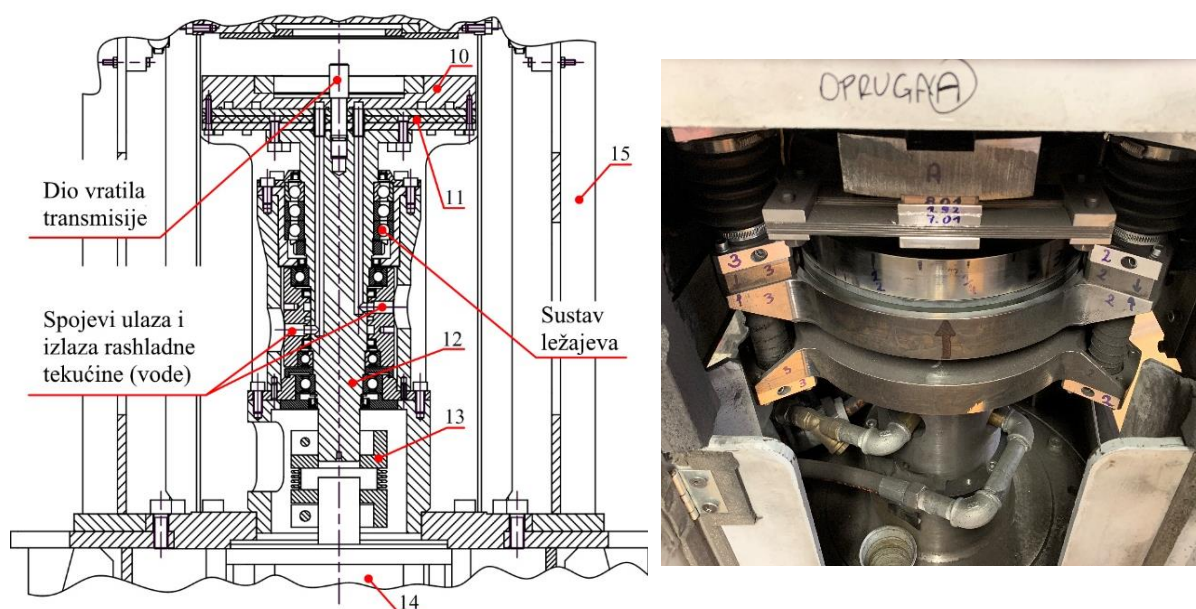


Slika 43. Vertikalna os s inicijalnom izvedbom (lijevo) i s tri troosna senzora (desno) ([32])

Sustav ovjesa (6) vertikalne osi izveden je kao skup tri paketa lisnatih opruga pravokutnog oblika, a osigurava jednolik kontakt između kliznih površina te sudjeluje pri prijenosu okretnog momenta s reaktivnog diska (8) i potisne ploče (7) na troosne senzore opterećenja. Sustav vodenog hlađenja u potisnoj ploči zajedno sa sustavom ovjesa smanjuju prijenos topline na troosne senzore, stoga je u redizajnu tribometra uklonjena ploča za toplinsku izolaciju (5). Tri temperaturna senzora međusobno razmaknuta za 120° oko vertikalne osi ugrađena su u reaktivni disk na srednjem radijusu i dubini od 4mm od kontaktne površine. Dodatni temperaturni senzor ugrađen je na spoj rashladnog diska i cjevovoda radi kontrole temperature spoja.

6.1.2. Rotacijska os

Rotacijska os temelji se na električnom servomotoru (14) velike snage koji pokreće rotacijski disk (10) preko spojke servomotora (13) i glavnog vratila (12). Okretni moment prenosi se s glavnog vratila na tarnu ploču preko dijela ulaznog vratila transmisije. Oslonac normalne sile izveden je kao sustav radijalnih kugličnih ležajeva na glavnom vratilu kako bi se spriječilo opterećenje servomotora. Ležajevi velike krutosti i preciznosti koriste se kako bi se spriječila mogućnost pojave vibracija kod velikih brzina vrtnje ([32]). Sustav vodenog hlađenja u rotacijskom disku (10) i ploča za toplinsku izolaciju (11) sprječavaju prijenos topline s tarne ploče na sustav ležajeva. Budući da rotacijski disk i glavno vratilo rotiraju, ulaz i izlaz rashladne tekućine rotacijske osi spojeni su s glavnim vratilom preko posebnog rotacijskog spoja koji se temelji na dinamičkim brtvama koje za normalan rad trebaju biti mokre ([32]).

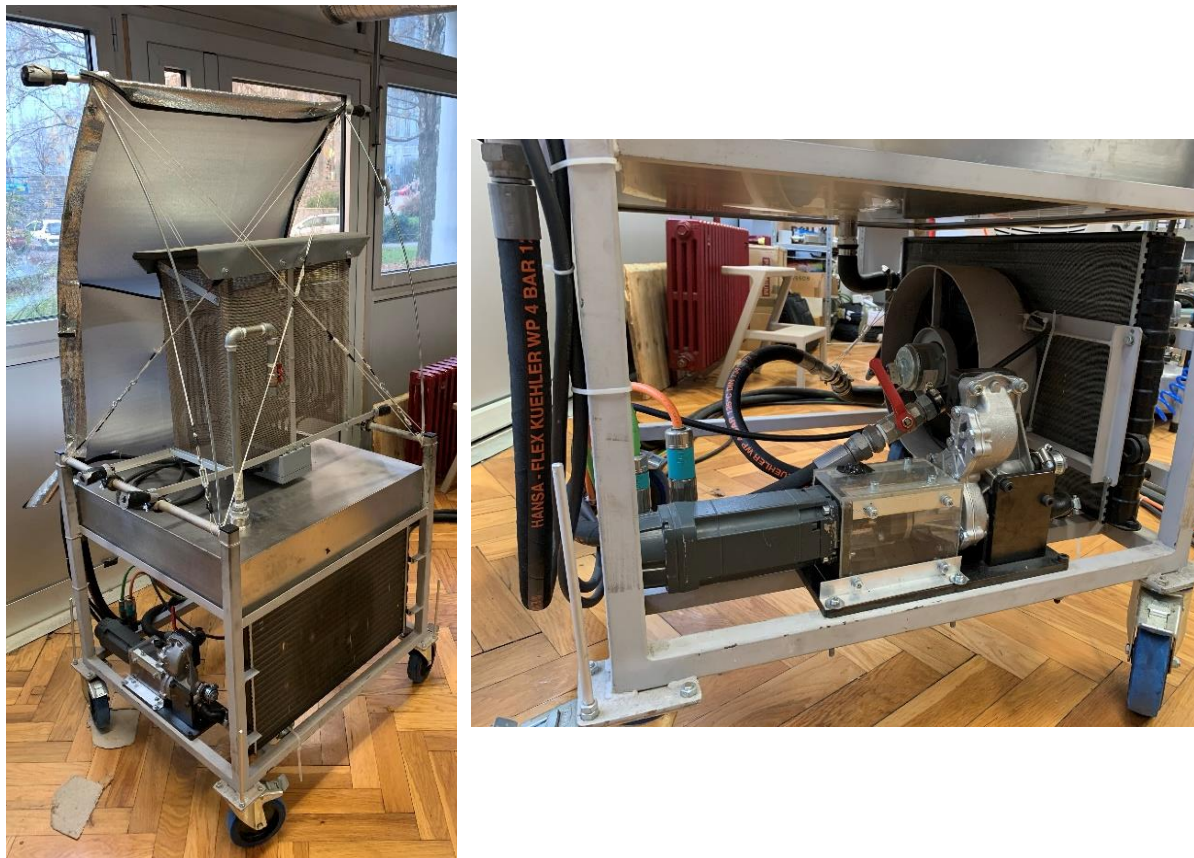


Slika 44. Uzdužni presjek (lijevo) ([32]) i stvarna izvedba (desno) rotacijske osi

6.1.3. Sustav vodenog hlađenja

Za razliku od velikog broja tribometara s uzorkom na disku kod kojih je toplinska energija nastala trenjem mala spram mase diska, te je stoga za postizanje/održavanje ciljane radne temperature potrebno zagrijavanje, kod ovog tribometra situacija je obratna stoga je regulacija ciljane temperature ostvarena hlađenjem umjesto zagrijavanjem. Rashladna tekućina (mješavina vode i etilen-glikola – “antifriz“) odvodi toplinu nastalu trenjem s rotacijskog i nerotacijskog diska prema rashladnoj jedinici (Slika 45.) gdje se pritom zračno hladi. Kako bi

se smanjile temperaturne oscilacije u ulaznom dijelu spremnika rashladne tekućine, a time i promjena snage hlađenja, zagrijana rashladna tekućina se iz tribometra vraća u 50-litarski spremnik rashladne tekućine velike toplinske inercije ([32]).



Slika 45. Rashladna jedinica (lijevo) i pogonski sustav vodenog hlađenja (desno)

Senzori tlaka i temperature postavljeni su na ulaznoj i izlaznoj grani rashladne tekućine kako bi se kontrolirao protok rashladne tekućine s odgovarajućom temperaturom tijekom eksperimenta. Regulacija protoka rashladne tekućine ostvarena je centrifugalnom pumpom promjenjive brzine i uključno-isključnim ventilom postavljenim na ulaznoj grani vertikalne osi. Ovakav položaj ventila omogućuje prekid protoka rashladne tekućine prema vertikalnoj osi (minimalno hlađenje), dok rashladna tekućina i dalje može teći kroz rotacijsku os. Kako prilikom smanjivanja brzine klizanja servomotor rotacijske osi prelazi u generatorski način rada, generirana električna struja troši se na otpornicima postavljenim na rashladnoj jedinici.

6.1.4. Sustav ventilacije

Prilikom ispitivanja na tribometru, uslijed trošenja tarnog materijala nastaju čestice trošenja i neugodni miris koje je potrebno pravilno filtrirati prije ispuštanja u okolinu. Nastale

čestice trošenja i neugodni miris iz tribometrijske komore uklanjaju se industrijskim ventilacijskim sustavom opremljenim odgovarajućim filterima. Sustav ventilacije je izveden na način da je u tribometrijskoj komori tlak niži od tlaka okoline (podtlak) čime se postiže pravilan protok čestica i mirisa, dok operator može proizvoljno regulirati protok zraka ([32]).

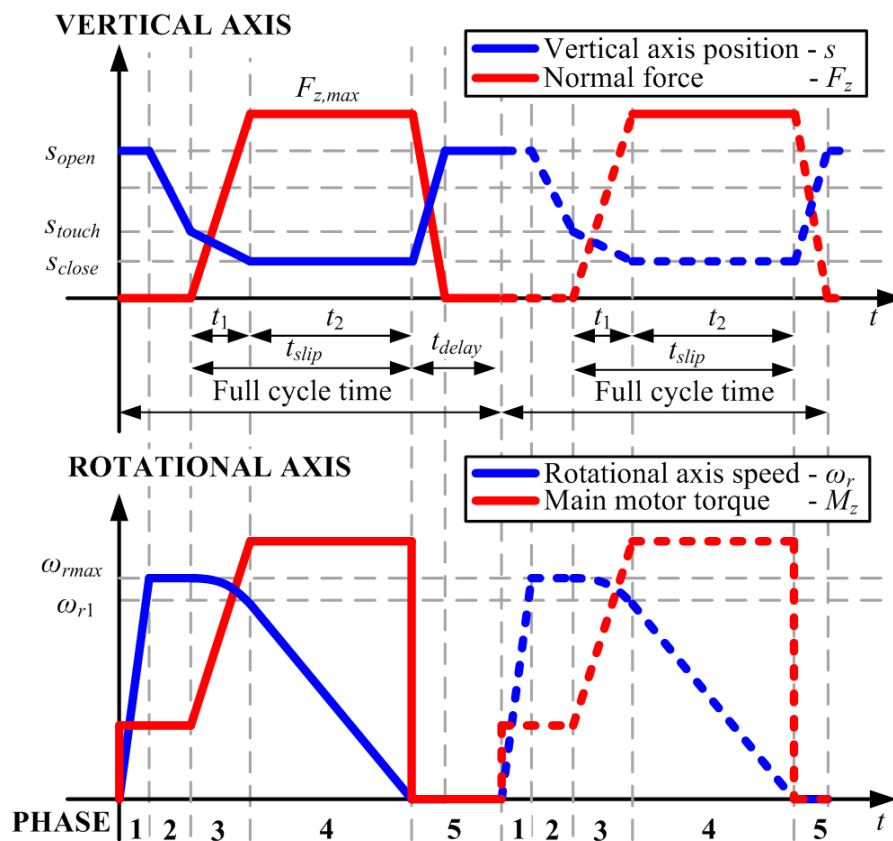


Slika 46. Ventilacijski sustav ispitnog postava

6.2. Princip rada ispitnog postava

Eksperimenti koji se provode na tribometru sastoje se od velikog broja ciklusa koji uključuju određen set radnih parametara. Jedan radni ciklus može se podijeliti u 5 faza ([32]):

- 1) isključeni rotacijski disk ubrzava se do početne/maksimalne brzine vrtnje ω_{rmax} ;
- 2) kontakt između nerotacijskog diska i tarne ploče ostvaruje se prevladavanjem razmaka između diskova;
- 3) normalna sila F_z (ili okretni moment M_z) povećava se od 0 do ciljane vrijednosti unutar vremenskog intervala t_1 (Slika 47.);
- 4) u vremenskom intervalu t_2 normalna sila (ili okretni moment) se održava na ciljanoj vrijednosti sve dok brzina klizanja ne padne na 0;
- 5) ispitni stroj (tribometar) miruje u vremenskom intervalu t_{delay} kako bi se diskovi ohladili te kako bi prosječna temperatura u ciklusu postigla ciljanu vrijednost.



Slika 47. Kvalitativni prikaz faza radnog ciklusa ispitnog stroja ([32])

Za zadanu vrijednost okretnog momenta, ukupno vrijeme klizanja $t_{slip} = t_1 + t_2$ je funkcija početne brzine klizanja i momenta inercije rotacijskih masa. Stoga, za različite kombinacije početne brzine klizanja ω_{rmax} i vremena t_2 tribometar će raditi s promjenjivom vrijednošću momenta inercije, što je općenito moguće ostvariti bilo promjenom stvarne inercije ili dodavanjem/oduzimanjem okretnog momenta na glavnom servomotoru (tj. kroz “električnu” inerciju) ([32]). Kako bi se ostvarila velika fleksibilnost u radu i uklonila potreba za montažom i demontažom dodatne inercijske mase, na ovom postavu primijenjena je “električna” inercija.

Tribometrom upravlja industrijsko računalo Pentium 4 koje dobiva izmjerene podatke s ispitnog postava (odnosno senzora i enkodera), izvršava algoritme te potom šalje upravljačke signale servomotorima za upravljanje okretnim momentom i brzinom vrtnje. Izmjereni podaci s ispitnog postava uključuju: brzine vrtnje i pozicije servomotora vertikalne i rotacijske osi (φ_r , φ_v ; ω_r , ω_v) te pumpe rashladnog sustava (φ_{pmp} ; ω_{pmp}), vrijednosti sila izmjerenih na troosnim sensorima (F_z ; M_z), temperature reaktivnog diska (T_d) i rashladnog diska (T_{cool}), temperature i tlakove na ulaznoj i izlaznoj grani rashladne tekućine (T_{in} , p_{in} ; T_{out} , p_{out}) te vertikalni pomak reaktivnog diska (d) ([32]).

Na početku svakog eksperimenta operator definira set radnih parametara koji uključuje:

- broj radnih ciklusa (N_{cik});
- početna/maksimalna brzina klizanja (ω_{rmax});
- koeficijent električne inercije (K_{el});
- vrijeme zatvaranja reaktivnog diska i tarne ploče (spojke) (t_2);
- okretni moment (M_z);
- početna normalna sila (F_{zR0});
- radna temperatura (T_d);
- minimalno vrijeme pauze (t_{delay});
- maksimalna dopuštena vrijednost normalne sile ($F_{z\text{max}}$).

Regulator brzine klizanja aktivan je u prvoj fazi radnog ciklusa u kojoj se rotacijski disk (tarna ploča) ubrzava do ciljane vrijednosti brzine vrtnje (ω_{rmax}), kao i u drugoj fazi u kojoj se uspostavlja normalna sila (F_z). Kada se uspostavi normalna sila, regulator brzine klizanja se isključuje te regulaciju preuzima regulator normalne sile, odnosno regulator okretnog momenta (M_z). Zadatak regulatora normalne sile, koji je podređen regulatoru okretnog momenta, je osigurati povratnu kontrolu normalnog opterećenja u trećoj i četvrtoj fazi u kojima normalna sila, kao i okretni moment, raste i održava se na ciljanoj vrijednosti. U inicijalnom ciklusu, regulator okretnog momenta uzima početnu vrijednost normalne sile (F_{zR0}) koju definira operator, te je u pravilu potrebno tri do četiri ciklusa kako bi regulator postigao ciljanu vrijednost okretnog momenta. Regulator vremena zatvaranja spojke (t_2) održava ciljanu vrijednost vremena zatvaranja spojke dodavanjem, odnosno oduzimanjem, električne inercije fizičkoj (stvarnoj), te je također potrebno tri do četiri ciklusa kako bi regulator postigao ciljanu vrijednost vremena zatvaranja. Primarna regulacija temperature reaktivnog diska (T_d) ostvarena je promjenom vremena pauze (t_{delay}) između dva uzastopna ciklusa. Da bi se spriječio prekomjerni pad temperature, regulator temperature reaktivnog diska uzima vrijednost minimalnog vremena pauze ukoliko temperatura reaktivnog diska padne ispod 90% ciljane vrijednosti temperature. Kako bi se spriječilo prekomjerno zagrijavanje reaktivnog diska, regulator upravlja uključno-isključnim ventilom i brzinom vrtnje centrifugalne pumpe te omogućava protok rashladne tekućine kroz nerotacijski disk. Za temperaturu rashladne tekućine iznad 45°C aktivira se ventilator hladnjaka na rashladnoj jedinici kako bi se postiglo dodatno hlađenje rashladne tekućine.

Snimljeni podaci tijekom eksperimenata u obliku srednjih ili maksimalnih vrijednosti parametara u jednom radnom ciklusu pohranjuju se na glavno računalo. Kako bi se mogla snimiti velika količina podataka tijekom dugih eksperimenata, dodatno se koristi CAN zapisnik s 8 GB memorije koji omogućava spremanje parametara u vremenskom periodu od 2 ms ([32]). Na glavno računalo spremaju se karakteristične vrijednosti u svakom radnom ciklusu sa svih senzora, dok se na CAN zapisnik spremaju samo ukupna normalna sila, ukupni okretni moment, brzina vrtnje rotacijske osi, srednja temperatura reaktivnog diska te vrijeme ispitivanja i broj snimljenih radnih ciklusa.

6.3. Mjerenje trošenja na temelju razlike u masi

Stupanj trošenja moguće je odrediti prema izrazu (21), pri čemu je razliku volumena (ΔV_w) moguće odrediti iz razlike mase (Δm) koristeći gustoću tarnog materijala (ρ):

$$\Delta V_w = \frac{\Delta m}{\rho}. \quad (25)$$

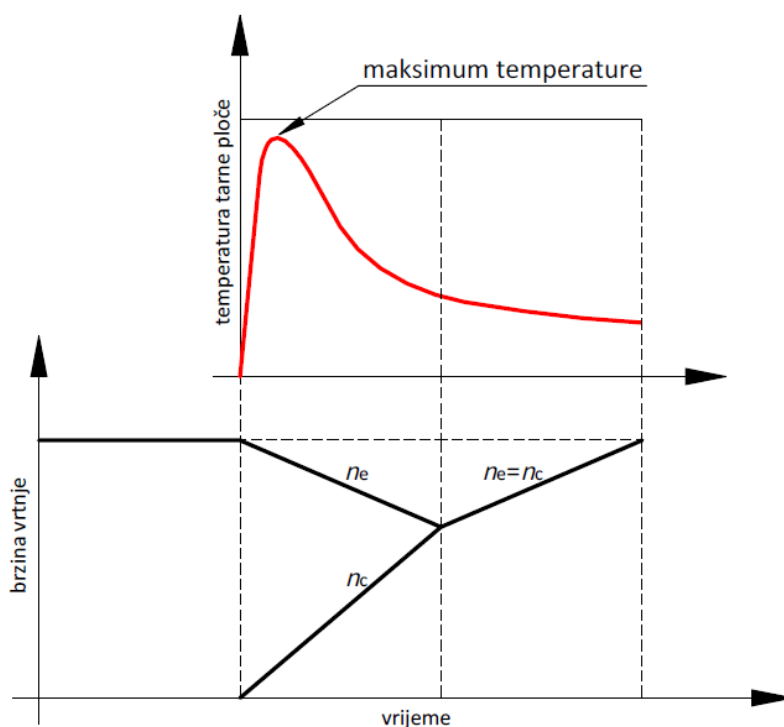
Mjerenje mase tarne ploče provodi se na preciznoj vagi s tolerancijom od 0,01 g neposredno prije i nakon trošenja na tribometru (Slika 48.). Kako bi se uklonio utjecaj nastalih čestica trošenja na mjerenje mase nakon ispitivanja na tribometru, tarna ploča se prije mjerenja ispuhuje (čisti) komprimiranim zrakom.



Slika 48. Precizna vaga za mjerenje razlike mase tarne ploče

7. TROŠENJE TARNOG MATERIJALA SPOJKE U OČEKIVANOM RASPONU RADNIH TEMPERATURA

Dinamičko ponašanje automobilskih suhih tarnih spojki ovisi o karakteristikama tarnog kontakta između tarnih obloga i potisne ploče, odnosno zamašnjaka, tijekom procesa uključivanja spojke. Na Slici 49. prikazana je promjena brzine vrtnje motora (zamašnjaka odnosno potisne ploče) i ulaznog vratila transmisije (tarne ploče), te promjena temperature površine tarne ploče u procesu uključivanja spojke. Vidljivo je kako se najveći porast temperature tarnih obloga javlja prilikom sinkronizacije kada se brzina vrtnje motora n_e smanjuje, a brzina vrtnje ulaznog vratila transmisije n_c povećava (iako može biti i obratno) ([33]).



Slika 49. Promjena brzine vrtnje i temperature u jednom radnom ciklusu

Kako je ranije rečeno, tijekom uključivanja spojke uslijed velikih brzina klizanja i relativno velikog kontaktnog pritiska generirano trenje uzrokuje toplinu, a time i porast temperature, što utječe na ponašanje tarnog materijala i karakteristike trenja. Očekivani raspon radnih temperatura koje nastaju prilikom uključivanja spojke ponajprije ovisi o radnim uvjetima, dok u normalnim radnim uvjetima uglavnom ne prelaze 250°C. Rezultati matematičkih modela pokazuju porast temperature za 30-35°C po uključivanju spojke ([34]).

7.1. Početno sušenje tarnog materijala i proces uhodavanja spojke

Tarne obloge automobilskih suhих tarnih spojki uglavnom su izrađene od organskih materijala koji u dodiru s okolnim zrakom upijaju ili ispuštaju vlagu. Takvo svojstvo naziva se higroskopnost. Hoće li doći do upijanja ili ispuštanja vlage ovisi o vlažnosti samog materijala i njegovoj temperaturi, vlažnosti i temperaturi okolnog zraka, te o vrsti materijala odnosno njegovim biokemijskim svojstvima. Kako bi se isključio utjecaj vlage na ispitivanje trošenja tarnog materijala, svaka nova (nekorištena) tarne ploča se prije ispitivanja na tribometru suši 5 sati (ili više) pri 100°C u električnoj pećnici do stabilizacije razlike mase. Budući da pojedina ispitivanja traju nekoliko dana, pa čak i tjedana, između svakih dugih pauza (novi radni dan, vikend itd.) potrebno je tarne ploču dodatno osušiti 1 sat pri 100°C prije početka ispitivanja.



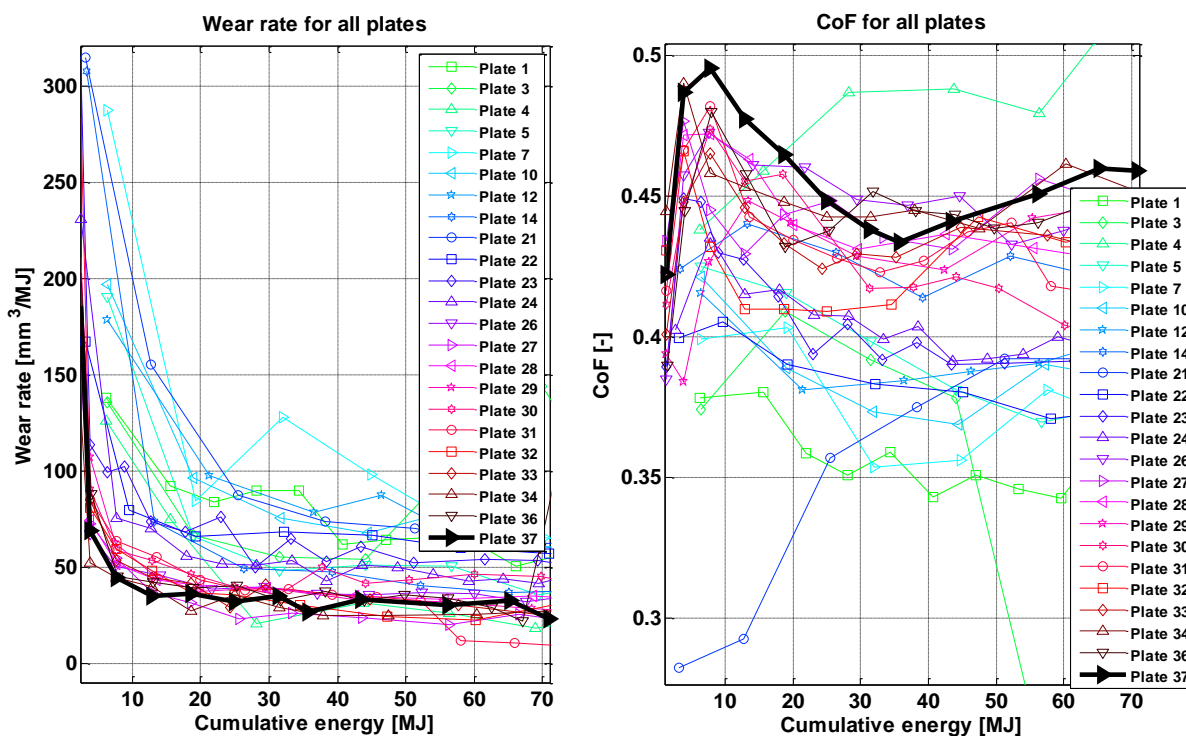
Slika 50. Sušenje tarne ploče u električnoj pećnici

U cilju postizanja stabilnih rezultata trošenja i koeficijenta trenja (COF) tarnog materijala, provodi se proces uhodavanja spojke pri čemu je uočeno kako se za veliki broj različitih tarnih ploča stabilizacija postiže između 30 i 60 MJ kumulativne energije. Određena je kombinacija radnih parametara kojom se postiže najveća disipirana energija u najkraćem vremenskom periodu kako bi se smanjilo potrebno vrijeme ispitivanja, a da pri tom odabrani radni parametri ne budu u području u kojem se može očekivati trajna promjena tarnog materijala. Radna temperatura od 170°C izabrana je kao najveća temperatura koja zahtjeva manje hlađenja, a time i skraćujući vrijeme pauze između dva uzastopna radna ciklusa. Kombinacija radnih parametara za proces uhodavanja prikazana je u Tablici 2.

Tablica 2. Set radnih parametara procesa uhodavanja spojke

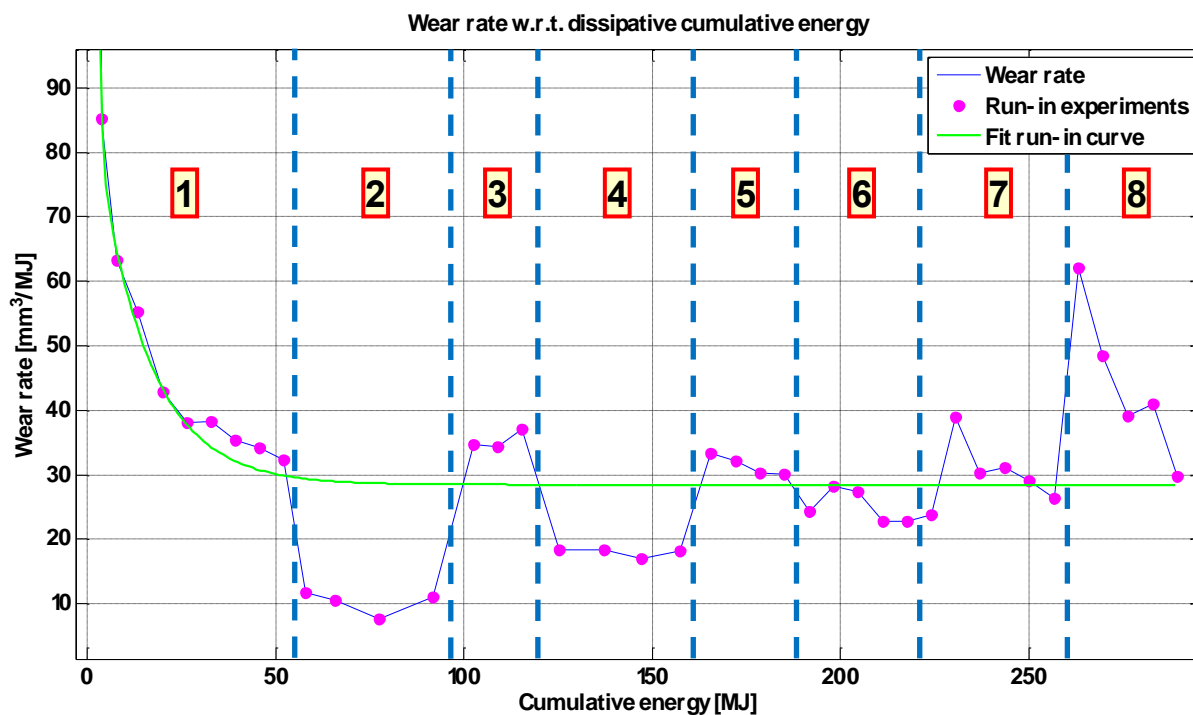
Broj radnih ciklusa	N_{cik}	250
Početna/maksimalna brzina klizanja	ω_{rmax}	2800 min ⁻¹
Koeficijent električne inercije	K_{el}	0,5
Vrijeme zatvaranja spojke	t_2	3,4 s
Okretni moment	M_z	50 Nm
Početna normalna sila	F_{zR0}	1200 N
Radna temperatura	T_d	170 °C
Minimalno vrijeme pauze	t_{delay}	6 s
Maksimalna dopuštena normalna sila	F_{zmax}	2000 N

Stabilizacija stupnja trošenja i koeficijenta trenja za različite tarne ploče prikazana je na Slici 51. Vidljivo je kako većina tarnih ploča stabilizaciju stupnja trošenja postiže pri oko 40 MJ kumulativne energije, dok koeficijent trenja ima varijacije od otprilike 0,03. Također je vidljivo kako stupanj trošenja i koeficijent trenja prate ranije objašnjen trend procesa uhodavanja, odnosno povećan stupanj trošenja i koeficijent trenja u fazi formiranja tarnog sloja.

**Slika 51. Stabilizacija stupnja trošenja i koeficijenta trenja za različite tarne ploče**

7.2. Utjecaj vlage na dinamiku trošenja tarne ploče #31

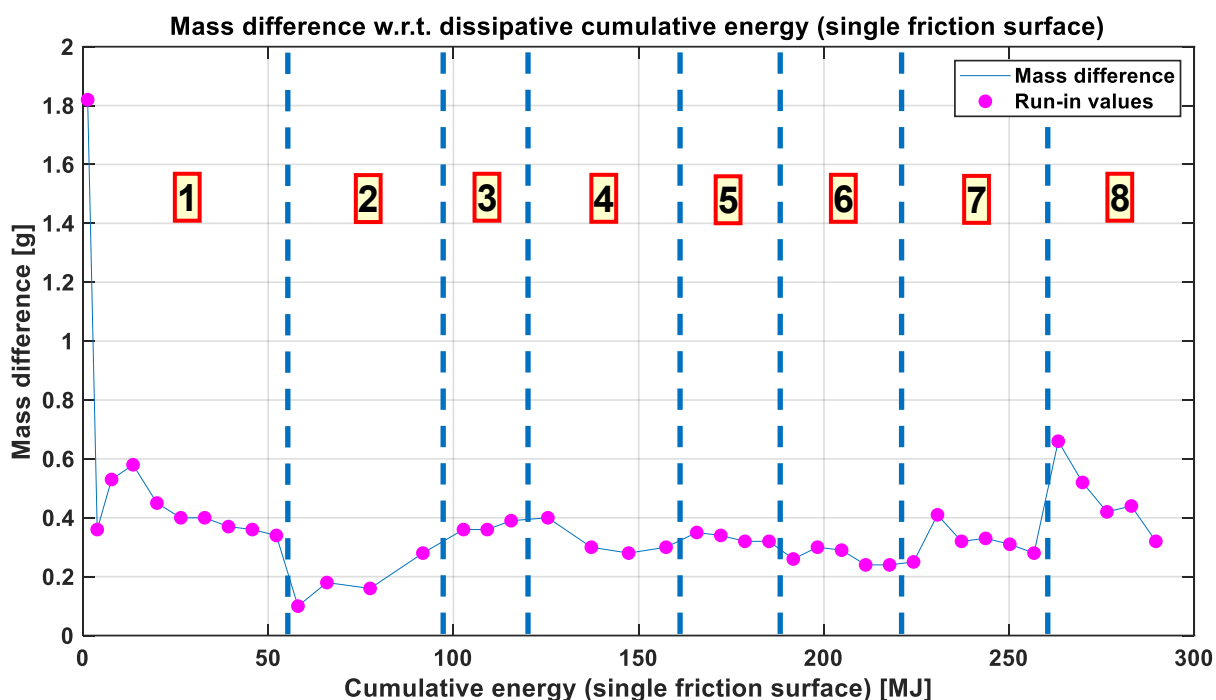
Ispitivanje trošenja tarne ploče #31 provedeno je u cilju analize dinamike trošenja tarnog materijala suhe spojke u procesu uhodavanja spojke. Nakon provedenog početnog procesa uhodavanja s prethodno definiranim setom radnih parametara (Tablica 2.), ispitivanje trošenja tarne ploče #31 nastavljeno je sa setom radnih parametara za proces uhodavanja pri čemu je u svakom setu eksperimenata mijenjan samo jedan radni parametar u odnosu na set početnih parametara. Mijenjani radni parametru su: radna temperatura T_d , početna brzina klizanja ω_{\max} i okretni moment M_z , dok su ostali radni parametri ostali nepromijenjeni (u Tablici 3., crveno označeni parametri razlikuju se od početnih). Između svakog seta eksperimenata s jednim promijenjenim radnim parametrom, proveden je proces uhodavanja spojke sa početnim radnim parametrima.



Slika 52. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #31

Tablica 3. Promijenjeni radni parametri procesa uhodavanja

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
T_d [°C]	170	170	170	170	170	120	170	240
ω_{\max} [min ⁻¹]	2800	1200	2800	2800	2800	2800	2800	2800
M_z [Nm]	50	50	50	25	50	50	50	50



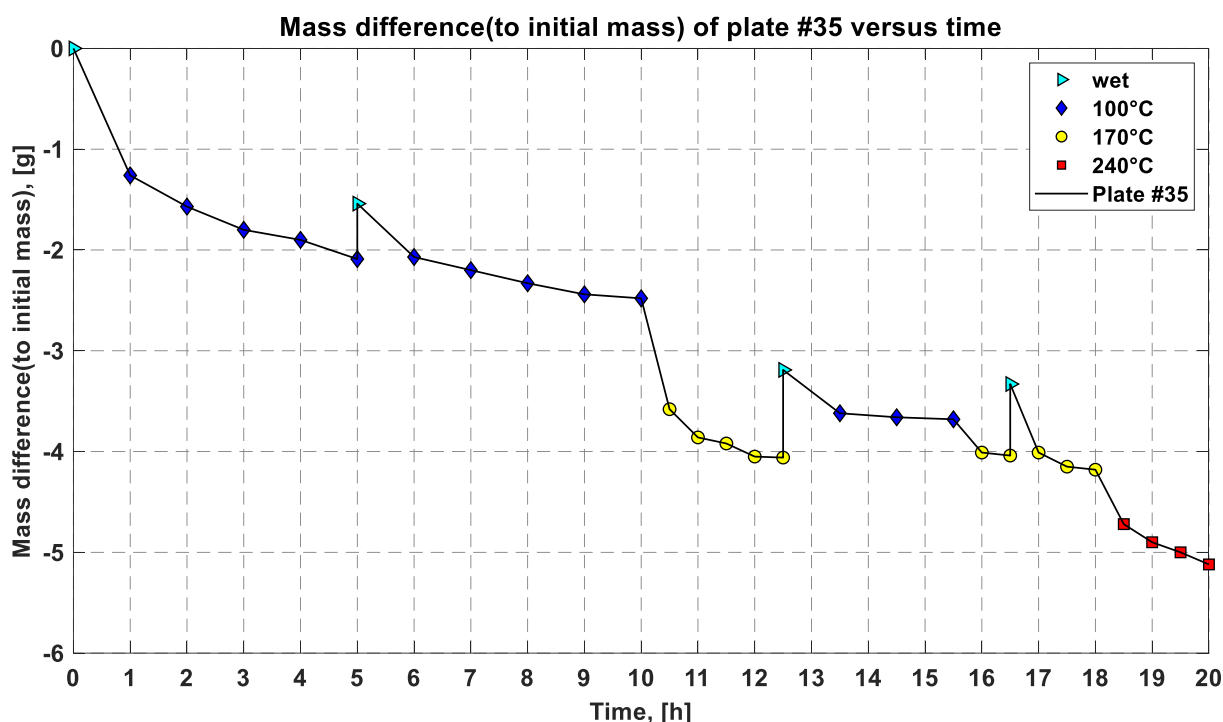
Slika 53. Ovisnost relativne razlike mase o kumulativnoj energiji za taru ploču #31

Na Slici 52. prikazana je ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za taru ploču #31, dok je na Slici 53. prikazana ovisnost relativne razlike mase o kumulativnoj energiji za istu taru ploču, pri čemu su plavim crtkanim linijama označena različita područja (set eksperimenata) u kojima su sve radne točke snimane s istim radnim parametrima prikazanim u Tablici 3. Vidljivo je kako smanjenje početne brzine klizanja (područje 2) i okretnog momenta (područje 4) očekivano utječe na smanjenje stupnja trošenja pri čemu je stupanj trošenja stabilan nakon promjene radnog parametra. S druge strane, uočeno je kako svaka promjena razine temperature (područje 6, 7 i 8) rezultira prolaznom promjenom (dinamikom) stupnja trošenja pri čemu promjena nalikuje krivulji procesa uhodavanja spojke. Prolazna promjena stupnja trošenja može biti fizikalno realna, može biti posljedica promjene mase zbog promjene sadržaja vlage u tarnom materijalu, ili pak kombinacija navedenog. Ako se pretpostavi da je dio prolazne promjene (dinamike) stupnja trošenja uzrokovan nakupljanjem, odnosno otpuštanjem vlage u materijalu tarnih obloga uslijed promjene razine temperature, tada bi se prijelaz s više na nižu temperaturu (sa 170°C na 120°C) mogao objasniti povećanjem udjela vlage u tarnom materijalu što za posljedicu ima manju razliku mase, a samim time i niži stupanj trošenja. Obratno, prijelaz s niže na višu temperaturu (sa 120°C na 170°C, odnosno sa 170°C na 240°C) može se objasniti smanjenjem udjela vlage u tarnom materijalu zbog isušivanja što za posljedicu ima veću razliku mase, a u konačnici i veći stupanj trošenja tarnog materijala.

Kako bi se potvrdila dana hipoteza da je dio prolazne promjene, odnosno dinamike, stupnja trošenja povezan s promjenom sadržaja vlage u tarnom materijalu, a u cilju karakterizacije utjecaja vlage na promjenu stupnja trošenja pri promjeni razine temperature, potrebno je provesti kompenzaciju razlike mase, a analogno time i stupnja trošenja, tarne ploče #31 na način da se provede sušenje iste te tarne ploče u električnoj pećnici kako bi se simulirala promjena sadržaja vlage u tarnom materijalu pri promjeni razine temperature koja je uočena pri ispitivanju trošenja na tribometru. U konačnici, cilj kompenzacije je postići ujednačen stupanj trošenja bez prolazne promjene istog.

7.3. Gubitak vlage uslijed sušenja na visokim temperaturama

Da bi se mogla potvrditi prethodno objašnjena pretpostavka povećanog stupnja trošenja tarne ploče #31 zbog gubitka vlage uslijed sušenja pri prijelazu s niže na više temperature, najprije je potrebno pogledati utjecaj temperatura većih od 100°C na gubitak vlage u tarnom materijalu. Za provedbu ispitivanja sušenja u električnoj pećnici upotrijebljena je nova (nekorištena) tarna ploča #35.



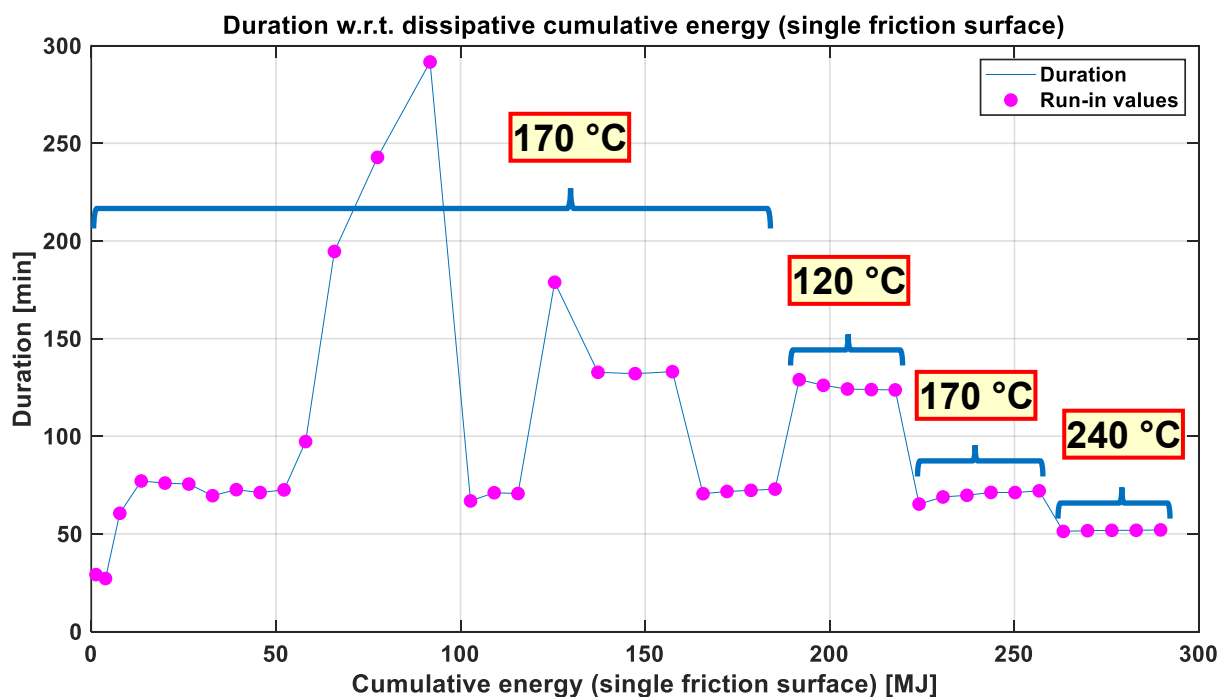
Slika 54. Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #35 uslijed sušenja

Potrebno je napomenuti kako se pretpostavlja da je promjena mase tarne ploče povezana isključivo s promjenom mase tarnih obloga, dok masa metalnih dijelova tarne ploče ostaje

nepromijenjena tijekom ispitivanja. Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #35 uslijed sušenja na temperaturama većim od 100°C prikazana je na Slici 54. Tarna ploča #35 sušena je u električnoj pećnici na temperaturama od 100°C, 170°C i 240°C, pri čemu je nakon postignute stabilizacije razlike mase na jednoj radnoj temperaturi uslijedio porast na višu temperaturu sve dok se opet nije postigla stabilizacija razlike mase na toj novoj temperaturi. Vidljivo je kako se nakon određenog vremena postigne stabilizacija razlike mase na jednoj radnoj temperaturi, dok prelaskom na veću radnu temperaturu razlika mase ponovno poraste. To upućuje kako niske radne temperature (100°C) nisu dovoljne za gubitak vlage (isušivanje) na svim dubinskim slojevima tarnog materijala, te kako svaki prijelaz na veću radnu temperaturu pokazuje dodatni porast razlike mase budući da dolazi do gubitka vlage na sve dubljim slojevima tarnog materijala. Prilikom snimanja zadnje radne točke na 240°C zabilježen je neugodan miris što upućuje na termalnu degradaciju tarnog materijala ili rastapanje plastičnog kliznog ležaja ploče.

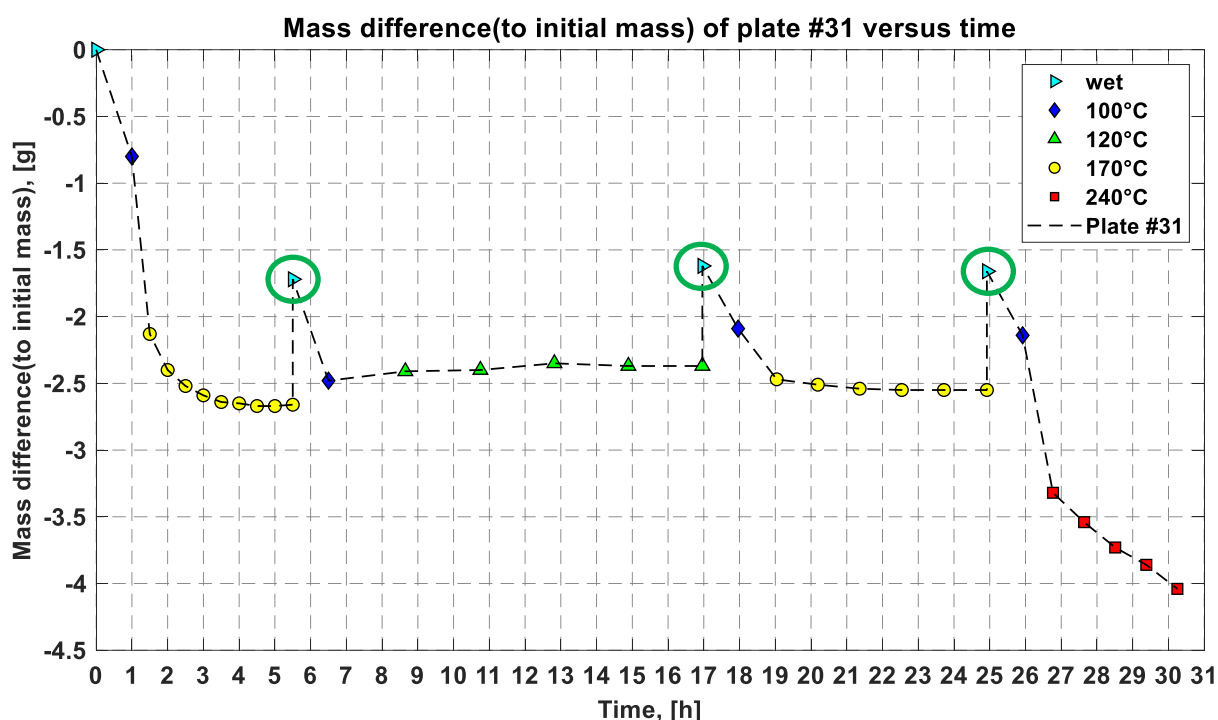
7.4. Sušenje tarne ploče #31 na različitim temperaturama

Nakon što je provedeno sušenje tarne ploče #35 u cilju analize gubitka vlage, a time i mase tarnog materijala pri visokim temperaturama, zaključeno je kako prijelaz s niske na visoke temperature može uzrokovati prolaznu promjenu (povećanje) stupnja trošenja uočenu kod tarne ploče #31 budući da na većim radnim temperaturama dolazi do dodatnog gubitka vlage.



Slika 55. Raspored sušenja tarne ploče #31 u električnoj pećnici

Budući da se prolazna promjena stupnja trošenja očituje samo u područjima u kojima je mijenjana radna temperatura (Slika 52. – područje 6, 7 i 8), sušenje tarne ploče #31 provedeno je u električnoj pećnici prema istom rasporedu i radnim parametrima kao i ispitivanje trošenja te tarne ploče provedeno na tribometru. Raspored sušenja (vrijeme i temperatura) tarne ploče #31 u električnoj pećnici prikazan je na Slici 55. Budući da tarna ploča #31 nije korištena otprilike 3 mjeseca, najprije je sušena na 170°C do stabilizacije razlike mase koja predstavlja ranije snimljene eksperimente trošenja provedene na 170°C. Nakon postignute stabilizacije razlike mase, tarna ploča sušena je na 120°C što predstavlja prijelaz s više na nižu temperaturu, te je potom sušena na 170°C i 240°C što predstavlja prijelaz s niže na višu temperaturu.



Slika 56. Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #31 uslijed sušenja

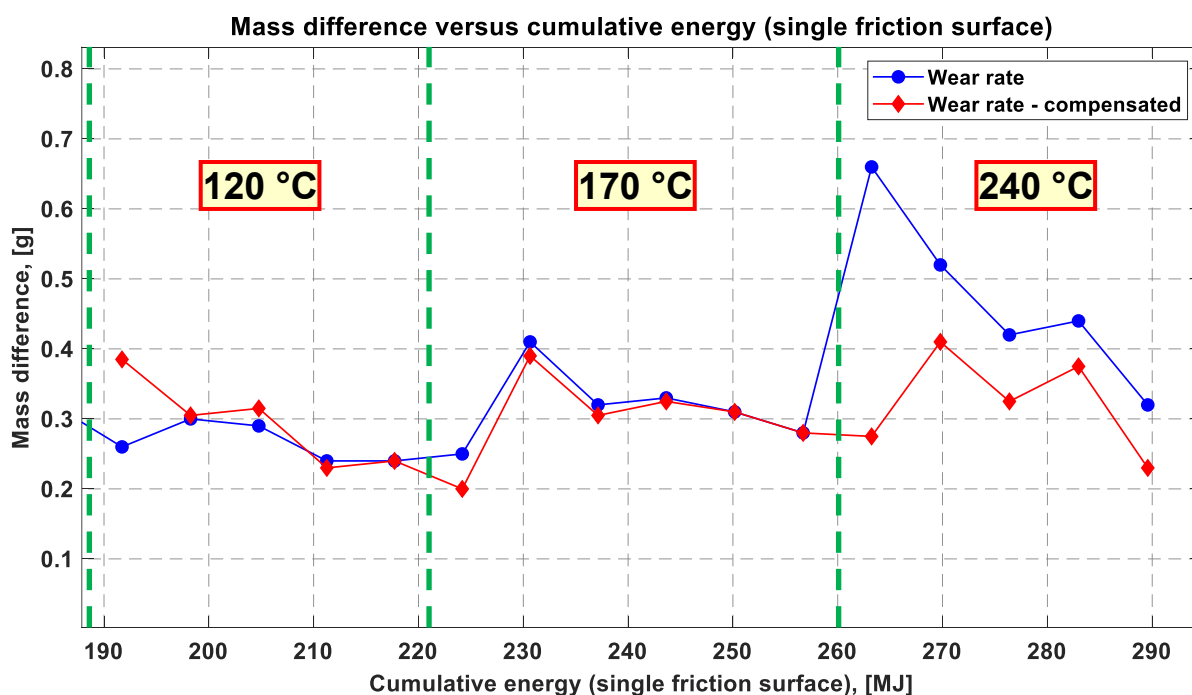
Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #31 uslijed sušenja u električnoj pećnici prikazana na Slici 56. pokazuje očekivane rezultate. Prijelaz s više na nižu temperaturu (sa 170°C na 120°C) nakon postignute stabilizacije pokazuje na povećanje udjela vlage u tarnom materijalu budući da je iznos apsolutne razlike mase manji nego iznos pri 170°C, odnosno masa tarne ploče (tarnog materijala) prilikom sušenja na 120°C je veća nego prilikom sušenja na 170°C. Prelaskom s niže na višu temperaturu (sa 120°C na 170°C) udio vlage u tarnom materijalu smanjuje se uslijed sušenja. Daljnji prijelaz na višu temperaturu (sa 170°C na 240°C) pokazuje drastično smanjenje udjela vlage u tarnom materijalu, a samim time i mase tarne ploče,

budući da veća temperatura omogućava isušivanje vlage na dubljim slojevima u tarnom materijalu. Mjerne točke označene zelenim kružićem predstavljaju apsolutnu razliku mase prije početka procesa sušenja, odnosno nakon pauze (novi radni dan). Moguće je primijetiti približno jednak porast mase tarne ploče uslijed apsorpcije (nakupljanja) vlage u tarnom materijalu nakon pauze od otprilike 16 sati.

7.5. Kompenzacija trošenja tarne ploče #31

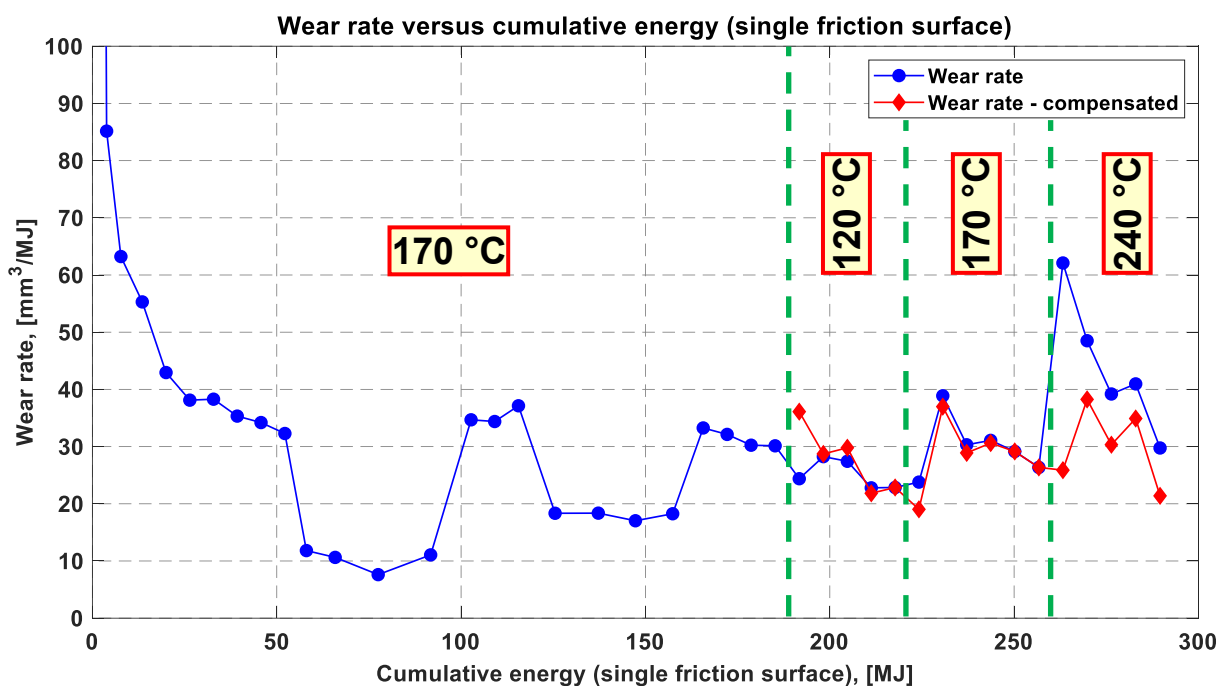
Kako bi se mogla potvrditi pretpostavka povezanosti prolazne promjene stupnja trošenja s promjenom udjela vlage u tarnom materijalu, potrebno je razliku mase tarne ploče #31 dobivenu ispitivanjem trošenja na tribometru Δm_{exp} kompenzirati s razlikom mase iste te tarne ploče dobivenom sušenjem u električnoj pećnici Δm_{dr} . Prilikom sušenja tarne ploče u električnoj pećnici obje tarne površine izložene su istoj temperaturi, za razliku od tribometra gdje je jedna tarna površina izložena radnoj temperaturi (tarna površina okrenuta prema vertikalnoj osi), dok je druga tarna površina prislonjena na rotacijski stol približno konstantne temperature. Pretpostavlja se kako na tribometru ne dolazi do sušenja tarne površine prislonjene na rotacijski stol te da je masa tarne obloge koja se ne troši stabilna, stoga se za kompenzaciju razlike mase uzima polovina razlike mase tarne ploče dobivena sušenjem u električnoj pećnici:

$$\Delta m_{\text{comp}} = \Delta m_{\text{exp}} - \Delta m_{\text{dr}} / 2. \quad (26)$$



Slika 57. Kompenzirani dio razlike mase tarne ploče #31

Na Slici 57. prikazan je kompenzirani dio razlike mase tarne ploče #31 za područja u kojima je mijenjana radna temperatura. Vidljivo je kako nakon provedene kompenzacije prva radna točka nakon promjene temperature pokazuje povećanje razlike mase uslijed prelaska na nižu temperaturu, odnosno smanjenje razlike mase uslijed prelaska na višu temperaturu.



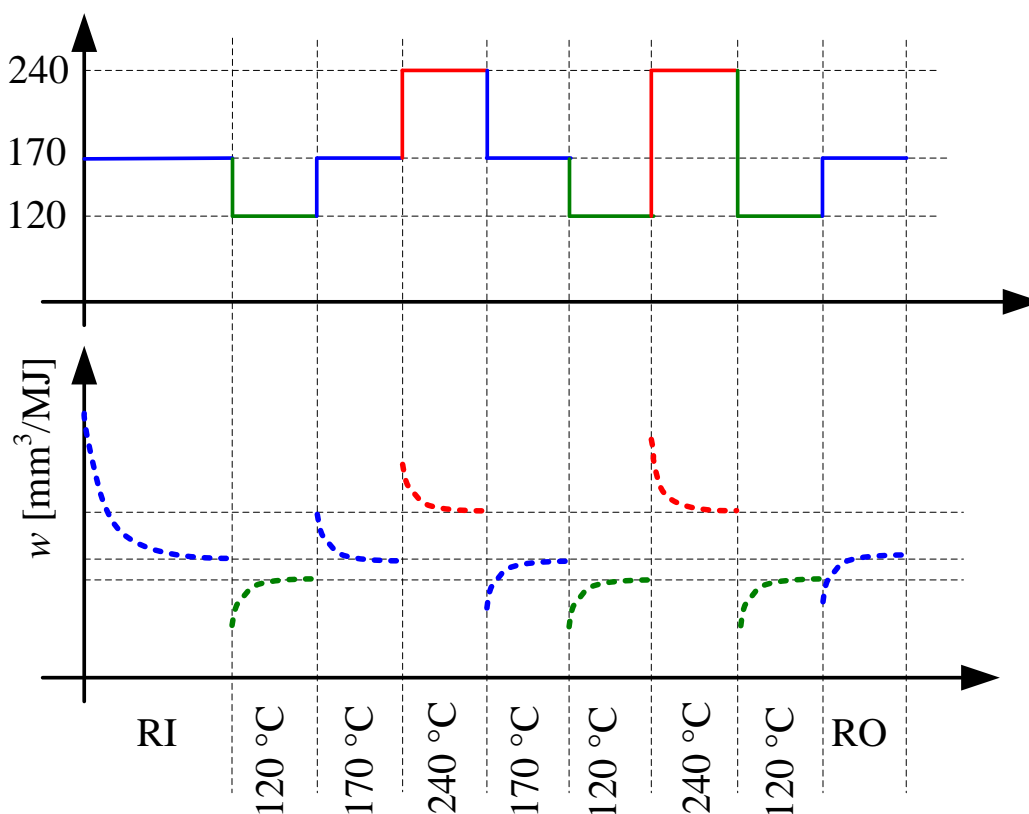
Slika 58. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #31 nakon provedene kompenzacije trošenja

Na Slici 58. prikazana je ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #31 nakon provedene kompenzacije trošenja. Moguće je primijetiti kako prve radne točke pri prijelazu s niže na višu temperaturu, odnosno na 170°C i 240°C, pokazuju manji stupanj trošenja nego ostale točke pri tim temperaturama. Budući da su te radne točke snimljene na početku novog radnog dana, moguće je da niska temperatura tribometra utječe na niže vrijednosti stupnja trošenja. Dobiveni rezultati podržavaju zaključak da se prolazna promjena (dinamika) stupnja trošenja nakon promjene razine temperature može, barem djelomično, objasniti promjenom sadržaja vlage u tarnom materijalu. Povećanje razlike mase, a time i stupnja trošenja, uslijed prijelaza na više temperature može se djelomično povezati s gubitkom vlage uslijed sušenja tarnog materijala, dok se ostatak povećanog trošenja (razlike mase) može povezati s utjecajem visokih temperatura na svojstva tarnog materijala. Međutim, nije u potpunosti sigurno je li provedena kompenzacija tarne ploče #31 obuhvatila sve utjecajne parametre za pravilnu usporedbu kao što su trajanje dugih pauza između snimanja radnih točaka

(novi radni dan, vikend itd.), termalna degradacija tarnog materijala (isparavanje smola i ljepila uslijed visokih temperatura), radna temperatura ispitnog postava, odnosno tribometra, i slično.

7.6. Detaljna karakterizacija utjecaja vlage na trošenje tarnog materijala

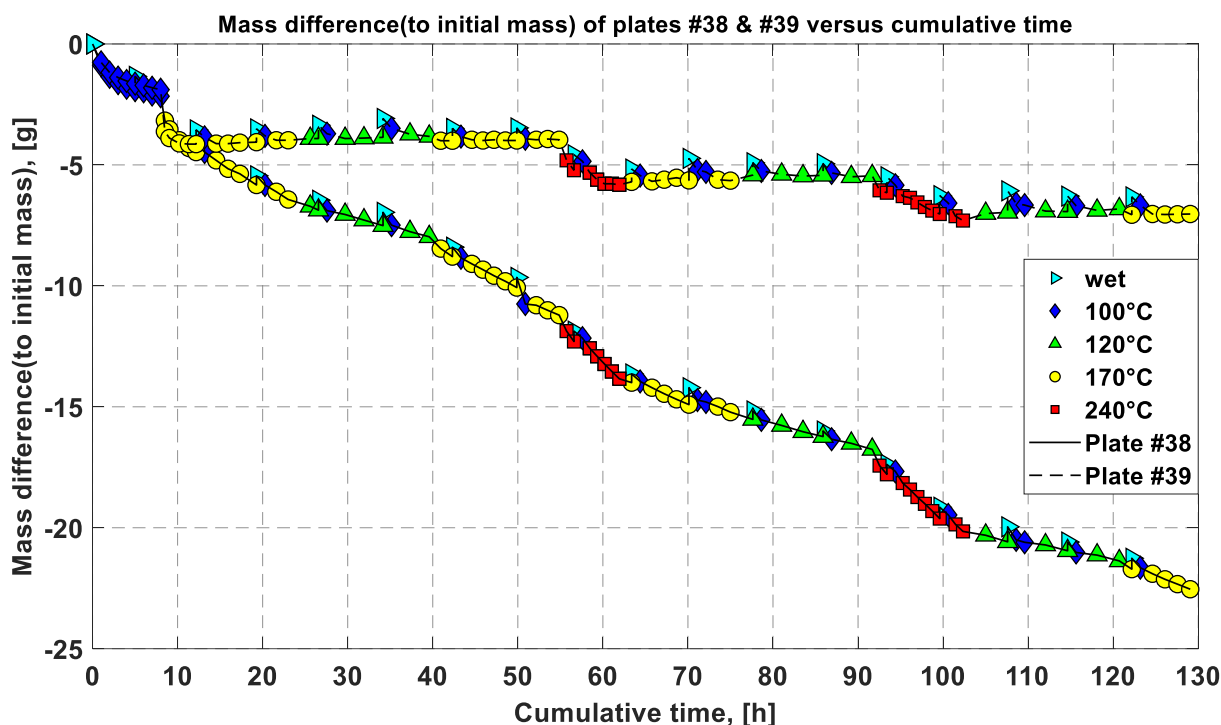
Kako bi se provela detaljna karakterizacija utjecaja vlage na trošenje tarnog materijala, odnosno kompenzacija, upotrijebljene su dvije nove (nekorištene) tarne ploče koje su ispitivane usporedno pri jednakim uvjetima i jednakom trajanju dnevnih i vikend pauza. Jedna tarna ploča, #38, ispitivana je na tribometru pri čemu je ta tarna ploča izložena trošenju i zagrijavanju (sušenju). Usporedno, druga tarna ploča, #39, ispitivana je sušenjem u električnoj pećnici pri istim temperaturama i trajanju kao i tarna ploča #38 na tribometru, pri čemu je tarna ploča #39 izložena samo zagrijavanju (sušenju). Promjena radne temperature je stepeničasta i to prema sljedećem rasporedu prikazanom na Slici 59.



Slika 59. Raspored promjene radne temperature (gore) s očekivanom promjenom stupnja trošenja (dolje)

Početno sušenje provedeno je za obje tarne ploče pri 100°C kroz 8 sati. Proces uhodavanja tarne ploče #38 proveden je s ranije definiranim setom radnih parametara (Tablica 2.), dok je tarna ploča #39 za to vrijeme sušena u električnoj pećnici pri 170°C. Nakon

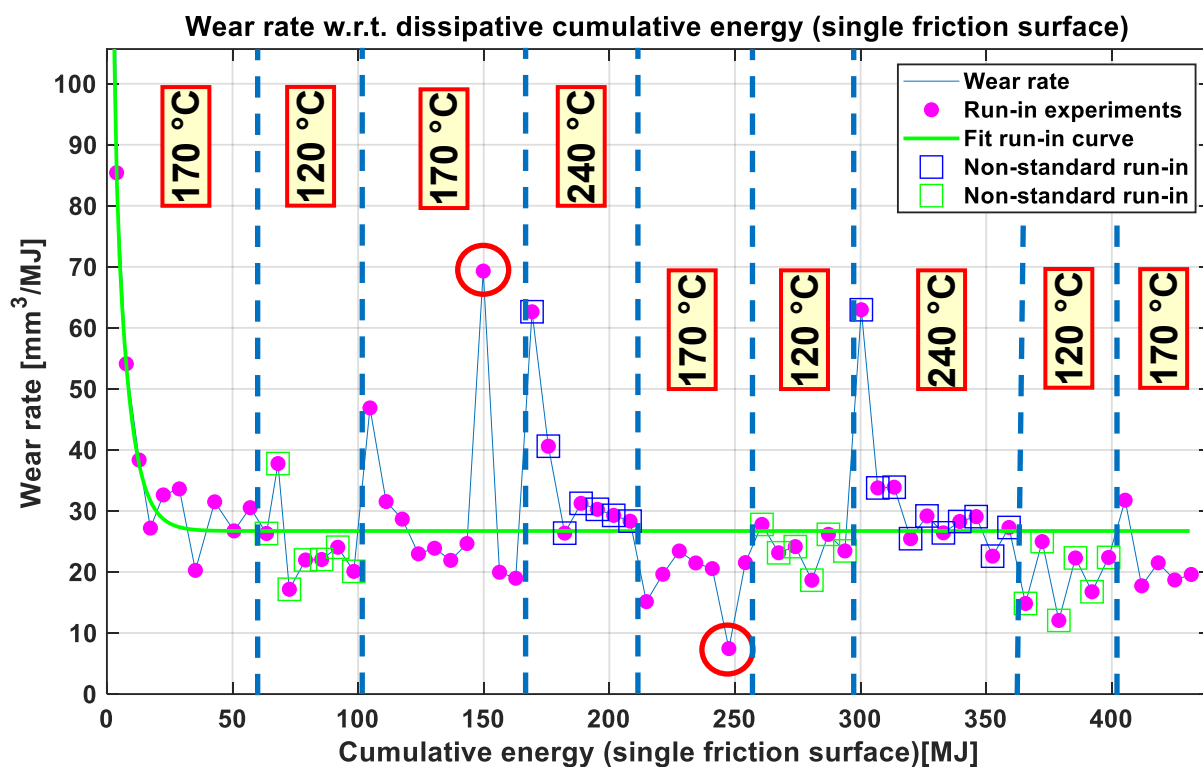
završenog procesa uhadavanja, radna temperatura je najprije postepeno povećavana do 240°C, te zatim postepeno smanjivana do 120°C, dok je nakon toga radna temperatura izravno povećana sa 120°C na 240°C te potom izravno smanjena na 120°C (Slika 59.). Radna temperatura je promijenjena svaki put nakon postignute stabilizacije stupnja trošenja na trenutnoj radnoj temperaturi. Kako bi se spriječio utjecaj hladnog tribometra na rezultate, radna temperatura je mijenjana na polovini radnog dana, za razliku od ispitivanja tarne ploče #31 gdje je radna temperatura mijenjana na početku novog radnog dana. Na kraju je ponovno proveden proces uhadavanja spojke tzv. *run-out*, kako bi se potvrdilo da nije došlo do trajne štete u taranom materijalu.



Slika 60. Promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #38 i #39

Na Slici 60. prikazana je promjena apsolutne razlike mase tarne ploče #38 koja je ispitivana na tribometru i tarne ploče #39 koja je usporedno sušena u električnoj pećnici pri istim temperaturama i trajanju kao i tarna ploča #38. Gubitak mase u procesu početnog sušenja na 100°C je približno jednak za obje tarne ploče. U procesu uhadavanja spojke, apsolutna razlika mase tarne ploče #38 je veća budući da je tarna ploča istovremena izložena trošenju i sušenju, za razliku od tarne ploče #39 koja je izložena samo sušenju. Vidljivo je kako tarna ploča #39 postiže stabilizaciju apsolutne razlike mase sve do 240°C, uz tek neznatno smanjenje apsolutne razlike mase, odnosno povećanje mase tarne ploče, pri prijelazu sa 170°C na 120°C

što se može objasniti nakupljanjem sadržaja vlage u tarnom materijalu uslijed prelaska s više na nižu temperaturu. Prijelaz sa 170°C na 240°C pokazuje povećanje apsolutne razlike mase, međutim, nakon smanjenja radne temperature, odnosno pri prijelazu s 240°C na 170°C i zatim na 120°C, ponovno se postiže stabilizacija apsolutne razlike mase tarne ploče #39 sve do sljedećeg prijelaza na 240°C pri čemu ponovno dolazi do povećanja razlike mase. S druge strane, vidljivo je kako porast apsolutne razlike mase tarne ploče #38 prati približno linearan trend s povećanjem kumulativne energije, odnosno vremena. Može se zaključiti kako dugotrajno sušenje na temperaturama manjim ili jednakim 170°C ne uzrokuje dodatno sušenje, a samim time i gubitak mase tarne ploče, već se najveći gubitak mase postiže pri prijelazu na više temperature. Budući da smanjenjem radne temperature nakon prethodno provedenog sušenja na 240°C dolazi do tek neznatnog smanjenja apsolutne razlike mase što ukazuje na vrlo malo nakupljanje sadržaja vlage u tarnom materijalu uslijed prelaska s više na niže temperature, to ukazuje kako sušenjem pri 240°C osim gubitka sadržaja vlage dolazi i do gubitka (hlapljenja) pojedinih komponenata tarnih obloga, primjerice smola ili ljepila. Neugodan miris koji je zamijećen tijekom sušenja u električnoj pećnici pri 240°C potvrđuje prethodnu tvrdnju, odnosno prilikom sušenja na 240°C dolazi do nepovratnog gubitka komponenti tarnih obloga.

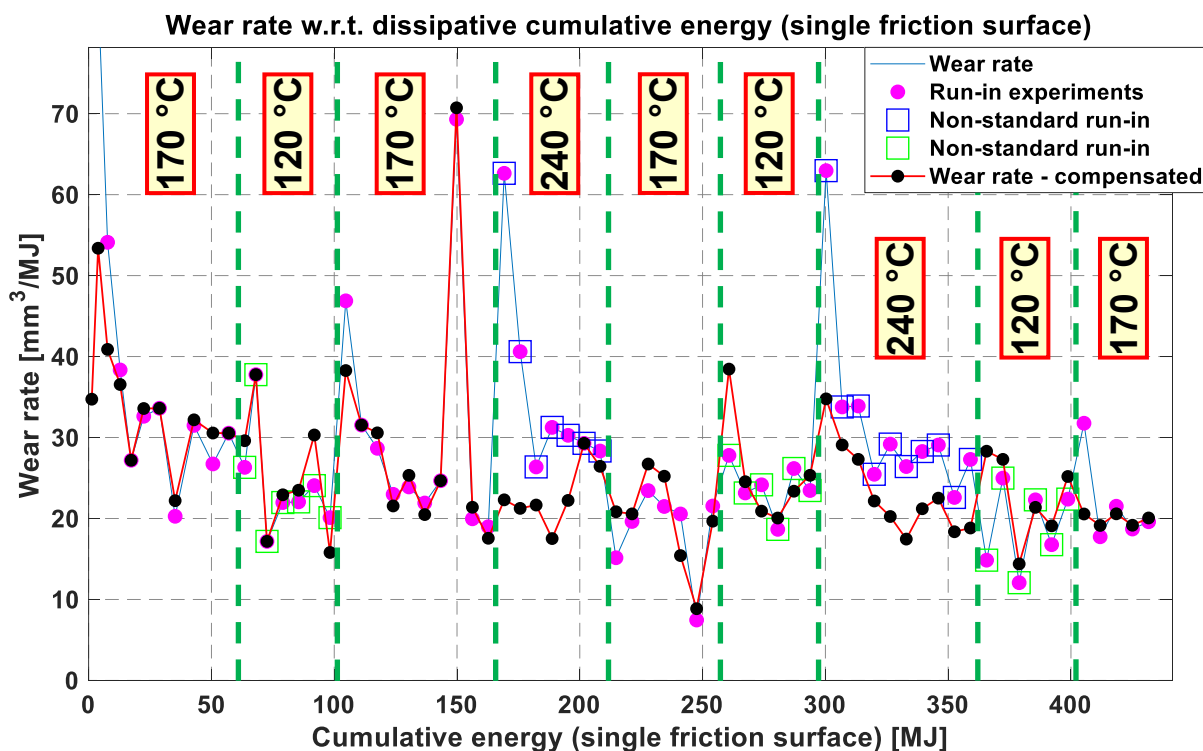


Slika 61. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #38

Na Slici 61. prikazana je ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #38 ispitivanu na tribometru. Slično kao i kod tarne ploče #31, vidljivo je kako je i kod ove tarne ploče prisutna prolazna promjena, odnosno dinamika, stupnja trošenja sa promjenom razine temperature. Prolazna promjena stupnja trošenja ponaša se u skladu s očekivanom promjenom pri promjeni radne temperature prikazanom na Slici 59. – dolje. Međutim, moguće je primijetiti povećanje, odnosno smanjenje, stupnja trošenja bez promjene temperature (označeno crvenim kružićem) pri čemu su te radne točke snimljene na početku novog radnog dana nakon pauze.

Nakon provedenog ispitivanja trošenja tarne ploče #38 na tribometru i sušenja tarne ploče #39 u električnoj pećnici, slično kao i kod tarne ploče #31, provedena je kompenzacija razlike mase na način da je razlika mase tarne ploče #38 Δm_{exp} dobivena ispitivanjem na tribometru kompenzirana razlikom mase tarne ploče #39 Δm_{dr} dobivenom sušenjem u električnoj pećnici, pri čemu je kao i ranije razmatrana samo jedna polovina ukupne razlike mase:

$$\Delta m_{\text{comp}} = \Delta m_{\text{exp}} - \Delta m_{\text{dr}} / 2. \quad (27)$$



Slika 62. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #38 nakon provedene kompenzacije trošenja

Na Slici 62. prikazana je ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #38 nakon provedene kompenzacije razlike mase, odnosno stupnja trošenja. Stupanj trošenja u procesu uhadavanja spojke pokazuje veće vrijednosti budući da u toj fazi osim sušenja dolazi i do zaglađivanja površine tarnih obloga, a samim time i povećanog gubitka mase. Dobiveni rezultati pokazuju kako se prolazna promjena stupnja trošenja s promjenom razine temperature može, barem djelomično, objasniti s promjenom sadržaja vlage u tarnom materijalu, što se naročito može primijetiti pri prijelazu na više temperature. Kako uslijed visokih temperatura dolazi do toplinskog širenja materijala pri čemu se dotad poravnate neravnine na obje plohe više ne podudaraju, to za posljedicu ima novi proces uhadavanja u kojem dolazi do novog poravnavanja neravnina pri čemu je povećan gubitak mase, a samim time i stupanj trošenja.

7.7. Prijedlog daljnjih ispitivanja u cilju karakterizacije utjecaja vlage na dinamiku trošenja tarnog materijala

Prilikom ispitivanja sušenja tarne ploče #35 u električnoj pećnici pri 240°C kroz 2 sata uočen je gust dim neugodnog mirisa (Slika 63.). Također, prilikom ispitivanja sušenja tarne ploče #39 u električnoj pećnici pri istoj radnoj temperaturi od 240°C došlo je do topljenja kliznog ležaja tarne ploče (Slika 64.).



Slika 63. Tarna ploča #35 nakon sušenja u električnoj pećnici



Slika 64. Rastopljeni klizni ležaj tarne ploče #39 nakon sušenja u električnoj pećnici

Tarne obloge, koje su ujedno i predmet ispitivanja trošenja, čine mali udio ukupne mase cijele tarne ploče. Prigušivač torzijskih vibracija tarne ploče čini set cirkularno postavljenih zavojnih opruga i tarni prsteni. Zavojne opruge su tvornički podmazane i sadrže određenu količinu maziva, dok tarni prsteni mogu biti nemetalni. Kako se nakon ispitivanja provodi mjerenje mase (vaganje) na preciznoj vagi s točnošću 0,01 g, isparavanje tog maziva ili degradacija tarnih prstena može unositi određenu pogrešku u dobivene rezultate. Budući da je prilikom ispitivanja sušenja u električnoj pećnici pri 240°C zamijećen gust dim neugodnog mirisa, kao i rastopljeni klizni ležaj tarne ploče, zajedno s dobivenim rezultatima zaključuje se kako prilikom sušenja na toj temperaturi dolazi do nepovratnog gubitka mase. Stoga, kako bi se uklonio utjecaj metalnih i ostalih dijelova tarne ploče na ispitivanje trošenja tarnih obloga prijedlog je da se tarne obloge skinu s tarne ploče te potom ispituju u električnoj pećnici.

Kako je ranije rečeno, prilikom procesa uhodavanja spojke dolazi do formiranja tarnog sloja od nastalih čestica trošenja koji smanjuje trošenje i omogućava stabilan koeficijent trenja. Budući da je nakon procesa uhodavanja površina tarnih obloga modificirana formiranim tarnim slojem koji može utjecati na poroznost i higroskopska svojstva tarnog materijala, drugi prijedlog je da se tarne obloge skinu s tarne ploče tek nakon završenog procesa uhodavanja, te da se zatim provode ispitivanja sušenja u električnoj pećnici.

8. TROŠENJE TARNOG MATERIJALA SPOJKE PRI VISOKIM TEMPERATURAMA DO POJAVE EFEKTA TEMPERATURNOG ZAMORA

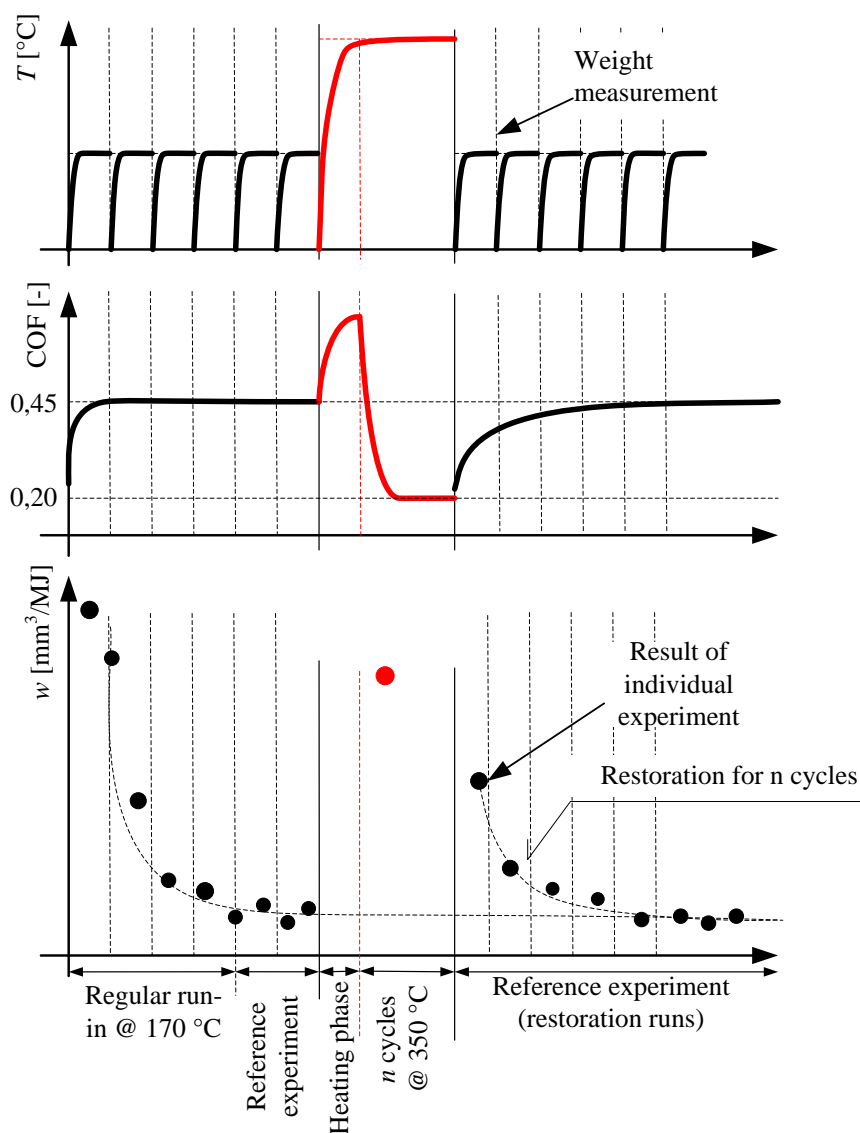
Ranije je rečeno kako rad spojke pri visokim temperaturama može uzrokovati oštećenje tarnog sloja i termalnu degradaciju tarnog materijala koje rezultira visokim stupnjem trošenja i opadanjem koeficijenta trenja (COF). Ukoliko je spojka bila samo kratkotrajno izložena visokom termičkom opterećenju, stupanj trošenja i koeficijent trenja će se postepeno vratiti na svoju početnu vrijednost, slično kao i u procesu uhodavanja spojke. Taj proces naziva se restauracija. Ako je pak spojka kontinuirano izložena visokom termičkom opterećenju, tarne obloge zajedno s potisnom pločom i zamašnjakom mogu postati trajno oštećene. U tom slučaju koeficijent trenja iznenada opada na vrlo nisku vrijednost ($\mu \approx 0,1$) što rezultira neželjenim proklizavanjem spojke. Proklizavanje spojke dodatno uzrokuje povećanje temperature pri čemu se oštećenje dodatno povećava. Ovaj efekt naziva se *fading*.

Iako u većini slučajeva u normalnim uvjetima vožnje spojke osobnih automobila ne postižu temperature veće od 250°C, postoje situacije u kojima temperatura spojke može znatno porasti iznad uobičajenih radnih. Primjerice, vuča teretne ili kamp prikolice osobnim automobilom u koloni na uzbrdici, pri čemu se ostvaruje velik broj uključivanja spojke (“stani-kreni“) s relativno velikom brzinom klizanja i okretnim momentom, može rezultirati pojavom efekta temperaturnog zamora materijala tzv. *fadingom*. Stoga, kako bi se analizirao utjecaj visokih temperatura na dinamiku trošenja tarnog materijala spojke, provedena su ispitivanja trošenja na tribometru na način da je radna temperatura postepeno povećavana do pojave efekta temperaturnog zamora, pri čemu je drastičan pad koeficijenta trenja mjerilo za uočavanje istog.

8.1. Inicijalna ispitivanja trošenja pri visokim temperaturama

Ispitni postav, odnosno tribometar, konstruiran je za provedbu dugotrajnih ispitivanja trošenja pri radnim temperaturama do 350°C, pri čemu se kratkotrajna ispitivanja mogu provoditi s radnim temperaturama većim od 350°C. Upravljačko računalo tribometra ima postavljenu temperaturnu granicu te se u slučaju prekoračenja granične temperature ispitivanje prekida kako bi se spriječilo daljnje oštećenje ispitnog postava. Promjena radne temperature na tribometru primarno se ostvaruje promjenom minimalnog vremena pauze t_{delay} između dva uzastopna radna ciklusa. Kako bi se mogla provesti ispitivanja trošenja na temperaturama većim

od 250°C, potrebno je pronaći odgovarajuću kombinaciju radnih parametara kojom se može ostvariti i održati ciljana radna temperatura. U cilju određivanja tih parametara, odlučeno je inicijalna ispitivanja trošenja pri visokim temperaturama provesti sa setom radnih parametara za proces uhadavanja spojke (Tablica 2.), pri čemu se smanjenjem minimalnog vremena pauze t_{delay} između dva uzastopna radna ciklusa omogućuje postizanje većih radnih temperatura.



Slika 65. Plan provođenja ispitivanja trošenja tarnog materijala pri visokim temperaturama do pojave efekta temperaturnog zamora

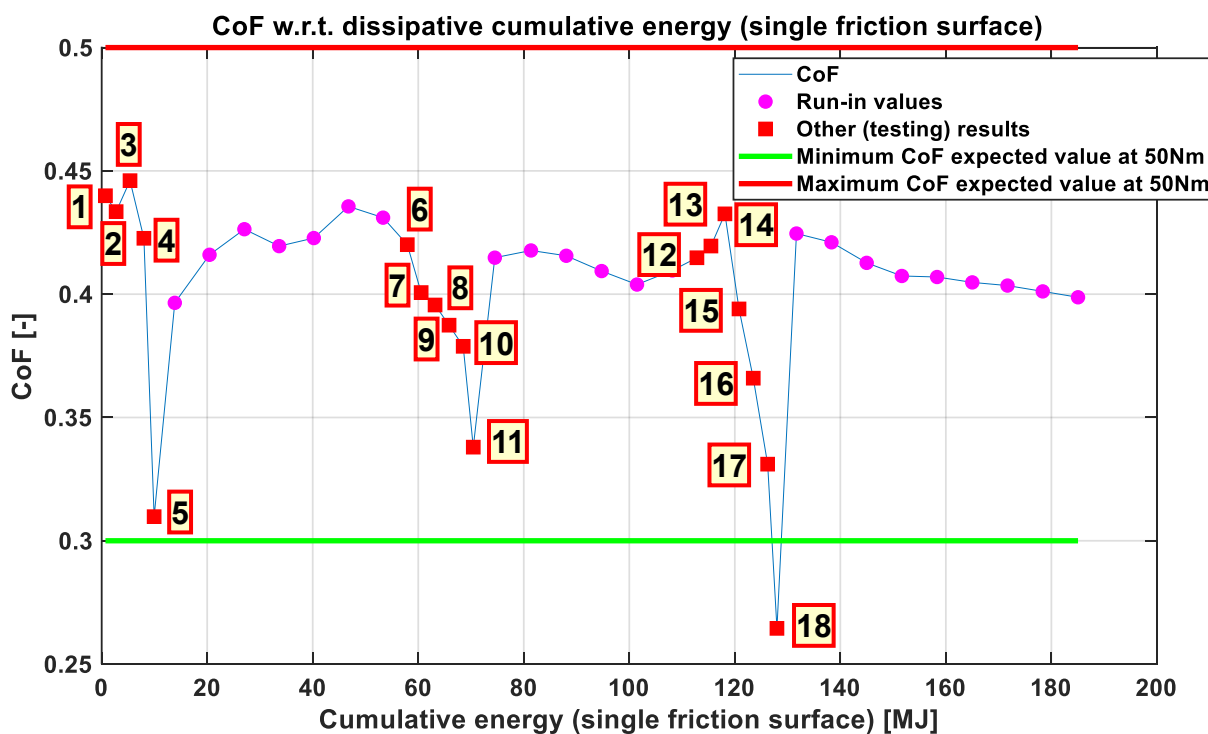
Na Slici 65. prikazan je plan provođenja ispitivanja trošenja tarnog materijala pri visokim temperaturama do pojave efekta temperaturnog zamora, odnosno *fadinga*. Kao i do sada, za svaku novu (nekorištenu) tarnu ploču najprije će se provesti početno sušenje pri 100°C do stabilizacije razlike mase te proces uhadavanja spojke do otprilike 70 MJ disipirane

kumulativne energije. Nakon postignute stabilizacije stupnja trošenja i koeficijenta trenja u procesu uhodavanja, nastavlja se s ispitivanjem trošenja tarnog materijala pri visokim temperaturama na način da se radna temperatura postepeno povećava sve do pojave *fadinga* kojeg simbolizira drastični pad koeficijenta trenja. Iako ne postoji egzaktna granična vrijednost koeficijenta trenja na kojoj dolazi do pojave *fadinga*, pri provedbi ovih ispitivanja odabrano je kako se *fading* pojavljuje kada koeficijent trenja padne ispod 0,3. Ispitivanje se zatim nastavlja na radnoj temperaturi na kojoj je došlo do pojave *fadinga* na način da se provodi određen broj ciklusa (1, 2, 5, 10 itd.) s niskim koeficijentom trenja. Nakon određenog broja ciklusa provedenih u *fadingu*, slijedi ispitivanje trošenja sa setom radnih parametara za proces uhodavanja sve do postizanja stabilizacije stupnja trošenja i koeficijenta trenja, odnosno slijedi proces restauracije. Budući da se ispitivanja trošenja pri visokim radnim temperaturama provode sa znatno manjim brojem ciklusa (100 radnih ciklusa) za razliku od ispitivanja pri nižim temperaturama (250 radnih ciklusa), dobiveni rezultati stupnja trošenja možda ne predstavljaju relevantne vrijednosti.

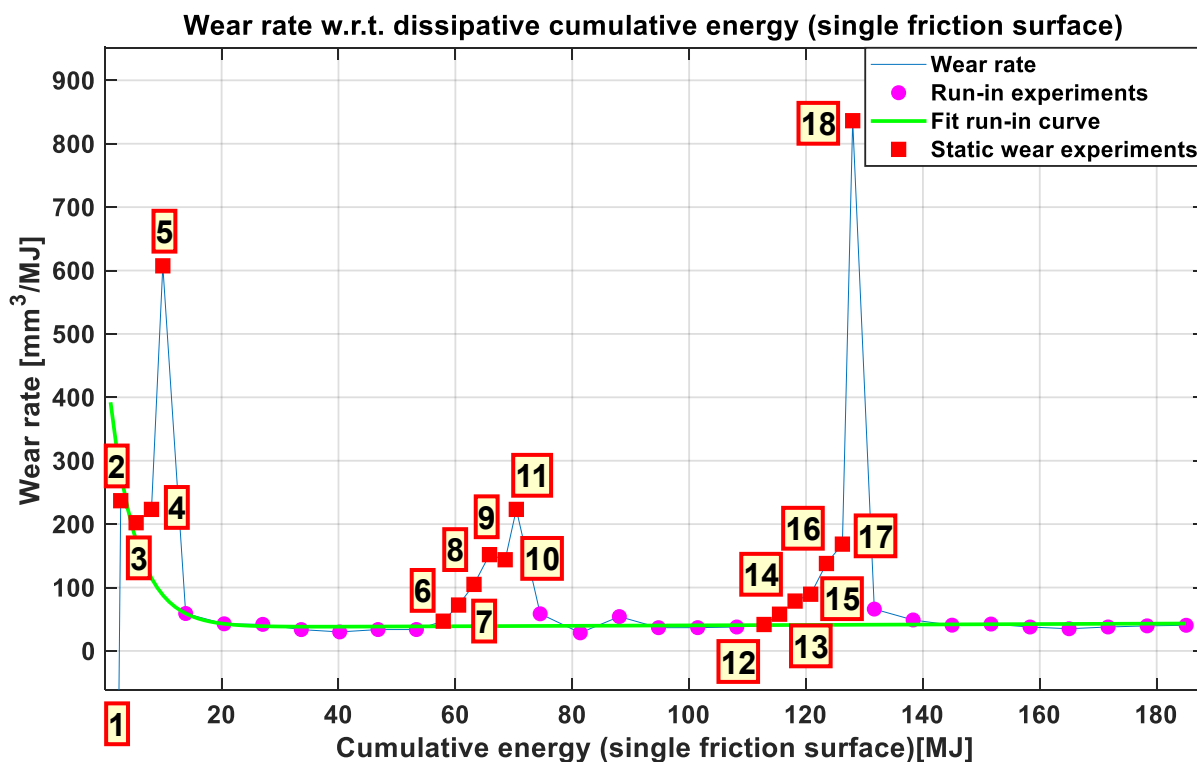
Za provedbu inicijalnih ispitivanja, odnosno da bi se utvrdilo mogu li se na ispitnom postavu, odnosno tribometru, postići i održati visoke ciljane radne temperature, upotrijebljena je tarna ploča #20 koja je ranije korištena za ispitivanje trošenja u rasponu normalnih radnih temperatura. Stoga, ispitivanje tarne ploče #20 nastavljeno je bez početnog sušenja do stabilizacije razlike mase kao i bez procesa uhodavanja spojke.

Tablica 4. Radni parametri za tarnu ploču #20

No.	ω_{rmax} [min ⁻¹]	M_z [Nm]	t_2 [s]	t_{delay} [s]	T_d [°C]	No.	ω_{rmax} [min ⁻¹]	M_z [Nm]	t_2 [s]	t_{delay} [s]	T_d [°C]
1	2800	50	3,4	6	200	10	2800	50	3,4	1	300
2	2800	50	3,4	4	240	11	2800	50	3,4	0	330
3	2800	50	3,4	3	270	12	2800	50	3,4	6	170
4	2800	50	3,4	1	300	13	2800	50	3,4	5	200
5	2800	50	3,4	0	330	14	2800	50	3,4	4	240
6	2800	50	3,4	6	170	15	2800	50	3,4	3	270
7	2800	50	3,4	5	200	16	2800	50	3,4	1	300
8	2800	50	3,4	4	240	17	2800	50	3,4	0	330
9	2800	50	3,4	3	270	18	2800	50	3,4	0	350



Slika 66. Ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #20



Slika 67. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #20

Na Slici 66. prikazana je ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #20, dok je na Slici 67. prikazana ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za istu tarnu ploču, pri čemu su brojevima označene radne točke s radnim parametrima prikazanim u Tablici 4. Moguće je primijetiti kako je za postizanje veće radne temperature potrebno kraće vrijeme pauze između dva uzastopna radna ciklusa budući da je pri većim radnim temperaturama brže odvođenje topline, a samim time brži pad ciljane radne temperature. Iz tog razloga sljedeći ciklus uključivanja treba biti neposredno iza prethodnog kako bi se postigla, odnosno održala, ciljana radna temperatura.

U prvom ispitivanju (točke 1 - 5) pri visokim temperaturama koeficijent trenja tarne ploče #20 najprije malo poraste pri temperaturi od 270°C (točka 3), dok sa sljedećim prijelazom na veću temperaturu lagano opadne (točka 4). U radnoj točki 5 pri 330°C koeficijent trenja drastično opada ($\mu \approx 0,25$) pri čemu se zaključuje kako je došlo do pojave *fadinga* ($COF < 0,3$). Kako bi se održao ciljani okretni moment spojke M_z , s opadanjem koeficijenta trenja raste normalna sila približavajući se pritom graničnoj vrijednosti normalne sile ($F_{zmax} = 2000$ N). Nakon provedenih 15 ciklusa u *fadingu* ($\mu \approx 0,25$) pri 330°C slijedi proces restauracije s jednakim setom radnih parametara kao i kod procesa uhodavanja spojke. Može se primijetiti kako koeficijent trenja postiže svoju normalnu (početnu) vrijednost ($\mu \approx 0,4$) već nakon 250 radnih ciklusa procesa restauracije.

Nakon završenog procesa restauracije, sljedeće ispitivanje (točke 6 – 11) provođeno je do radne temperature od 330°C pri čemu se može primijetiti kako koeficijent trenja gotovo linearno opada sa svakim porastom radne temperature. Naposljetku, u radnoj točki 11 pri 330°C dolazi do drastičnog pada koeficijenta trenja ($\mu \approx 0,25$) čime se zaključuje kako je došlo do pojave *fadinga*. Nakon provedenih 5 ciklusa u *fadingu* ($\mu \approx 0,25$) pri 330°C slijedi proces restauracije pri čemu se koeficijent trenja restaurira već nakon 250 radnih ciklusa, slično kao i u prošlom ispitivanju.

Zadnje ispitivanje (točke 12 – 18) tarne ploče #20 pri visokim temperaturama pokazuje postepen porast koeficijenta trenja s porastom temperature do 240°C (točka 14), nakon čega dolazi do strmog opadanja koeficijenta trenja s daljnjim povećanjem radne temperature. Na kraju, u radnoj točki 18 pri 350°C dolazi do drastičnog pada koeficijenta trenja ($\mu \approx 0,25$) što označava pojavu *fadinga*. Provedeno je 25 ciklusa u *fadingu* pri čemu je uočeno kako na temperaturi od 350°C koeficijent trenja padne ispod 0,25, dok je u zadnjem snimljenom radnom

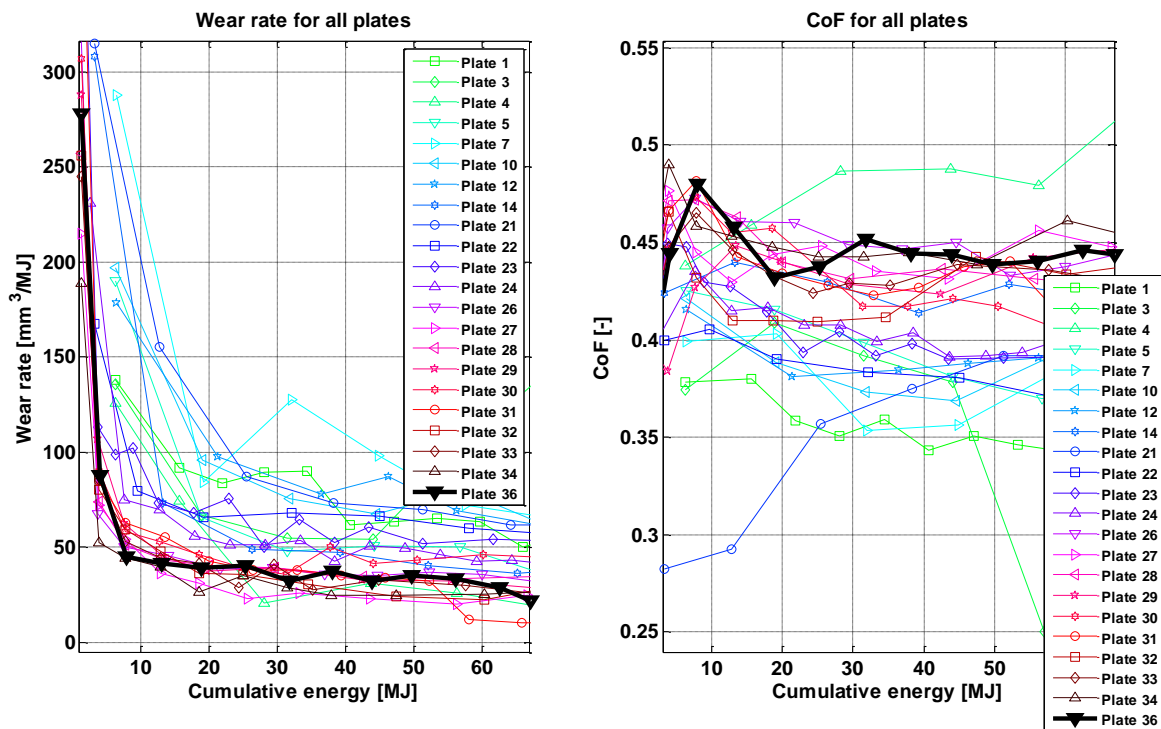
ciklusu koeficijent trenja iznosio tek 0,14. Nakon *fadinga* proveden je proces restauracije pri čemu je koeficijent trenja restauriran već nakon 250 radnih ciklusa. Moguće je primijetiti kako daljnjim ispitivanjem u procesu restauracije koeficijent trenja lagano opada što se može povezati sa smanjenjem (istrošenosti) radijalnih proreza (žljebova) na tarnoj ploči koji omogućavaju odvođenje nastalih čestica trošenja.

Razmatrajući rezultate trošenja, prva radna točka pokazuje izrazito velik stupanj trošenja budući da je uslijed duge pauze došlo do nakupljanja sadržaja vlage u tarnom materijalu pri čemu je masa tarne ploče nakon ispitivanja veća nego ona prije. Iako dobiveni rezultati stupnja trošenja nisu relevantni zbog malog broj provedenih radnih ciklusa, vidljivo je kako stupanj trošenja raste sa svakim porastom temperature što je u skladu s ranije objašnjenim utjecajem temperature na stupanj trošenja. Također je moguće primijetiti kako s drastičnim padom koeficijenta trenja (točka 5, 11 i 18) dolazi do drastičnog povećanja stupnja trošenja, djelomično iz razloga što u tim radnim točkama uslijed visoke temperature dolazi do mekšanja tarnog materijala pri čemu se žice (pojačivači trenja u tarnom materijalu) zavare na reaktivni disk uzrokujući time povećano trošenje (žljebove) tarne ploče (Slika 29).

Nakon provedenog inicijalnog ispitivanja tarne ploče #20 pri visokim temperaturama zaključeno je kako odabrana kombinacija radnih parametara omogućava postizanje i održavanje ciljanih radnih temperatura. Za postizanje većih radnih temperatura predloženo je uvođenje minimalne pauze t_{delay} između dva uzastopna radna ciklusa te povećanje vremena zatvaranja spojke t_2 , dok ostali radni parametri ostaju nepromijenjeni.

8.2. Ispitivanje trošenja tarne ploče #36

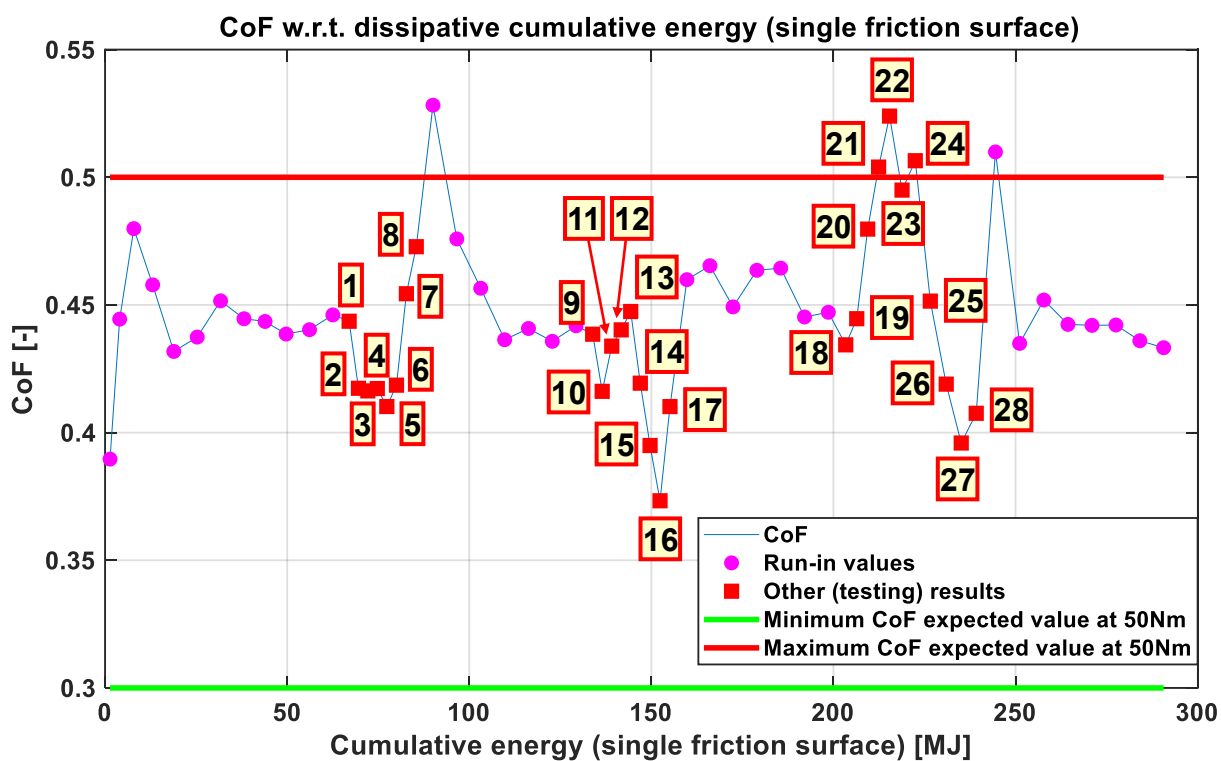
Nakon provedenog ispitivanja tarne ploče #20 u cilju određivanja kombinacije radnih parametara za ostvarivanje i održavanje ciljane radne temperature, ispitivanje je nastavljeno s novom (nekorištenom) tarnom pločom #36. Za tarnu ploču #36 najprije je provedeno početno sušenje pri 100°C do stabilizacije razlike mase i proces uhadavanja spojke do stabilizacije stupnja trošenja i koeficijenta trenja, prikazano na Slici 68. Slično kao i kod tarne ploče #20, provedena su tri seta ispitivanja (*fading* + restauracija), pri čemu je prvi set proveden do 350°C, drugi do 370°C, a treći do 410°C. Kako je prethodno rečeno, za postizanje većih radnih temperatura (410°C) uvedeno je minimalno vrijeme pauze između dva uzastopna ciklusa ($t_{\text{delay}} > 0$), dok je vrijeme zatvaranja spojke t_2 produljeno. Radni parametri za provedbu ispitivanja tarne ploče #36 pri visokim temperaturama prikazani su u Tablici 5.



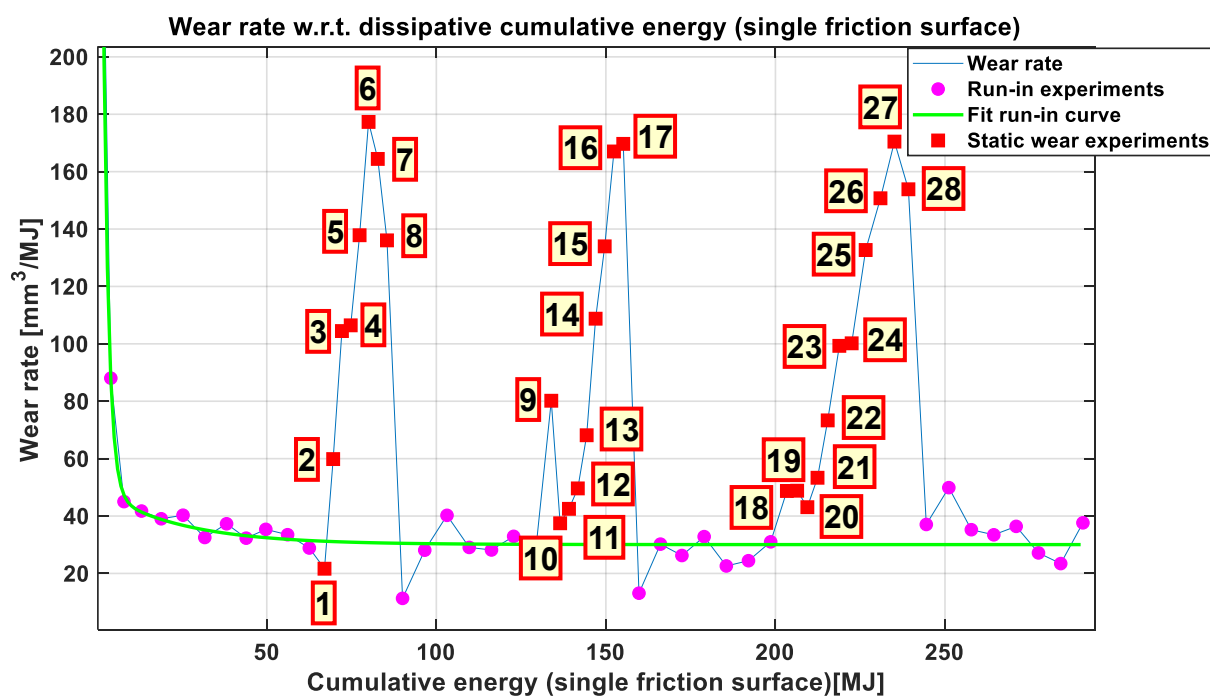
Slika 68. Stabilizacija stupnja trošenja i koeficijenta trenja za tarnu ploču #36

Tablica 5. Radni parametri za tarnu ploču #36

No.	ω_{rmax} [min ⁻¹]	M_z [Nm]	t_2 [s]	t_{delay} [s]	T_d [°C]	No.	ω_{rmax} [min ⁻¹]	M_z [Nm]	t_2 [s]	t_{delay} [s]	T_d [°C]
1	2800	50	3,4	6	170	15	2800	50	3,4	1	330
2	2800	50	3,4	4	200	16	2800	50	3,4	0	350
3	2800	50	3,4	3	240	17	2800	50	3,4	0	370
4	2800	50	3,4	3	270	18	2800	50	4,0	6	170
5	2800	50	3,4	2	300	19	2800	50	4,0	5	200
6	2800	50	3,4	1	330	20	2800	50	4,0	4	240
7	2800	50	3,4	1	350	21	2800	50	4,0	4	270
8	2800	50	3,4	0	350	22	2800	50	4,0	3	300
9	2800	50	3,4	6	170	23	2800	50	4,0	2	330
10	2800	50	3,4	6	170	24	2800	50	4,5	2	350
11	2800	50	3,4	4	200	25	2800	50	5,0	2	370
12	2800	50	3,4	3	240	26	2800	50	5,0	1	390
13	2800	50	3,4	3	270	27	2800	50	5,0	1	410
14	2800	50	3,4	2	300	28	2800	50	5,0	0	410



Slika 69. Ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #36



Slika 70. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #36

Na Slici 69. prikazana je ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #36, dok je na Slici 70. prikazana ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za istu tarnu ploču, pri čemu su brojevima označene radne točke s radnim parametrima prikazanim u Tablici 5.

Nakon provedenog procesa uhadavanja, u prvom ispitivanju (točke 1 – 8) pri visokim temperaturama koeficijent trenja tarne ploče #36 opada na određenu vrijednost ($\mu \approx 0,42$) pri 200°C (točka 2) na kojoj se zatim zadržava s daljnjim povećanjem radne temperature. Povećanje radne temperature iznad 330°C (točka 6) pokazuje porast koeficijenta trenja, uz također povećan stupanj trošenja (Slika 70.), što se može objasniti formiranjem tarnog sloja uslijed nastalih čestica trošenja pri visokim temperaturama. Kako u bilo koja dva uzastopna radna ciklusa nije došlo do pada koeficijenta trenja ispod 0,3, zaključeno je kako nije došlo do pojave *fadinga* te je stoga započet proces restauracije. Već nakon 250 radnih ciklusa provedenih u procesu restauracije vidljiv je značajan porast koeficijenta trenja ($\mu \approx 0,53$) koji s daljnjim ispitivanjem u procesu restauracije opada te se stabilizira nakon 1000 radnih ciklusa. Prva točka (250 ciklusa) u procesu restauracije pokazuje nisku vrijednost stupnja trošenja što se može objasniti prolaznom promjenom (smanjenjem) stupnja trošenja uslijed prelaska s više (350°C) na nižu (170°C) temperaturu zbog porasta sadržaja vlage u tarnom materijalu.

U drugom ispitivanju (točke 9 – 17) pri visokim temperaturama može se primijetiti kako, slično kao i kod prošlog ispitivanja, koeficijent trenja najprije padne ($\mu \approx 0,42$) pri temperaturi od 170°C (točka 10) nakon čega postepeno raste s povećanjem radne temperature. Povećanjem radne temperature iznad 270°C (točka 13) dolazi do naglog opadanja koeficijenta trenja sve do 350°C (točka 16) nakon čega pri 370°C (točka 17) koeficijent trenja ponovno poraste. Iako nije došlo do pada koeficijenta trenja ispod 0,3 u dva uzastopna radna ciklusa, odnosno *fadinga*, zabilježeno je par ciklusa s koeficijentom trenja ispod 0,2. Budući da su ti radni ciklusi bili neposredno prije povećanja vremena pauze između dva ciklusa, u sljedećem radnom ciklusu koeficijent trenja se vratio na svoju normalnu vrijednost ($\mu \approx 0,4$). Ispitivanje je nastavljeno s procesom restauracije pri čemu je restauracija koeficijenta trenja postignuta već nakon 250 radnih ciklusa. Razmatrajući rezultate trošenja, prva radna točka snimljena u drugom ispitivanju pri visokim temperaturama pokazuje velik stupanj trošenja budući da je ista točka snimljena nakon duge pauze (vikend) što se može povezati s povećanim gubitkom sadržaja vlage u tarnom materijalu. Također, može se primijetiti kako se stupanj trošenja povećava s povećanjem radne temperature, dok pri najvećim temperaturama postiže zasićenje.

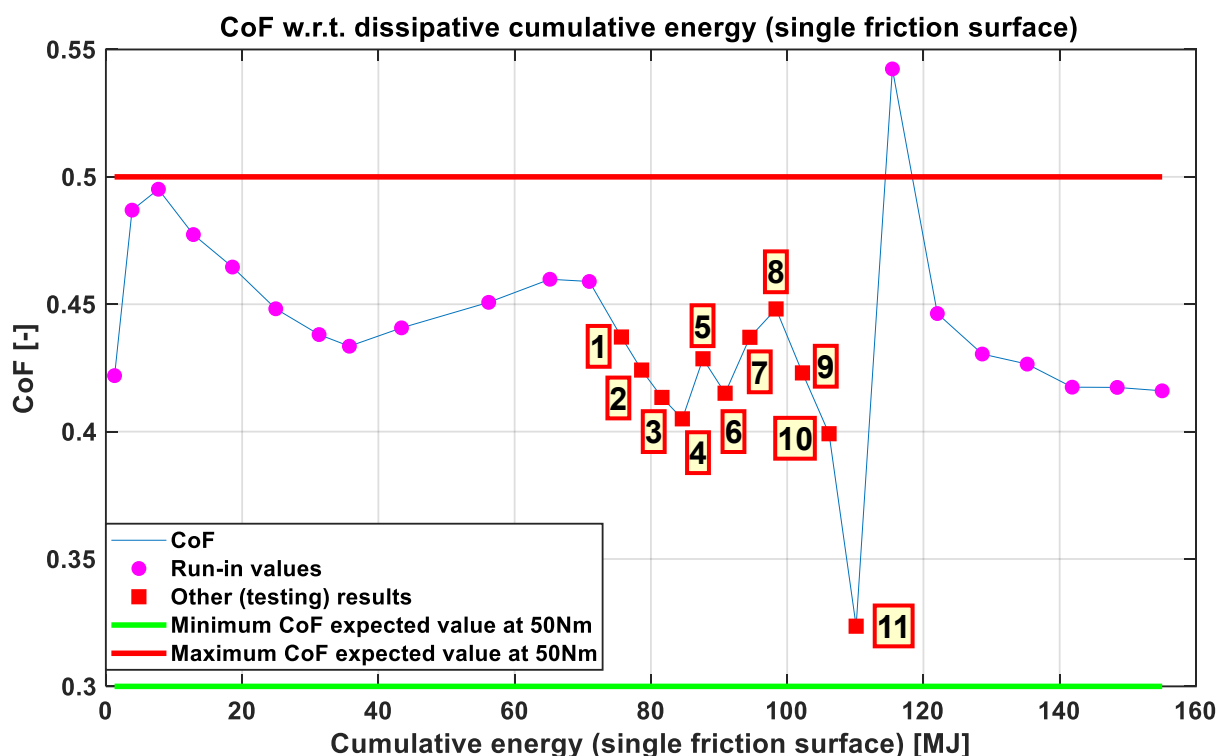
U trećem ispitivanju (točke 18 – 28) pri visokim temperaturama vidljivo je kako se s povećanjem radne temperature povećava koeficijent trenja postičući pritom visoku vrijednost ($\mu \approx 0,52$) sličnu onoj nakon provedenih 250 radnih ciklusa u prvom procesu restauracije (točka 22). Daljnjim povećanjem radne temperature iznad 300°C (točka 22) dolazi do opadanja koeficijenta trenja, dok nakon 350°C (točka 24) opadanje postaje strmije. Također, kao i u prethodna dva ispitivanja, nisu zabilježena dva uzastopna radna ciklusa s koeficijentom trenja manjim od 0,3 što implicira kako nije došlo do pojave *fadinga*, stoga je nastavljeno ispitivanje s procesom restauracije. Rezultati pokazuju kako je došlo do stabilizacije stupnja trošenja i koeficijenta trenja što znači kako nije došlo do trajnog oštećenja tarnog materijala. Moguće je primijetiti kako radne točke snimljene u trećem ispitivanju najviše prate ranije objašnjen trend promjene koeficijenta trenja, odnosno stupnja trošenja, s temperaturom.

8.3. Ispitivanje trošenja tarne ploče #37

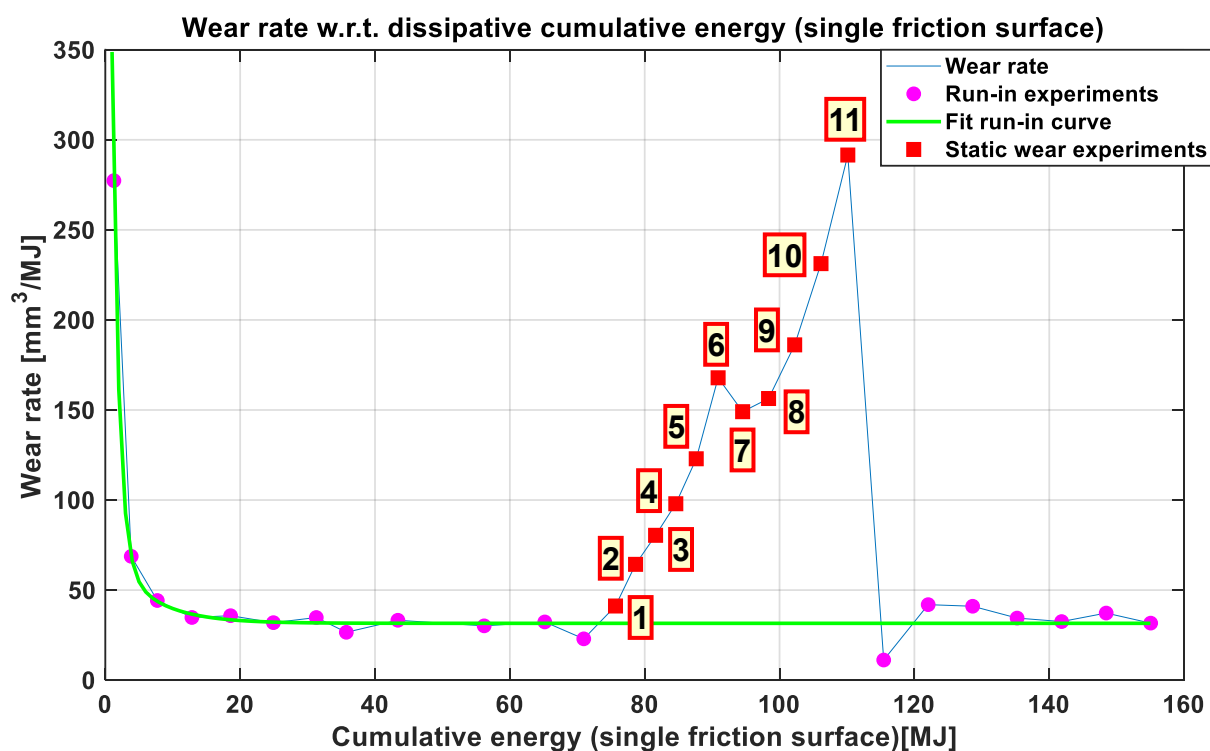
Nakon provedenih ispitivanja trošenja pri visokim temperaturama tarni materijal ploče #36 je potrošen (potrošenost radijalnih proreza za odvođenje nastalih čestica trošenja), stoga je za nastavak ispitivanja potrebno uzeti novu tarnu ploču. Za nastavak ispitivanja pri visokim temperaturama upotrijebljena je nova (nekorištena) tarna ploča #37 za koju je provedeno početno sušenje pri 100°C do stabilizacije razlike mase i proces uhadavanja spojke do stabilizacije stupnja trošenja i koeficijenta trenja (Slika 51.). Kako kod tarne ploče #36 nije došlo do pojave *fadinga* pri najvećoj radnoj temperaturi od 410°C , ispitivanje tarne ploče #37 odlučeno je provesti do 430°C . Za razliku od prethodnih ispitivanja, kod tarne ploče #37 proveden je samo jedan set ispitivanja (*fading* + restauracija). Slično kao i kod tarne ploče #36, u cilju ostvarivanja većih radnih temperatura uvedeno je minimalno vrijeme pauze između dva uzastopna radna ciklusa ($t_{\text{delay}} > 0$), dok je vrijeme zatvaranja spojke t_2 produljeno.

Tablica 6. Radni parametri za tarnu ploču #37

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ω_{rmax} [min^{-1}]	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800
M_z [Nm]	50	50	50	25	50	50	50	50	50	50	50
t_2 [s]	4	4	4	4	4	4,5	5	5	5	5	5
t_{delay} [s]	6	5	4	4	3	2	2	2	1	1	0
T_d [$^\circ\text{C}$]	170	200	240	270	300	330	350	370	390	410	430



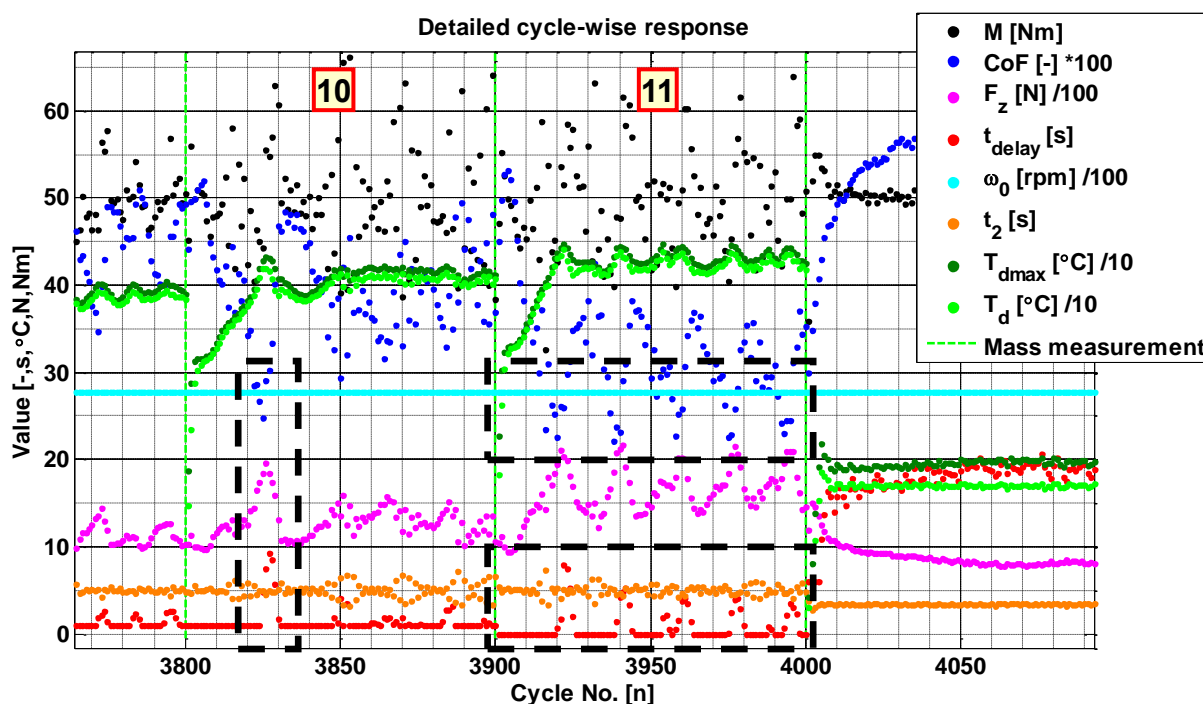
Slika 71. Ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #37



Slika 72. Ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #37

Na Slici 71. prikazana je ovisnost koeficijenta trenja o kumulativnoj energiji za tarnu ploču #37, dok je na Slici 72. prikazana ovisnost stupnja trošenja o kumulativnoj energiji za istu tarnu ploču, pri čemu su brojevima označene radne točke s radnim parametrima prikazanim u Tablici 6. Povećanjem radne temperature dolazi do postepenog opadanja koeficijenta trenja sve do 270°C (točka 4) nakon čega slijedi postepen porast koeficijenta trenja uslijed formiranja tarnog sloja. Nakon temperature od 370°C (točka 8), s daljnjim povećanjem radne temperature dolazi do strmog opadanja koeficijenta trenja uslijed visokih temperatura.

Razmatrajući rezultate trošenja, vidljivo je kako se stupanj trošenja povećava s povećanjem radne temperature što je u skladu s ranije objašnjenim utjecajem visokih temperatura na stupanj trošenja. Zgodno je napomenuti kako postoje određene razlike među spojkama koje dovode do različitih kombinacija koeficijenta trenja i stupnja trošenja, odnosno manji koeficijent trenja s većim stupnjem trošenja i obratno.



Slika 73. Detaljan prikaz radnih parametara u svakom radnom ciklusu

Na Slici 73. dan je detaljan prikaz radnih parametara u svakom radnom ciklusu prilikom ispitivanja tarne ploče #37 na temperaturi od 410°C i 430°C (točka 10 i 11). Moguće je primijetiti kako se svaki radni ciklus u kojem koeficijent trenja padne ispod 0,3 (označeno crnom crtkanom linijom) događa neposredno prije radnog ciklusa u kojem dolazi do povećanja vremena pauze t_{delay} zbog održavanja ciljane radne temperature. Budući da pauza između

sljedećeg radnog ciklusa traje otprilike 5s ili dulje, u tom periodu koeficijent trenja se restaurira na svoju normalnu (početnu) vrijednost. Također se može primijetiti kako se sa smanjenjem koeficijenta trenja povećava normalna sila da bi se ostvario ciljani okretni moment kojim se opterećuje spojka, odnosno tarne ploča, prilikom ispitivanja. Prilikom ispitivanja tarne ploče #37 nije u potpunosti došlo do pojave *fadinga*, no zamijećeno je desetak radnih ciklusa s vrlo niskim koeficijentom trenja ($\mu \approx 0,22$) koji su se javili neposredno prije povećanja vremena pauze između dva uzastopna radna ciklusa. Kako je u zadnjih nekoliko radnih ciklusa ispitivanja na temperaturi od 430°C zamijećen čudan zvuk na tribometru prilikom zatvaranja spojke, obustavljeno je daljnje povećanje radne temperature u cilju sprječavanja mogućeg oštećenja ispitnog postava. Ispitivanje je nastavljeno s procesom restauracije gdje je već nakon 250 radnih ciklusa provedenih u procesu restauracije vidljiv značajan porast koeficijenta trenja ($\mu \approx 0,54$) koji s daljnjim ispitivanjem u procesu restauracije opada te se stabilizira nakon 1250 radnih ciklusa.

8.4. Prijedlog daljnjih ispitivanja u cilju karakterizacije utjecaja visokih temperatura na dinamiku trošenja tarnog materijala

Na temelju provedenih ispitivanja tarnih ploča #20, #36 i #37 pri visokim temperaturama može se zaključiti kako je jedino kod tarne ploče #20 došlo do pojave efekta temperaturnog zamora materijala (*fadinga*), odnosno do određenog broja uzastopnih radnih ciklusa s koeficijentom trenja manjim od 0,3. Tarna ploča #20 jedina je ranije korištena za provedbu ispitivanja trošenja tarnog materijala u rasponu normalnih radnih temperatura, dok su tarne ploče #36 i #37 bile potpuno nove (nekorištene) prije ispitivanja na visokim temperaturama. Budući da je tarne ploča #20 prije ispitivanja na visokim radnim temperaturama stajala uskladištena mjesecima, nije sigurno do kakvih je promjena u svojstvima tarnog materijala došlo u međuvremenu. Kako je ranije rečeno, sastav materijala tarnih obloga definira njegova svojstva pa time i temperaturni prag, odnosno temperaturu iznad koje dolazi do pojave efekta temperaturnog zamora, odnosno *fadinga*. Budući da se radi o organskim materijalima, utjecaj temperature i starenja na svojstva tarnog materijala također nisu zanemarivi. Dobiveni rezultati ispitivanja tarnih ploča #36 i #37 pri visokim temperaturama pokazuju kako bi temperaturna granica za pojavu *fadinga* mogla biti na 450°C. Stoga, u cilju daljnje karakterizacije utjecaja visokih temperatura na dinamiku trošenja tarnog materijala, prijedlog je da se daljnja ispitivanja pri visokim temperaturama provedu na radnoj temperaturi od 450°C na barem tri tarne ploče po cijeloj dubini svake ploče.

9. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedeno je ispitivanje utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala automobilske suhe tarne spojke. Suhe tarne spojke uglavnom se izrađuju od organskih materijala zbog njihovih izvrsnih triboloških svojstava, jeftine proizvodnje i ekološke prihvatljivosti, a općenito se sastoje od veziva, vlakana, punila i modifikatora trenja. Pregledom literature pokazano je da se u radu suhih spojki javljaju četiri osnovna mehanizma trošenja: adhezija, abrazija, umor površine i tribokorozija, pri čemu je u većini slučajeva prisutna kombinacija navedenih. Nadalje, pregledom literature pokazan je utjecaj visokih temperatura na stupanj trošenja i koeficijent trenja tarnih obloga pri čemu s povećanjem temperature koeficijent trenja u početku raste uslijed formiranja tarnog sloja od nastalih čestica trošenja. Daljnjim povećanjem temperature dolazi do kidanja nastalog tarnog sloja pri čemu dolazi do znatnog opadanja koeficijenta trenja i pojave efekta temperaturnog zamora materijala (eng. *fading*). S druge strane, stupanj trošenja raste s povećanjem temperature pri čemu je trošenje izraženije pri većim temperaturama.

Eksperimentalna ispitivanja trošenja tarnog materijala suhe spojke provedena su na ispitnom postavu, odnosno tribometru koji koristi čitave tarne ploče kao ispitne uzorke (eng. *disc-on-disc tribometer*), razvijenom na Fakultetu. Tribometar je računalno upravljani pri čemu je omogućeno precizno upravljanje radnim parametrima. U cilju ispitivanja utjecaja temperature na dinamiku trošenja tarnog materijala, provedena su dva seta eksperimenata. U prvom slučaju vršena je promjena razine temperature u očekivanom rasponu radnih temperatura spojke (do 240°C), dok je u drugom slučaju vršeno povećanje razine temperature do pojave efekta temperaturnog zamora, odnosno *fadinga*.

Prilikom ispitivanja tarne ploče #31 uočeno je kako sa svakom promjenom temperature, bilo povećanjem ili smanjenjem, dolazi do prolazne promjene stupnja trošenja pri čemu promjena prati oblik krivulje procesa uhodavanja. Budući da su organski materijali tarnih obloga prilično higroskopni, dana je pretpostavka da je dio prolazne promjene (dinamike) stupnja trošenja uzrokovan promjenom sadržaja vlage u tarnom materijalu te da stoga nije realističan, odnosno tako dobivena razlika mase ne korelira s razlikom volumena uslijed smanjenja debljine tarnih obloga. Uzimajući tu pretpostavku, pri prijelazu s više na nižu temperaturu dolazi do povećanja (nakupljanja) sadržaja vlage u tarnom materijalu pri čemu

stupanj trošenja pada. S druge strane, pri prijelazu s niže na višu temperaturu dolazi do gubitka sadržaja vlage u tarnom materijalu uslijed sušenja pri čemu stupanj trošenja raste. Da bi se potvrdila navedena hipoteza, najprije je odlučeno provesti inicijalno ispitivanje sušenja tarne ploče #35 u električnoj pećnici s postepenim povećanjem temperature kako bi se utvrdilo dolazi li do promjene sadržaja vlage u tarnom materijalu na većim temperaturama. Rezultati sušenja tarne ploče #35 pokazali su kako svakim prijelazom na veću temperaturu dolazi do novog gubitka sadržaja vlage (mase tarne ploče) budući da pri većim temperaturama dolazi do gubitka vlage na dubljim slojevima u tarnom materijalu. Kada je potvrđena promjena sadržaja vlage s promjenom temperature, odlučeno je provesti kompenzaciju razlike mase, odnosno stupnja trošenja, tarne ploče #31 na način da se provede sušenje tarne ploče #31 u električnoj pećnici s istim promjenama temperature i duljinom trajanja kao i provedena ispitivanja na tribometru kod kojih je uočena prolazna promjena (dinamika) stupnja trošenja. Kompenzacija razlike mase, odnosno stupnja trošenja, zatim je provedena na način da je od razlike mase tarne ploče #31 dobivene trošenjem na tribometru oduzeta polovina razlike mase iste te tarne ploče dobivena sušenjem, budući da u električnoj pećnici dolazi do jednolikog sušenja cijele tarne ploče za razliku od tribometra gdje se ispituje trošenje samo jedne tarne površine. Rezultati provedene kompenzacije tarne ploče #31 pokazuju djelomično smanjenje prolazne promjene stupnja trošenja, dok se ostatak promjene stupnja trošenja može povezati s utjecajem temperature na svojstva tarnog materijala. Kako bi se postigla detaljna karakterizacija utjecaja vlage na dinamiku trošenja tarnog materijala, odlučeno je provesti dva usporedna ispitivanja s jednakim radnim parametrima, odnosno s jednakim promjenama temperature i trajanjima, i s dvije nove (nekorištene) tarne ploče #38 i #39, pri čemu je tarne ploča #38 ispitivana na tribometru, dok je tarne ploča #39 ispitivana u električnoj pećnici. Nakon ispitivanja provedena je kompenzacija razlike mase kao i kod tarne ploče #31, pri čemu se u ovom slučaju razlika mase tarne ploče #38 dobivena trošenjem na tribometru kompenzirala razlikom mase tarne ploče #39 dobivenom sušenjem u električnoj pećnici. Dobiveni rezultati provedene kompenzacije pokazuju djelomično smanjenje prolazne promjene stupnja trošenja, naročito pri prijelazu s niže na višu temperaturu, dok je promjena stupnja trošenja i dalje prisutna s promjenom temperature što se može objasniti toplinskim širenjem pri čemu dolazi do novog poravnivanja neravnina što odgovara procesu uhodavanja spojke. Zaključuje se kako je dana hipoteza točna.

Kako bi se analizirao utjecaj visokih temperatura na dinamiku trošenja tarnog materijala spojke, provedena su ispitivanja trošenja na tribometru na način da je radna temperatura

postepeno povećavana do pojave efekta temperaturnog zamora (*fadinga*), pri čemu je drastičan pad koeficijenta trenja ($\mu < 0,3$) mjerilo za uočavanje istog. Nakon određenog broja ciklusa provedenih u *fadingu*, proveden je proces restauracije u cilju regeneracije koeficijenta trenja i smanjenja stupnja trošenja na približno početnu vrijednost. U cilju određivanja kombinacije radnih parametara kojom se postiže i održava ciljana radna temperatura, najprije je odlučeno provesti inicijalno ispitivanje pri visokim temperaturama s tarnom pločom #20. Provedena su tri seta ispitivanja pri čemu je nakon svakog ispitivanja pri visokim temperaturama proveden proces restauracije do stabilizacije stupnja trošenja i koeficijenta trenja. Rezultati ispitivanja tarne ploče #20 pokazuju pojavu efekta temperaturnog zamora (*fadinga*) u sva tri ispitivanja na temperaturama većim ili jednakim 330°C , pri čemu u svakom procesu restauracije dolazi do stabilizacije stupnja trošenja i koeficijenta trenja što implicira kako nije došlo do trajnog oštećenja tarnog materijala. Nakon definiranja kombinacije radnih parametara, ispitivanja su nastavljena s novom (nekorištenom) tarnom pločom #36. Provedena su tri seta ispitivanja pri čemu je radna temperatura povećavana do 410°C , dok je nakon svakog ispitivanja pri visokim temperaturama proveden proces restauracije. Rezultati ispitivanja tarne ploče #36 ne pokazuju pojavu efekta temperaturnog zamora, iako koeficijent trenja varira s povećanjem radne temperature, a stupanj trošenja očekivano raste. Proces restauracije pokazuje stabilizaciju stupnja trošenja i koeficijenta trenja. Ispitivanja su zatim nastavljena s još jednom novom (nekorištenom) tarnom pločom #37. Proveden je jedan set ispitivanja pri čemu je radna temperatura povećavana do 430°C , dok je zatim proveden proces restauracije. Rezultati ispitivanja tarne ploče #37 ne pokazuju pojavu efekta temperaturnog zamora, iako je zamijećeno desetak radnih ciklusa s vrlo niskim koeficijentom trenja ($\mu \approx 0,22$) koji su se javili neposredno prije povećanja vremena pauze između dva uzastopna radna ciklusa. Kako je u zadnjih nekoliko ciklusa ispitivanja na temperaturi od 430°C zamijećen čudan zvuk na tribometru prilikom zatvaranja spojke, obustavljeno je daljnje povećanje radne temperature. Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja pri visokim temperaturama zaključeno je kako se efekt temperaturnog zamora materijala pojavio jedino na tarnoj ploči #20 koja je ranije korištena.

Na temelju dobivenih rezultata dani su prijedlozi daljnjih ispitivanja. Kako bi se uklonio utjecaj metalnih i ostalih dijelova tarne ploče prilikom ispitivanja sušenja, prijedlog je da se tarne obloge skinu s tarne ploče te potom ispituju u električnoj pećnici. Prijedlog daljnjih ispitivanja pri visokim temperaturama je da se ispitivanja provedu na 450°C na barem tri tarne ploče po cijeloj dubini svake ploče.

LITERATURA

- [1] Schaeffler Technologies AG & Co. KG, »LuK Clutch Course - An introduction to clutch technology for passenger cars«.
- [2] Society of Automotive Engineers, Inc., Manual Transmission Clutch Systems, 1997.
- [3] M. Hoić, M. Hrgetić i J. Deur, »Sustav za telemetrijsko mjerenje temperature rotacijskih pogonskih elemenata,« Zagreb, 2019.
- [4] Hrvatska obrtnička komora - Pučko otvoreno učilište Zagreb, Tehnika motornih vozila, Zagreb, 2004.
- [5] Schaeffler Technologies AG & Co. KG, »Clutch System Diagnostic Guide - LuK's Complete Guide to Clutch Operation and Failure Diagnosis«.
- [6] Sachs, »Standard clutch actuation system,« [Mrežno]. Available: <https://slideplayer.com/slide/1552902/>. [Pokušaj pristupa 8 Rujan 2019].
- [7] I. Mahalec, Z. Lulić i D. Kozarac, Konstrukcije motora, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [8] [Mrežno]. Available: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/91LoPizGyNL._AC_SL1500_.jpg. [Pokušaj pristupa 28 Prosinac 2019].
- [9] Schaeffler, »LuK Dual Mass Flywheel,« [Mrežno]. Available: <https://www.repxpert.com/en/schaeffler-products/page-ds2021>. [Pokušaj pristupa 29 Prosinac 2019].
- [10] M. Pisaturo, »Dry clutch for automated manual transmissions - Structural analysis and control strategies,« University of Salerno, Salerno, 2013.

- [11] Sachs, »From Clutch Cable to CSC: Clutch Actuation Systems for Cars and LCV,« [Mrežno]. Available: <https://aftermarket.zf.com/go/en/sachs/products/cars-and-vans/clutch-systems/clutch-actuation-systems/>. [Pokušaj pristupa 28 Studeni 2019].
- [12] M. Hoić, »Modeliranje dinamike suhe dvostrane spojke,« Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [13] Schaeffler Technologies AG & Co. KG, »LuK Innovative clutch facing materials - Cool facings for hot applications!,« 2006.
- [14] Nilkanth Exports, »Granular Activated Carbon,« [Mrežno]. Available: <http://www.nilkanthexports.com/GRANULAR-ACTIVATED-CARBON.php>. [Pokušaj pristupa 4 Prosinac 2019].
- [15] Miba, »Miba Facing,« [Mrežno]. Available: <http://www.amsautomotive.com/miba-facing#prettyPhoto>. [Pokušaj pristupa 11 Rujan 2019].
- [16] Sachs, [Mrežno]. Available: <https://www.carid.com/images/sachs/items/sd80217kl.jpg>. [Pokušaj pristupa 5 Prosinac 2019].
- [17] [Mrežno]. Available: <https://www.chinacutchbrake.com/wp-content/uploads/2017/05/71High-Quality-Glass-Fiber-Clutch-Lining-1.jpg>. [Pokušaj pristupa 6 Prosinac 2019].
- [18] K. Grilec i V. Ivušić, Tribologija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za materijale, 2011.
- [19] O. Abdullah i J. Schlattmann, »Thermal behavior of friction clutch disc based on uniform pressure and uniform wear assumptions,« 2016.
- [20] X. Xiao, Y. Yin, J. Bao, L. Lu i X. Feng, »Review on the friction and wear of brake materials,« Advances in Mechanical Engineering, 2016.
- [21] A. Ramalhoa i J. Miranda, »The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems,« Elsevier, 2005.

- [22] D. Grzelczyk i A. J., »Wear Processes in a Mechanical Friction Clutch: Theoretical, Numerical, and Experimental Studies,« *Hindawi*, 2015.
- [23] E. Rabinowicz, *Friction and wear of materials*, 2nd edition, New York: John Wiley and Sons, 1995.
- [24] M. Hoić, N. Kranjčević, Z. Herold i J. Deur, »Experimental Characterization and Modeling of Dry Dual Clutch Wear,« SAE International, Zagreb, 2014.
- [25] Katedra za mjerenje i kontrolu, Ispitivanje hrapavosti tehničkih površina, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [26] M. Müller i G. Ostermeyer, »A Cellular Automaton model to describe the three-dimensional friction and wear mechanism of brake systems,« Elsevier, 2007.
- [27] D. Strommenger, C. Gühmann, R. Knoblich i J. Beilharz, »Wear Modelling for Remaining Lifetime Prediction of Dry Clutches,« Springer, 2016.
- [28] H. Feng, M. Yimin i L. Juncheng, »Study on Heat Fading of Phenolic Resin Friction Material for Micro-automobile Clutch,« International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010.
- [29] G. Fernandes, W. Haertel Jr., P. Zanotto i A. Sinatora, »Influence of mild and severe wear condition in the formation and stability of friction film in clutch system,« Elsevier, 2013.
- [30] A. Della Gatta, L. Iannelli, M. Pisaturo, A. Senatore i F. Vasca, »Dry Clutch Engagement Modelling and Control,« Milano, 2017.
- [31] M. Hoić, M. Hrgetić i J. Deur, »Design of a pin-on-disc-type CNC tribometer including an automotive dry clutch application,« Elsevier, 2016.
- [32] M. Hoić, M. Hrgetić, N. Kranjčević, M. Kostelac, J. Deur i A. Tissot, »Design of a CNC tribometer for a full dry clutch friction plate including wear characterization application,«.
- [33] M. Faidh-Allah, »The Temperature Distribution in Friction Clutch Disc under Successive Engagements,« 2018.

- [34] T. Gkinis, R. Rahmani i H. Rahnejat, »Integrated Thermal and Dynamic Analysis of Dry Automotive Clutch Linings,« 2019.

PRILOZI

I. CD-R disk