

Trošenje klipa i košuljice cilindra motora te zupčanika reduktora traktora

Pavlović, Anđela

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:235:698490>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Andela Pavlović

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec, dipl. ing.

Student:

Anđela Pavlović

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se Bogu za sve protekle akademske godine i uspješnom završetku studija.

Zahvaljujem se mentoru prof .dr. sc. Krešimiru Grilecu i asistentici Ivani Bunjan na ukazanoj pomoći i strpljenju pri izradi ovoga rada.

Također, želim se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima za svu pomoć i potporu tijekom proteklih godina.

Anđela Pavlović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: ANĐELA PAVLOVIĆ Mat. br.: 0035196199

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje klipa i košuljice cilindra motora te zupčanika reduktora traktora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of tractor engine piston, cylinder liner and transmission gear**

Opis zadatka:

Kod traktora, uz trošenje dijelova koji rade u zemlji, troše se i njegovi standardni dijelovi koje posjeduju i ostala motorna vozila. Zbog specifičnosti rada poljoprivrednih strojeva i trošenje tih dijelova može biti specifično.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Opisati tribosustav klip – košuljica cilindra motora te navesti materijale za njihovu izradu.
- 2) Opisati tribosustav zupčanika mjenjača te navesti materijale za njihovu izradu.
- 3) Pronaći potrošene dijelove klipa i košuljice cilindra te zupčanika mjenjača traktora.
- 4) Provesti karakterizaciju materijala potrošenih dijelova.
- 5) Analizirati potrošene dijelove te odrediti mehanizme trošenja.

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

Zadatak zadan:
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:
M. Grilec
prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Predsjednica Povjerenstva:
Biserka Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA I OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. MATERIJALI ZA IZRADU KLIPA I CILINDRA MOTORA.....	2
2.1. Cilindar motora	2
2.2. Klip motora	5
2.3. Materijali za izradu cilindra (bloka) motora	7
2.4. Materijali za izradu klipa motora	9
3. MATERIJALI ZA IZRADU ZUPČANIKA MJENJAČA.....	12
3.1. Zupčani prijenosnik (mjenjač)	12
3.2. Materijali za izradu zupčanika mjenjača [17]	16
3.2.1. Materijali za izradu zupčanika mjenjača brzine traktora [17].....	18
4. TRENJE I MEHANIZMI TROŠENJA	19
4.1. Površine u dodiru	19
4.2. Vrste i procesi trenja	22
4.3. Mehanizmi i procesi trošenja	24
4.3.1. Slučajevi trošenja kod cilindra i klipa motora te zupčanika reduktora.....	32
5. EKSPERIMENTALNI DIO	36
5.1. Ispitivanje klipa i cilindarske košuljice traktora	37
5.1.1. Karakterizacija materijala	41
5.1.2. Analiza tragova i određivanje mehanizama trošenja	56
5.2. Ispitivanje zupčanika reduktora traktora.....	63
5.2.1. Karakterizacija materijala	65
5.2.2. Analiza tragova i određivanje mehanizama trošenja	69
6. ZAKLJUČAK.....	72
LITERATURA.....	74
PRILOZI.....	76

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz suhe (lijevo) i mokre košuljice (desno) [3].....	3
Slika 2. Utjecaj obrade cilindra na štetnu emisiju, trajnost i ekonomičnost motora [3]	4
Slika 3. Prikaz klipa i klipnjače [2].....	5
Slika 4. Klip od Al-legure (lijevo) i klip od čelika (desno) [11].....	11
Slika 5. Volkswagen-ov manualni mjenjač brzina [14]	12
Slika 6. Dijelovi zupčanika i zuba [13]	13
Slika 7. Topografija i karakteristike hrapavosti površine [26].....	19
Slika 8. Nominalna i stvarna dodirna površina [26].....	20
Slika 9. Hertz-ov dodir dviju kugli [26].....	21
Slika 10. Prikaz elemenata tribosustava [27]	22
Slika 11. Trenje klizanja [28].....	23
Slika 12. Jedinični događaj abrazije [26]	25
Slika 13. Čista abrazija [26]	25
Slika 14. Selektivna abrazija [26]	26
Slika 15. Nulta abrazija [26]	26
Slika 16. Jedinični događaj adhezije [26].....	27
Slika 17. Trajno nalijepljene čestice na površinu [26].....	28
Slika 18. Jedinični događaj umora površine [26].....	28
Slika 19. Površina oštećena umorom površine [26].....	29
Slika 20. Jedinični događaj tribokorozije [26]	30
Slika 21. Površina oštećena tribokorozijom [29]	31
Slika 22. Opći oblik procesa trošenja [30]	32
Slika 23. Procesi trošenja kliznih elemenata [30]	33
Slika 24. Procesi trošenja kotrljajućih elemenata [30].....	35
Slika 25. Klip i košuljica cilindra traktora Zetor 4911	36
Slika 26. Zupčanik mjenjača traktora Zetor 5211	36
Slika 27. Zetor 4911 iz 1978. godine [34].....	37
Slika 28. XRF DELTA PROFESSIONAL uređaj za analizu elemenata u materijalu [38]	41
Slika 29. Izrezani uzorci: klipa (lijevo) i prstena (desno)	43
Slika 30. Postupak oblaganja uzorka prstena u polimernu masu	43
Slika 31. Uređaj za oblaganje uzoraka u polimernu masu	44
Slika 32. Obloženi uzorci: klipa (lijevo) i prstena (desno)	44
Slika 33. Uređaj za brušenje uzoraka	45
Slika 34. Uređaj za poliranje uzoraka	46
Slika 35. Izgled uzoraka nakon poliranja	47
Slika 36. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x	48
Slika 37. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x	48
Slika 38. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x	49
Slika 39. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x	49
Slika 40. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x.....	50
Slika 41. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x.....	50
Slika 42. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x.....	51
Slika 43. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x.....	51
Slika 44. Izgled površine uzorka košuljice nakon brušenja, poliranja i nagrizanja	53
Slika 45. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x.....	54
Slika 46. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x.....	54
Slika 47. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x.....	55
Slika 48. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x.....	55

Slika 49. Cilindarska košuljica Zetor-a	57
Slika 50. Prikaz istrošenosti vanjske stijenke donje plohe košuljice	58
Slika 51. Presjek cilindarske košuljice	59
Slika 52. Tragovi trošenja na unutarnjoj stijenci košuljice	60
Slika 53. Abrazijsko trošenje čela klipa	61
Slika 54. Pojava rupica na površini uslijed erozijskog djelovanja	62
Slika 55. Tijelo klipa s označenim mehanizmima trošenja	62
Slika 56. Zetor 5211, 1988. godina [36]	63
Slika 57. Uzorak prije ulijevanja i uliven uzorak nakon brušenja	65
Slika 58. Uzorak nakon poliranja (lijevo) i nagrizanja (desno)	66
Slika 59. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x	67
Slika 60. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x	67
Slika 61. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x	68
Slika 62. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x	68
Slika 63. Površina loma zubi zupčanika.....	69
Slika 64. Površina loma zubi zupčanika.....	70
Slika 65. Prikaz korijena pukotine uslijed umora površine.....	70
Slika 66. Rupičasta korozija na bokovima zubi	71

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjena zupčanika u ovisnosti o položajima osi vratila [13]	15
Tablica 2. Prednosti i nedostaci zupčanih prijenosnika [12], [13]	16
Tablica 3. Dimenzije košuljice cilindra.....	38
Tablica 4. Dimenzije klipa	39
Tablica 5. Prikaz udjela elemenata u materijalu klipa	42
Tablica 6. Prikaz udjela elemenata u materijalu prstena	42
Tablica 7. Prikaz udjela elemenata u materijalu košuljice	52
Tablica 8. Dimenzije zupčanika mjenjača.....	64

POPIS KRATICA I OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm	Površina
Al	-	Aluminij
Cr	-	Krom
Cu	-	Bakar
ČL	-	Čelični lijev
d	mm	Promjer zupčanika
DMT	-	Donja mrtva točka
Fe	-	Željezo
F_N	N	Normalna sila
F_t	N	Tangencijalna sila
GMT	-	Gornja mrtva točka
i	-	Prijenosni omjer
Mg	-	Magnezij
Mn	-	Mangan
n	min ⁻¹	Broj okretaja vratila
Ni	-	Nikal
NL	-	Nodularni lijev
P	-	Fosfor
p	Pa	Tlak
r	mm	Radijus
S	-	Sumpor
Si	-	Silicij
SL	-	Sivi lijev
t	h	Vrijeme
t_u	h	Vrijeme uhodavanja
z	-	Broj zubi zupčanika
Zn	-	Cink
XRF	-	Rendgenska fluorescentna analiza
ΔV	mm	Promjena volumena
μ	-	Faktor trenja

SAŽETAK

Izum motora s unutarnjim izgaranjem u devetnaestom stoljeću predstavljao je veliki napredak u području tehnike. Od tada pa do danas gotovo da nema područja u kojem motori s unutarnjim izgaranjem nisu zastupljeni bilo da se radi o benzinskom ili dizelskom motoru. Proizvodnja poljoprivrednih strojeva omogućila je ljudima lakše, jednostavnije, brže, ali i ekonomičnije obavljanje poslova obrade zemlje. S obzirom na težinu uvjeta rada, od strane proizvođača propisan je vijek trajanja za vitalne dijelove motora i transmisije, odnosno broj sati pri kojima se mora napraviti njihov remont ili zamjena. Ispitivanja u radu napravljena su na istrošenim dijelovima traktora, odnosno napravljena je analiza istrošenosti i mikrostrukture cilindarske košuljice, klipa i zupčanika reduktora. Cilindarska košuljica i klip zamijenjeni su pri generalnom remontu motora zbog istrošenosti, a zupčanik reduktora oštećen je uslijed umora materijala i preopterećenja. Na uzorcima dijelova analizirana je mikrostruktura na svjetlosnom mikroskopu i primjenom XRF-metode dobiven je kemijski sastav materijala od kojeg su dijelovi izrađeni. Cilj rada je prepoznati mehanizme trošenja analizirajući tragove trošenja na dijelovima, koji su uzroci njihovog nastanka te koje mjere se mogu poduzeti za smanjenje njihovog intenziteta.

Ključne riječi: motor, traktor, cilindarska košuljica, klip, prsten, zupčanik, trenje, trošenje

SUMMARY

The invention of the internal combustion engine in 19th century was a major improvement in the field of engineering. From then on, there are almost no areas in which internal combustion engines are not represented, whether gasoline or diesel engines. The production of agricultural machinery made it easier, simpler, faster and more economical for people to carry out land processing activities. Given the weight of operating conditions, the manufacturer prescribes the life span for the vital parts of engine and transmission, that is, the number of hours during which their overhaul or replacement must be made. The work tests were carried out on worn out parts of the tractor, that is, an analysis of wear and microstructure of the cylinder liner, piston and transmission gear was made. The cylinder liner and the piston were replaced during the general engine overhaul due to wear and the transmission gear was damaged due to fatigue of materials and overload. The microstructure of parts sample was analyzed on the light microscope and the chemical composition of the material from which the parts were made was obtained using XRF-method. The aim of this paper is to recognize the mechanisms of wear by analyzing the traces of wear on parts, which are the causes of their formation and which measures can be taken to reduce their intensity.

Key words: engine, tractor, cylinder liner, piston, piston ring, gear, friction, wear

1. UVOD

Devetnaesto stoljeće obilježila je pojava motora s unutarnjim izgaranjem, takvih motora u kojima se kemijska energija goriva pretvara u toplinsku energiju, a zatim se ta toplinska energija djelovanjem mehaničkih elemenata pretvara u mehanički rad. Razvile su se dvije vrste motora koje su i danas u primjeni: Ottov i Dieselov motor. Ottov (benzinski) motor primjenjuje se kod osobnih automobila, motocikala te za manje uređaje poput motorne pile i kosilice za travu. Dieselov (dizelski) motor, osim primjene kod cestovnih vozila, namijenjen je pogonu poljoprivrednih strojeva (traktori, sijačice...), građevinskih strojeva, turbina u termoelektranama itd.

Dijelovi motora poput cilindra, klipa, klipnjače i klipnih prstenova izloženi su velikim toplinskim opterećenjima pa je nužno pri konstruiranju tih dijelova odabrati optimalni materijal koji će biti zadovoljavajuće kvalitete uz prihvatljivu cijenu. Materijali od kojih se izrađuju navedeni dijelovi moraju imati veliku otpornost na trošenje i visoke temperature, zadovoljavajuća mehanička svojstva poput čvrstoće, granice razvlačenja i tvrdoće pri povišenim temperaturama, što bolju toplinsku provodljivost radi učinkovitijeg hlađenja i dobru otpornost na koroziju.

Okretni moment s motora prenosi se preko spojke na zupčanike mjenjačke kutije. Zupčanci prenose velike sile i momente stoga je nužno da budu izrađeni od kvalitetnih materijala kod kojih neće doći do naglog trošenja zubi i do njihovog loma. Materijal za izradu zupčanika mora imati dobru obradivost i najčešće se provodi naknadna toplinska obrada poput cementiranja i poboljšavanja za postizanje boljih mehaničkih svojstava.

U teorijskom dijelu rada bit će detaljno objašnjeno koje su uloge navedenih dijelova kao i materijali od kojih se isti izrađuju i način na koji se izrađuju, kako poboljšati mehanička svojstva određenog materijala i od kojih materijala se izrađuju zupčanci kod traktora. Također, bit će riječ općenito o procesima i mehanizmima trošenja, ali i o onim mehanizmima trošenja koji su karakteristični za navedene dijelove.

U eksperimentalnom dijelu radu provest će se karakterizacija materijala za klip, cilindar i zupčanik reduktora traktora Zetor, analiza tragova trošenja te na osnovu tragova donijeti zaključak o zastupljenim mehanizmima trošenja.

2. MATERIJALI ZA IZRADU KLIPA I CILINDRA MOTORA

U naslovu poglavlja pod pojmom motor podrazumijeva se motor s unutarnjim izgaranjem, a navedeni podaci odnose se na dizelski motor. Diesellov motor široko je zastupljen kod svih vrsta cestovnih vozila (putnička i teretna vozila), zrakoplova te građevinskih i poljoprivrednih strojeva. Rad dizelskog motora temelji se na usisu zraka u cilindar preko usisnih ventila. Zrak se potom tlači djelovanjem sile klipa na dovoljno visoku temperaturu pri kojoj se ubrizgava gorivo i dolazi do samozapaljenja smjese [1]. U nastavku će biti detaljno opisane funkcije cilindra i klipa motora kao i materijali od kojih su isti izrađeni.

2.1. Cilindar motora

Cilindar motora je dio motora okruglog presjeka unutar kojeg dolazi do izgaranja smjese stlačenog zraka i ubrizganog goriva pod visokim tlakom. Smješten je u bloku motora, a određen je promjerom i dužinom. Promjer cilindra još se naziva i provrt klipa dok pod dužinom podrazumijevamo udaljenost od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT) [2]. Cilindri, odnosno blokovi motora, s obzirom na materijal i postupak izrade mogu se podijeliti u sljedeće skupine [3]:

- Monometalna ili jednometalna izvedba
- Izvedba s cilindarskim košuljicama
- Uliveni umetci za kliznu plohu cilindra

Monometalna ili jednometalna izvedba karakteristična je za cilindarski blok izrađen od sivog lijeva.

Cilindarske košuljice većinom se primjenjuju kod blokova od aluminijskih ili magnezijevih legura, a ponekad i kod blokova izrađenih od sivog lijeva (npr. kod kamiona).

Cilindarske košuljice mogu se podijeliti u nekoliko skupina prema sljedećim kriterijima [3]:

Prema načinu hlađenja (prijelazu topline) mogu biti:

- Suhe košuljice
- Mokre košuljice

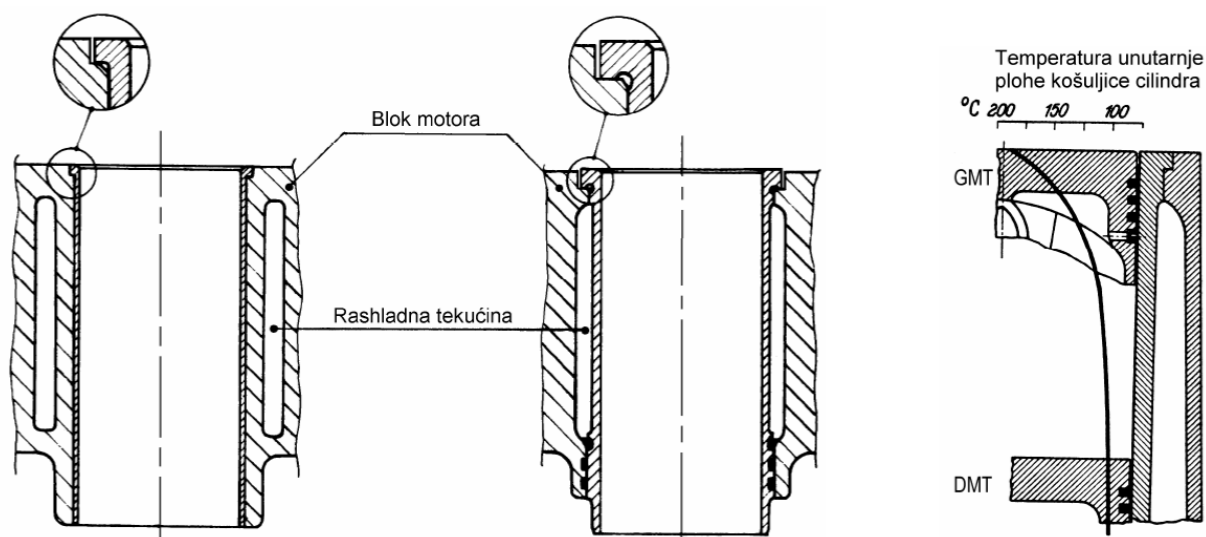
Prema materijalu od kojeg su izrađene:

- Košuljice od sivog lijeva
- Košuljice od Al-legura

Obzirom na spoj košuljice i bloka:

- Uprešane košuljice
- Ulivene košuljice
- Uložene košuljice – suhe ili mokre

Cilindarske košuljice primjenjuju se u slučajevima kada je blok motora izrađen od lakše i tribološki manje postojane legure kako bi se smanjilo trošenje samog cilindra. Suhe košuljice debljine stijenke od 2,5 do 3,5 mm uprešaju se u blok (čvrsti dosjed), a zatim se obrađuju na konačnu mjeru. Druga mogućnost je primjena suhих uložnih košuljica koje su već obrađene na konačnu mjeru te se samo rukom uguraju u provrt bloka (tzv. *slip-fit* košuljice). Osnovna prednost suhe košuljice je mogućnost jednostavnog popravka potpuno istrošenog cilindra te sloboda izbora materijala cilindra neovisno o bloku. Nedostatak suhe košuljice je otežano odvođenje topline i relativno visoki troškovi popravka jer se obrađuje i provrt u koji se košuljica uprešava [3].



Slika 1. Prikaz suhe (lijevo) i mokre košuljice (desno) [3]

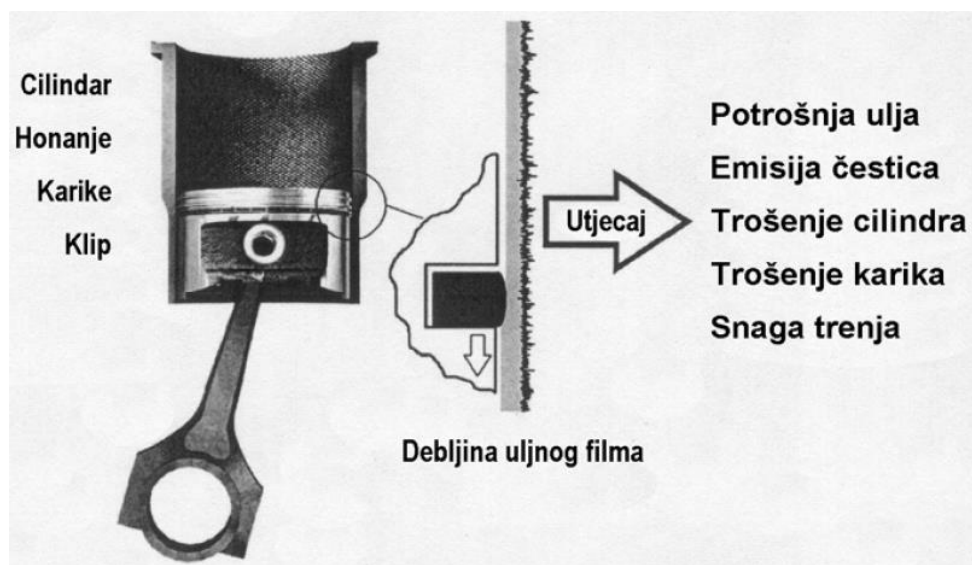
Mokra košuljica je zapravo samostojeći cilindar potpomognut blokom s gornje i donje strane. Za razliku od suhe košuljice, mokra košuljica je u direktnom kontaktu s rashladnom tekućinom. Budući da između rashladne tekućine i košuljice nema potporne strukture provrta bloka, košuljica mora biti odgovarajuće debljine i čvrstoće stijenke kako bi mogla podnijeti velika opterećenja koja nastaju pri izgaranju. Osnovna prednost mokre košuljice je njena jednostavna

zamjena ukoliko dođe do oštećenja kao i mogućnost podnošenja velikih opterećenja bez pregrijavanja zbog izuzetno dobrog i učinkovitog hlađenja [4].

Mokra košuljica mora biti postavljena malo iznad bloka da bi se pri stezanju najveći tlak nalijeganja brtve postigao na košuljici. Na *Slici 1.* prikazana je i krivulja temperature unutarnje plohe košuljice cilindra. Najveće temperature su na vrhu gdje nema kontakta košuljice s rashladnom tekućinom.

Ulivene košuljice primjenjuju se samo kod blokova od Al-legura izrađenih postupkom tlačnog lijevanja. Prilikom lijevanja taline u kalup, u kalup se na mjesto cilindra umetnu cilindrični ulošci od tvrdog i poroznog silicija u čije pore pod djelovanjem visokog tlaka ulazi talina Al-legure te oni hlađenjem i stezanjem postaju sastavni dio bloka.

Cilindri motora izloženi su jako visokim temperaturama i tlakovima (kod Diesellovih motora radne temperature kreću se u rasponu 700°C–900°C pri tlakovima 30-55 bar [5]) stoga je neophodna pravilna obrada unutarnje površine postupcima honanja i kemijskom obradom. Cilindar ne smije biti prefino honan jer se na jako glatkoj površini ulje ne može zadržati pa je posljedica toga slabo podmazivanje koje dovodi do nagorijevanja cilindra. Ako je površina cilindra pak pregruba, ulje će se dobro zadržati, podmazivanje će biti zadovoljavajuće, ali zbog velike količine ulja, povećat će se emisija štetnih tvari u ispušnim plinovima. Utjecaj debljine uljnog filma prikazan je na *Slici 2.* [3]



Slika 2. Utjecaj obrade cilindra na štetnu emisiju, trajnost i ekonomičnost motora [3]

Obrada unutarnje površine cilindra uz honanje podrazumijeva i kemijsku zaštitu koja osigurava dugotrajan rad pri povišenim temperaturama i opterećenjima uz minimalno trošenje površine. Kemijska obrada cilindra obuhvaća sljedeće postupke [3]:

- Fosfatiranje i nitriranje – provode se nakon honanja s ciljem zaštite od nagorijevanja karika i pojave uzdužnih brazdi
- Fosfatiranjem se smanjuje vrijeme uhodavanja motora
- Kaljenjem, kromiranjem i nitriranjem smanjuje se trošenje cilindra

Eksperimentalnim ispitivanjima potvrđeno je kako cilindar s grubo obrađenom površinom ima najmanje trošenje i najveću otpornost prema nagorijevanju.

2.2. Klip motora

Klip je sastavni dio motora smješten u cilindru, a preko klipnjače je vezan na koljenasto vratilo. Klip je mehanička naprava koja služi za ostvarivanje linearnog gibanja unutar cilindra i za brtvljenje cilindra. Kada se klip giba od DMT do GMT, klip tlači zrak, pumpa ubrizgava gorivo te dolazi do zapaljenja smjese. Čelo klipa preuzima potisak sile koja nastaje pri izgaranju smjese zraka i goriva. Spoj klipnjače i klipa s njegovim dijelovima prikazan je na *Slici 3.* [2],[6].



Slika 3. Prikaz klipa i klipnjače [2]

Klip je najugroženiji dio motora, a on ujedno i ograničava brzinu vrtnje klipnih motora. Tijekom rada klip podnosi velika mehanička i toplinska naprezanja i u takvim uvjetima mora obavljati sljedeće funkcije [3]:

- a) Prenositi sile plinova na klipnjaču
- b) Prenositi normalnu silu plinova na cilindar
- c) Pomoću brtvenih elemenata (prstena) mora brtviti prostor izgaranja prema kućištu radilice
- d) Prenositi toplinu plinova izgaranja na cilindar koja se dalje odvodi s cilindra na rashladno sredstvo
- e) Kod dvotaktnih motora razvodi radnu tvar pomoću usisnih i ispušnih kanala

Da bi mogao ispravno obavljati navedene funkcije, klip mora imati sljedeća svojstva [3]:

- Što manja masa da bi sila inercije bila što manja kod većih brzina vrtnje
- Čelo klipa mora imati što veću krutost, a plašt klipa treba biti elastičan
- Klipni utori moraju imati veliku čvrstoću kako ih karike ne bi uništile
- Materijal klipa mora imati dobru toplinsku provodljivost kako bi odvođenje topline s klipa na cilindar bilo što bolje
- Klip treba biti konstruiran tako da mu je rastezanje s povećanjem temperature što manje

Promjer klipa je malo manji od unutarnjeg promjera cilindra ili košuljice kako bi mu se omogućilo nesmetano gibanje. Zbog razlike između unutarnjeg promjera cilindra/košuljice i promjera klipa, plinovi koji nastanu pri izgaranju prolazili bi kroz te zatore u donji dio motora. Kako bi se to spriječilo, klipovi su opremljeni karikama, odnosno klipnim prstenima čiji je osnovni zadatak brtvljenje. Najčešće se postavljaju tri klipna prstena od kojih su dva kompresijska, a funkcija im je brtvljenje između klipa i stijenke cilindra, dok je treći prsten uljni. Uljni prsten ostavlja tanki sloj ulja na stijenkama cilindra (nekoliko mikrometara) dok se klip giba prema DMT [2].

Pri konstrukciji nekog motora potrebno je uzeti u obzir njegovu radnu temperaturu zbog činjenice da pri zagrijavanju dolazi do širenja materijala. Stoga je potrebno pri proračunu promjera cilindra uzeti u obzir i povećanje promjera klipa uslijed zagrijavanja [2].

2.3. Materijali za izradu cilindra (bloka) motora

Blok je središnji, nosivi dio motora čija je uloga spriječiti izlaz radnog medija, rashladnog sredstva i maziva, ali i spriječiti ulaz vlage, prašine i prljavštine. U pojedinim slučajevima blok je i nosivi dio konstrukcije (npr. kod traktora, motocikla itd.) [3]. Kao što je prije navedeno, cilindar je sastavni dio bloka, odnosno provrt u bloku motora u čijoj se unutrašnjosti odvija proces pretvorbe toplinske u mehaničku energiju. Stoga materijali za izradu cilindra, odnosno bloka motora, moraju biti otporni na visoke temperature i tlakove, imati visoku otpornost na trošenje (najčešći mehanizmi trošenja su abrazija i umor materijala), visoku čvrstoću i korozivnu postojanost.

Najčešći materijali za izradu bloka su sivi lijev i aluminijske legure [3].

- Sivi lijev – najčešće primjenjivan materijal za izradu bloka/cilindra motora. Sivi lijev je legura željeza i ugljika gdje je ugljik izlučen u obliku grafita. Obično sadrži 2,5 do 4% ugljika, 1 do 3% silicija, 0,2 do 1% mangana, 0,02 do 0,25% sumpora i 0,02 do 1% fosfora. Karakteriziraju ga odlična klizna svojstva, dobra otpornost na trošenje, relativno velika tvrdoća te dobra toplinska postojanost i svojstva prigušenja udara i buke. Ima veliku krutost, a sama proizvodnja je jeftina i jednostavna. Sivi lijev ima veliku tlačnu čvrstoću, ali malu vlačnu čvrstoću koja je posljedica izlučivanja grafita u obliku listića. Grafitni listići imaju zarezno djelovanje pa značajno utječu na mehanička svojstva sivog lijeva. Što ih je više i što su „grublji“ to su mehanička svojstva lijeva lošija. Mala vlačna čvrstoća te sklonost deformacijama i stvaranju pukotina glavni su nedostaci u primjeni sivog lijeva. Sivi lijev kao materijal za izradu blokova motora danas je najzastupljeniji kod Diesellovih motora zbog velikih opterećenja (npr. blok motora traktora izrađen je od sivog lijeva). Blokovi od SL lijevaju se u pijesku bez obzira na izvedbu oblika glave cilindra (*Closed-Deck* i *Open-Deck* izvedba) [3],[7],[8].
- Vermikularni lijev – naziva se još i crvičasti lijev jer se grafit izlučuje u obliku crvića. Vermikularni lijev je zapravo sivi lijev s dodatkom magnezija. Godine 1999. počela je serijska proizvodnja blokova Diesellovih motora od vermikularnog lijeva. U usporedbi sa sivim lijevom ima dvaput veću vlačnu čvrstoću, a modul elastičnosti mu je 1,5 puta veći. S povećanjem debljine stijenke čvrstoća mu opada znatno manje nego kod sivog lijeva [3]. Vlačna čvrstoća vermikularnog lijeva kreće se u rasponu od 300 do 600 MPa, a modul elastičnosti od 170 do 190 GPa [8]. Sivi lijev s vermikularnim grafitom je odličan kompromis između visokočvrstog sivog lijeva s kuglastim grafitom i dobre

obradivosti i kliznih svojstava sivog lijeva s listićavim grafitom [9]. Hoće li se grafit izlučiti u crvolikom ili kugličastom obliku, ovisit će o udjelu magnezija u sivom lijevu. Cilindri, odnosno blokovi izrađeni od vermikularnog lijeva su laganiji i bolje prigušuju zvuk u odnosu na blokove od sivog lijeva. Nedostatak je nimalo jednostavna proizvodnja materijala jer zahtjeva optimiranje postupka lijevanja i sužavanje granice dodatka magnezija [3].

- Aluminijske legure – najprimjenjivaniji materijal za izradu cilindra/bloka motora osobnih automobila, motocikala, zrakoplova te manjih motora razne namjene. Najvažnija prednost blokova od Al-legura je manja masa u odnosu na blokove od sivog lijeva. Gustoća Al-legura je samo jedna trećina gustoće SL, ali im je toplinsko istezanje tri puta veće. Čvrstoća Al-legura danas je približno jednaka čvrstoći SL, ali ne i pri povišenim temperaturama. Omogućuju najbolje hlađenje te vrlo učinkovitu i jeftinu proizvodnju postupkom tlačnog lijevanja (u odnosu na SL, veća cijena proizvodnje) [3]. Budući da se pri izradi cilindra motora mora uzeti u obzir postojanost materijala na povišenim temperaturama, cilindar odnosno blok motora izrađuje se od Al-Si legura. Al-Si legure pripadaju skupini lijevanih aluminijevih legura, a poznate su i pod nazivom silumin. Zbog prisutnosti silicija imaju dobru livljivost, a za poboljšanje mehaničkih svojstava dodaju se i ostali legirni elementi poput bakra i magnezija. Silicij pozitivno utječe i na otpornost na trošenje, ali loše utječe na čvrstoću, duktilnost i strojnu obradu [10]. Najčešće Al-Si legure koje se primjenjuju za izradu blokova motora su AlSi5Cu3 i AlSi7Mg sa sljedećim karakteristikama [8]:

AlSi5Cu3 legura ima sljedeći kemijski sastav: 85,5 do 91,5% aluminijska, 5,5 do 6,5% silicija, 3 do 4% bakra, do 0,35% nikla, do 0,25% titana, do 0,5% mangana, do 1% željeza, do 0,1% magnezija i do 1% cinka. Karakteriziraju je dobra livljivost, toplinska provodljivost i korozivna postojanost.

AlSi7Mg legura ima sljedeći kemijski sastav: 91,1 do 93,3% aluminijska, 6,5 do 7,5% silicija, 0,25 do 0,45% magnezija, do 0,2% bakra, 0,2% titana, 0,2% željeza i 0,1% cinka. Ima slična svojstva kao i legura AlSi5Cu3, ali toplinskom obradom ove legure moguće je postići veće vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja.

Ove dvije legure pripadaju skupini podeutektskih Al–Si legura čiji je udio silicija manji od 12%. Nikal i željezo dodaju se legurama kako bi povećali čvrstoću pri povišenim temperaturama, a da pritom ne smanjuju žilavost [10].

2.4. Materijali za izradu klipa motora

Budući da je klip najosjetljiviji dio motora koji mora ispuniti niz zahtjeva, onda i materijal od kojeg se izrađuje mora imati određena mehanička i toplinska svojstva koja će omogućiti klipu ispravno funkcioniranje. Glavni zahtjevi za izbor materijala klipa su što manja masa (radi smanjenja inercijskih sila), što bolja toplinska provodljivost da bi hlađenje bilo učinkovitije, zadovoljavajuća čvrstoća na povišenim temperaturama i što manje toplinsko istezanje. S obzirom na zadane uvjete i veličinu motora, materijali koji se koriste za izradu klipa su aluminijske legure, čelik i sivi lijev [3].

- Aluminijske legure – primjenjuju se Al–Si legure iz skupine eutektskih (12-13% Si) i nadeutektskih legura (> 13% Si).

Eutektska legura s 12% Si je 1926. godine uvedena kao standardni materijal za izradu klipova u automobilskim motorima, a to je i ostala sve do danas [3]. Osnovne karakteristike ovih legura su visoka otpornost na koroziju i trošenje, visoka toplinska vodljivost i specifična krutost te dobra specifična čvrstoća. Izvrsna mehanička svojstva omogućena su zbog niskog tališta i uskog temperaturnog intervala skrućivanja. Moguće je provoditi percipitacijsko očvršćivanje i usitnjavanje zrna kao i sferoidizacijsko žarenje (povećana nosivost). Najčešći dodatni legirni elementi su nikal, bakar i željezo [10].

Nadeutektske legure sadrže više od 13% Si, a za izradu klipova koriste se legure s 18% Si i 24% Si. Dodavanjem Si povećava se otpornost na trošenje i smanjuje toplinsko istezanje, ali pada čvrstoća. Za potrebnu čvrstoću pri povišenim temperaturama najčešće se dodaju Mg, Cu i Fe. Moguće je provesti naknadnu toplinsku obradu za poboljšanje mehaničkih svojstava [10].

Na povišenim temperaturama klip od Al-legura isteže se gotovo 3 puta više nego SL. Stoga se takav klip izvodi s velikim međuprostorom da u situaciji vrući klip + hladni cilindar (puštanje motora u rad i naglo opterećenje hladnog motora) ne dođe do zaribavanja motora. Čvrstoća materijala naglo opada na povišenim temperaturama,

osobito iznad 400°C. Budući da je materijal dosta mekan, čestice nastale izgaranjem mogu lako oštetiti klip. Klipovi se većinom izrađuju lijevanjem u kokile koje omogućuju brzo hlađenje i stvaranje sitnozrnate mikrostrukture koja daje dobra mehanička svojstva poput povećane čvrstoće. Visoko opterećeni klipovi od Al-legura izrađuju se kovanjem u ukovnju od komada trupca, nakon čega moraju proći toplinsku obradu za uklanjanje zaostalih naprezanja. Za razliku od lijevanja u kokilu, kod kovanja se u klip ne mogu umetnuti regulacijski članovi (prstenovi i pločice) [3].

- Sivi lijev – za proizvodnju klipova uglavnom se primjenjuje sivi lijev s kuglastim grafitom (nodularni lijev). U odnosu na klipove od Al-legura, klipovi od SL nisu mekani, toplinski su manje istezljivi i lošije odvođuju toplinu s čela klipa i u pojasu karika što im predstavlja veliki problem jer je neophodno osigurati neprekinuti i pouzdani dovod ulja za hlađenje. U slučaju da se optok ulja nakratko prekine, dolazi do zaribavanja klipa.

Sivi lijev koristi se za izradu klipova kod velikih dvotaktnih sporohodnih Diesellovih motora kao i kod klipova srednjebrzohodnih Diesellovih motora promjera 150 do 200 mm. Klipovi se hlade mlazom ulja. Klipovi od SL lijevaju se u pijesku [3].

- Čelik – čelični klipovi najčešće se koriste kod velikih motora (teretna vozila) mada se u novije vrijeme sve češće nalaze i u motorima osobnih vozila. Za razliku od Al-legura, čelik ima znatno veću čvrstoću pri povišenim temperaturama što mu daje prednost u odnosu na Al-legure. Međutim, čelik slabije provodi toplinu, odnosno teže je odvesti toplinu s klipa na cilindar. Čelični klip se iznutra hladi uljem, a podnosi temperature i do 180°C veće nego klip od Al-legure. Zbog većih temperatura na čelu klipa i u rashladnim kanalima može doći do skrućivanja ulja, začepljenja kanala i ubrzanog starenja ulja. Za izradu klipa najčešće se primjenjuju niskolegirani čelici poput 38MnSiVS5, visokolegirani čelici poput SAE4140H, čelici za poboljšavanje i vatrootporni poput 42CrMo4V.

Na *Slici 4.* prikazani su klipovi izrađeni od Al-legure i čelika. Čelični klip ima manju kompresijsku visinu zbog veće čvrstoće, a zbog istog razloga je i ukupna masa čeličnog klipa i osovinice približno jednaka masi aluminijskog klipa. Stoga je i motor koji ima ugrađen čelični klip laganiji i niži. Čelični klip također osigurava i manju potrošnju goriva uz dobivanje veće snage i znatno duži vijek trajanja [3],[11].

Također je moguća izvedba i višedijelnog klipa gdje je čelo klipa izrađeno od vatrootpornog čelika ili čelika za poboljšavanje, a donji dio od eutektičke Al-legure, a u novije vrijeme od SL s kuglastim grafitom [3].



Slika 4. Klip od Al-legure (lijevo) i klip od čelika (desno) [11]

3. MATERIJALI ZA IZRADU ZUPČANIKI MJENJAČA

Zupčanik je strojni dio valjkastog ili stožastog oblika s ravnomjerno raspoređenim zubima po obodu. Dva zupčanika u zahvatu čine jedan zupčani par koji služi za prijenos rotacijskog gibanja i za prijenos okretnog momenta. Svaki zupčanik učvršćen je na svoje vratilo. Prijenos snage, odnosno okretnog momenta vrši se pomoću veze oblikom koju čini zahvat zubi [12]. U zupčanom paru jedan zupčanik je pogonski, a drugi je gonjeni i u pravilu su različitih promjera [13]. U nastavku će biti riječ o zupčastom prijenosniku motornih vozila (mjenjaču), principu rada, vrsti zupčanika te materijalima od kojih se zupčanici izrađuju.

3.1. Zupčani prijenosnik (mjenjač)

Zupčani prijenosnik je sustav s dva ili više zupčanih parova koji prenose okretni moment oblikom. Standardni primjer jednog zupčanog prijenosnika je mjenjač brzina motornog vozila (Slika 5.)



Slika 5. Volkswagen-ov manualni mjenjač brzina [14]

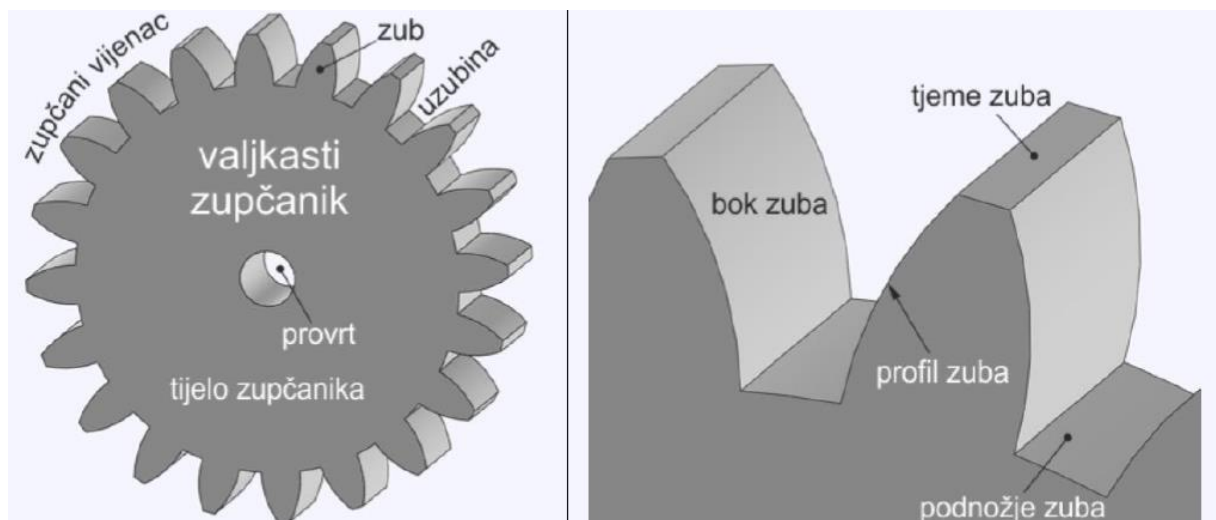
Da bi se okretni moment mogao prenijeti s pogonskog na gonjeni zupčanik, oba zupčanika moraju imati uzajamnu tangencijalnu nepokretnost koja se može ostvariti npr. klinom. U protivnom zupčanik rotira na vratilu ili vratilo rotira u zupčaniku bez prijenosa okretnog momenta.

Zupčanici rotiraju u suprotnim smjerovima i uglavnom su različitih promjera. Osim za prijenos okretnog momenta, prijenosnici se koriste za promjenu brzine vrtnje vratila i promjenu smjera vrtnje vratila. Kod reduktora (prijenosnik koji smanjuje brzinu vrtnje pogonskog vratila; ulazna brzina je veća od izlazne) manji zupčanik je pogonski, a kod multiplikatora (uređaj koji povećava brzinu vrtnje pogonskog vratila; ulazna brzina je manja od izlazne) veliki zupčanik je pogonski. Prijenosni omjer zupčanog para definira se kao omjer kutne brzine pogonskog zupčanika i brzine gonjenog zupčanika [13].

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1}$$

Zupčanik se, prema [13], sastoji od sljedećih dijelova (*Slika 6.*):

- Tijelo zupčanika
- Zupčani vijenac
- Zub
- Uzubina



Slika 6. Dijelovi zupčanika i zuba [13]

Zubi mogu biti ravni, kosi, strelasti, spiralni i zavojni [15]. Prema obliku tijela zupčanici mogu biti valjkasti, stožasti i specijalni.

Obzirom na vrstu prijenosa zupčani prijenosnici mogu biti [13]:

- S konstantnim prijenosnim omjerom
- Mjenjači
- Razdjelnici

Prijenosnici s konstantnim prijenosnim omjerom – vratila pogonskog i gonjenog zupčanika rotiraju različitim brzinama, ali je omjer tih brzina uvijek konstantan. Konstantni prijenosni omjer imaju reduktor i multiplikator između pogonskog i radnog stroja.

Mjenjač brzina ima promjenjiv prijenosni omjer na način da je promjena brzine vrtnje vratila skokovita ili povremena. Takav mjenjač brzine zahtijeva da su parovi zupčanika stalno u zahvatu dok zupčanici na izlaznom vratilu slobodno rotiraju sve dok spojka jednog od njih ne spoji s pogonskim vratilom. Mjenjač brzine nalazi se između spojke i diferencijala (pripada skupini razdjelnika). Pri pokretanju vozila javljaju se velike sile koje motor svojim okretnim momentom ne može svladati. Zato se između motora i pogonske osovine kotača ugrađuje reduktor koji će povećati okretni moment motora uz smanjenje broja okretaja [16].

Glavne funkcije mjenjača brzine motornog vozila su [16]:

- a) Prijenos i povećanje okretnog momenta motora
- b) Osiguranje praznog hoda (motor radi u zaustavljenom stanju)
- c) Promjena broja okretaja
- d) Promjena smjera vrtnje i mogućnost vožnje unatrag

Osi spregnutih zupčanika mogu biti u sljedećim odnosima: sijeku se, paralelne su, mimoilaze se i kolinearne su.

Prema zahtijevanim položajima osi zupčanika ovisit će i tip zupčanika koji se primjenjuje u radu prijenosnika (*Tablica 1.*).

Tablica 1. Primjena zupčanika u ovisnosti o položajima osi vratila [13]

Položaj osi zupčanika	Vrsta zupčanika
Paralelne osi vratila	Valjkasti zupčanici s ravnim i kosim zubima
Osi koje se sijeku	Stožasti zupčanici s ravnim i kosim zubima
Osi se mimoilaze	Valjkasti zupčanici sa zakrivljenim zubima, Stožasti zupčanici sa zakrivljenim zubima, Puž s pužnim kolom
Kolinearne osi	Harmonijski prijenosnici, Planetarni prijenosnici

Sila koja se prenosi zubima opterećuje zube na savijanje. Do loma zuba dolazi uslijed pojave umora materijala koji nastaje kao posljedica titrajnog opterećenja. Pri prijenosu snage bokovi zubi se međusobno relativno gibaju što dovodi do pojave Hertzovog pritiska na dodirnim površinama. Hertzov pritisak ovisno o hrapavosti površine i čvrstoći bokova uzrokuje utiskivanje kapljica maziva u mikropukotine zuba. Tijekom rada mikropukotine se povećavaju, geometrija zuba se narušava te u konačnici dolazi do loma zuba uslijed oštećene površine.

Ukoliko uslijed nepovoljne kombinacije opterećenja, brzine klizanja, faktora trenja bokova, stanja površine i temperature ulja dođe do prekida dotoka ulja, površina se jako zagrijava i postaje hrapava. Posljedica velike hrapavosti površine je stvaranje nadvišenja koja se zavaruju i dolazi do njihovog trenutačnog loma, a površina boka ostaje oštećena i naborana [12].

Prednosti i nedostaci zupčanih prijenosnika prikazani su u *Tablici 2*.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci zupčanih prijenosnika [12], [13]

Prednosti	Nedostaci
Visok stupanj iskoristivosti $\geq 0,98$	Najskuplji mehanički prijenosnik (osim pužnih)
Velika trajnost i izdržljivost	Zahtijeva se vrlo točna obrada
Tihi rad	Vibracije i šumovi nastali uslijed krutog prijenosa okretnog momenta
Male dimenzije	
Za prienos najmanjih do najvećih snaga i brzina vrtnje	

3.2. Materijali za izradu zupčanika mjenjača [17]

Prilikom izbora materijala za izradu zupčanika mjenjača brzine motornog vozila potrebno je uzeti u obzir sljedeće faktore: radni uvjeti, obradivost, opterećenje, tražena kvaliteta i u konačnici cijena izrade. Budući da se opterećenje prenosi zahvatom zubi, zubi moraju imati dobru otpornost na trošenje stoga je pri konstrukciji zupčanika potrebno odabrati materijal koji je dovoljno otporan na trošenje, visoke čvrstoće, ali i cjenovno prihvatljiv.

Najčešći materijali koji se koriste za izradu zupčanika su čelici i željezni lijev, ali i drugi metali poput bronce, mjedi i aluminijske legirane polimeri [18].

Za mala opterećenja i male brzine najčešće se koristi željezni lijev ili čelični lijev s neobrađenim zubima. Kod srednjih i jakih opterećenja primjenjuju se konstrukcijski čelici i čelici za cementiranje. Ako je zupčanik namijenjen za vrlo jaka opterećenja i velike brzine, onda se isti izrađuje od legiranih čelika koji su i toplinski obrađeni (cementiranje i kaljenje) [15].

- Sivi lijev pripada skupini željeznih ljevova, a grafit je u obliku lamela. Svojstvo dobre livljivosti omogućava stvaranje tvrde kore koja je otporna na trošenje i koroziju osobito kod pogona koji rade na otvorenom. Glavne prednosti sivog lijeva su velika prigušna sposobnost, dobra livljivost, dobra antikorozijska i antifriksijska svojstva i relativno niska cijena. Zbog lamelnog oblika grafita koji ima zarezno djelovanje nema dobra dinamička svojstva. Najčešće se primjenjuje za niske obodne brzine ($v = 2 \text{ m/s}$), niska opterećenja i manje važne prijenosnike.

- Nodularni lijev (žilavi lijev, kugličasti lijev) pripada skupini željeznih ljevova s grafitom u obliku kuglica. Grafit ima oblik kuglica zbog dodavanja magnezija u željezni lijev. Prednost kugličastog oblika grafita u odnosu na lamelarni je da nema zarezanog djelovanja. Po svojim svojstvima nodularni lijev ima bolja mehanička svojstva od SL, ali lošija od čeličnog lijeva. Karakteriziraju ga visoka vlačna čvrstoća i dinamička izdržljivost, visok modul elastičnosti, dobra obradivost, mogućnost zavarivanja te dobra svojstva prigušivanja i otpornosti na trošenje [19]. Nodularni lijev može se toplinski obrađivati sljedećim postupcima [20]:
 - a) Žarenje – za uklanjanje zaostalih naprezanja (reducira se 80–90% zaostalih naprezanja)
 - b) Normalizacija – postiže se povećanje otpornosti na trošenje i rast granice razvlačenja
 - c) Poboljšavanje – postiže se visoka čvrstoća, tvrdoća, otpornost na trošenje i povišena žilavost
- Temper lijev također je dio skupine željeznih ljevova koji se dobiva žarenjem željeznog lijeva u kojem je cijeli ugljik izlučen u obliku željeznog karbida odnosno perlita. Žarenjem u pijesku željezni karbid se raspada, a ugljik se pretvara u temper–ugljik. Rezultat toga je materijal visoke čvrstoće i veće elastičnosti nego SL. Prema svojstvima temper lijev se nalazi između sivog i čeličnog lijeva. Naziva se još i kovkasti lijev. Primjenjuje se za zupčanike osjetljive na oštećenja.
- Čelični lijev namijenjen je za izradu dijelova od čelika koji se naknadno ne obrađuju postupcima plastične obrade (kovanjem, valjanjem...). Može biti nelegirani (ugljični) čelični lijev i legirani čelični lijev. Dobiva se u Siemens–Martinovoj peći, elektrolučnoj i elektroindukcijskoj peći. Teško se lijeva i slabo ispunjava kalup, a odljevak je potrebno naknadno toplinski obraditi (postupak normalizacije). Karakteriziraju ga visoka čvrstoća, žilavost i istezljivost, dobra obradivost i zavarljivost. Zupčanici od ČL zadovoljavajućeg sastava i čistoće mogu se naknadno cementirati, površinski kaliti i poboljšavati [17], [21].
- Konstrukcijski čelici mogu biti ugljični čelici ili legirani čelici, a koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova, dijelova strojeva, uređaja itd. Dijele se na obične (ugljične ili

niskolegirane) čelike te plemenite (ugljične ili legirane) čelike za izradu dijelova s većim zahtjevima (primjer: za izradu zupčanika). Konstrukcijski čelici imaju visoku otpornost na trošenje, visoku čvrstoću i granicu razvlačenja, zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Zubi zupčanika mogu se fino obraditi što pogoduje tihom i mirnom radu. Jezgra zuba mora ostati žilava radi elastičnog preuzimanja opterećenja [17], [23].

- Prešane umjetne smole imaju dobra svojstva prigušenja i otporne su na vodu, kemikalije, kiseline i temperaturne razlike. Ukoliko pri izboru materijala zupčanika nije mjerodavno svojstvo antikorozivnosti, zupčanicima od umjetnih smola se sparuju s glatko obrađenim zupčanicima od metala.

3.2.1. Materijali za izradu zupčanika mjenjača brzine traktora [17]

Za izradu zupčanika mjenjača traktora najčešće se primjenjuju konstrukcijski čelici (ugljični i legirani), čelici za cementiranje i poboljšavanje te čelični lijev, nodularni, temper i sivi lijev. Koji će materijal biti izabran, ovisi o opterećenju i radnim uvjetima kojima će traktor biti izložen.

Zupčanicima od konstrukcijskih čelika imaju dobru otpornost na trošenje i koroziju, visoku čvrstoću pri povišenim temperaturama i žilavu jezgru. Izrađuju se kovanjem, glodanjem, blanjanjem itd. Konstrukcijski čelici mogu se legirati (najčešće kromom, molibdenom, silicijem, manganom itd.) i toplinski obrađivati. Primjeri konstrukcijskih čelika koji se koriste za izradu zupčanika mjenjača brzine kod traktora: E295, E335, E360...

Čelici za cementiranje su konstrukcijski čelici kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougljičava rubni sloj, a nakon toga slijedi kaljenje kako bi se postigla visoka otpornost na trošenje rubnih slojeva i povećanje žilavosti nepougljičene jezgre [24]. Primjeri čelika za cementiranje koji se koriste pri izradi zupčanika traktora: C15, 16MnCr5, 20MnCr5...

Čelici za poboljšavanje pripadaju skupini nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji postižu zadovoljavajuću čvrstoću, granicu razvlačenja i žilavost postupcima kaljenja i visokog popuštanja [25]. Primjeri čelika za popuštanje koji se primjenjuju kod izrade zupčanika: C22, C45, 34Cr4, 42CrMo4, 34CrMo4...

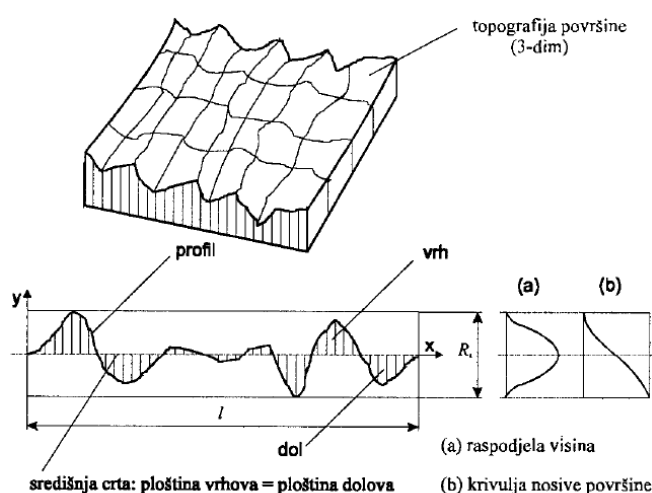
Zupčanicima mjenjača traktora osim konstrukcijskih čelika izrađuju se i od sivog lijeva (SL 20, SL 25...), nodularnog lijeva (NL 60, NL 80...) i čeličnog lijeva (ČL.0545, ČL.0645...) .

4. TRENJE I MEHANIZMI TROŠENJA

Tribologija je znanstveno-stručna disciplina koja se bavi problematikom trenja i trošenja površina u dodiru i relativnom gibanju i pratećim aktivnostima. Trenje i trošenje nemoguće je izbjeći, ali ih je moguće kontrolirati¹ i svesti na zadovoljavajuću razinu. To je ujedno i osnovni zadatak tribologije. Kontrola trenja i trošenja provodi se pravilnim izborom materijala tribopara, raznim prevlakama kao i površinskim pred-obradama. Korisno trenje nalazimo u primjerima kočenja i bušenja dok je za primjer korisnog trošenja najbolje uzeti postupke obrade odvajanjem čestica. Promatrajući ova dva tribološka elementa na primjeru motora s unutarnjim izgaranjem ili mehaničkih konstrukcija poput zupčanika i ležajeva, lako je zaključiti da se u takvim situacijama trenje i trošenje smatraju štetnim jer uzrokuju rasipanje energije i gubitak materijala [26], [27].

4.1. Površine u dodiru

Trenje i trošenje javljaju se na dodiru realnih površina koje su većinom hrapave. Hrapavost podrazumijeva nepravilnosti na površini koje su karakteristične za određeni postupak obrade, a koje ne uključuju odstupanje od oblika, valovitost i površinske pogreške. Za mjerenje parametara hrapavosti metodom dodira često se koristi elektroničko-mehanički uređaj s ticalom gdje se s referentne površine uzima profil dobiven presijecanjem površine ravninom postavljenom okomito na smjer obrade (Slika 7.) [26].

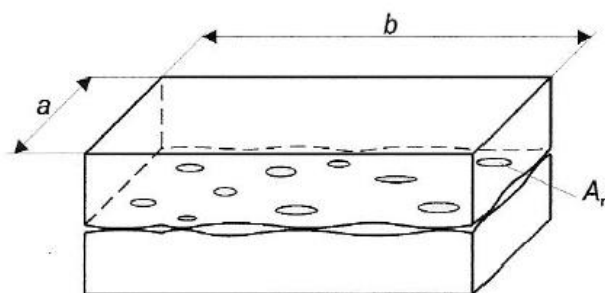


Slika 7. Topografija i karakteristike hrapavosti površine [26]

¹ Kontrolirati u smislu upravljanja, ne provjere

Kod dvaju površina koje se međusobno dodiruju, dodir može biti površinski (konformni) i koncentrirani (nekonformni). Površinski dodir karakterističan je za ravne (hrapave) površine dok je koncentrirani dodir svojstven zakrivljenim plohama.

Kod površinskog dodira razlikujemo stvarnu i nominalnu dodirnu plohu (Slika 8.).



$$A_0 = a \cdot b \gg A_r = \sum_{i=1}^n A_r^i$$

A_0 - nominalna dodirna ploština

A_r - stvarna dodirna ploština

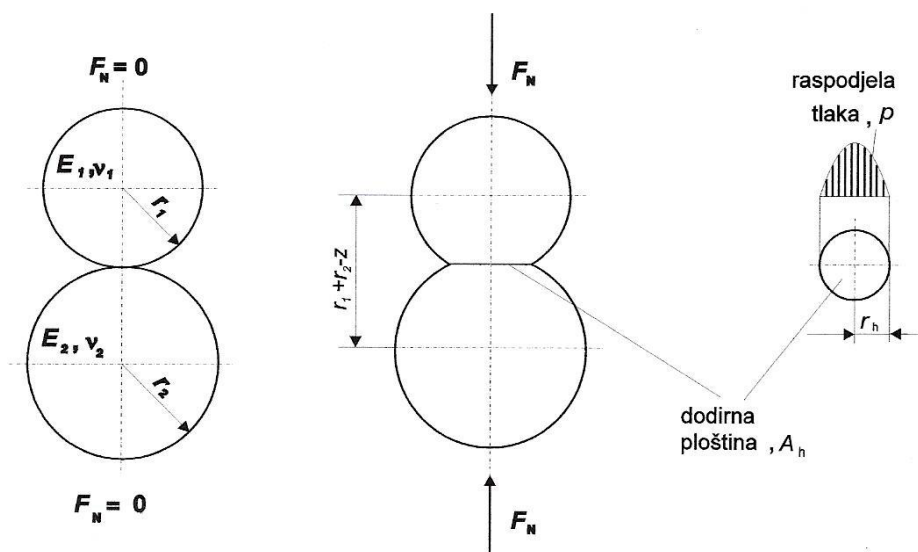
A_r^i - jedinični dodir

n - broj jediničnih dodira

Slika 8. Nominalna i stvarna dodirna površina [26]

Nominalna dodirna površina mnogo je veća od stvarne premda je za tribološke procese važnija stvarna dodirna površina. Prema izvodu GREENWOOD-a i TRIPP-a stvarna dodirna površina A_r proporcionalna je opterećenju F_N [26].

Koncentrirani dodir pojavljuje se u slučajevima dodira prstenova i kuglica kod kugličnih ležajeva, zubi zupčanika i drugim sličnim primjerima. Dodir dvije zakrivljene površine opisao je Heinrich Rudolph Hertz.



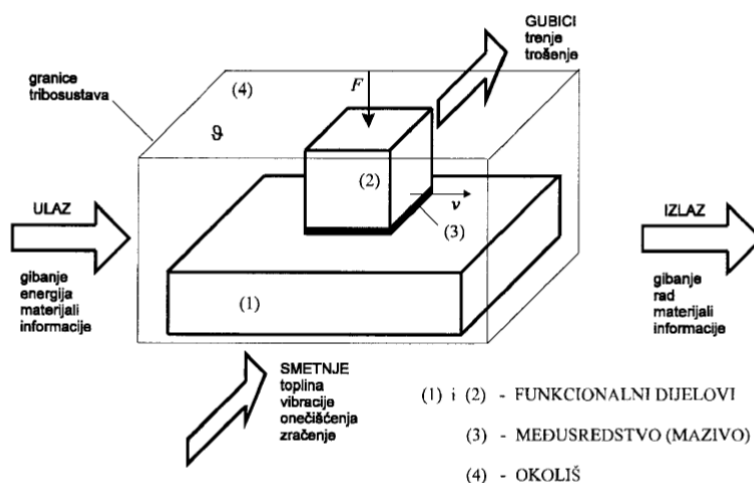
Slika 9. Hertz-ov dodir dviju kugli [26]

Na *Slici 9.* prikazan je dodir dviju kugli različitih promjera u uvjetima kad postoji i ne postoji opterećenje na kugle. Djelovanjem normalne sile F_N na kugle, dolazi do njihove elastične deformacije i pojave tlaka p unutar dodirne površine A_H . Preko izraza za proračun dodirnog pritiska p i radijusa dodirne plohe r_H , prema [26], dolazi se do konačnog izraza za dodirnu površinu A_H :

$$A_H = \pi \cdot r_H^2 = \pi \left[\frac{3r}{2E} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot F_N^{\frac{2}{3}}$$

Dakle, izraz jasno pokazuje da ne postoji idealan točkasti dodir nego se i kod koncentričnog dodira oblikuje dodirna površina koja ovisi o ekvivalentnom radijusu, složenom modulu elastičnosti i normalnoj sili.

Jednostavan tribosustav sastoji se od funkcionalnih dijelova koji se dodiruju, postojećeg maziva između njihovih površina te utjecaja okoline. Prikaz jednostavnog tribosustava dan je na *Slici 10.*



Slika 10. Prikaz elemenata tribosustava [27]

Pri traženju optimalnih rješenja za probleme trenja, trošenja i podmazivanja potrebno je uzeti u obzir opterećenje F , silu trenja, temperaturu, smjer i brzinu gibanja dijelova, protok kroz sustav te razne smetnje poput vibracija i onečišćenja i gubitke uslijed trenja i trošenja [27].

Porast ili smanjenje sile trenja u sustavima poput zupčanika i ležajeva, promjena hrapavosti površine te porast temperature iznad granične vrijednosti mogu biti pokazatelji predstojećeg kvara [28].

4.2. Vrste i procesi trenja

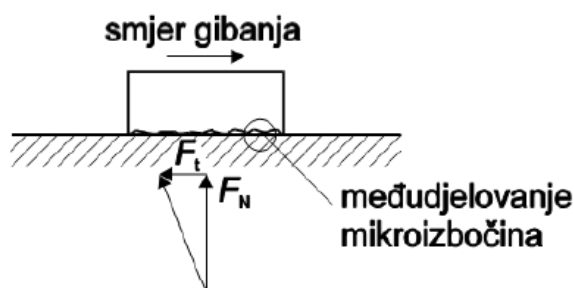
Trenje predstavlja otpor gibanju čvrstih tijela koja su u kontaktu, djeluje paralelno dodirnim površinama, a smjer sile trenja suprotan je smjeru relativnog gibanja. Trenje je uglavnom štetna i nepoželjna pojava koju nije moguće izbjeći, ali je moguće postići i održavati optimalnu vrijednost za dani materijal. Budući da sila trenja predstavlja otpor gibanju, za njezino svladavanje potrebno je uložiti znatnu količinu mehaničke energije. Kao posljedica trenja na kontaktnim površinama dolazi do trošenja i zagrijavanja materijala čime utrošena mehanička energija prelazi u nepoželjnu i nepovratnu toplinsku energiju [28].

Faktor trenja ovisi o međupovršini para materijala u kontaktu, pripremi površina te o međudjelovanju površina (mazivo, onečišćenje itd). Površine čistih metala i legura u kontaktu imaju visoku adheziju te s tim i visoke faktore trenja [27].

Prema [28], trenje možemo podijeliti u sljedeće kategorije:

- Vanjsko trenje (trenje među čvrstim površinama)
- Viskoznost (trenje među dijelovima fluida, odnosno između čvrstog tijela i fluida)
- Suho trenje
- Trenje uz podmazivanje
- Statičko trenje (trenje mirovanja, trenje pokretanja)
- Dinamičko trenje (kinetičko trenje, trenje kretanja)

Trenje klizanja prikazano je na *Slici 11*.



Slika 11. Trenje klizanja [28]

Sila F_N predstavlja normalnu silu na površinu kontakta, F_t je sila trenja. Odnos sile trenja F_t i normalne sile F_N definiran je faktorom trenja μ prema izrazu [26]:

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

Za trenje kotrljanja općenito vrijedi da je mnogo manje nego trenje klizanja. Razlog tome je što kod kotrljanja uglavnom izostaju sile trenja od brazdanja i raskidanja adhezijskih veza koje se javljaju kod klizanja. Dakle, sila trenja kotrljanja sastoji se od sile otpora na elastičnu deformaciju i sile otpora na plastičnu deformaciju [26].

Vrijednosti faktora trenja kotrljanja krutog cilindra ili sferičnog tijela koje se giba nasuprot cilindričnog ili sfernog tijela nalaze se u intervalu od 0,005 do 10^{-5} , a vrijednosti faktora klizanja suhog tijela kreću se u rasponu od 0,1 do 1, a u nekim slučajevima i iznad 1 [27].

4.3. Mehanizmi i procesi trošenja

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticama. U većini slučajeva vrijedi da je povećano trenje popraćeno većim trošenjem, ali i obrnuto [26].

Postoje 4 osnovna mehanizma trošenja:

- Abrazija
- Adhezija
- Umor površine
- Tribokorozija

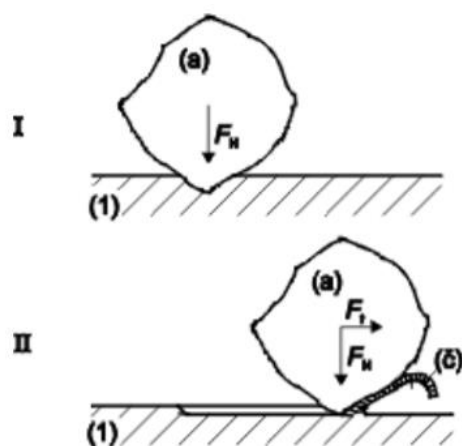
Posljedica trošenja je gubitak materijala s površine bilo da se radi o potpunom gubitku ili premještanju materijala prema dodirnim površinama. U slučaju prijenosa materijala s jedne na drugu površinu konačni volumen, odnosno gubitak mase, na međupovršini je nula. Trošenje ne predstavlja samo gubitak materijala nego i oštećenje površine bez promjene volumena i mase.

Određivanje zastupljenih mehanizama trošenja na određenoj površini provodi se na temelju izgleda trošene površine i obliku čestica trošenja. Na potrošenoj površini nikad se ne pojavljuje samo jedan mehanizam trošenja, nego kombinacija navedenih mehanizama. Trošenje započinje pojavom jednog mehanizma, a nastavlja drugim. Karakteristična pojava za sve navedene mehanizme, osim umora površine, je postupni gubitak materijala s površine [27].

U nastavku slijede opisi osnovnih mehanizama trošenja prema [26].

Abrazija

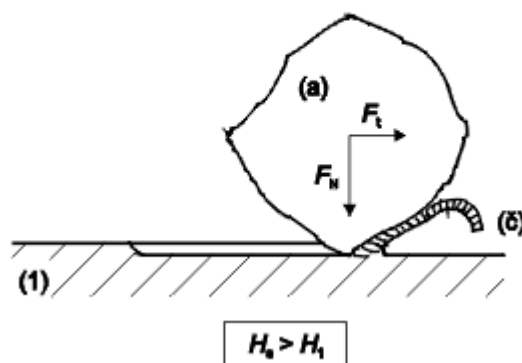
Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Klasičan primjer korisnog abrazijskog trošenja je postupak brušenja. Za abrazijsko trošenje karakteristične su dvije faze. U prvoj fazi abraziv prodire u površinu materijala pod djelovanjem normalne sile F_N nakon čega započinje druga faza u kojoj pod utjecajem tangencijalne sile F_t dolazi do istiskivanja materijala u obliku odvojene čestice. Abrazijsko trošenje prikazano je na *Slici 12*.



Slika 12. Jedinični događaj abrazije [26]

Obzirom na tvrdoću abraziva i abradiranog materijala, abrazijsko trošenje moguće je podijeliti u sljedeće skupine:

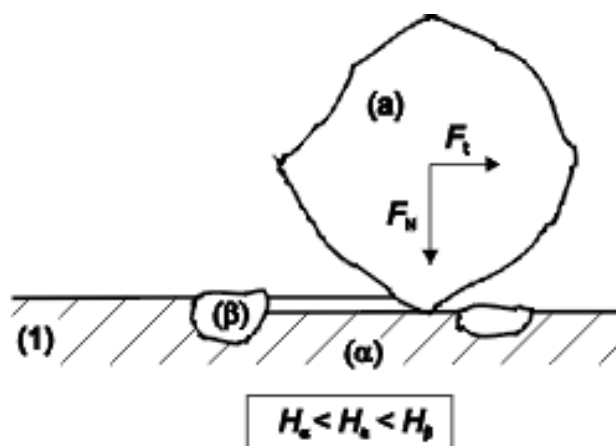
Čista abrazija – nastaje u slučajevima kad je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće trošene površine.



Slika 13. Čista abrazija [26]

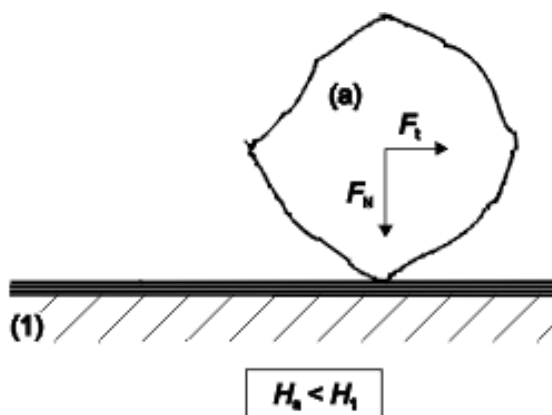
Na Slici 13. ilustriran je primjer čiste abrazije. Oznaka (1) predstavlja trošenu površinu dok oznaka (a) predstavlja abraziv koji prodire u površinu i odvaja česticu. Ukoliko je mikrostruktura materijala trošene površine višefazna, da bi potvrdili pojavu čiste abrazije, tvrdoća abraziva mora biti veća od tvrdoće svih faza od kojih je površina izgrađena. Odvojena čestica ovisno o vrsti abradiranog materijala može biti u obliku lomljene ili spiralne strugotine te tako kod krhkih materijala imamo lomljenu česticu, a kod duktilnih spiralnu česticu. Abradirana površina ostaje izbrazdana.

Selektivna abrazija – nastaje kad u strukturi abradiranog materijala postoji faza veće tvrdoće od tvrdoće abraziva. U takvom slučaju, abraziv može rezati samo zahvaćeni sloj mekše faze te površina ostaje izbrazdana s prekidima na mjestima na kojima se nalazi tvrđa faza (Slika 14.).



Slika 14. Selektivna abrazija [26]

Slika 14. prikazuje višefazni abradirani materijal koji se sastoji od dvije faze α i β . Tvrdoća α -faze manja je od tvrdoće abraziva, a tvrdoća β -faze veća je tvrdoće abraziva. Stoga, abraziv može rezati dio površine na kojem je α -faza, ali ne i onaj dio gdje je prisutna β -faza. Iako s površine „odlaze“ čestice mekše faze, povremeno će se među odvojenim česticama naći i zrna tvrde faze budući da trošenjem mekše faze tvrđa zrna gube uklještenje i odvajaju se od površine. Nulta abrazija – nastaje kad je tvrdoća cijelog abradiranog materijala tvrđa od abraziva (Slika 15.).



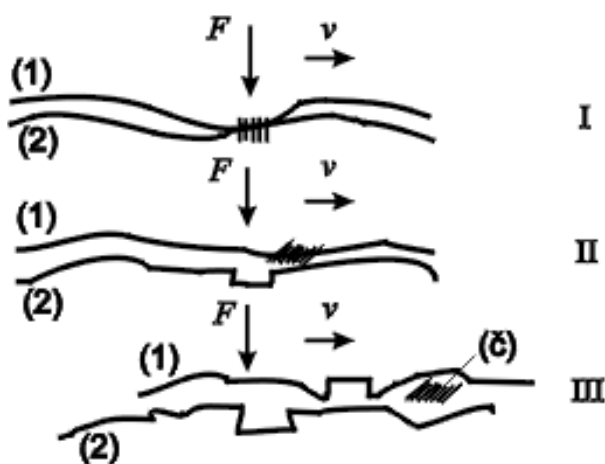
Slika 15. Nulta abrazija [26]

Nultu abraziju karakterizira polirana površina, a odvojene čestice su sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja. Najčešće se pojavljuje na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine poput CVD, PVD, boriranja itd.

Kakva će biti otpornost materijala na abraziju, ovisi isključivo o odnosu tvrdoće abraziva i abradiranog materijala budući da je taj odnos ključan za prvu fazu jediničnog događaja abrazije, fazu prodiranja.

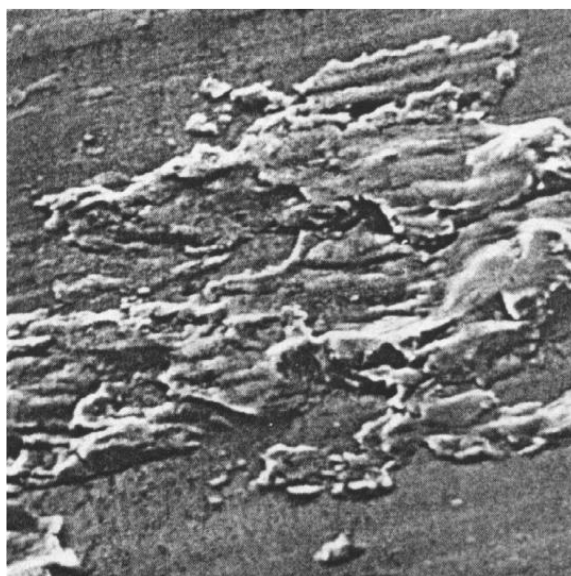
Adhezija

Adhezijsko trošenje definira se kao prijelaz materijala s jedne tarne plohu na drugu pri relativnom gibanju zbog procesa zavarivanja krutih faza. Kada sile otpora na elastičnu i plastičnu deformaciju kao i sile otpora na brazdanje i kidanje adhezijskih veza postanu veće od kohezijskih sila, dolazi do trošenja. Jedinični događaj adhezije prikazan je na *Slici 16*.



Slika 16. Jedinični događaj adhezije [26]

U prvoj fazi pod utjecajem sile F dolazi do zavarivanja krutih faza, odnosno nastaje adhezijski spoj. U drugoj fazi adhezijski spoj se raskida, a čestica ostaje nalijepljena na jednoj tarnoj plohi. U trećoj fazi dolazi do mogućeg otkidanja nalijepljene čestice, a njen oblik ovisit će o uvjetima obrade (najčešće je listićav). Čestice mogu ostati trajno ili privremeno nalijepljene na površinu. Prikaz trajno nalijepljene čestice dan je na *Slici 17*.

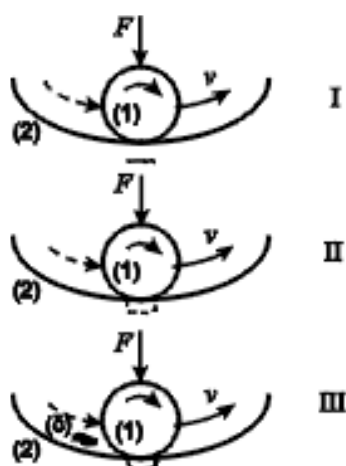


Slika 17. Trajno nalijepljene čestice na površinu [26]

Otpornost kliznog para na adhezijsko trošenje ovisit će o sklonosti tarnog para stvaranju zavarenih spojeva. Oni materijali koji u paru nisu skloni mikrozavarivanju su tribološki kompatibilni materijali.

Umor površine

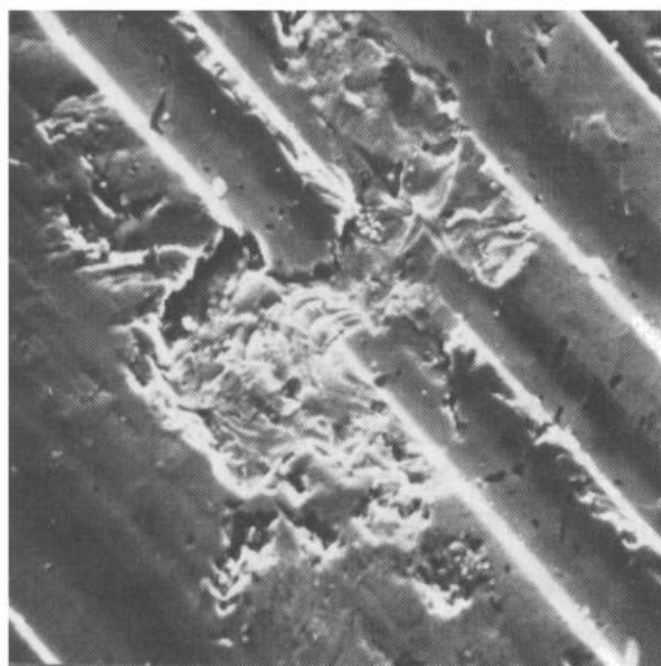
Umor površine karakterizira odvajanje čestice s površine uslijed periodički promjenjivih opterećenja. Jedinični događaj umora površine dan je na *Slici 18*.



Slika 18. Jedinični događaj umora površine [26]

Jedinični događaj umora površine opisan je u tri faze. U prvoj fazi dolazi do stvaranja mikropukotine redovito ispod površine jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira uvijek ispod površine. Ova faza naziva se još i faza inkubacije jer nema nikakvog odvajanja čestica. U drugoj fazi mikropukotine rastu i izbijaju na samu površinu te iz njih izlaze sitne kuglaste čestice koje su tako sitne da se ne mogu definirati kao gubitak materijala, ali su itekako značajne kao pokazatelj stanja procesa trošenja umorom površine. U trećoj fazi dolazi do ispadanja čestica trošenja. Te čestice uglavnom imaju oblik pločice ili iverka i krupne su, a njihovim ispadanjem na površini ostaju rupice pa se ovakav oblik trošenja naziva još i rupičenje (eng. *pitting*).

Na *Slici 19.* prikazan je izgled površine oštećene umorom.



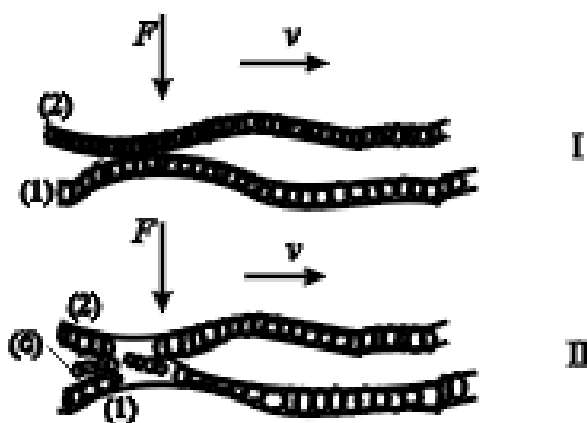
Slika 19. Površina oštećena umorom površine [26]

Kod umora površine do stvaranja početnih pukotina dolazi zbog gibanja dislokacija na granicama zrna te će i otpornost materijala na umor ovisiti o otporu gibanju tih dislokacija. Otpornost materijala na umor površine naziva se dinamička izdržljivost koju je moguće odrediti jedino eksperimentalno i ovisi o sljedećim faktorima koji mijenjaju nominalnu raspodjelu naprezanja proračunatu za homogene, izotropne, glatke i elastične materijale u kotrljajućem dodiru:

- Podpovršinski koncentratori naprezanja – oksidi i druge tvrde, krhke uključine, granice zrna, sulfidi, karbidi i ostali konstituenti druge faze itd.
- Obilježja površine – topografija i tekstura površine, mikrostruktura, zaostala naprezanja, onečišćenja itd.
- Površinske pogreške – ogrebotine, udubljenja, uključine i čestice druge faze
- Diskontinuiteti u geometriji dodira – odstupanje od linijske geometrije dodira i prisutnost čestica u području dodira
- Raspodjela opterećenja u ležaju – elastične deformacije, unutrašnjost zračnost, međusobna neprilagođenost ležajeva...
- Tangencijalne sile – kotrljanje uz klizanje i bez značajnijeg klizanja
- Elastohidrodinamika

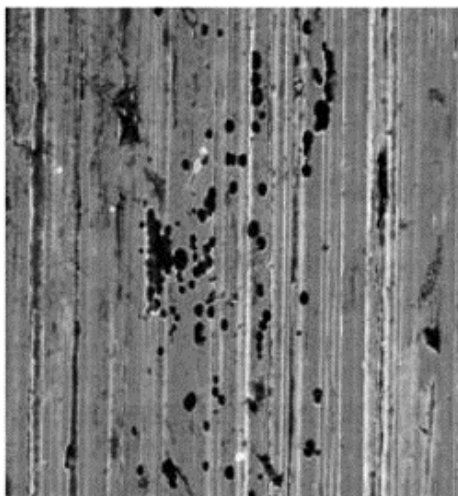
Tribokorozija

Tribokemijsko trošenje (tribokorozija) je mehanizam trošenja kod kojeg prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj tribokorozije prikazan je na *Slici 20*.



Slika 20. Jedinični događaj tribokorozije [26]

U prvoj fazi pod djelovanjem sile F na tribopar dolazi do stvaranja ili obnavljanja sloja produkata korozije, a u drugoj fazi javlja se lokalno razaranje nastalog sloja produkata korozije. Izgled površine oštećene tribokorozijom dan je na *Slici 21*.



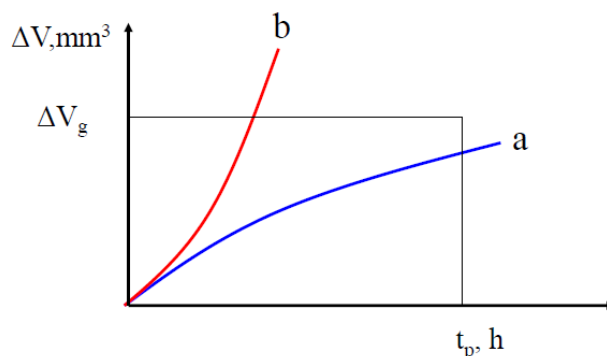
Slika 21. Površina oštećena tribokorozijom [29]

Izgled površine čije je oštećenje uzrokovano tribokorozijom ovisit će o intenzitetu odnošenja nastalih čestica trošenja. Ako je intenzivnost odnošenja čestica s površine mala, na površini ostaju proizvodi korozije. Ako je intenzivnost odnošenja čestica velika, površina naizgled ostaje polirana. Čestice su praškastog oblika i stvaraju se unutar vanjskog sloja površine.

Kriterij za određivanje otpornosti materijala na tribokoroziju je kemijska pasivnost materijala u nekom mediju. Tablice koje sadrže podatke o otpornosti pojedinih materijala u različitim medijima mogu poslužiti za orijentacijsko procjenjivanje otpornosti materijala na tribokoroziju.

Tribokorozija je relativno slabo intenzivan mehanizam trošenja jer predstavlja kombinaciju kemijskih reakcija na površini materijala i jednog od prethodno navedenih mehanizama koji su mnogo intenzivniji. Zbog slabog intenziteta, tribokorozija je u pojedinim slučajevima poželjna jer slojevi produkata korozije sprječavaju neposredan dodir metal/metal, ali predstavlja ozbiljan problem u uvjetima visokih temperatura, vlažnog okoliša i u kombinaciji s vibracijama.

Budući da je proces trošenja kombinacija najmanje dva mehanizma trošenja koji djeluju istovremeno ili s vremenskim slijedom, tribološkim mjerama nastoji se izbjeći pojava opasnijih mehanizama ili njihova odgoda. Na *Slici 22.* dan je dijagramski prikaz općeg oblika procesa trošenja.



Slika 22. Opći oblik procesa trošenja [30]

Krivulja a predstavlja normalno (predviđeno) trošenje koje nastupa nakon određenog broja radnih sati i primjenom triboloških mjera nastoji se postići upravo to da određeni tribosustav radi u ovom režimu. Krivulja b predstavlja abnormalno trošenje, trošenje koje se ne može predvidjeti i gdje u kratkom vremenu dolazi do velikog gubitka volumena, odnosno visokog stupnja istrošenosti materijala.

Praćenje procesa trošenja izvodi se mjerenjem buke, vibracija, sile trenja, temperature, spektrografskom analizom ulja, radioaktivnim metodama, ferografijom itd. [26].

4.3.1. Slučajevi trošenja kod cilindra i klipa motora te zupčanika reduktora

Pojedini slučajevi trošenja bit će opisani u nastavku na primjerima cilindra i klipa motora te zupčanika reduktora. Svaki slučaj trošenja kombinacija je više mehanizama trošenja od kojih su jedni zastupljeni u većoj, a drugi u manjoj mjeri.

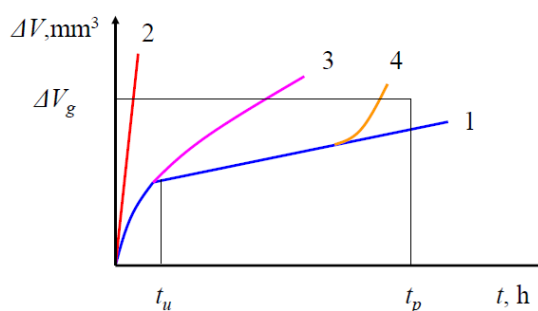
Trošenje cilindra i klipa motora

Cilindar i klip su viskokopterećeni dijelovi motora, kako zbog trenja koje se javlja kao otpor gibanju klipa unutar košuljice cilindra, tako i zbog kemijskih procesa koji se odvijaju u unutrašnjosti cilindra i na čelu klipa. Zbog toga njihovo trošenje opisujemo sljedećim slučajevima:

Klizno trošenje

Klizno trošenje javlja se kao posljedica trenja klizanja budući da klip klizi po stijenci košuljice cilindra. Kod kliznog trošenja najintenzivniji mehanizam je adhezija. Opasnost pojave abrazije i umora površine je mala dok je najmanja opasnost pojave tribokorozije.

Na *Slici 23.* prikazani su procesi trošenja kliznih elemenata.



Slika 23. Proces trošenja kliznih elemenata [30]

Dijagram $t-\Delta V$ prikazuje 4 krivulje kojima su opisani procesi trošenja kliznih elemenata. Krivulja 1 prikazuje zadovoljavajući proces trošenja u kojem nakon malo intenzivnijeg trošenja u fazi uhodavanja dolazi do normalnog trošenja. Tribološkim mjerama nastoji se postići ovakav izgled krivulje gdje iznos trošenja ostaje ispod graničnog iznosa do isteka projektiranog vijeka trajanja. Krivulja 2 prikazuje slučaj neuspješnog uhodavanja, najčešće zbog jake adhezije. Krivulja 3 posljedica je nedopušteno visoke brzine trošenja do koje dolazi uslijed zagađenja tribosustava abrazivnim česticama ili ako su one sastavni dio jednog elementa kliznog para. Krivulja 3 najbolje opisuje slučaj trošenja kod klipnog prstena i košuljice cilindra. Ako je prsten izrađen od sivog lijeva, u njegovoj mikrostrukturi ne smije postojati slobodni cementit jer postoji opasnost od uzrokovanja abrazijskog trošenja. Krivulja 4 karakteristična je za prerani umor površine što se kod klipa i cilindra događa jako rijetko. Kao mjera otpornosti na klizno trošenje uzima se kompatibilnost materijala [26].

Do pojave adhezije dolazi najčešće uslijed prekida uljnog filma na stijenama košuljice cilindra čime se ostvaruje direktan kontakt klipnih prstenova i košuljice [31].

Abrazijsko trošenje

Opasnost od pojave abrazijskog trošenja kod klipa i košuljice cilindra nije velika kao opasnost od adhezije, ali je ipak zastupljena u dovoljnoj mjeri da se može svrstati među česte slučajeve trošenja para klip/košuljica.

Do abrazijskog trošenja dolazi uslijed prisutnosti abrazivnih čestica u unutrašnjosti cilindra. Abrazivne čestice najčešće dopiru u cilindar preko goriva koje sadrži krute čestice poput vanadija. Osim toga i čestice koje su produkti korozije, iako fine granulacije, djeluju abrazivno na stijenku košuljice i klip. Na unutarnjim stjenkama košuljice kao trag trošenja ostaju paralelne vertikalne brazde. Da bi se smanjila opasnost od pojave abrazije, potrebno je odstraniti krute čestice iz goriva [31].

Tribokorozija

Do pojave tribokorozije kod klipa i košuljice cilindra dolazi zbog prisutnosti sumpora u kemijskom sastavu goriva. Čestice sumpora iz goriva talože se na čelu klipa i gornjem dijelu košuljice što stvara problem u uvjetima kondenzacije. U takvim uvjetima, nastaje agresivna sumporna kiselina koja nagrizava stijenke košuljice i čelo klipa i na tim površinama stvaraju se krateri različitih dubina i nepravilnih oblika. Produkt sumporne kiseline uzrokuje i abrazijsko trošenje [31].

Trošenje zupčanika reduktora

Zupčanci su strojni elementi kod kojih se prijenos okretnog momenta s pogonskog na gonjeni zupčanik vrši oblikom, odnosno bokovi zubi prenose opterećenje. Zato su zubi najopterećeniji i najosjetljiviji dio zupčanika i izloženi su stalnom trošenju tijekom eksploatacije.

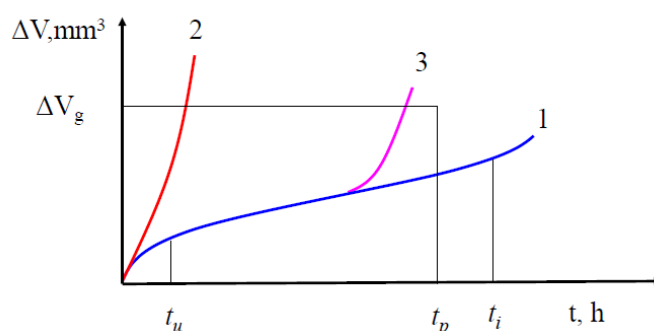
Ključni elementi za pojavu oštećenja i otpornosti zupčanika na trošenje su izbor materijala i vrsta površinske obrade. Oštećenje zuba može biti na samoj površini ili ispod nje. Ako je površina zuba grubo obrađena, oštećenje će biti površinsko dok će u slučaju kvalitetnije obrade i kvalitetnijeg materijala, oštećenje uglavnom nastati ispod površine. Zupčanci s otvrdnutom površinom zbog nepovoljnog odnosa naprežanja i granice razvlačenja skloni su plastičnoj deformaciji. Također, povremena preopterećenja uzrokuju akumulaciju oštećenja, ispod površine nastaju pukotine koje se šire prema površini i u dubinu te u konačnici dolazi do loma zuba [32].

Trošenje zubi zupčanika reduktora opisuje se sljedećim slučajevima:

Kotrljajuće trošenje

Kotrljajuće trošenje nastaje uslijed koncentriranog dodira zakrivljenih površina. Čest primjer trošenja zupčanika koji se najčešće očituje pojavom umora površine. Opasnost od pojave abrazije i adhezije je mala, a od tribokorozije najmanja.

Na Slici 24. prikazani su procesi trošenja kotrljajućih elemenata.



Slika 24. Proces trošenja kotrljajućih elemenata [30]

Krivulja 1 predstavlja zadovoljavajući proces trošenja gdje je problem intenzivnijeg trošenja materijala za vrijeme uhodavanja manje izražen nego kod kliznog trošenja. Međutim, kad je riječ o zupčanicima, budući da se kod njih javlja i trenje klizanja i trenje kotrljanja, problem uhodavanja je ipak veći nego je to prikazano krivuljom. Granična istrošenost i predviđeni vijek trajanja manji su nego kod kliznog trošenja. Projektirana trajnost t_p mora biti unutar vremena inkubacije umora površine. Krivulja 2 prikazuje neuspješno uhodavanje, a krivulja 3 predstavlja prerani umor površine [26].

Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje čest je slučaj trošenja zupčanika reduktora poljoprivrednih strojeva. Najveća opasnost kod ovog slučaja trošenja je pojava prekomjerne abrazije, opasnost od pojave umora površine je mala, a od tribokorozije najmanja. Budući da abraziv najčešće nije moguće ukloniti, otpornost na abrazijsko trošenje postiže se pravilnim izborom materijala i zaštitom površine [26].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada temelji se na ispitivanju klipa i košuljice cilindra dizelskog motora traktora Zetor 4911 iz 1978. godine (*Slika 25.*) i zupčanika reduktora traktora Zetor 5211 iz 1988. godine (*Slika 26.*).



Slika 25. Klip i košuljica cilindra traktora Zetor 4911



Slika 26. Zupčanik mjenjača traktora Zetor 5211

Za dobivanje potrebnih rezultata ispitivanja bit će provedena karakterizacija materijala na osnovu koje će se pokušati približno odrediti materijali od kojih su dijelovi izrađeni, a nakon toga slijedi analiza potrošenih dijelova i određivanje postojećih mehanizama trošenja. Ispitivanje mikrostrukture provodit će se u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

5.1. Ispitivanje klipa i cilindarske košuljice traktora

Kako je navedeno u uvodnom dijelu eksperimentalnog rada, klip i košuljica cilindra dijelovi su traktora Zetor 4911 iz 1978. godine (*Slika 27.*). Zetor Tractors a.s. je tvrtka za proizvodnju traktora osnovana 1946. godine u Republici Češkoj sa sjedištem u Brnu. Od osnivanja tvrtke pa do danas, u 136 zemalja diljem svijeta prodano je oko 1,3 milijuna traktora [33].


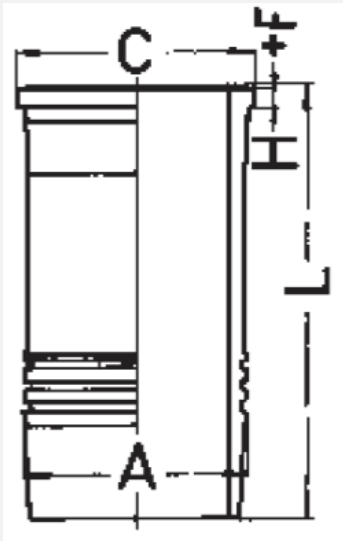


Slika 27. Zetor 4911 iz 1978. godine [34]

Blok motora traktora proizveden je s 3 cilindra u koje su postavljene košuljice. Riječ je o tzv. mokrim košuljicama koje su u izravnom kontaktu s rashladnom tekućinom čime je omogućeno bolje podnošenje velikih toplinskih opterećenja. Mokre košuljice u usporedbi sa suhim košuljicama imaju znatno veću debljinu stijenke jer su učvršćene blokom motora samo s gornje i donje strane kako to prikazuje *Slika 1.* Snaga motora iznosi 34 kW, odnosno 45 KS (konjskih snaga). Na traktoru je pri približno 6000 radnih sati napravljen veliki servis pri čemu su uslijed dotrajalosti zamijenjeni klip i košuljica cilindra. Budući da je riječ o mokroj košuljici, istrošena košuljica je jednostavno izvađena cjelovita iz bloka motora i zamijenjena novom.

U nastavku slijede tablice s dimenzijama košuljice i klipa. U tablicama su prikazane dimenzije dobivene mjerenjem pomičnim mjerilom rezolucije 0,1 mm i dimenzije iz Kolbenschmidt kataloga.

Tablica 3. Dimenzije košuljice cilindra

Dimenzije košuljice cilindra		
		 <p>[35]</p>
Veličine	Mjerenje [mm]	Katalog [mm]
Visina košuljice (L)	225,5	225,7
Unutarnji promjer	102,3	102
Promjer donje plohe (A)	116	116
Promjer gornje plohe (C)	124	124
Visina gornje plohe (H)	10	10,07
Vanjski promjer	113,5	-
Debljina stijenke na gornjoj plohi	11,1 (lijevo)	-
	10,6 (desno)	
Debljina stijenke između vanjskog i unutarnjeg promjera	5,5 (lijevo)	-
	5,7 (desno)	

Tablica 4. Dimenzije klipa

Dimenzije klipa		
		<p>[35]</p>
Veličine	Mjerenje [mm]	Katalog [mm]
Visina klipa (GL)	116	116,5
Kompresijska visina klipa (KH)	66	66,5
Promjer provrta za osovinicu	35	35
Promjer klipa	101,8	-
Visina utora za uljni prsten	5	5
Visina utora za komp. prstenove	3	3
Visina donjeg dijela klipa	73,5	-
Debljina stijenke čela	27,1 (lijevo)	-
	26,9 (desno)	-
Debljina stijenke donjeg dijela	3	-
Promjer d1	47,2	-

Tablica 3. prikazuje usporedbu dimenzija košuljice dobivenih mjerenjem i poznatih dimenzija iz Kolbenschmidt kataloga. Uspoređujući dimenzije mogu se primijetiti razlike među pojedinim vrijednostima, odnosno da su izmjerene dimenzije manje od dimenzija zadanih za novu košuljicu (osim unutarnjeg promjera koji se povećao). To dokazuje da je tijekom dugogodišnje eksploatacije došlo do trošenja (gubitka) materijala uslijed kemijskih reakcija i mehaničkih utjecaja pri čemu je došlo do promjena prvotnih dimenzija. Također, različite debljine stijenke na desnoj i lijevoj strani pokazuju da je na pojedinim mjestima gubitak materijala veći nego na drugim. Gubitak materijala na stijenkama uzrokuje povećanje unutarnjeg promjera košuljice, odnosno povećanje zazora između košuljice i klipa.

U *Tablici 4.* prikazane su dimenzije za klip dobivene mjerenjem i očitane iz kataloga. Među njima također postoji mala razlika kao i kod dimenzija košuljice čime se ponovo može zaključiti da su se i klipu uslijed dugotrajnog opterećenja promijenile prvotne dimenzije, odnosno da je došlo do trošenja materijala. Prema vrijednostima iz tablice vidljivo je da je razlika u visini klipa 0,5 mm. Iako u katalogu nije navedena visina čela klipa, uzimajući u obzir da je čelo najopterećeniji dio klipa, može se pretpostaviti da je gubitak materijala od 0,5 mm najvećim dijelom nastao upravo na čelu.

Ranije je spomenuto kako promjer klipa mora biti malo manji od unutarnjeg promjera cilindarske košuljice kako bi se omogućilo nesmetano gibanje klipa (za detaljnije objašnjenje vidjeti 2.2). Ovu tvrdnju potvrđuju i rezultati mjerenja prikazani u tablicama prema kojima razlika između promjera košuljice i klipa iznosi 0,5 mm. Jasno je da je ova razlika na početku eksploatacije bila manja budući da je unutarnji promjer košuljice bio manji, a promjer klipa veći.

Dimenzije dobivene mjerenjem pomičnim mjerilom i prikazane u tablici samo su orijentacijske vrijednosti koje će poslužiti za usporedbu dimenzija između nove i istrošene košuljice. Za utvrđivanje stvarnog stupnja istrošenosti provode se mnogo točnija i preciznija mjerenja dimenzija mikrometrom i ovalnosti košuljice. Ova mjerenja rade se u više točki i više smjerova za dobivanje pouzdanijih i točnijih podataka.

5.1.1. Karakterizacija materijala

Metalografija je znanost koja se bavi analizom strukture metala na makro i mikro razini. Mikrostruktura nekog materijala promatra se na svjetlosnom i elektronskom mikroskopu. Na taj način moguće je uočiti mikrostrukturne komponente poput kristalnih zrna, uključaka, granica zrna, precipitata itd. Cilj provođenja karakterizacije materijala istrošenih dijelova je pokušati približno odrediti materijale od kojih su dijelovi izrađeni. Za određivanje materijala potrebno je napraviti analizu kemijskog sastava i mikrostrukture. Kemijski sastav košuljice i klipa dobiven je XRF-metodom.

XRF (rendgenska fluorescentna analiza) je metoda koja se temelji na pobuđivanju atoma ispitivanog uzorka rendgenskim zračenjem što rezultira emisijom fluorescentnog zračenja iz materijala, karakterističnog za elementni sastav. Ovom metodom dobiva se i kvalitativna i kvantitativna slika o kemijskom sastavu uzorka. Metoda je brza, univerzalna, nedestruktivna, jednostavna i ne zahtijeva uzorkovanje. Kemijski sastav dobiva se snimanjem uzorka prijenosnim XRF uređajem koji omogućuje analizu uzoraka bez obzira na njihovu veličinu, oblik, mjesto gdje se nalaze itd. Osnovni nedostatak ove metode je nemogućnost analize organskih materijala [37].

XRF uređaj prikazan je na *Slici 28*.



Slika 28. XRF DELTA PROFESSIONAL uređaj za analizu elemenata u materijalu [38]

Kemijski sastav i određivanje mikrostrukture klipa i prstena

XRF-metodom dobiveni su udjeli elemenata u strukturi materijala klipa i prstena, prikazani u tablicama.

Tablica 5. Prikaz udjela elemenata u materijalu klipa

Elementi	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Zr	Pb
Udjeli [%]	0,78	77,29	18,74	0,24	0,60	1,13	1,16	0,045	0,0031	0,015

Najveći udio u kemijskom sastavu materijala klipa ima aluminij. Nakon aluminijskog, slijedi silicij s udjelom od 18,74% čime se zaključuje da je klip izrađen od Al-Si legure i to nadeutektičke budući da sadrži više od 13% Si. Legiranjem aluminijskog silicijem povećava se otpornost klipa na trošenje, ali mu zbog visokog udjela Si značajno pada čvrstoća što se rješava dodavanjem Fe, Cu i Mg. Nikal povećava otpornost na koroziju pri povišenim temperaturama, a ostali elementi poput cirkonija, kroma, sumpora, titana, olova nalaze se u tragovima.

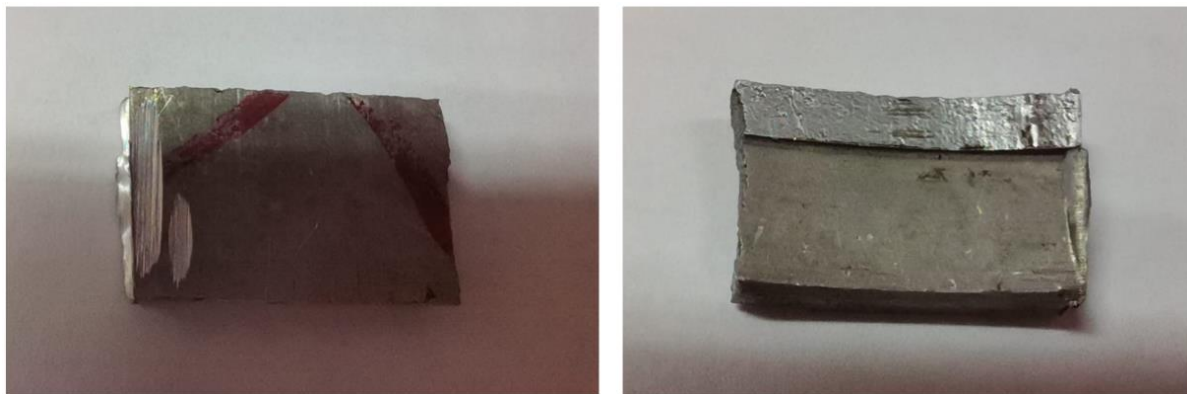
Tablica 6. Prikaz udjela elemenata u materijalu prstena

Elementi	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
Udjeli [%]	1,91	0,17	3,59	1,60	0,44	86,04	0,13	6,10

U kemijskom sastavu materijala prstena najveći udio ima željezo, a osim udjela željeza značajan je i udio cinka od 6,1% koji povećava otpornost prstena na koroziju. S obzirom na kemijski sastav, može se reći da je prsten izrađen od sivog lijeva. Budući da je sivi lijev legura željeza i ugljika, zbunjujuća može biti činjenica da ugljik nije naveden u tablici i da kao takav nije prisutan u mikrostrukтури prstena. Međutim, ugljik može biti prisutan u mikrostrukтури košuljice, ali XRF-metodom ne može se pouzdano odrediti njegov postotak. Uz ovu pretpostavku i analizu mikrostrukture prstena na svjetlosnom mikroskopu, bit će moguće točno odrediti o kojoj vrsti materijala se radi.

Kako je već navedeno, za točno određivanje materijala klipa i prstena osim XRF-metode potrebno je napraviti i metalografiju.

Analiza mikrostrukture napravljena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za mikroanalizu potrebno je izrezati ispitni uzorak i napraviti pripremu površine. Izrezani uzorci prikazani su na slici.



Slika 29. Izrezani uzorci: klipa (lijevo) i prstena (desno)

Postupak pripreme površine uzorka sastoji se od sljedećih koraka:

Ulijevanje uzorka u polimernu masu

Radi zaštite uzorka od vanjskih utjecaja i lakšeg rukovanja, uzorak je potrebno uliti u plastomernu ili duromernu masu postupkom toplog ili hladnog ulijevanja. Ispitni uzorci klipa i prstena uliveni su postupkom toplog ulijevanja u polimernu masu.



Slika 30. Postupak oblaganja uzorka prstena u polimernu masu

Na Slici 31. prikazan je uređaj na kojem su ulijevani uzorci klipa i prstena.



Slika 31. Uređaj za oblaganje uzoraka u polimernu masu

Postupak oblaganja uzoraka u polimernu masu identičan je i za klip i za prsten iako nisu izrađeni od istog materijala. Uzorak se stavi na podlogu unutar čahure i u potpunosti se prekrije prahom. Zatim se na čahuru postavlja grijač zagrijan na 143°C , tlak se namjesti na vrijednost između 1 i 2 bara i uzorak se grije 15 minuta. Nakon toga, grijač se makne i uliveni uzorak se hladi unutar čahure 30 minuta.



Slika 32. Obloženi uzorci: klipa (lijevo) i prstena (desno)

Brušenje uzoraka

Brušenje je postupak obrade odvajanjem čestica kojim se postiže fina obrada površine. S površine uzoraka potrebno je ukloniti sve nečistoće, naslage i plastično deformirane slojeve. Uzorci su brušeni na uređaju prikazanom na slici u šest koraka, odnosno na šest brusnih papira različitih znatosti počevši od najveće do najmanje. Za brušenje uzoraka korišteni su brusni papiri sljedećih znatosti: P120, P320, P600, P1000, P2400, P4000.

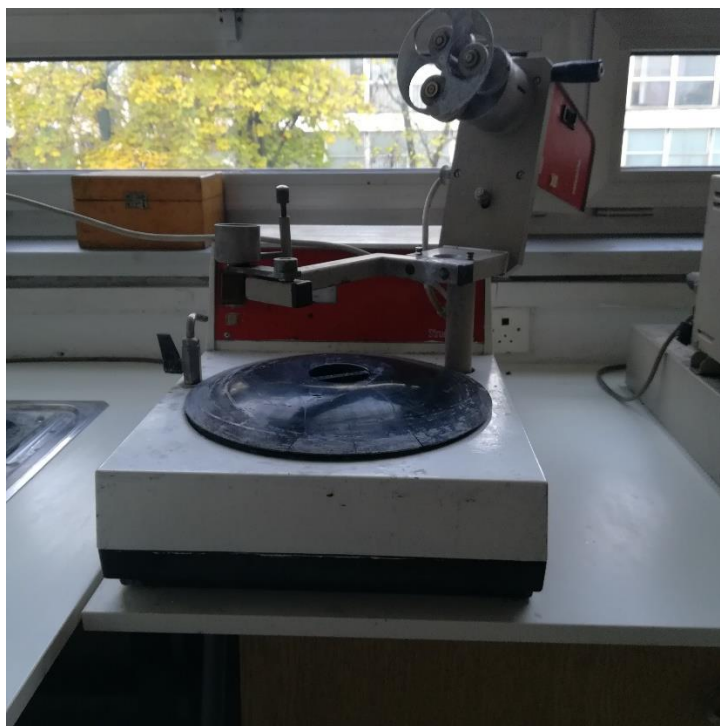


Slika 33. Uređaj za brušenje uzoraka

Brušenje se odvijalo pri brzini od 300 min^{-1} uz primjenu vode kao sredstva za hlađenje i podmazivanje. Sila pritiska je nepoznata budući da se uzorci moraju ručno pridržavati kako ne bi došlo do pomicanja uzoraka po brusnom papiru i njihovog izbacivanja uslijed djelovanja centrifugalne sile. Uzorci se bruse u uzdužnom i poprečnom smjeru kako bi se eliminirali tragovi brušenja.

Poliranje uzoraka

Nakon brušenja uzoraka potrebno je provesti poliranje. Poliranjem se dobiva čista i sjajna površina koja se može promatrati na svjetlosnom mikroskopu. Uređaj za poliranje prikazan je na slici.



Slika 34. Uređaj za poliranje uzoraka

Postupak poliranja provodi se u dva koraka. U prvom koraku na rotirajući disk uređaja postavlja se odgovarajuća tkanina. Za uzorak klipa korištena je tkanina MD-MOL, a za uzorak prstena tkanina MD-DAC. Za oba uzorka abrazivno sredstvo je dijamantna pasta veličine abraziva 3 μm . Dijamantna pasta nanosi se direktno na tkaninu prije početka poliranja i razmazuje se povlačenjem uzorka po njoj. Zatim se uzorak postavi u glavu i stegne. Za hlađenje i podmazivanje koristi se posebno sredstvo (lubrikant). Vrijeme poliranja je 2 minute pri brzini od 150 min^{-1} i sili pritiska 30 N. Radni parametri isti su za oba uzorka.

U drugom koraku za oba uzorka koristi se ista tkanina naziva MD-CHEM. Poliranje se obavlja pri brzini od 150 min^{-1} , u trajanju 1 minute te uz silu pritiska od 25 N. Umjesto dijamantne paste i sredstva za podmazivanje koristi se posebna tekućina koja ima funkciju hlađenja, podmazivanja i abraziva. Polirani uzorci ispiru se hladnom vodom, dobro posuše i spremni su za postupak nagrizanja.

Na *Slici 35.* prikazani su uzorci nakon poliranja.



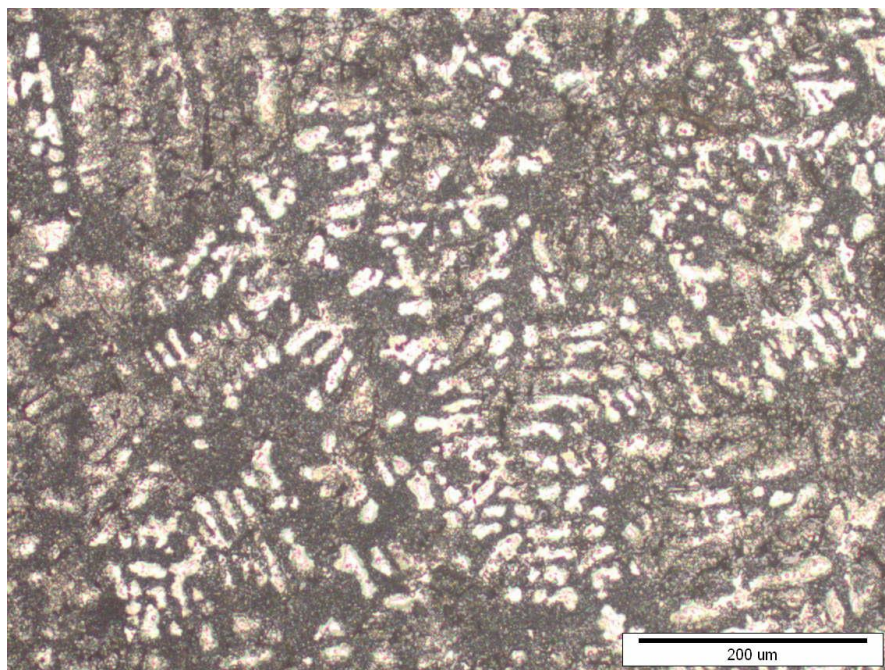
Slika 35. Izgled uzoraka nakon poliranja

Nagrizanje uzoraka

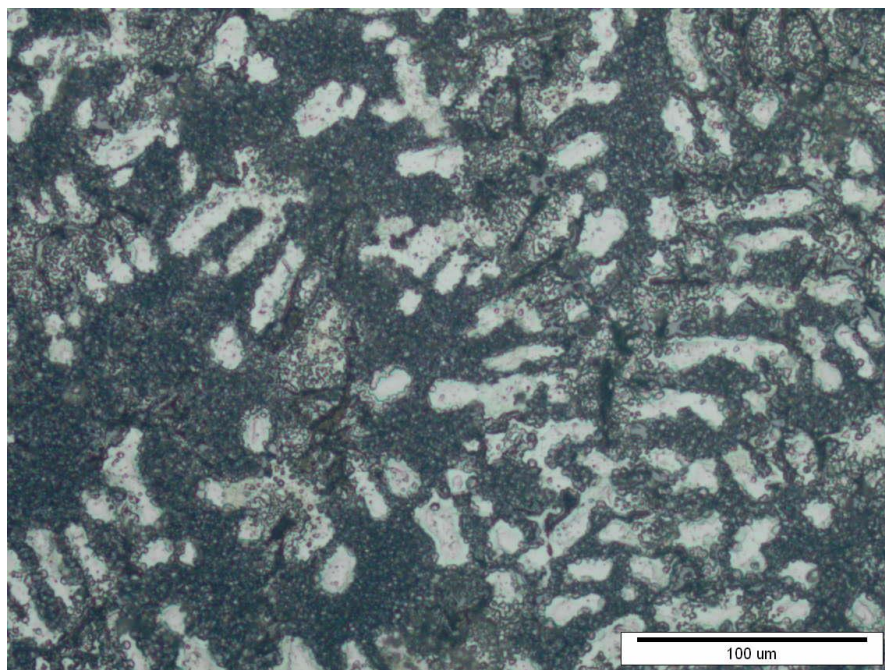
Nagrizanje je zadnji korak u pripremi površine za analizu mikrostrukture. Analizom nagrižene površine na svjetlosnom mikroskopu dobiva se jasna slika mikrostrukture na kojoj se mogu uočiti kristalna zrna, uključci, granice zrna itd.

Za postupak nagrizanja potrebna je otopina za nagrizanje i voda. U jednu posudu stavi se otopina, a u drugu voda. Budući da klip i prsten nisu izrađeni od istog materijala, za njihovo nagrizanje korištene su različite otopine. Za nagrizanje uzorka klipa korištena je fluorovodična kiselina, a za nagrizanje uzorka prstena korišten je nital. Uzorci se urone u posude s nagrizajućim otopinama i drže se par sekundi u njima, a nakon toga se vade i uranjaju u posude s vodom. Kod postupka nagrizanja uzorak se ne smije držati predugo u otopini jer će površina biti previše nagrižena i analizom uzorka na mikroskopu neće biti jasno vidljive mikrostrukturne komponente.

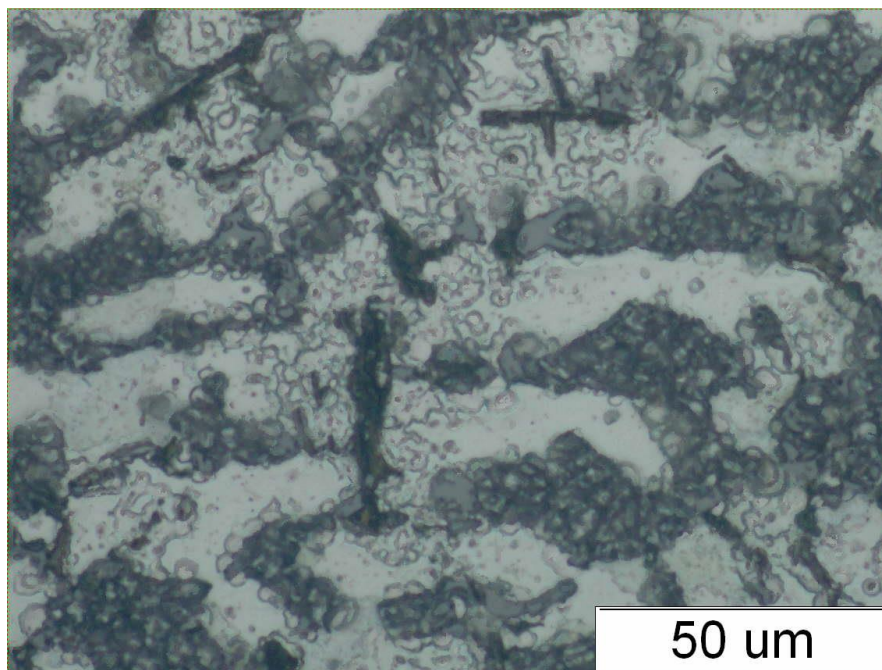
Mikrostruktura uzoraka dobivena je na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x, 200x, 500x i 1000x. Mikrostrukture uzorka klipa i prstena prikazane su na slikama.



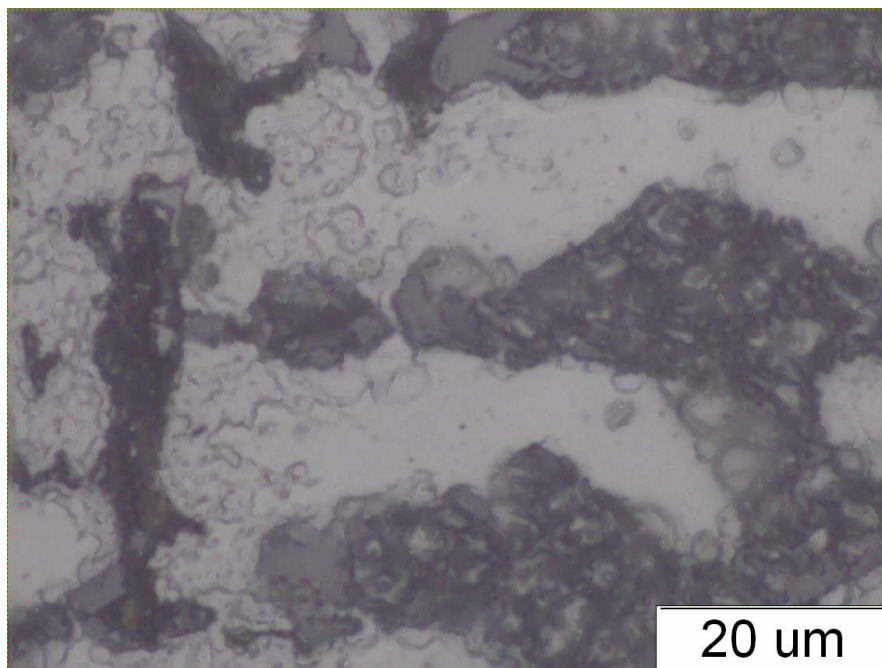
Slika 36. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x



Slika 37. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x

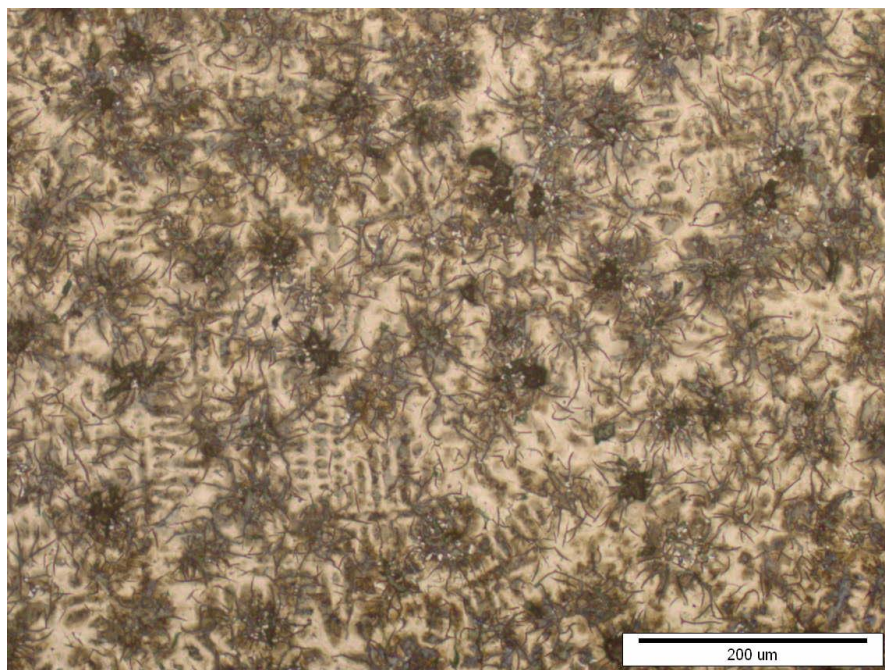


Slika 38. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x

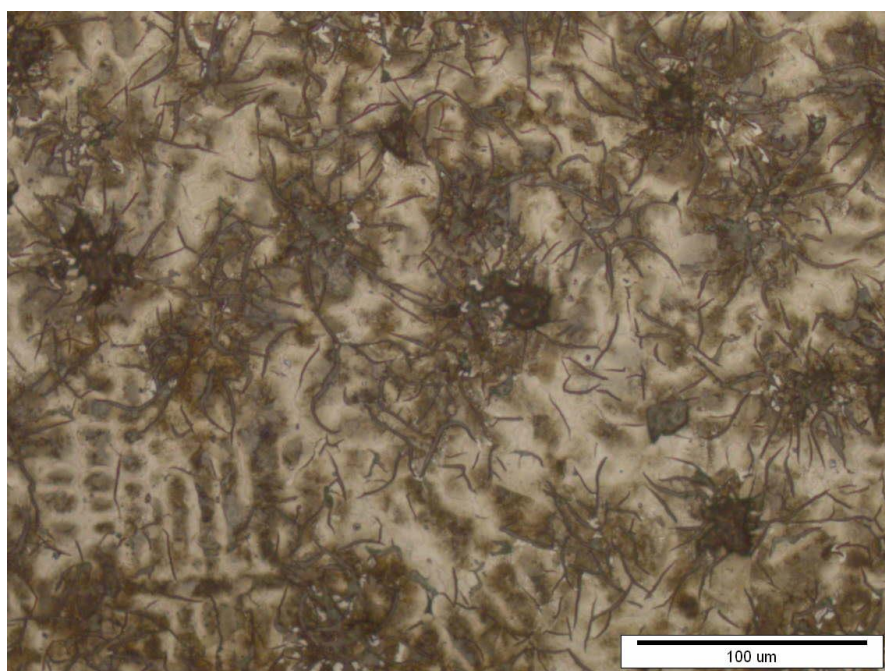


Slika 39. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x

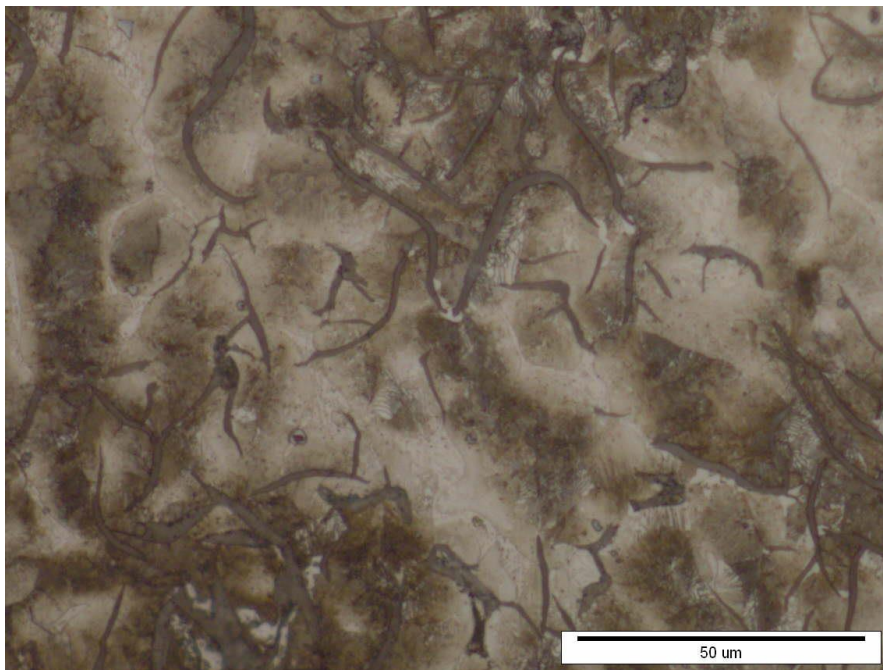
Na Slikama 36. do 39., a posebice na Slici 36., jasno je vidljiva ljevačka struktura s dendritnim svijetlim poljima kristala mješanca okruženim s percipitatima aluminijske i silicijске gusto grupiranih u eutektičku fazu.



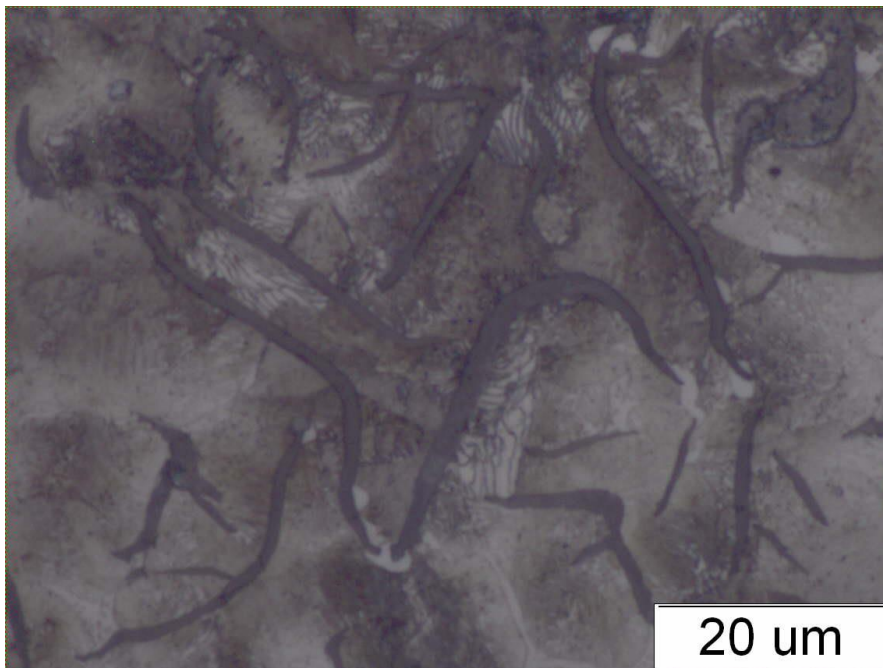
Slika 40. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x



Slika 41. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x



Slika 42. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x



Slika 43. Mikrostruktura prstena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x

Slike 40. do 43. jasno prikazuju strukturu sivog lijeva u kojoj su vidljivi listići grafita u feritno-perlitnoj matrici.

Kemijski sastav i određivanje mikrostrukture košuljice

Udjeli prisutnih elemenata u materijalu košuljice prikazani su u tablici.

Tablica 7. Prikaz udjela elemenata u materijalu košuljice

Elementi	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
Udjeli [%]	1,76	0,038	0,69	0,25	0,76	96,18	0,06	0,25

Prema podacima iz tablice može se primijetiti da u kemijskom sastavu košuljice najveći udio ima željezo. Legirni elementi poput kroma i cinka dodaju se radi povećanja otpornosti materijala na koroziju. Uspoređujući udjele silicija, mangana, fosfora i sumpora dobivene XRF-metodom i udjele ovih elemenata navedenih u teorijskom dijelu rada (vidjeti 2.3.), može se zaključiti da je košuljica izrađena od sivog lijeva.

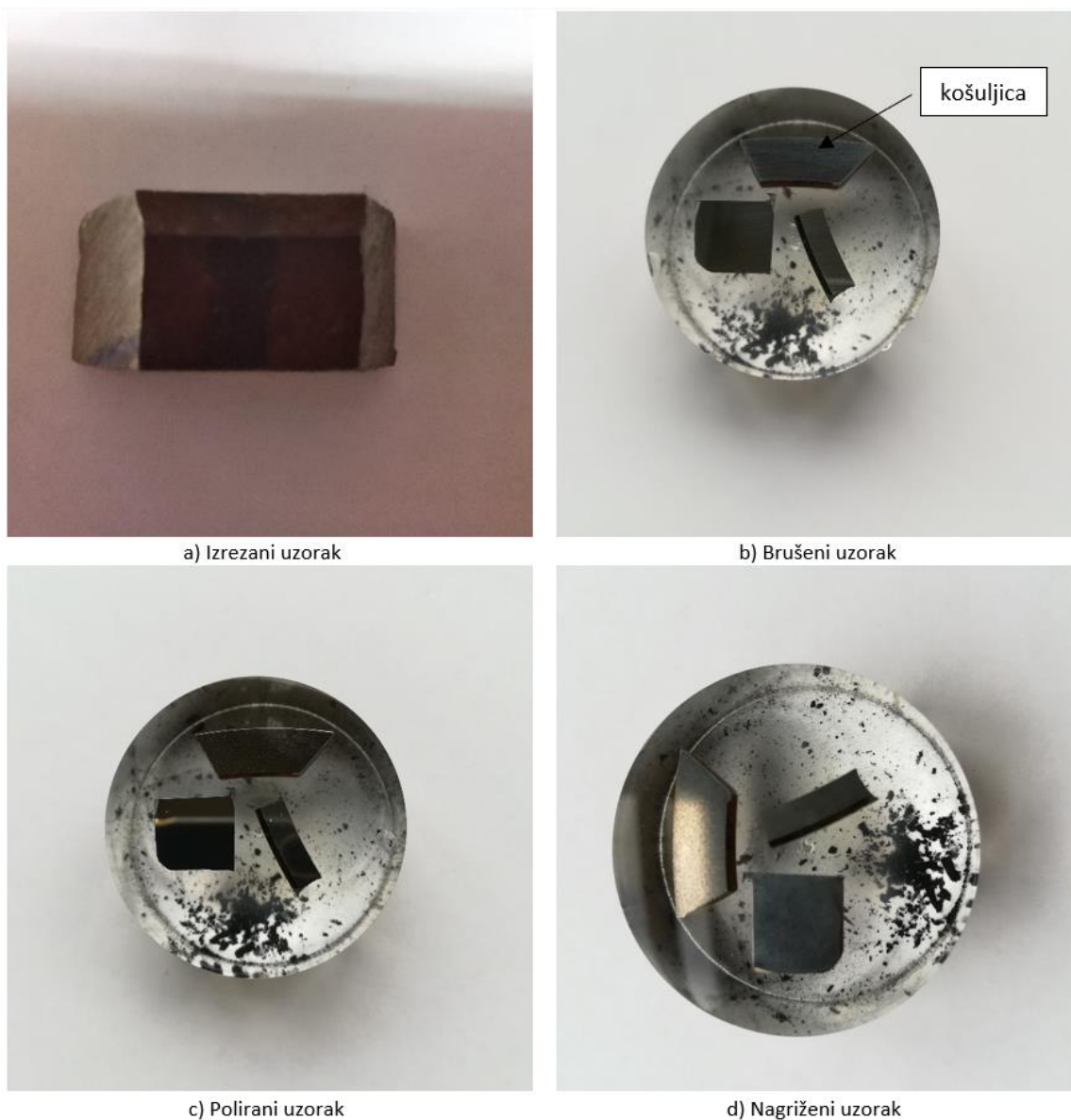
Za mikroanalizu potrebno je izrezati ispitni uzorak i napraviti pripremu površine. Uzorak je izrezan s donje plohe košuljice na tračnoj pili. Postupak pripreme površine uzorka sastoji se od sljedećih koraka:

- Ulijevanje uzorka u polimernu masu
- Brušenje uzorka
- Poliranje uzorka
- Nagrizanje uzorka

Ulijevanje uzorka košuljice u polimernu masu napravljeno je na isti način kao ulijevanje uzoraka klipa i prstena. Uzorak se postavi na podlogu unutar čahure na uređaju za ulijevanje, u potpunosti se prekrije prahom i grije se 15 minuta na 143°C. Ohlađeni uzorak brusi se na uređaju Minitch 233 na šest brusnih papira različitih veličina zrna. Veličine zrna brusnog papira i radni parametri brušenja isti su kao kod brušenja uzoraka klipa i prstena.

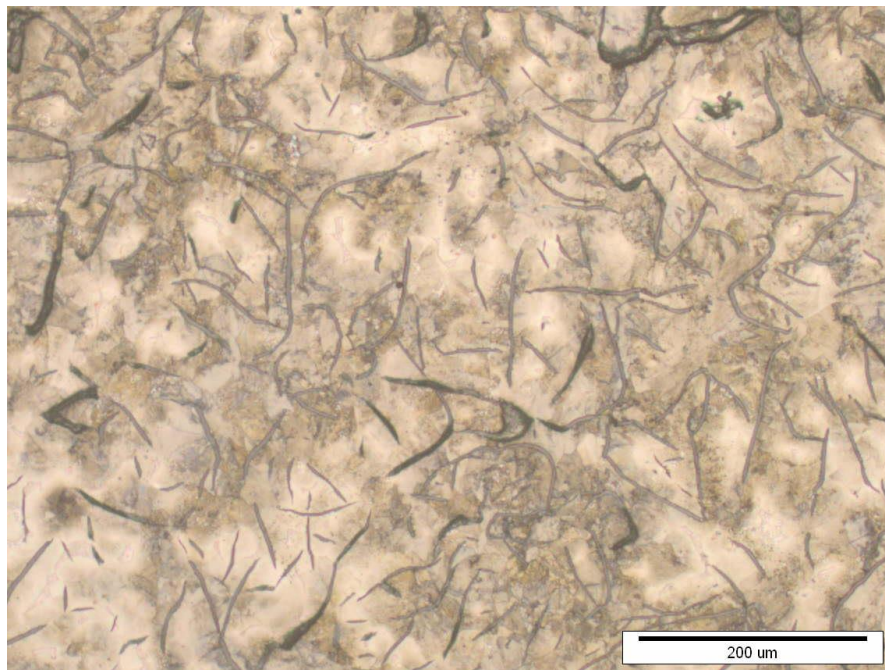
Nakon brušenja uzorak se mora polirati. Poliranje se provodi u dva koraka. U prvom koraku korištena je tkanina MD-DAC, dijamantna pasta kao abraziv i lubrikant za hlađenje i podmazivanje. U drugom koraku poliranja podloga je bila tkanina MD-CHEM, a za hlađenje i podmazivanje korištena je tekućina koja služi i kao abraziv. Poliranje uzorka košuljice napravljeno je pri istim radnim parametrima pri kojim je poliran uzorak klipnog prstena.

Nagrizanje uzorka košuljice napravljeno je u 3-postotnom nitalu. Uzorak je uronjen u posudu s nitalom na nekoliko sekundi, a nakon toga uranja se u posudu s vodom kako bi se prekinuo proces nagrivanja. Uzorak se mora dobro osušiti i nakon toga moguće je provesti analizu mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu. Izgled površine uzorka nakon brušenja, poliranja i nagrivanja prikazan je na slici.

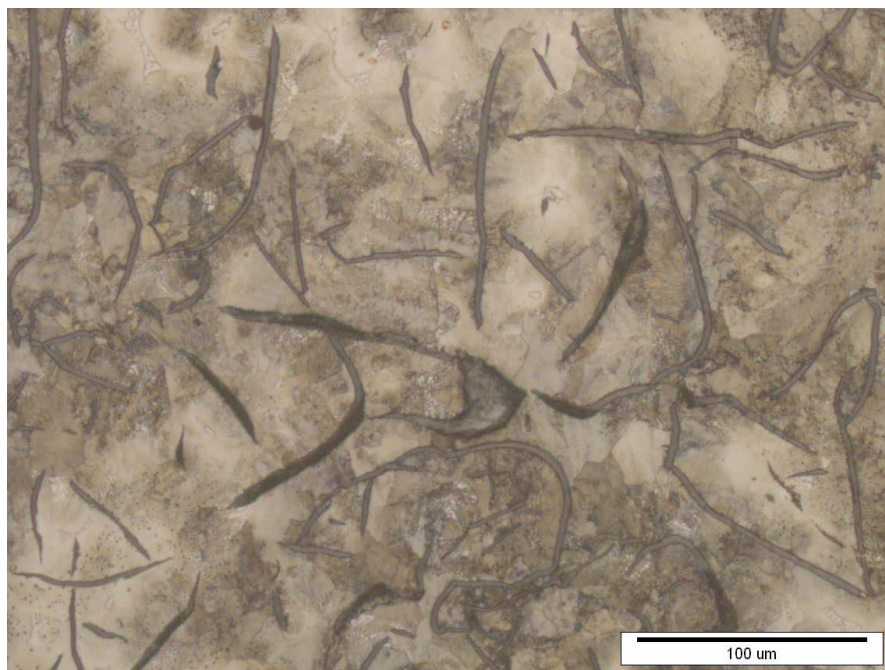


Slika 44. Izgled površine uzorka košuljice nakon brušenja, poliranja i nagrivanja

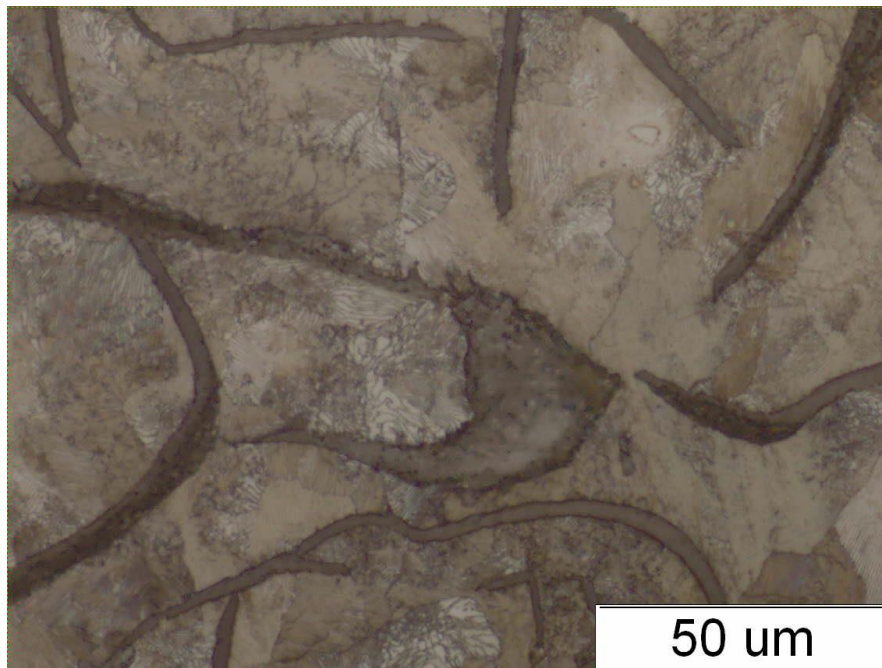
Mikrostruktura uzorka košuljice dobivena je na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x, 200x, 500x i 1000x.



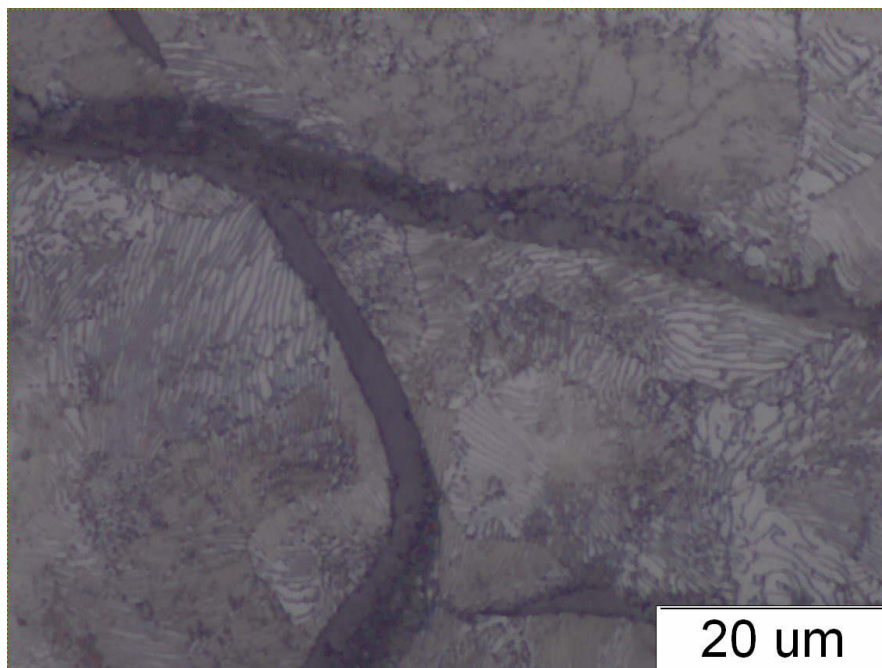
Slika 45. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x



Slika 46. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x



Slika 47. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x



Slika 48. Mikrostruktura košuljice na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x

Slike 45. do 48. jasno prikazuju strukturu sivog lijeva u kojoj su vidljivi listići grafita u feritno-perlitnoj matrici.

5.1.2. *Analiza tragova i određivanje mehanizama trošenja*

Pri gibanju klipa od gornje mrtve točke do donje mrtve točke i obratno te uslijed izgaranja smjese zraka i goriva dolazi do trošenja unutarnje površine košuljice. Kako bi se povećala otpornost košuljice na trošenje, unutarnju površinu potrebno je honati, a nakon toga ponekad se provodi fosfatiranje i nitriranje. Honanje je postupak obrade odvajanjem čestica kojim se obrađuju unutarnje cilindrične površine s ciljem postizanja zahtijevane točnosti oblika cilindra i kvalitete površine. Dakle, honanjem se postiže manje odstupanje od kružnosti i grubo obrađena površina. Kad se postupak honanja ne bi provodio, odnosno kad se površina košuljice ne bi pogrubljavala, na tako glatkoj površini ulje se ne bi moglo zadržati budući da viskoznost ulja pada pri povišenim temperaturama. U takvim uvjetima podmazivanje bi bilo nedovoljno, koeficijent trenja bi se značajno povećao te bi u vrlo kratkom roku došlo do zaribavanja motora. Osim toga, uloga ulja je i odvođenje topline iz cilindra. Ako na stijenkama košuljice nema dovoljno ulja, odvođenje topline će biti otežano i doći će do nagorijevanja. S druge strane, površina košuljice ne smije biti ni previše gruba jer će se na takvoj površini ulje zadržati u većoj količini što će rezultirati povećanjem emisije štetnih plinova i potrošnje ulja u motoru. Kod mokrih košuljica značajna prednost je što se one jednostavno mogu zamijeniti ukoliko dođe do njihovog oštećenja kao što je to bio slučaj kod Zetor-a 4911. Nova košuljica naručuje se zajedno s klipom i prstenovima i svi dijelovi su obrađeni na konačnu mjeru te nije potrebno provoditi naknadne obrade.

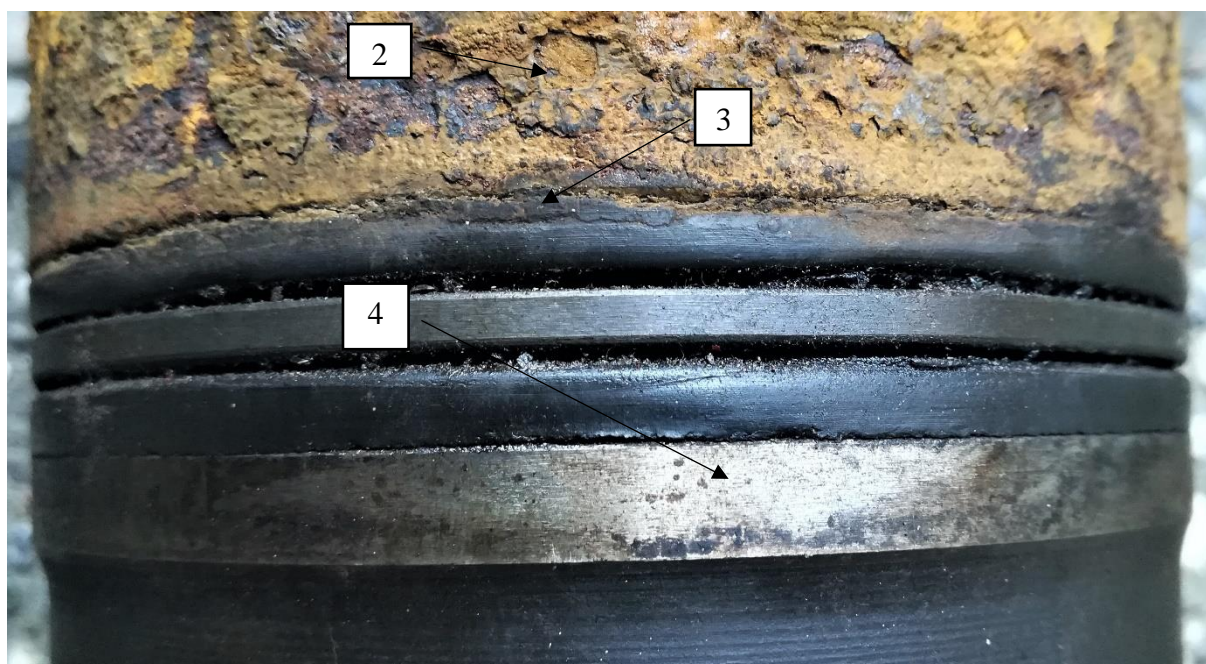
Na donjoj plohi košuljice postavljena su dva brtvena prstena. Gornji prsten sprječava istjecanje rashladne tekućine iz bloka u kućište koljenastog vratila, a donji prsten sprječava da ulje dođe u kontakt s rashladnom tekućinom koja cirkulira oko košuljice i hladi je. Između ova dva prstena na bloku motora nalazi se kontrolni otvor za rashladnu tekućinu i ulje. Ukoliko kroz otvor istječe rashladna tekućina, znači da je gornji prsten oštećen, a ako kroz otvor istječe ulje, oštećen je donji prsten. U slučaju da je oštećen samo jedan od navedenih prstenova, drugi prsten, ukoliko nema oštećenja na njemu, osigurat će sustav od miješanja rashladne tekućine i ulja. Rashladne tekućine kojima se hlade košuljice su voda i antifriz. Prednosti antifriz nad vodom kao tekućinom za hlađenje su niža temperatura ledišta, bolje odvođenje topline i antikorozivno djelovanje na dijelove motora.

Na *Slici 49.* i *Slici 50.* prikazan je vanjski izgled košuljice. Brojevima 1, 2, 3 i 4 označeni su uočeni tragovi trošenja.



Slika 49. Cilindarska košuljica Zetor-a

Broj 1 označava područje košuljice zahvaćeno korozijom. Ovdje je riječ o općoj koroziji budući da je zahvaćena cijela površina košuljice. Tijekom eksploatacije košuljica je bila u direktnom kontaktu s rashladnom tekućinom čije je djelovanje najvećim dijelom uzrokovalo pojavu korozije. Na slici se jasno vidi da je korodirana površina ograničena na područje između brtvenog prstena i gornje plohe, odnosno područje koje je u izravnom kontaktu s rashladnom tekućinom što potvrđuje prethodnu tvrdnju. Budući da je vanjska površina košuljice potpuno prekrivena korozijskim produktima, najvjerojatniji uzrok ovom stanju je češća primjena vode nego antifriz za hlađenje ili njihovo miješanje, odnosno razrjeđivanje antifriz. Osim toga, pojavi i širenju korozije na vanjskom plaštu košuljice pridonijeli su i drugi čimbenici poput radne okoline (rad na polju, u šumi itd.), radnih uvjeta (visokih temperatura, kemijskih reakcija,...) i atmosferskih uvjeta (izloženost oborinama, visokim temperaturama,...).



Slika 50. Prikaz istrošenosti vanjske stijenke donje plohe košuljice

Na vanjskoj površini košuljice mogu se uočiti brazde i krateri koji su nastali odnošenjem materijala uslijed korozijskog djelovanja (broj 2 označava krater). Također se može primijetiti da su oba oblika trošenja jasno vidljiva golim okom te da su po cijeloj košuljici približno iste dubine što znači da se radi o ravnomjernoj koroziji čiji je intenzitet najmanje opasan budući da se vrlo lako može pratiti napredovanje procesa i predvidjeti kad korodirani dio treba zamijeniti. Na ovom dijelu površine košuljica nije u kontaktu sa stijenkom bloka motora, odnosno gubitak materijala nije posljedica fizičkog kontakta dva metala nego korozijskog i erozijskog djelovanja. Uspoređujući istrošenu i novu košuljicu, stvaranjem korozijskih naslaga glatka i sjajna površina nove košuljice postala je izrazito hrapava i oljuštena. Osim korozijskih produkata, na površini košuljice vidljive su i male bijele točkice koje su nastale uslijed kavitacijske erozije.

Broj 3 označava adhezijski sloj koji je nastao uslijed toplinskog i mehaničkog oštećenja gornjeg brtvenog prstena. Mehaničko oštećenje prstena uzrokovano je erozijom, odnosno udaranjem fluida o površinu prstena velikim brzinama. Prsten je izrađen od gume i kao takav otporan je na visoke temperature koje nastaju na stijenki cilindra. Međutim, prirodni proces gume je da ona stari tijekom vremena pri čemu gubi svoja dobra toplinska i elastična svojstva. Guma starenjem postaje poput plastike, smanjuje joj se elastičnost, postaje kruta i toplinski manje

postojana. Udarom fluida o površinu prstena dolazi do otkidanja sitnih čestica materijala s vrha prstena od kojih neke bivaju odnesene s fluidom dok druge ostaju trajno nalijepljene na prsten. Zagrijavanjem guma omekšava i postaje ljepljiva što pogoduje stvaranju naljepka.

Broj 4 označava mjesto na košuljici gdje je došlo do abrazijskog trošenja. Na površini se mogu uočiti tragovi grebanja nastali uslijed kontakta košuljice s raznim česticama prisutnima u mazivu, čestica dospjelih izvana, sitnih komadića metala itd. Istrošena površina je polirana, sjajna i lako uočljiva u odnosu na ostalu površinu.

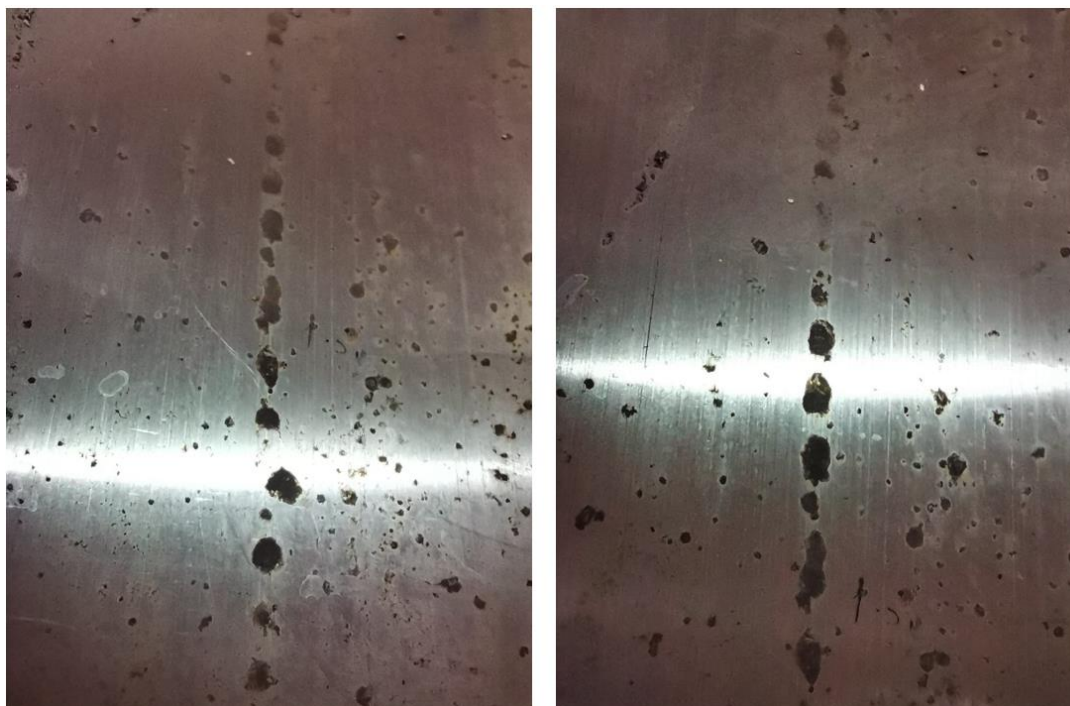
Pri određivanju stupnja istrošenosti košuljice važno je procijeniti stanje unutarnje površine (korozijska brazda, naljepci) i izmjeriti sve značajne dimenzije poput unutarnjeg promjera.

Na *Slici 51.* prikazana je unutarnja površina košuljice. Za potrebe analize mikrostrukture košuljice s donje plohe izrezan je uzorak te nije riječ o nekakvom oštećenju na košuljici ili primarnoj konstrukciji. Na donjoj plohi može se uočiti pojava lokalne korozijske, ali nisu primijećeni opasniji oblici ove korozijske poput *pittinga*. Do pojave korozijske na donjoj plohi košuljice dolazi uslijed otjecanja ulja sa stijenke košuljice u karter koji je smješten ispod koljenastog vratila. Pri gibanju klipa od GMT do DMT uljni prsten „struže“ ulje sa stijenke košuljice, ali zbog ograničenog prostora za gibanje prsten ne može doći do kraja košuljice te pri dnu ostane mali sloj ulja koji u kombinaciji sa zagrijanom stijenkom potiče pojavu lokalne korozijske.



Slika 51. Presjek cilindarske košuljice

Značajniji mehanizmi trošenja unutarnje stijenke košuljice su adhezija i abrazija.



Slika 52. Tragovi trošenja na unutarnjoj stijenki košuljice

Na *Slici 52.* prikazani su tragovi trošenja na unutarnjoj površini košuljice. Smeđe točke nastale su kao posljedica adhezijskog trošenja tribopara klipnog prstena i košuljice. Glavni uzrok adhezijskog trošenja košuljice je slabo podmazivanje, odnosno nedovoljan sloj ulja između košuljice i prstena. Budući da je podmazivanje na nekim dijelovima bilo slabo, prsten je strugao po stijenki košuljice te je došlo do ljuštenja površine. Smeđe točke zapravo su oljušteni dijelovi stijenke.

Vertikalne brazde na stijenki posljedica su abrazijskog trošenja košuljice. Do abrazijskog trošenja došlo je zbog prisutnosti abrazivnih čestica unutar košuljice. Abrazivne čestice mogu biti korozijski produkti, odlomljeni komadići metala, krute čestice koje se nalaze u gorivu i ulju itd.

Na površini klipa i klipnih prstenova uočena su oštećenja poput ljuštenja vanjskog sloja materijala, zarezi i rupice. Najistrošeniji, odnosno najoštećeniji dio klipa je čelo koje podnosi najveća toplinska opterećenja. Na čelu klipa uočena su tri značajna oštećenja: zarezi, ljuštenje materijala i rupice.

Zarezi na čelu klipa nastali su uslijed erozijskog trošenja česticama. Abrazivne čestice najčešće preko goriva dolaze u kontakt sa čelom klipa. U gorivu se često mogu naći krute čestice poput vanadija koje pod visokim tlakom uzrokuju lokalno oštećenje površine (pojavu abrazije). Osim krutih čestica u gorivu, abrazivno djelovanje imaju i odlomljeni komadići metala, čestice korozije, izgorjene čestice itd. Na slici je prikazano abradirano područje čela klipa.



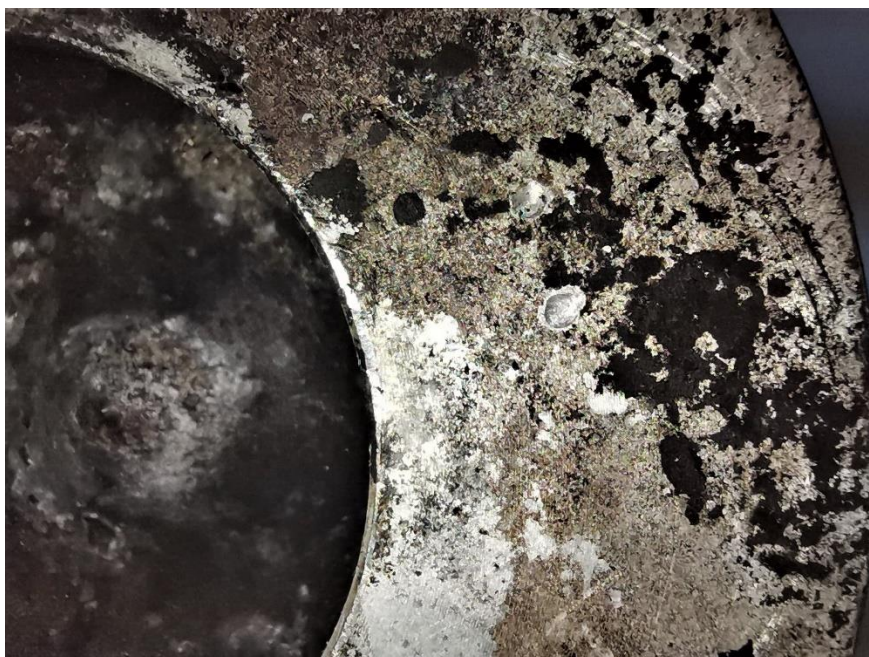
Slika 53. Abrazijsko trošenje čela klipa

Na slici se također može primijetiti i trošenje ruba prostora za izgaranje. Pojavu abrazije na čelu klipa nemoguće je izbjeći, ali pravilnim odabirom materijala za izradu klipa, boljom filtracijom goriva i zraka može se znatno smanjiti njezin intenzitet.

Ljuštenje vanjskog sloja materijala uzrokuje kombinacija kemijskih, mehaničkih i toplinskih utjecaja.

Rupice na površini čela klipa vidljive su golim okom i relativno su velike dubine. Uzrok njihovog nastanka može biti erozija kapljevinom budući da se gorivo u cilindar ubrizgava pri visokim tlakovima i velikim brzinama pri čemu raspršene kapljice udaraju u površinu čela klipa i uzrokuju lokalna oštećenja. Osim toga, u gorivu se nalaze i krute čestice koje prodiru u površinu klipa i uzrokuju nastanak rupica. Dakle, rupice su posljedica erozije kapljevinom i česticama, a zastupljeni mehanizmi trošenja su umor površine i abrazija. Na *Slici 54.* prikazane su rupice nastale na čelu klipa uslijed erozijskog djelovanja.

Slika 55. prikazuje tijelo klipa na kojem su brojevima 1, 2 i 3 označeni mehanizmi trošenja (1-abrazija, 2-adhezija prstena, 3-adhezija; ljuštenje naslona prstena i stvaranje naslage ulja).



Slika 54. Pojava rupica na površini uslijed erozijskog djelovanja



Slika 55. Tijelo klipa s označenim mehanizmima trošenja

5.2. Ispitivanje zupčanika reduktora traktora

Potrošeni zupčanik dio je mjenjačke kutije traktora Zetor 5211 iz 1988. godine (Slika 56.). Riječ je o zupčaniku 3. i 4. brzine, snage motora 33 kW, odnosno 45 KS.



Slika 56. Zetor 5211, 1988. godina [36]

Reduktor Zetor-a 5211 sastavljen je od 12 zupčanika od kojih 10 zupčanika služi za vožnju naprijed, a 2 za vožnju unatrag, dakle radi se o mjenjaču s 5 stupnjeva prijenosa + 1 stupanj za vožnju unazad. Prema podacima iz radioničkog priručnika za model 5211 zupčanici se mijenjaju pri približno 5000 radnih sati u srednje teškim radnim uvjetima. U ovom slučaju uslijed pojave umora materijala i preopterećenja konstrukcije došlo je do loma zubi na manjem zupčaniku. Pojava umora materijala inicira da je zupčanik bio često i dugotrajno izložen promjenjivom dinamičkom opterećenju koje je uzrokovalo pojavu sitnih pukotina na polomljenim i oštećenim zubima. Lom i oštećenje zubi na manjem zupčaniku ukazuju da je do preopterećenja došlo pri radu u trećem stupnju prijenosa. Kod traktora prienos okretnog momenta najčešće se vrši u drugom i trećem stupnju što dokazuje i pojava umora na manjem zupčaniku. O istrošenosti zubi i površini loma bit će detaljnije rečeno u 5.2.2.

Tablica 5. prikazuje podatke o zupčaniku reduktora poput karakterističnih dimenzija i broja zubi. Sve dimenzije dobivene su mjerenjem pomičnim mjerilom rezolucije 0,1 mm. Zupčanik je postavljen na međuvratilo reduktora, a s vratilom je spojen perom preko kojeg se s vratila na zupčanik prenosi okretni moment, ali i rotacijsko gibanje.

Tablica 8. Dimenzije zupčanika mjenjača

Dimenzije zupčanika mjenjača		
		
Veličine	Mali zupčanik	Veliki zupčanik
Promjer podnožne kružnice	117,8 mm	138,6 mm
Promjer tjemene kružnice	134,2 mm	154,6 mm
Unutarnji promjer	62 mm	62 mm
Visina zuba	8,6 mm	8,6 mm
Debljina zuba pri tjemenu	2,8 mm	2,8 mm
Debljina zuba pri korijenu	6,6 mm	6,6 mm
Razmak između osi zubi	11,4 mm	11,4 mm
Ukupan broj zubi	36	42
Broj oštećenih zubi	4	Nema
Broj puknutih zubi	3	Nema
Dimenzije utora za pero		
Duljina utora	15,9 mm	
Širina utora	4 mm	

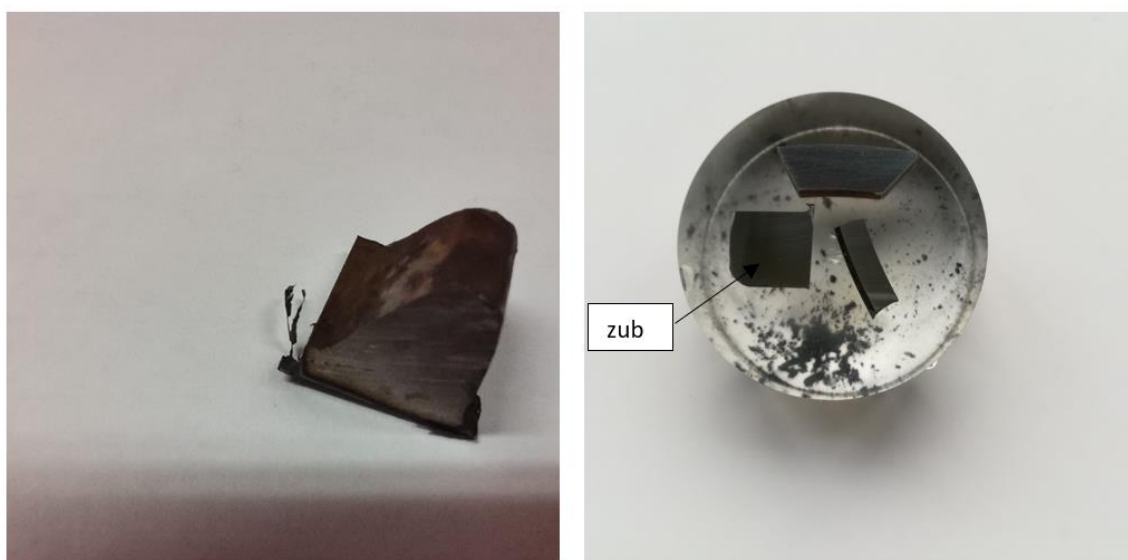
5.2.1. Karakterizacija materijala

Budući da se XRF-metodom ne može pouzdano odrediti postotak ugljika u kemijskom sastavu, za određivanje materijala od kojeg je zupčanik izrađen napravljena je analiza uzorka na svjetlosnom mikroskopu kao u prethodna dva slučaja.

Kao ispitni uzorak koristit će se zub izrezan s većeg zupčanika. Uzorak je uliven zajedno s klipom i prstenom u istu polimernu masu. Postupak ulijevanja uzorka u polimernu masu opisan je detaljno u 5.1.1.

Uzorak je brušen pri brzini od 300 min^{-1} na brusnim papirima znatosti P120, P320, P600, P1000, P2400, P4000. Vrijeme nije točno određeno, odnosno brusi se sve dok se ne eliminiraju tragovi prethodnog brušenja. Uzorak je brušen u uzdužnom i poprečnom smjeru.

Uzorak prije ulijevanja i nakon brušenja prikazan je na slici.

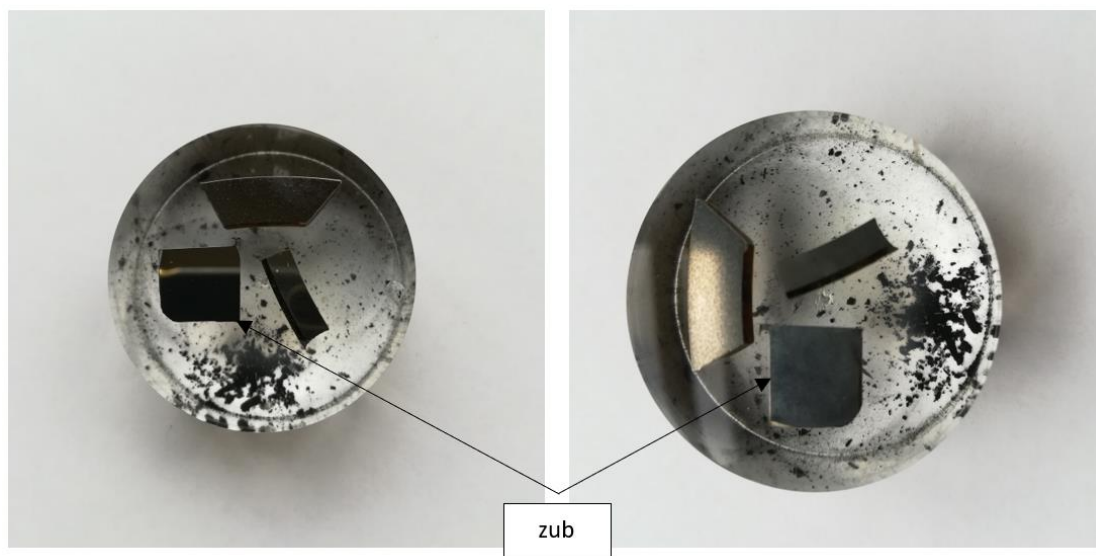


Slika 57. Uzorak prije ulijevanja i uliven uzorak nakon brušenja

Budući da su na uzorku još uvijek vidljivi tragovi zadnjeg brušenja, površina uzorka mora se polirati. Poliranje je napravljeno u dva koraka s istim tkaninama, abrazivima i sredstvima za hlađenje i podmazivanje koji su korišteni za poliranje uzorka prstena. Prvo poliranje trajalo je 2 minute uz opterećenje od 30 N dok je drugo poliranje trajalo 1 minutu uz silu pritiska od 25 N. U oba koraka disk rotira brzinom od 150 min^{-1} .

Uzorak je nagrizan u 3-postotonom nitalu nekoliko sekundi, a kemijska reakcija nagrivanja površine prekinuta je uranjanjem uzorka u vodu.

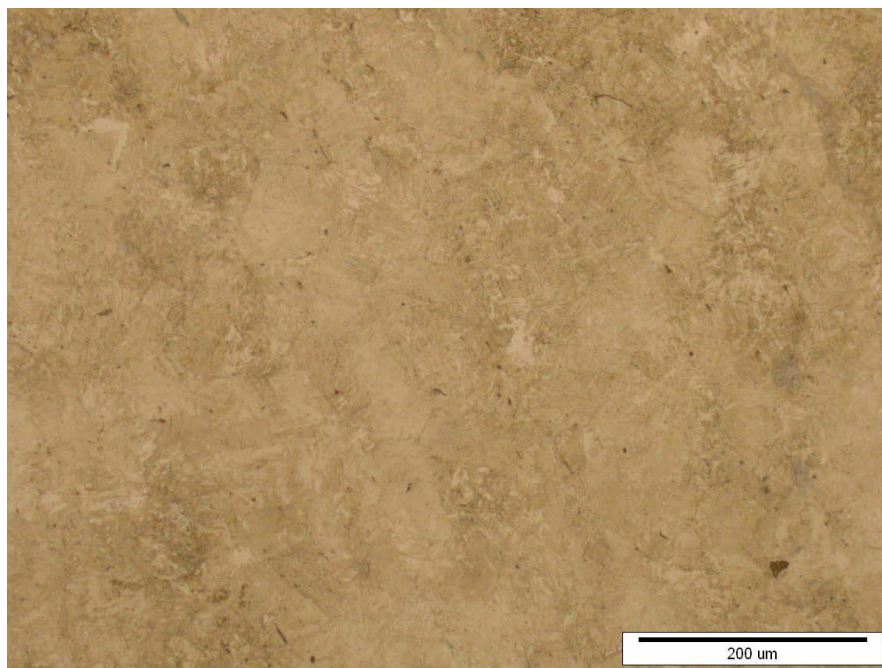
Na *Slici 54.* prikazan je izgled površine nakon poliranja i nakon nagrivanja u nitalu.



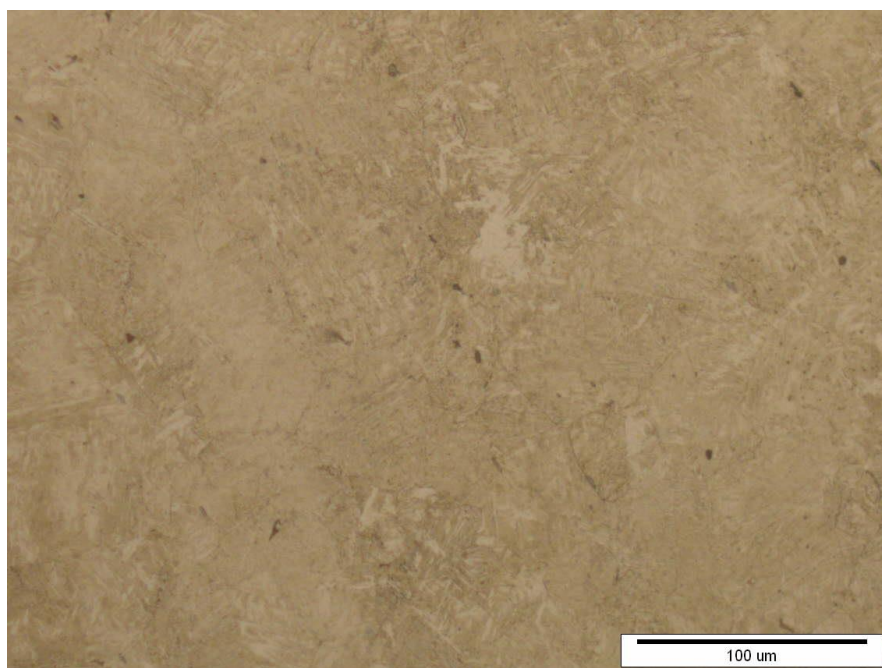
Slika 58. Uzorak nakon poliranja (lijevo) i nagrivanja (desno)

Analizom uzorka na svjetlosnom mikroskopu dobivena je mikrostruktura zuba pri povećanju 100x, 200x, 500x i 1000 x. Mikrostruktura je prikazana na *Slikama 59., 60., 61. i 62.*

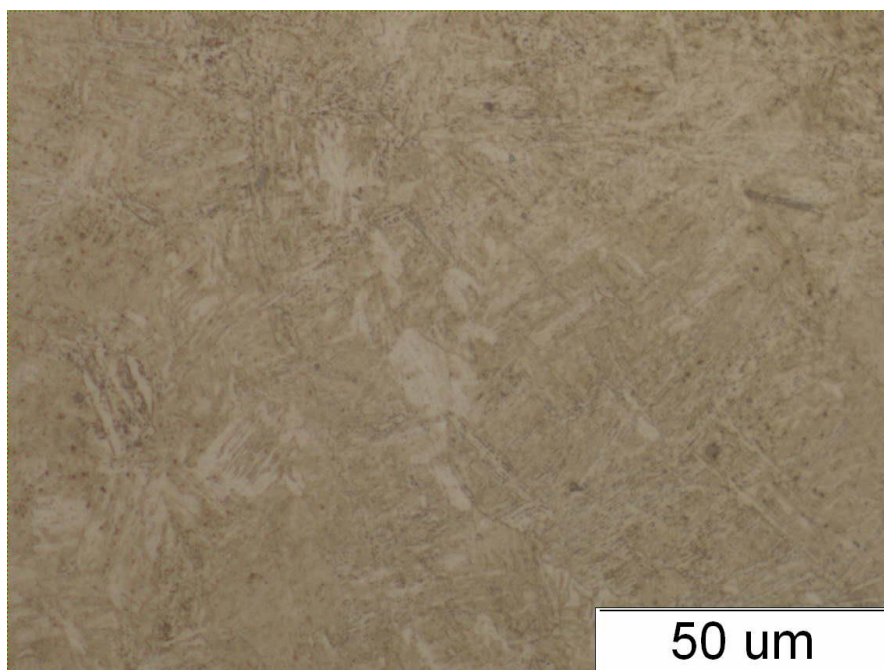
Na slikama mikrostrukture zuba teško se mogu uočiti kristalna zrna i granice zrna. Tek pri povećanju od 500x i 1000x mogu se uočiti zrna u obliku iglica. Iako za zupčanik nije određen kemijski sastav, uzimajući u obzir poteškoće nastale pri rezanju zuba zbog velike tvrdoće, sitnozrnatu mikrostrukturu i nemogućnost provedbe XRF-analize, može se zaključiti da je zupčanik najvjerojatnije izrađen od čelika za cementiranje, čelika velike tvrdoće, čvrstoće i žilavosti nepougličene jezgre. Nažalost, zbog intenzivnog procesa korozije, rub zuba nije bilo moguće analizirati (mikrostruktura, mikrotvrdoća)



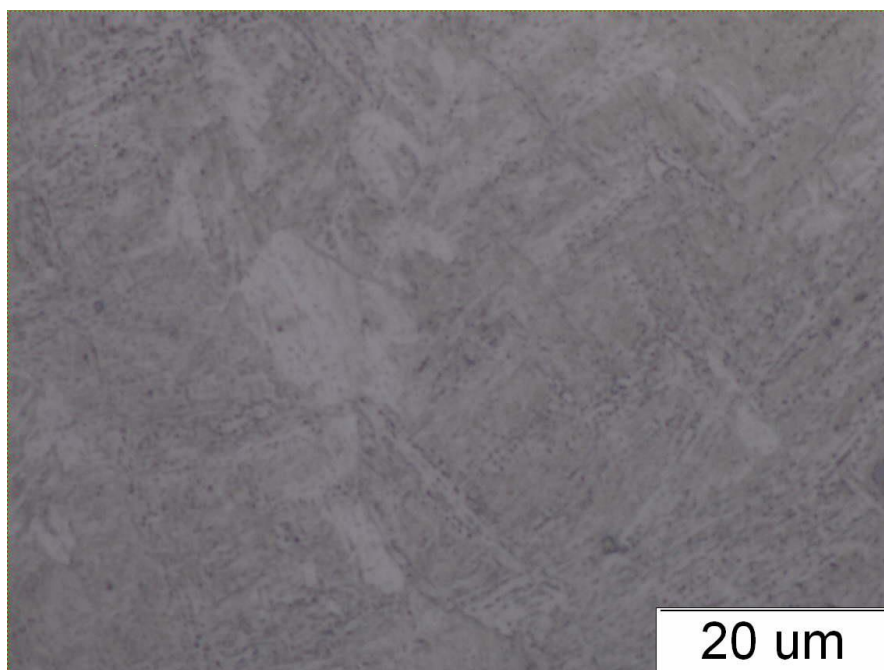
Slika 59. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 100x



Slika 60. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 200x



Slika 61. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 500x



Slika 62. Mikrostruktura zupčanika na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju 1000x

5.2.2. Analiza tragova i određivanje mehanizama trošenja

Na manjem zupčaniku reduktora traktora uslijed pojave umora materijala i preopterećenja došlo je do potpunog loma i otkidanja tri zuba dok su još dva zuba slomljena, ali nisu otkinuti s tijela zupčanika. Izgled površine loma prikazan je na slikama.



Slika 63. Površina loma zubi zupčanika

Površina s koje su zubi otkinuti je hrapava, korodirana i bez većih ostataka polomljenih zubi. Analizirajući lom prema izgledu površine, zaključuje se da je došlo do krhkog loma pri kojem su zubi doslovno odrezani s tijela zupčanika uslijed preopterećenja. Na *Slici 64.* prikazana je površina loma dva zuba na čije je oštećenje veći utjecaj imao umor površine. Preopterećenje je samo ubrzalo proces širenja pukotine.



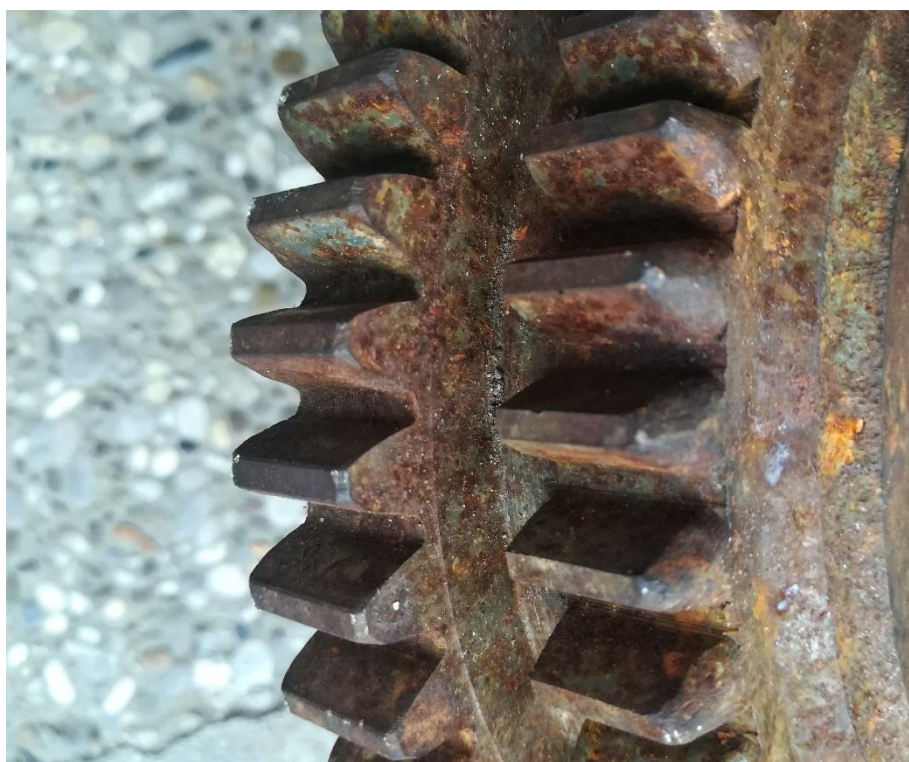
Slika 64. Površina loma zubi zupčanika



Slika 65. Prikaz korijena pukotine uslijed umora površine

Na *Slici 65.* prikazan je korijen pukotine na oštećenom zubu. Za razliku od ostale površine na zubu, površina korijena pukotine je glatka i sjajna što znači da je uzrok loma zuba umor površine ubrzan velikom silom opterećenja. Umor površine je najčešći mehanizam trošenja kod dinamički opterećenih konstrukcija i vrlo opasna pojava.

Cijela površina zupčanika prekrivena je korozijskim produktima te je jedino na bokovima zubi i unutarnjem promjeru moguće vidjeti osnovnu boju zupčanika. Radi se o općoj koroziji jer je prekrivena cijela površina, ali uz nju se pojavljuje i rupičasta korozija na bokovima zubi. Ona nastaje kao posljedica utiskivanja maziva u mikropukotine kada bokovi zubi dođu u kontakt (*Slika 66.*).



Slika 66. Rupičasta korozija na bokovima zubi

Zupčanik je sastavljen od manjeg i većeg zupčanika izrađenih u jednom komadu s ravnim zubima. Uspoređujući izgled zubi manjeg i zubi većeg zupčanika primijetit će se velika istrošenost zubi manjeg zupčanika zbog veće učestalosti prijenosa okretnog momenta. Zubi velikog zupčanika su gotovo neoštećeni, ne uzimajući u obzir koroziju.

6. ZAKLJUČAK

Trošenje strojnih dijelova tijekom eksploatacije nepoželjna je pojava koja se ne može spriječiti, ali se poduzimanjem triboloških mjera poput pravilnog izbora materijala, površinske zaštite, toplinske obrade metala i dr. ovaj proces može usporiti i smanjiti na najmanju moguću mjeru.

Cilindarska košuljica, klip i zupčanik vitalni su dijelovi svakog stroja pogonjenog motorom s unutarnjim izgaranjem. Redovno i pravilno održavanje osigurat će im produljen vijek trajanja i smanjit će mogućnost iznenadnih i velikih kvarova.

Košuljica i klip zamijenjeni su pri generalnom popravku motora zbog istrošenosti. Analizirajući mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu te vanjsku i unutarnju površinu košuljice i površinu čela i plašta klipa radi uočavanja tragova trošenja i prepoznavanja zastupljenih mehanizama trošenja, o stanju košuljice i klipa nakon isteka predviđenog vijeka trajanja zaključuje se sljedeće:

Košuljica cilindra prema kemijskom sastavu i mikrostrukтури izrađena je od sivog lijeva postupkom lijevanja u pijesku. Vanjska površina košuljice u potpunosti je prekrivena korozijskim produktima, a mogu se uočiti i sitne bijele točkice nastale uslijed kavitacije. Unutarnja površina košuljice oljuštena je uslijed klizanja prstena po njoj i prekrivena vertikalnim brazdama nastalim uslijed abrazijskog trošenja. Usto, zračnost između košuljice i klipa povećala se zbog trošenja stijenke košuljice što dovodi do slabog brtvljenja prstenova, a samim time i do gubitka snage motora. Za smanjenje trošenja košuljice cilindra preporučuje se bolja filtracija goriva, primjena prevlaka s velikom otpornošću na trošenje, koroziju i povišene temperature i primjena isključivo antifrizu za hlađenje košuljice.

Klip je izrađen od Al-Si legure postupkom lijevanja. Najveća oštećenja primijećena su na čelu klipa na kojem se lako uočavaju zarezi, rupice, ali i ovalnost unutarnjeg promjera (prostora za izgaranje) zbog toplinskih dilatacija i visokih tlakova. Na tijelu klipa može se primijetiti ljuštenje vanjskog sloja materijala na naslonu uljnog prstena i na plaštu klipa, ali i stvaranje naljepka na klipu uslijed izgaranja ulja. Za smanjenje trošenja klipa i prstenova najvažnije je osigurati dovoljno podmazivanje jer će slabo podmazivanje uzrokovati istovremeno trošenje i košuljice i klipa.

Zupčanik reduktora izrađen je od čelika povišene tvrdoće i čvrstoće budući da je namijenjen prijenosu velikih opterećenja. Tijekom eksploatacije došlo je do pojave umora površine, što se očitovalo u pojavi lokalnih oštećenja materijala na zubima uslijed velikih dinamičkih

opterećenja i rupičaste korozije. Na manjem zupčaniku pri prijenosu prevelikog opterećenja za treći stupanj u kombinaciji s umorom površine došlo je do loma zubi. Kako bi se povećala otpornost zupčanika na trošenje preporučuje se provesti odgovarajuću toplinsku obradu poput cementiranja i poboljšavanja.

LITERATURA

- [1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Dieselov_motor, dostupno 22.6.2020.
- [2] <http://www.autonet.hr/arhiva-clanaka/klip-i-cilindar>, dostupno 22.6.2020.
- [3] Mahalec, I., Kozarac, D., Lulić, Z.: Konstrukcije motora, pdf, Zagreb, 2015.
- [4] <https://www.enginebuildermag.com/2010/06/cylinder-sleeves-and-liners/>, dostupno 22.6.2020.
- [5] Lulić, Z., Kozarac, D., Mahalec, I.: Motori s unutarnjim izgaranjem, pdf, Zagreb, 2013.
- [6] https://hr.wikipedia.org/wiki/Klip_stroja, dostupno 23.6.2020.
- [7] https://hr.wikipedia.org/wiki/Sivi_ljjev, dostupno 24.6.2020.
- [8] Radić. A.: Tehnologija lijevanja kućišta motora, završni rad, Fakultet agrobiotehničkih znanosti, Osijek, 2019.
- [9] https://hr.wikipedia.org/wiki/Crvi%C4%87asti_ljjev, dostupno 24.6.2020.
- [10] Zadelj, I.: Aluminijske legure za rad na povišenim temperaturama, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [11] <https://www.kamion-bus.hr/977/Celik-ili-aluminij>, dostupno 24.6.2020.
- [12] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zup%C4%8Danik>, dostupno 25.6.2020.
- [13] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/14-ZupcaniPrijenosnici.pdf>, dostupno 25.6.2020.
- [14] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/new-gearbox-generation-enables-co2-savings-of-up-to-five-grammes-per-kilometre-5189>, dostupno 25.6.2020.
- [15] Gligorić, R.: Mašinski elementi, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2015.
- [16] Jukić Bračulj, I.: Mjenjači i razvodni prijenosi motornih vozila, završni rad, Veleučilište u Šibeniku, 2016.
- [17] Sigurnjak, E.: Tehnologija izrade zupčanika u poljoprivrednoj tehnici, završni rad, Poljoprivredni fakultet, Osijek, 2017.
- [18] <https://gearmotions.com/selection-of-gear-material/>, dostupno 26.6.2020.
- [19] https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDilavi_ljjev, dostupno 26.6.2020.
- [20] <http://proizvodno-strojarstvo.blogspot.com/2011/07/nodularni-zilavi-ljjev.html>, dostupno 26.6.2020.
- [21] https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Celi%C4%8Dni_ljjev, dostupno 26.6.2020.
- [22] https://hr.wikipedia.org/wiki/Konstrukcijski_%C4%8Delik, dostupno 26.6.2020.
- [23] <https://omnimerkur.hr/prodajni-program/crna-metalurgija/konstrukcijski-celici/>, dostupno 26.6.2020.

- [24] <https://omnimerkur.hr/prodajni-program/crna-metalurgija/celici-za-cementiranje/>, dostupno 26.6.2020.
- [25] <https://omnimerkur.hr/prodajni-program/crna-metalurgija/celici-za-poboljsanje-i-poboljsani/>, dostupno 26.6.2020.
- [26] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.
- [27] Kovačević, V., Vrsaljko, D.: Tribologija, pdf, Zagreb, 2011.
- [28] Grilec, K.: Tribologija, nastavni materijali, Zagreb, 2018.
- [29] Đurkić, A.: Analiza trošenja kotrljajućih ležajeva trakastog transportera za sjeme suncokreta u pogonu za prešanje tvornice ulja Čepin, diplomski rad, Fakultet agrobiotehničkih znanosti, Osijek, 2018.
- [30] Jakovljević, S.: Procesi trošenja, nastavni materijali, Zagreb, 2018.
- [31] Biočina, Lj.: Istrošenje košuljice cilindra, klipa, klipnih prstenova na sporohodnim diesel Sulzer 4 RLA 90, Naše more, pdf, 1990.
- [32] Raić, D.: Oštećenja zupčanika planetarnog prijenosnika bočnog reduktora traktora, diplomski rad, Fakultet agrobiotehničkih znanosti, Osijek, 2019.
- [33] <https://www.zetor.com/about-company>, dostupno 28.10.2020.
- [34] <https://www.njuskalo.hr/dijelovi-traktore/traktor-zetor-4911-oglas-18311358>, dostupno 29.10.2020.
- [35] Kolben und Komponenten Katalog, pdf, Kolbenschmidt, 2019.
- [36] <https://www.njuskalo.hr/traktori/traktor-zetor-5211-telefon-01-623431-oglas-19313401>, dostupno 2.11.2020.
- [37] Desnica, V.: Prijenosni uređaj za rentgensku fluorescentnu analizu (XRF) kao jedinstveni instrument za *in situ* elementnu karakterizaciju objekata kulturne baštine, stručni rad, Akademija likovnih umjetnosti, Zagreb, 2011.
- [38] <https://www.olympus-ims.com/ko/xrf-xrd/delta-handheld/delta-alloy/applications/>, dostupno 17.11.2020.

PRILOZI

I. CD-R disc