

# Trošenje koljenastog vratila motora s unutarnjim izgaranjem

---

**Ljubić, Daniel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:235:955493>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Daniel Ljubić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Daniel Ljubić

Zagreb, 2019.

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

Posebno bih se, od srca, zahvalio mentoru prof. dr. sc Krešimiru Grilecu, asistentu dipl.ing.mech. Draženu Mezdiću na korisnim savjetima, pomoći u eksperimentalnom dijelu i dobrom voljom za rješavanjem svake moje nedoumice i pitanja.

Daniel Ljubić





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске 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:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: DANIEL LJUBIĆ Mat. br.: 0035192964

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje koljenastog vratila motora s unutarnjim izgaranjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of internal combustion engine crankshaft**

Opis zadatka:

Koljenasto vratilo ili radilica dio je klipnog (stapnog) stroja koji pravocrtno gibanje klipova (stapova) pretvara u kružno gibanje pogonske osovine. Nepravilnim radom klipnih motora može doći do različitih oštećenja koljenastog vratila ili ostalih dijelova klipnog mehanizma. U ovom radu potrebno je:

- 1) Navesti i opisati glavne dijelove klipnih motora
  - 2) Analizirati tribološki sustav koljenasto vratilo – ležaj koljenastog vratila
  - 3) Navesti materijale od kojih se izrađuju koljenasto vratilo i ležajevi koljenastog vratila
  - 4) Prikazati primjere trošenja dijelova klipnog mehanizma
  - 5) Pronaći i analizirati primjere trošenja koljenastog vratila
- U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:  
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:  
10. srpnja 2019.  
11. srpnja 2019.  
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:  
*K. Grilec*  
prof. dr. sc. Krešimir Grilec

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

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. IZRADA KOLJENASTOG VRATILA .....	4
2.1. Koljenasto vratilo nastalo kovanjem.....	6
2.2. Koljenasto vratilo nastalo lijevanjem.....	6
2.3. Materijal za izradu koljenastog vratila.....	7
2.4. Postupak metalizacije koljenastog vratila.....	7
2.5. Mjerenje stupnja oštećenja rukavaca i ležajeva.....	8
3. TAKTOVI MOTORA.....	9
3.1. Četverotaktni motor.....	10
3.2. Teoretski rad četverotaktnog motora.....	12
4. OPTEREĆENJA KOLJENASTOG VRATILA.....	14
4.1. Momenti savijanja koljenastog vratila.....	16
5. TROŠENJE DIJELOVA KLIPNOG MEHANIZMA .....	18
5.1. Motorno ulje.....	19
5.2. Viskoznost.....	20
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	21
6.1. Koljenasto vratilo.....	21
6.1.1. XRF-metoda za dosjedni ležaj koljenastog vratila.....	23
6.1.2. Određivanje mikrostrukture materijala pomoću svjetlosnog mikroskopa.....	24
6.1.3. Mjerenje tvrdoće uzorka dosjednog ležaja koljenastog vratila.....	28
6.2. Klizni ležaj.....	31
6.2.1. XRF-metoda za klizni ležaj.....	32
6.2.2. Mikrostruktura materijala letećeg ležaja pomoću svjetlosnog mikroskopa.....	34
6.2.3. Mjerenje tvrdoće uzorka letećeg ležaja.....	37
6.3. Klip.....	38
6.3.1 XRF-metoda za klip.....	41
6.3.2. Mikrostruktura materijala klipa pomoću svjetlosnog mikroskopa.....	42
6.3.3. Mjerenje tvrdoće uzorka klipa.....	46
7. ZAKLJUČAK.....	47
8. LITERATURA .....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1. Dijelovi koljenastog vratila [1] .....	2
Slika 2. Kalup za izradu koljenastog vratila serijske proizvodnje [3].....	4
Slika 3. Izrada kovanog koljenastog vratila [6].....	6
Slika 4. Grafički prikaz takta motora [10] (GMT-gornja mrtva točka, DMT-donja mrtva točka) .....	9
Slika 5. Teoretski dijagram Otto motora[10] .....	10
Slika 6. Teoretski dijagram Diesel motora[10] .....	11
Slika 7. Grafički prikaz na Otto motoru a) usis, b)kompresija, c)paljenje smjese, d) kraj ekspanzije-slobodan ispuh, e)ispuh [10] .....	13
Slika 8. Smjer sile plinova $F_{pl}$ [4].....	14
Slika 9. Smjer sila inercije masa u pravocrtnom gibanju i rotirajućih masa $F_{In}$ [4] .....	14
Slika 10. Poprečne i uzdužne vibracije[4].....	15
Slika 11. Deformacija radilice usred centrifugalnih sila te uslijed sila inercija masa u pravocrtnom gibanju[4].....	15
Slika 12. Opterećenje koljenastog vratila u radijalnim silama [5] .....	16
Slika 13. Raspodjela momenata savijanja i momenta torzije u koljenastom vratilu [5] .....	17
Slika 14. Pumpa ulja za VAG grupaciju starijih generacija.....	18
Slika 15. Koljenasto vratilo trocilindarskog motora VAG grupacije, 1.4 TDI .....	21
Slika 16. Istrošenost uležištenja .....	22
Slika 17. Istrošenost kliznog ležaja sa navedenog 1.4 TDI motora .....	22
Slika 18. XRF DELTA PROFESSIONAL uređaj za analizu elemenata u materijalu [16] .....	23
Slika 19. Rezanje uzorka koljenastog vratila za analizu mikrostrukture .....	25
Slika 20. Uzorak dobiven postupkom hladnog ulijeivanja.....	25
Slika 21. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 100x.....	26
Slika 22. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 200x.....	26
Slika 23. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 500x.....	27



Slika 24. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 1000x.....	27
Slika 25. Tvrdomjer PMT 3 .....	28
Slika 26. Prikaz penetratora i otiska kod Vickers metode.....	29
Slika 27. Prikaz uzoraka tijekom ispitivanja tvrdoće.....	29
Slika 28. Prikaz rupe na podnožju ležaja koje služi za podmazivanje rotacijskih dijelova u radu motora.....	32
Slika 29. Leteći ležaj .....	32
Slika 30. Rezanje ležaja za analizu mikrostrukture.....	34
Slika 31. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 100x ..	35
Slika 32. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 200x ..	35
Slika 33. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 500x ..	36
Slika 34. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 1000x	36
Slika 35. Dijelovi klipa.....	39
Slika 36. Rastaljeni klip sa Audi A6 4.2 TDI V8 motora .....	40
Slika 37. Mjesto rezanja na klipu za analizu mikrostrukture .....	42
Slika 38. Uzorak odrezan sa klipa.....	43
Slika 39. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 100x.....	44
Slika 40. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 200x.....	44
Slika 41. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 500x.....	45
Slika 42. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 1000x.....	45

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Materijali koljenastih vratila i njihova svojstva [5] .....	7
Tablica 2. Prikaz udjela elemenata u dosjednom ležaju koljenastog vratila.....	24
Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće dosjednog ležaja prema Vickersu.....	30
Tablica 4. Udio elemenata u letećem ležaju mjeren s vanjske strane .....	33
Tablica 5. Udio elemenata u letećem ležaju mjeren s unutarnje strane .....	33
Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće uzorka letećeg ležaja .....	37
Tablica 7. Udio elemenata u klipu .....	41
Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće klipa prema Vickersu .....	46

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\alpha_s$		faktor oblika savijanja
$\alpha_t$		faktor oblika torzije
$A_{min}$	%	Istezanje
$d_1$	Mm	dijagonala kvadrata
$d_2$	Mm	dijagonala kvadrata
$F$	N	Sila
$F_{pl}$	N	sila plinova
$F_{in}$	N	sila inercije masa u pravocrtnom gibanju i rotirajućih masa
HV0,2		vrijednost tvrdoće prema vickers-u sa utegom mase 200g
$P_a$	bar	atmosferski tlak
$P_k$	bar	tlak kompresije
$P_{max}$		
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematička viskoznost
$V_c$	cm <sup>3</sup>	volumen cilindra
$V_k$	cm <sup>3</sup>	volumen kompresije
$\tau$	N/m <sup>2</sup>	uvijanje
$Z_{min}$	%	kontrakcija
$Q$	J	dovođenje energije
$\eta$	Pas	viskoznost
$\sigma$	kg*m <sup>2</sup>	savijanje
$\sigma_{ekv}$	kg*m <sup>2</sup>	ekvivalentno naprezanje

## SAŽETAK

Koljenasto vratilo je dio mehanizma kojim se pravocrtno gibanje klipova pretvara u kružno gibanje. Koljenasto vratilo je izloženo naglim opterećenjima, zbog udaraca klipova, nedostatkom maziva ili nekontroliranošću nivoa razine ulja u motoru, dolazi i do oštećenja njegovih popratnih dijelova kao što su klip, klipnjača i leteći ležajevi.

U teorijskom dijelu prikazan je način izrade koljenastog vratila, teoretski rad klasičnog četverotaktnog motora te sile koje operećuju koljenasto vratilo u radu motora.

U eksperimentalnom dijelu analiziran je dosjedni ležaj koljenastog vratila, leteći ležaj te klip. Ispitana je tvrdoća, sastav materijala te je određena mikrostruktura na tri navedena uzorka.

## **SUMMARY**

The crankshaft is a part of mechanism by which the rotating motion of the pistons turns into circular motion. The crankshaft is exposed to sudden loads due to piston stroke, lack of lubricant, or uncontrolled oil level in engine, resulting in damage to its accompanying parts such as piston, connecting rod and flying bearings.

The theoretical part shows the way of making a crankshaft, the theoretical work of a classic four-stroke engine and the force that loads a crankshaft in the engine operation.

In the experimental part, the crankshaft bearing, flying bearing and the piston were analyzed. Hardness, chemical composition of material and microstructure were determined on three samples.



## 1. UVOD

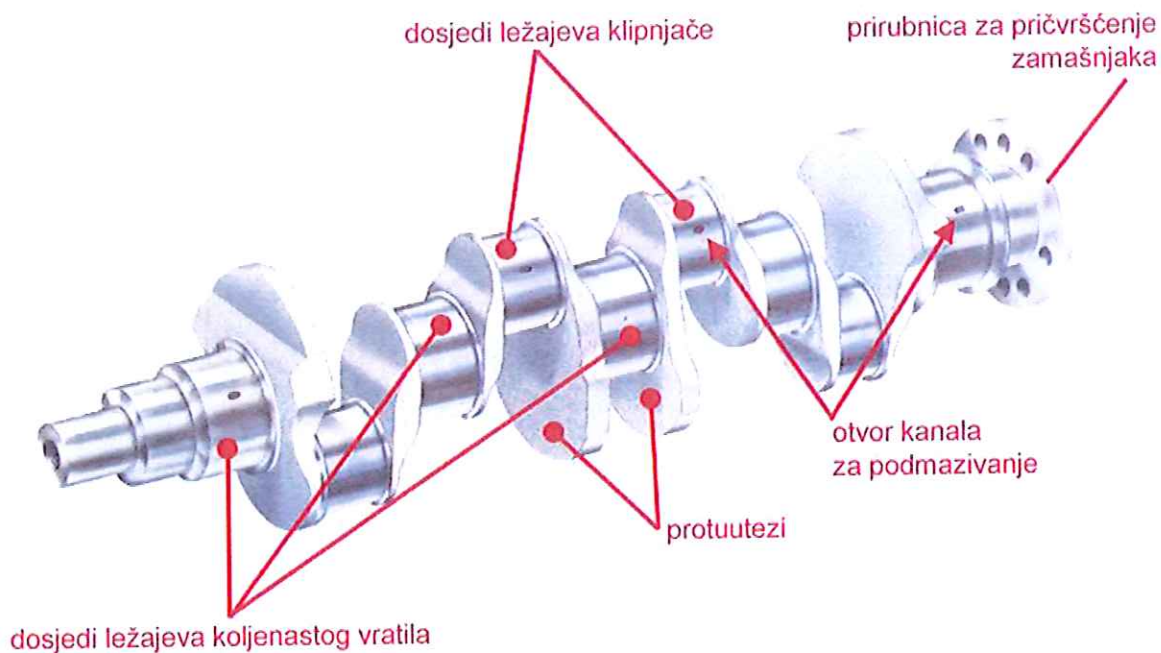
Koljenasto vratilo je u automobilima prva karika u prijenosu snage koja preko mjenjača daje pogonsku snagu kotačima. Koljenasto vratilo je obično kovano ili lijevano u jednom komadu.[1]

Najvažniji dijelovi na koljenastom vratilu su čepovi ležaja koljenastog vratila i čepovi ležaja klipnjača. Čepovi ležaja koljenastog vratila su u posebnim ležajnim posteljicama u kućištu koljenastog vratila. Na ležajevima klipnjače se okreću noge klipnjače, čime se uspostavlja gibljiva veza između klipova i koljenastog vratila. Koljenasto vratilo je na suprotnoj strani ležajeva klipnjače oblikovano u protutege, koji osiguravaju miran i jednakomjeran rad motora.[1]

Zamašnjak, teški čelični kolut na jednom kraju koljenastog vratila, svojom inercijom pokreće koljenasto vratilo preko mrtvih točaka klipova i praznih, neradnih taktova i na taj način održava jednakomjernu brzinu okretaja.[1]

Koljenasto vratilo je zbog udaraca klipova izloženo naglim opterećenjima zbog kojih mogu nastati titraji. To se kod različitih motora izbjegava ugradnjom dodatnog prigušivača titraja (kovinski kolut s gumenim uloškom) na suprotnoj strani od zamašnjaka. Uobičajeni redoslijed paljenja kod četverocilindričnog motora – počevši od cilindra koji je najbliže ventilatoru je 1-3-4-2 ili 1-2-4-3.[1]

Pri radnim taktovima klipovi preko klipnjače potiskuju koljenasto vratilo prema dolje, a pri ostalim trima taktovima okretanje koljenastog vratila pomiče klipove gore i dolje. Koljena koljenastog vratila su radi ravnomjerne raspodjele radnih vibracija zakrenuta pod različnim kutovima u odnosu na koljenasto vratilo.[1]



Slika 1. Dijelovi koljenastog vratila [1]

Na krajevima koljenastog vratila nalaze se nastavci za pričvršćivanje prigušivača vibracija, remenica, zamašnjak itd. S prednje strane motora nalazi se završetak koljenastog vratila na kojem je pričvršćen prigušivač vibracija. Radi se o ulošku s metalnim i gumenim dijelovima namjenjenom umirivanju vibracija (koje uzdužno pokreće koljenasto vratilo). Njegova je uloga prvenstveno ta, da dovoljno „umiri“ koljenasto vratilo kako ne bi puklo ili se na koji drugi način oštetilo uslijed preopterećenja.

Također, na istom se završetku koljenastog vratila nalaze i nastavci za spajanje remenica koje pokreću pumpu za vodu, alternator, bregasta vratila i ostalo.

Također, na tzv. prednjem dijelu koljenastog vratila montiran je disk za mjerenje brzine vrtnje. Takav je disk izveden ili u obliku zupčanika ili po obodu ima rupice (udubljenja). Optički (ili magnetni) senzor koji se nalazi neposredno uz ovaj disk šalje informacije središnjem upravljačkom računalu motora o brzini kretanja zubaca ili rupica. Taj se podatak potom preračunava u broj okretaja motora (broj okretaja koljenastog vratila) koji je jedan od temeljnih parametara potrebnih za rad elektronskog upravljačkog sistema. Pomoću ovog podatka motor „zna“ kada je potrebno pokrenuti ubrizgavanje goriva.



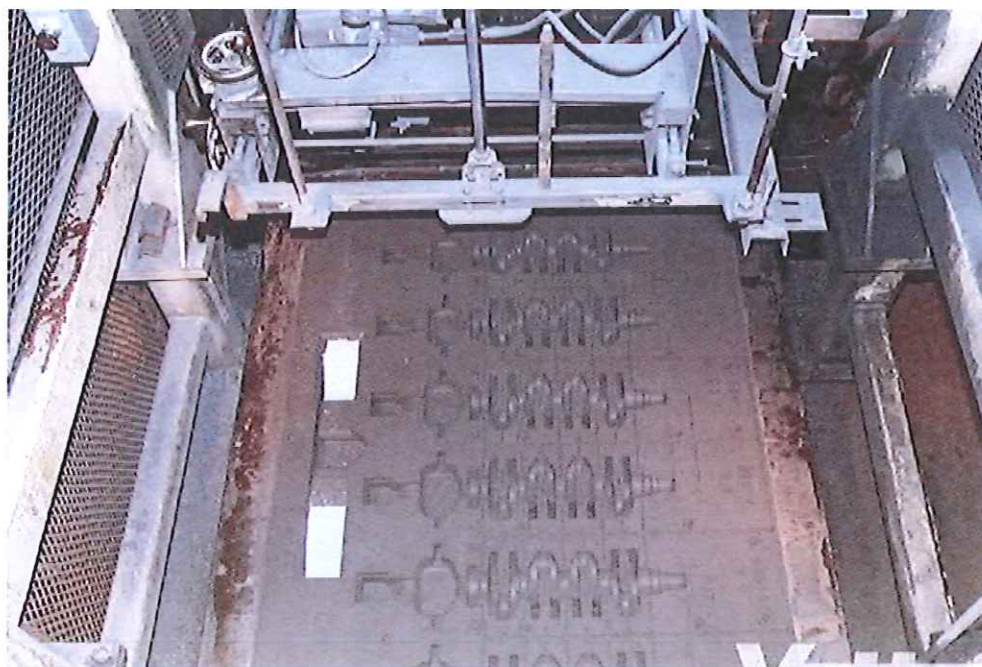
## 2. IZRADA KOLJENASTOG VRATILA

Koljenasto vratilo je najvažniji dio motora. Izrada koljenastog vratila spada pod složene oblike i također se svrstava u najskuplje dijelove motora.

Izrada koljenastog vratila najčešće se izrađuje kovanjem konstrukcijskog čelika vlačne čvrstoće  $490-930 \text{ N/mm}^2$ . Također vratila se izrađuju i lijevanjem pomoću kalupa.

Za lijevana vratila koristi se posebno pripremljeni sivi lijev zbog dobrih svojstava pri lijevanju, male osjetljivosti na zarezne pri obradi, te zbog dobrih kliznih svojstava.[2]

Također vratila se izrađuju od ugljičnih čelika i legiranih čelika. Koljenasta vratila izrađuju se iz jednoga komada. Dok se kod velikih motora izrađuju od dva ili više dijelova koji se međusobno spajaju vijcima. Ovakav način se većinom primjenjuje za plovne objekte. Zbog malog prostora plovila gdje se nalazi motor.



**Slika 2. Kalup za izradu koljenastog vratila serijske proizvodnje [3]**

Na slici 2 prikazan je kalup za izradu koljenastog vratila kod serijske proizvodnje pomoću kalupa.

Sam početak izrade koljenastog vratila kreće iz tehničke pripreme, odnosno izradom CAD modela koljenastog vratila. U CAD modelu odabire se materijal kojim će se koljenasto vratilo izraditi. Upotrebom CAD software programa, inženjeri tako mogu dimenzionirati vratilo prema proračunima koje je netko već prije same izrade CAD model-a izračunao. Kod koljenastog vratila ne smije se dopustiti ni najmanje odstupanje ili tzv. pogreška. Ne smije se dopustiti da prilikom rotacije dolazi do velikih vibracija, tako da njegovi protuutezi moraju biti savršeno dimenzionirani i dobro izbalansirani.

Nakon što inženjeri odrade svu potrebnu tehničku pripremu, izrađuje se sam kalup za izradu koljenastog vratila prikazan na slici 2. Za izradu kalupa koristi se zrnati vatrostalni pijesak i tekuća mješavina pečena na relativno tvrdoj konzistenciji.

Rubovi razdjeljivanja između nekoliko odjeljaka dovode do finog lijevanja na takva mjesta koja se moraju ukloniti u gotovom koljenastom vratilu(radilici). Cilj i svrha ovog izuma je da se dobije kalup u kojemu su takvi rubovi smješteni na dijelovima poluge koljenastog lijeva između njihovih nosivih dijelova, tako da niti jedan dio ležaja nema tankih radijalnih lamela.

Postoje dvije vrste izrade koljenastog vratila.

1. Koljenasto vratilo nastalo kovanjem
2. Koljenasto vratilo nastalo lijevanjem

## 2.1. Koljenasto vratilo nastalo kovanjem

Kovanje, općenito, je oblikovanje metala deformiranjem u toplom (užarenom), polutoplom ili hladnom stanju. Kovati se može ručno, udarcima čekićem na nakovnju, ili strojno, udarcima bata odnosno malja [4]. Kovanje radilice se vrši postupno u nekoliko ukovanja. Kovanje radilice s protuutezima je naročito teško. Općenito kovanjem se materijal sabija, nosiva vlakna u postojećem materijalu se zgušnjavaju te se postiže fina sitnozrnata struktura. Najčešće koljenasta vratila nastaju kovanjem konstrukcijskog čelika, odnosno čelika za poboljšavanje te nitriranog čelika vlačne čvrstoće  $490-930 \text{ N/mm}^2$  [5].



Slika 3. Izrada kovanog koljenastog vratila [6]

## 2.2. Koljenasto vratilo nastalo lijevanjem

Lijevanje je postupak oblikovanja kod kojeg se rastaljeni metal ulijeva u neku šupljinu većinom u kalup, hladi se i također skrućuje u kalupnoj šupljini, te poprima njen oblik tzv. odljevak. Za lijevana vratila koristi se posebno pripremljeni sivi lijev zbog dobrih svojstava pri lijevanju, male osjetljivosti na zarez pri obradi, te zbog dobrih kliznih svojstava.[5],[7]



### 2.3. Materijal za izradu koljenastog vratila

Najčešći korišteni materijali za izradu koljenastog vratila i njihova svojstva prikazani su u tablici 1.

**Tablica 1. Materijali koljenastih vratila i njihova svojstva [5]**

Materijal	Granica razvlačenja Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna čvrstoća R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Istezanje A <sub>min</sub> [%]	Kontrakcija Z <sub>min</sub> [%]	Udarni rad loma a <sub>k,min</sub> [J, 20°C]	Toplinska obrada
C 45	370	630-780	17	45	25 DVM	IK,KN
38 MnS 6	550	850-1000	12	25	-	IK
42 CrMo 4	650	900-1100	12	50	35 DVM	IK,KN
31 CrMoV 9	>800	1000-1200	11	-	50 DVM	N
GGG 70 (ASTM A536)	>450	>700	>2	-	-	IK

IK-indukcijsko kaljenje, KN-kratkotrajno nitriranje (1,5-2h);N-dugotrajno nitriranje (80-120h), DVM- Njemačko društvo za istraživanje i ispitivanje materijala, GGG 70-nodularni lijev

Najčešće se koljenasta vratila izrađuju kovanjem konstrukcijskog čelika vlačne čvrstoće 490-930 N/mm<sup>2</sup>. Uz gore navedene materijale u tablici 1. koljenasta vratila se izrađuju također i od ugljičnih i legiranih čelika. Ovisno o veličini, vratila motora malih snaga u velikim serijama izrađuju se prešanjem, dok se male serije izrađuju kovanjem. Što se tiče troškova izrade kod vratila izrađenih od sivog lijeva su znatno niži od kovanih ili prešanih čeličnih vratila zbog manje zahtjevnih troškova dodatne obrade.

Također, koljenasta vratila mogu biti sastavljena od dva do tri dijela koji su međusobno spojeni vijcima, pri čemu se uvijek gleda da ti dijelovi budu jednaki i međusobno zamjenjivi. Takva vratila koriste se kod plovnih objekata.

#### **2.4. Postupak metalizacije koljenastog vratila**

Metalizacija je nanošenje metalne prevlake na površinu predmeta radi zaštite od korozije ili drugih oblika trošenja, obnavljanja istrošenih dijelova, postizanja bolje toplinske ili električne vodljivosti, dekoracije i drugo. Razlikuju se fizikalni postupci metalizacije kao što su prskanje, vruće uranjanje (na primjer vruće cinčanje), platiranje, nataljivanje, navarivanje, oblaganje, lemljenje, lijepljenje te kemijski postupci kao što su elektroplatiranje (galvanotehnika), ionska izmjena i redukcija u otopini, dok difuzijska metalizacija i metalizacija napanjanjem mogu biti i fizikalne i kemijske naravi. [8]

Nakon izrade koljenastog vratila, prije početka postupka metalizacije potrebno je provjeriti da li je vratilo iskrivljeno. Taj dio posla obavlja „brusač“. Ako su neka vratila malo deformirana, odvajaju se sa strane i postupkom brušenja i/ili metalizacijom nastoje spasiti. Naravno navedeni postupci se primjenjuju eventualno ako je taj dio posla isplativ zbog troškova cijene predobrade, metalizacije i završne obrade.



## 2.5. Mjerenje stupnja oštećenja rukavaca i ležajeva

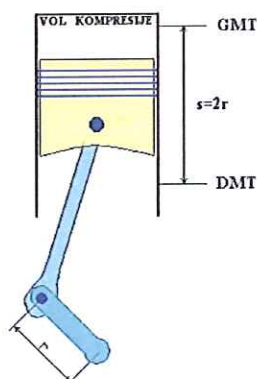
Prilikom rada, kod koljenastog vratila pojavljuju se naprezanja što također dovodi do nejednolike istrošenosti u poprečnom presjeku rukavca gdje se stvaraju deformacije.

Prethodno navedeno pridonosi pojavi udarnih naprezanja u svim ležajnim mjestima i pogoršanju uvjeta kod podmazivanja, rezultirajući promjenom zračnosti za protok maziva. Prosječno trošenje rukavca nosećih ležajeva vratila za 1000h rada iznosi oko 0,005 do 0,015mm. [2]

## 3. TAKTOVI MOTORA

Takt motora je dio radnoga ciklusa u kojem se odvija određeni proces. Navedeni proces se sastoji od usisa, kompresije, ekspanzije i ispuha. Postoje dvije vrste motora:

- Četverotaktni motor
- Dvotaktni motor



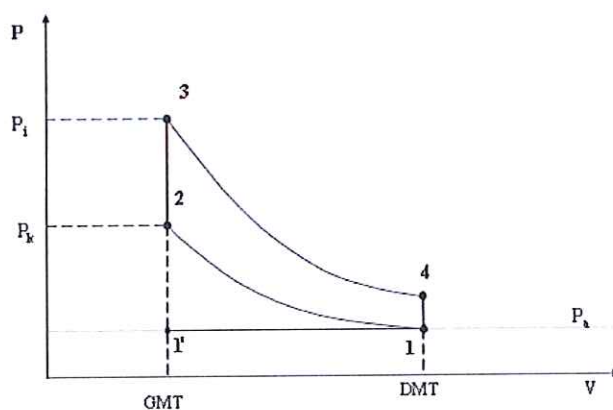
Slika 4. Grafički prikaz takta motora [9] (GMT-gornja mrtva točka, DMT-donja mrtva točka)

### 3.1. Četverotaktni motor

Četverotaktni motor je motor sa unutarnjim izgaranjem, odnosno to je motor koji svoj radni ciklus obavi u dva kruga koljenaste osovine.

Kod četverotaktnog motora, rad motora se sastoji od četiri takta:

1. TAKT-usisavanje zraka
2. TAKT-kompresija i paljenje
3. TAKT-izgaranje i ekspanzija(tzv.radni takt)
4. TAKT-ispuh i istiskavanje plinova



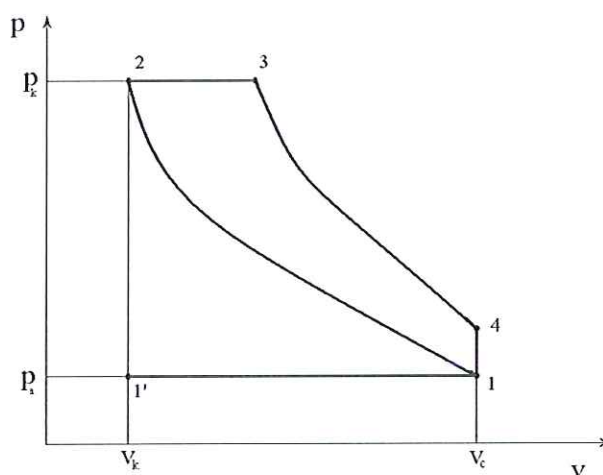
Slika 5. Teoretski dijagram Otto motora[10]

Teoretski p-V dijagram na slici 5. objašnjava rad motora sa četiri takta [10]:

1. TAKT – od 1'do 1 (usis zraka)
2. TAKT – od 1 do 2 (kompresija i u točki 2 paljenje)
3. TAKT – od 2 do 4 (od 2-3 izgaranje, 3-4 ekspanzija)
4. TAKT – od 4 do 1'(od 4-1 slobodan ispuh, 1-1' ispuh tjeran gibanjem stapa)

Kod diesel motora p-V dijagram je nešto drugačiji, gdje se točke u potpunosti poklapaju, jedino dolazi kod postupka izgaranja do promjena odnosno do ne poklapanja točaka (od 2 do 3).

Dakle, bitna razlika između Otto motora i Dieselog motora je što kod procesa izgaranja, izgaranje je trenutno odnosno kod stalnog volumena. Kod Diesel motora izgaranje je pod stalnim tlakom i traje određeno vrijeme.



Slika 6. Teoretski dijagram Diesel motora[10]

Točke predstavljaju:

- 1-otvaranje usisnog ventila
- 2-zatvaranje ispušnog ventila
- 3-zatvaranje usisnog ventila
- 4-početak izgaranja
- 5-kraj izgaranja
- 6-otvaranje ispušnog ventila

Oznake na p-V dijagramu su:

$P_a$ -atmosferski tlak

$P_k$ -tlak kompresije

$P_{max}$ - najveći tlak u cilindru

$Q$ -dovođenje energije

$V_c$ -volumen cilindra

$V_K$ -volumen kompresije

### 3.2. Teoretski rad čeverotaktnog motora

Najraširenija primjena je u automobilskoj industriji, a također upotrebljavaju se i u brodskoj industriji. Četverotaktni motor ima manji utjecaj na okoliš (manje zagađivanje) u odnosu na dvotaktni motor.

Objašnjenje rada četverotaktnog motora prema slici 5. i slici 6. :

1.Takt – klip se giba od GMT do DMT i usisava zrak u cilindar. Ovaj takt završava kada klip dođe u DMT.

**Točka 1** - teoretsko trenutno zatvaranje usisnog ventila.

2.Takt - Klip se giba do GMT i komprimira medij unutar cilindra (smjesu goriva i zraka kod Ottova motora ili sami zrak kod Dizelskog motora)

**Točka 2** - trenutno paljenje smjese ili trenutno ubrizgavanje goriva.

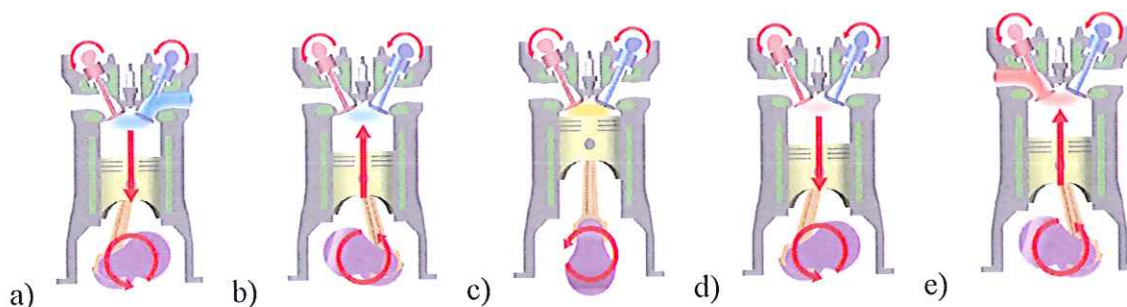
3.Takt - Izgaranje i ekspanzija, kod Ottova motora, izgaranje po izohori, a zatim ekspanzija, a kod Dizelskog motora je izgaranje po izobari i traje jedan dio ekspanzije.

**Točka 3** - predstavlja kraj izgaranja i početak ekspanzije kod Ottova, ili kraj izgaranja i početak samo ekspanzije kod Dizela.

**Točka 4** - otvaraju se ispušni ventili

4. Takt - ispuh, od 4 do 1 je po izohori, nagli pad tlaka na atmosferski, a zatim od 1 do 1' klip se giba od DMT do GMT i gura plinove pred sobom i tako nastavlja ispuh.

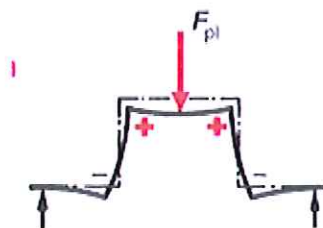
**Točka 1'** - zatvara se ispušni ventil, a otvara usisni ventil



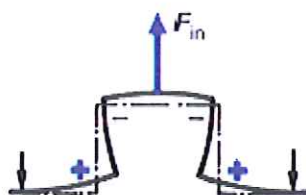
Slika 7. Grafički prikaz na Otto motoru a) usis, b) kompresija, c) paljenje smjese, d) kraj ekspanzije-slobodan ispuh, e) ispuh [10]

#### 4. OPTEREĆENJA KOLJENASTOG VRATILA

Koljenasto vratilo je opterećeno silom plinova  $F_{pl}$  [Slika 8.] ,silom inercije masa u pravocrtnom gibanju i rotirajućih masa  $F_{in}$  [Slika 9.]



Slika 8. Smjer sile plinova  $F_{pl}$ [4]



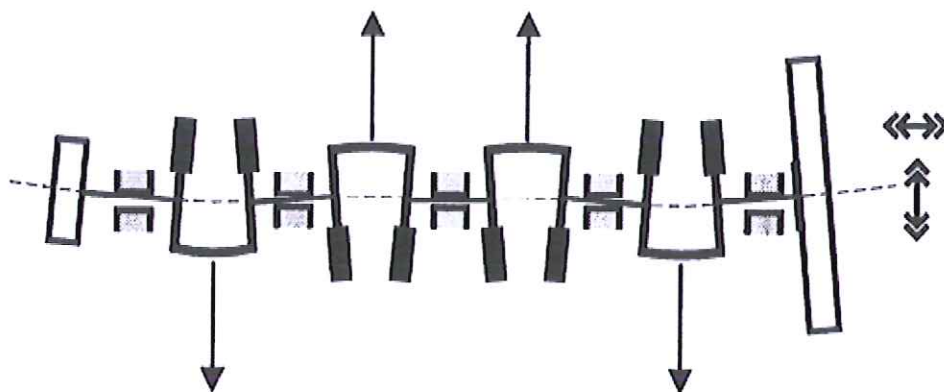
Slika 9. Smjer sile inercije masa u pravocrtnom gibanju i rotirajućih masa  $F_{in}$ [4]

Opterećenjem koljenastog vratila silom plinova  $F_{pl}$  vlačnim je naprežanjem ugrožen prijelaz letećeg rukavca u rame. Desno: Opterećenje silom inercije  $F_{in}$  izaziva takvo naprežanje na prijelazu glavnog rukavca u rame. Savijanje silom inercije najveće je kod najveće brzine vrtnje neopterećenoga motora. [4]

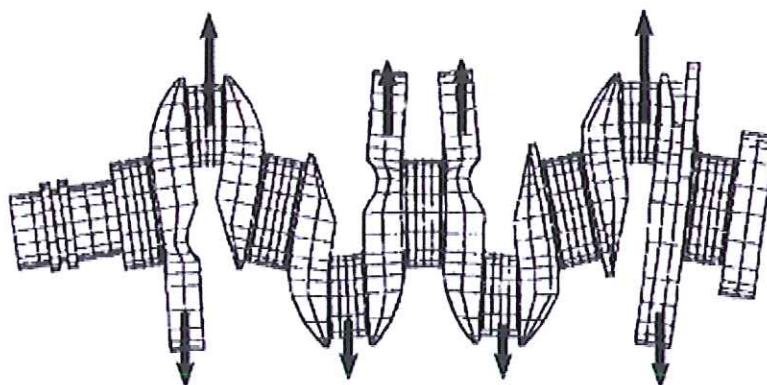


Koljenasto vratilo opterećeno je i vibracijama kao što su:

- Poprečne vibracije
- Uzdužne vibracije
- Torzijske vibracije



Slika 10. Poprečne i uzdužne vibracije[4]



Slika 11. Deformacija radilice usred centrifugalnih sila te uslijed sila inercija masa u pravocrtном gibanju[4]

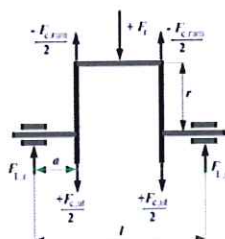
#### 4.1. Momenti savijanja koljenastog vratila

Koljenasto vratilo je istovremeno opterećeno na savijanje ( $\sigma$ ) i na torziju ( $\tau$ ), tako da se proračun čvrstoće provodi na temelju ekvivalentnog naprezanja  $\sigma_{ekv}$ . Takvo naprezanje se računa kod najvećih naprezanja, što kod koljenastog vratila predstavlja prijelazno zaobljenje rukavca klipnjače i izlazni otvor uljnog kanala na rukavcu klipnjače. Na tim mjestima se pojavljuju lomovi zbog umora materijala uslijed naprezanja na torziju i savijanje.

Naprezanja uslijed torzije računaju se prema teoriji torzijskih vibracija. Također je poznato da su savijanje i torzija koljenastog vratila povezani sa silama u glavnim ležajevima, ali savijanje i torzija se računaju odvojeno. Koljenasto vratilo je istovremeno opterećeno na savijanje i torziju, tako se proračun čvrstoće vrši na temelju ekvivalentnog naprezanja. Ekvivalentno naprezanje se utvrđuje za najkritičnija mjesta, gdje se najčešće pojavljuju lomovi uslijed umora materijala.

Kod proračuna koljenastog vratila potrebno je riješiti sljedeće zadatke:

- Potrebno je odrediti opterećenja
- Odrediti nazivna naprezanja uslijed savijanja i torzije statičkim proračunom
- Pomoću faktora oblika ( $\alpha_s$ ,  $\alpha_t$ ) odrediti stvarna naprezanja uslijed savijanja i torzije na najugroženijim mjestima
- odrediti ekvivalentna naprezanja
- te na kraju dobivene rezultate potrebno je usporediti s trajnom trajnom čvrstoćom



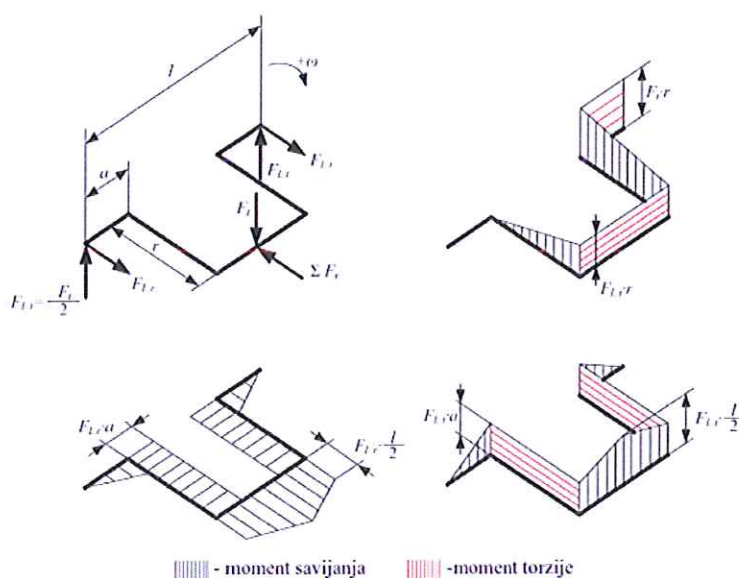
Slika 12. Opterećenje koljenastog vratila u radijalnim silama [5]



Sila u klipnjači rastavlja se na radijalnu i tangencijalnu komponentu.

U radijalnom smjeru, djeluju centrifugalne sile rotirajućih dijelova kao što su: rotirajući dio klipnjače, leteći rukavac izuzet sila plinova. Ravnoteže se određuju jednadžbama za iznose sila reakcija u osloncima, momenti savijanja i torzije u svojevrijedno određenim presjecima.

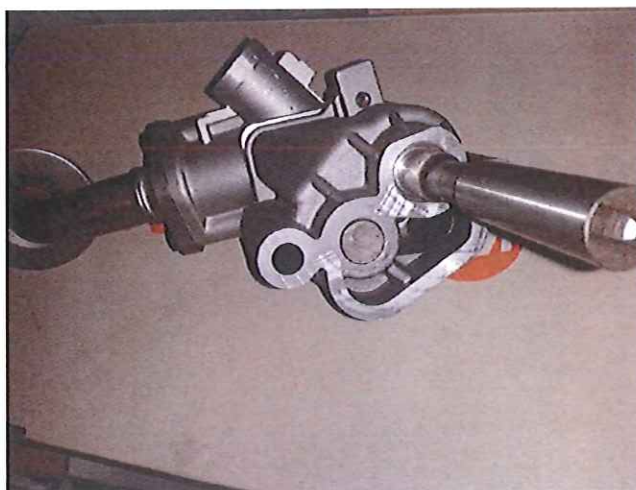
Na slici 13. prikazana je raspodjela momenata savijanja i torzije u koljenu radilice.



Slika 13. Raspodjela momenata savijanja i momenta torzije u koljenastom vratilu [5]

## 5. TROŠENJE DIJELOVA KLIPNOG MEHANIZMA

Kada se govori o trošenju dijelova klipnog mehanizma, najčešće dolazi do trošenja popratnih dijelova zbog nedostatka sredstva za podmazivanje. Postoje razni slučajevi gdje dolazi do puknuća klipnjače, klipa, samog bloka motora a i koljenastog vratila. Što se tiče podmazivanja, kako bi motori bili što ispravniji, pouzdaniji, jako je bitna kvaliteta motornog ulja kako bi se smanjilo trenje i mehanički gubici te kako bi se poboljšale performanse samog motora. Podmazivanje ili tzv. „krvotok“ benzinskih ili dizelskih motora, ima značaj kod trošenja vitalnih dijelova i sklopova koji su izloženi trenju. Taj način se postiže tlačnim sustavom podmazivanja, kružnim tokom motornog ulja. Kružni tok motornog ulja pokreće zupčasta pumpa koja se nalazi u uljnom karteru [Slika 14.]



Slika 14. Pumpa ulja za VAG grupaciju starijih generacija

Kao što je već rečeno, motornim uljem se podmazuje koljenasto i bregasto vratilo, razvodni mehanizam, te sam klip sa prstenima i cilindri, također kod motora s turbopunjačem podmazuje se i on sam.

Za funkcionalnost motora nije dovoljno samo nadolijevanje ulja, zbog razno raznih nečistoća koje bi se mogle naći u samom ulju, tako da u samom motoru nalazi se i filter ulja koji služi upravo da se odstranjuju nečistoće, metalne čestice i ostaci kod izgaranja.

### 5.1. Motorno ulje

Motorna ulja složene su otopine temeljnih (baznih) ulja i dodataka (aditiva). Temeljna ulja su visokorafinirana, a podrijetlom mogu biti mineralna i sintetička. Sintetička ulja imaju bolja svojstva, zbog strukture prilagođene radnim uvjetima u motoru, koja se postiže određenim kemijskim postupkom i tehnologijom proizvodnje.

Za razliku od mineralnih ulja, koja su smjesa ugljikovodika, sintetička ulja su dobivena kemijskom sintezom-pretežito sintetičkih estera i poliglikola. Aditivi, odnosno dodaci, podjednako su važni kao bazna ulja, jer osiguravaju potrebna svojstva kao što su:

- Čišćenje
- Raspršivanje
- Protočnost
- Otpornost na trošenje
- Otpornost na pritiske i koroziju
- Smanjenja trenja
- Sprječavanje starenja
- Sprječavanje pjenjenja

Danas u svijetu za većinu vozila koristi se sintetičko motorno ulje 5W-30 koje ispunjava sve potrebna i gore navedene standarde. Kod oznaka motornog ulja, 5W označava temperaturu na kojoj je ulje pogodno za rad, tako da konkretno oznaka 5W znači da se koriste za temperature ispod  $-18^{\circ}\text{C}$ . Oznaka „W“ zapravo označava „Winter(zima)“. Dok oznaka „30“ označava kakva su svojstva viskoznosti ulja pri  $100^{\circ}\text{C}$ .

## 5.2. Viskoznost

Viskoznost ( $\eta$ ) je trenje nastalo kod strujanja tekućine ili plina zbog različite brzine gibanja njegovih slojeva, a predstavlja mjeru unutrašnjeg trenja koje djeluje kao otpor na promjenu položaja molekula kod strujanja tekućina kada na njih djeluje smično naprezanje.

Postoje različite vrste viskoznosti [12] :

- Dinamička viskoznost je faktor unutrašnjeg trenja čestica ulja te određuje dinamiku nestlačivog Newton-ovog fluida. Izražava se u jedinici Pas. Ako se fluid sa viskoznosti od 1 Pas stavi između dvije ploče, te se jedna ploča gurne tangencijalno od 1 Pa, ploča će preći jednaku debljinu slojeva između ploča u 1s.
- Kinematička viskoznost ( $\nu$ ) je specifični faktor unutrašnjeg trenja ulja i predstavlja omjer dinamičke viskoznosti i specifične gustoće ulja. Izražava se u jedinicama  $m^2/s$  ili  $mm^2/s$ .
- Volumenska viskoznost određuje dinamiku newtonskog fluida.

U motoru se događaju velike promjene temperature, motor mora raditi i pri  $0^\circ C$ , dok najpovoljnija temperatura rada za motor iznosi malo više od  $80^\circ C$  da bi mogla ispariti vlaga koja se sakuplja kao ostatak izgaranja.

Što se tiče koljenastog vratila, temperature na ležajima koljenastog vratila i klipnjača iznose oko  $10^\circ C$  iznad temperature u koritu za ulje, odnosno oko  $90^\circ C$ , dok s druge strane kod klipnih prstena kod većeg opterećenja temperature prelaze  $230^\circ C$ .

Bitna je činjenica da viskoznost svih ulja porastom temperature se smanjuje, ali ipak postoje ulja koja postaju rjeđa brže od drugih.

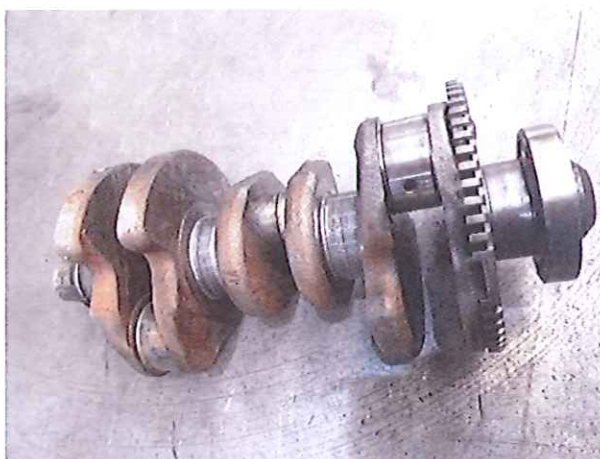


## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Koljenasto vratilo

Kada se govori o oštećenju koljenastog vratila, u rijetko kojim slučajevima dolazi do puknuća istog, osim ako se radi o grešci tijekom proizvodnje. Što se tiče oštećenja, najčešće oštećenje na koljenastom vratilu su temeljna uležištenja koja su povezana s kućištem s gornje strane motora i blok motora koji se nalazi s donje strane. Između njih nalaze se četiri „leteća“ ležaja kada govorimo o četverocilindarskom motoru, na koje su pričvršćene klipnjače koje se gibaju složeno, prijenosnom i relativnom rotacijom.

Kao primjer na slici 15. prikazano je koljenasto vratilo s trocilindarskog motora iz automobila Volkswagen Polo 1.4 TDI iz 2007.godine, snage 70KS.



**Slika 15. Koljenasto vratilo trocilindarskog motora VAG grupacije, 1.4 TDI**

Na koljenastom vratilu iz boljeg pogleda na slici 16. vidi se kako su temeljni klizni ležajevi potrošeni uslijed nedovoljnog podmazivanja. Uzrok je, nepravilno održavanje automobila što dovodi do ovakvih posljedica.



**Slika 16. Istrošenost uležištenja**

Zbog dotrajalog turbopunjača, automobil je počeo gubit ulje koje je izgaralo preko ispušne grane. Nekontroliranošću nivoa ulja, s vremenom nivo ulja u koritu je bio ispod dopuštene granice, pumpa za ulje nije imala od kuda vući ulje da podmazuje unutrašnje dijelove motora, i došlo je do izrazitog trenja između temeljnog uležištenja na vratilu gdje se nalaze klizni ležajevi, što se vidi na slikama 16 i 17.



**Slika 17. Istrošenost kliznog ležaja 1.4 TDI motora**

### 6.1.1. XRF-metoda

XRF-metodom odrađeno je snimanje dosjednog ležaja koljenastog vratila sa slike 16. kako bi dobili uvid u kemijski sastav uzorka.

XRF je metoda koja se bazira na pobuđivanju atoma ispitivanog uzorka rendgenskim zračenjem, što rezultira emisijom fluorescentnoga zračenja iz materijala, karakterističnog za elementni sastav. Te informacije daju nam i kvalitativnu i kvantitativnu sliku o elementnom sastavu uzorka.

XRF je nedestruktivna, brza, univerzalna i relativno jednostavna analitička metoda za multielementnu analizu artefakata i kao takva u svijetu je tretirana kao jedna od najosnovnijih fizikalnih metoda za istraživanja u konzervatorsko-restauratorskom području. U svojoj prijenosnoj inačici, upotrebljavanoj u ovom radu, ova je tehnika također neinvazivna, a samo problemi koji nisu riješeni tom metodom na terenu analiziraju se dodatno primjenom specijaliziranije laboratorijske opreme. Dakle, XRF rezultati s terena služe i kao vrijedne smjernice za daljnje sustavno i ciljano uzimanja uzoraka, čime potrebu uzorkovanja svode na minimum. To je svojstvo od posebne važnosti kada je riječ o istraživanju vrijednih i jedinstvenih objekata, što je u ovom području gotovo i pravilo. [16]



Slika 18. XRF DELTA PROFESSIONAL uređaj za analizu elemenata u materijalu [16]

Analiza materijala XRF-uredajem sa slike 18. provedena je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U tablici 2. prikazan je sastav materijala dosjednog ležaja koljenastog vratila.

**Tablica 2. Prikaz udjela elemenata u dosjednomo ležaju koljenastog vratila**

<i>Elementi</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>
<i>Udio elemenata [%]</i>	0,74	0,094	0,11	0,16	1,28	96,67	0,06

Prema dobivenim podacima vidi se da je materijal za izradu dosjednog ležaja koljenastog vratila kao što smo i predvidjeli konstrukcijski čelik. Osim većinskog udjela željeza od 96,67% , prisutni su i silicij i mangan koji pridonose čvrstoći, udio mangana mora biti manji od <1,65% jer povisuje prokaljivost, dok ostali kemijski elementi se nalaze u tragovima, što je vrlo vjerojatno nečistoća na samom uzorku prilikom ispitivanja, dok se udio ugljika ne može pouzdano odrediti ovom metodom.

### 6.1.2. Određivanje mikrostrukture materijala pomoću svjetlosnog mikroskopa

Kako bi odredili mikrostrukturu navedenog uzorka, analiza je provedena na svjetlosnom mikroskopu „OLYMPUS GX51“. Mikrostruktura je proučavana na povećanjima 100x, 200x, 500x i 1000x prikazanim na slikama 21, 22, 23 i 24.

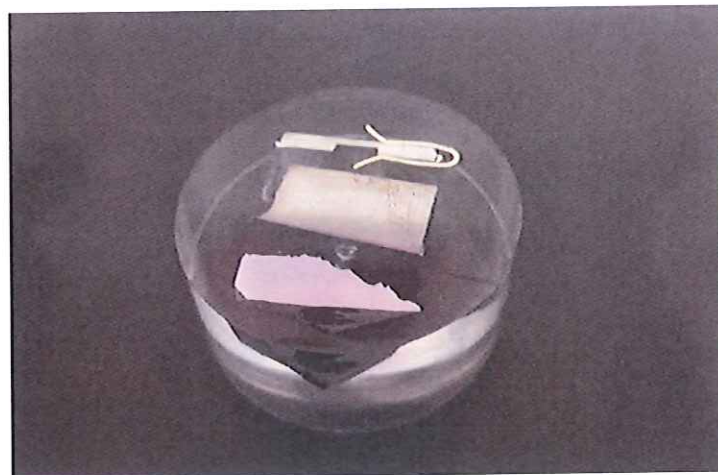
Prije analize mikrostrukture uzoraka, navedeni uzorak je trebalo odrezati s postojećeg koljenastog vratila. Uzorak koljenastog vratila prikazan na slici 19. izrezan je na tračnoj pili u prostoru tvrtke Monter-Strojarske montaže d.d.



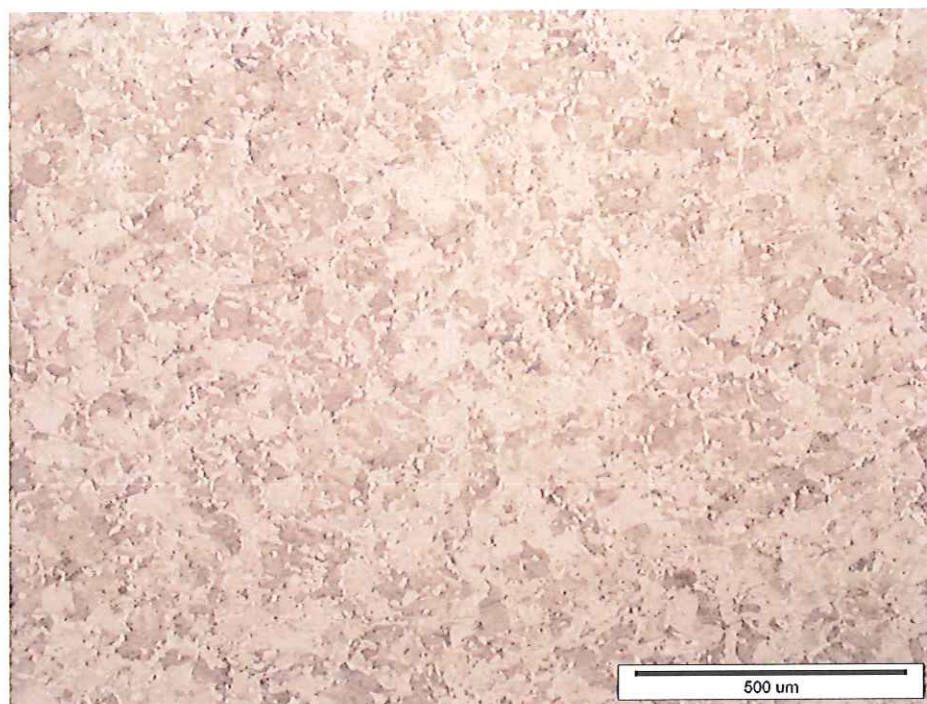


**Slika 19. Rezanje uzorka koljenastog vratila za analizu mikrostrukture**

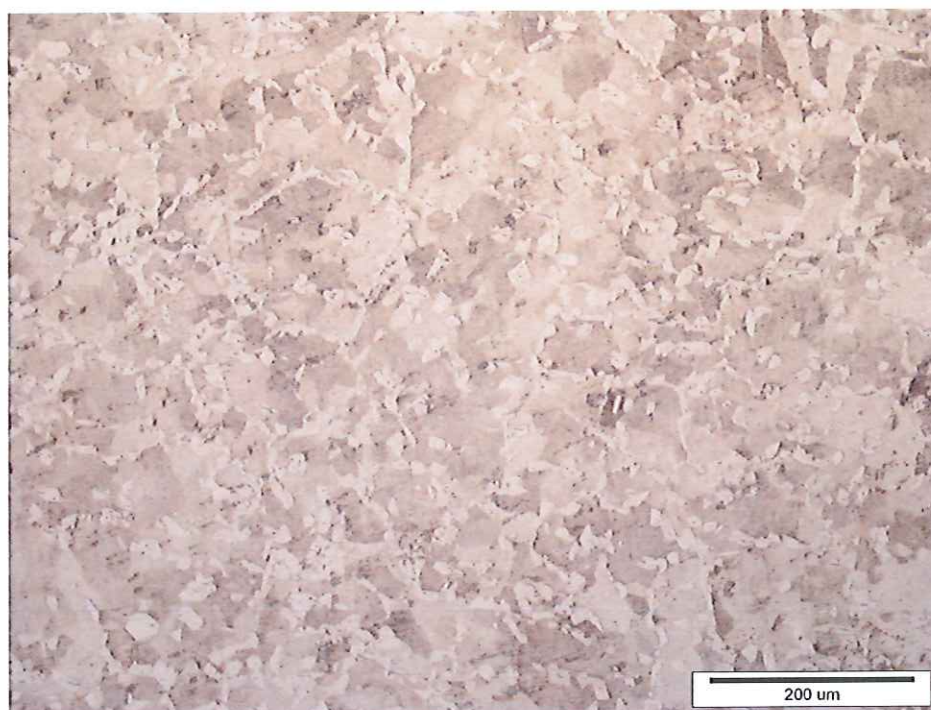
Za analizu mikrostrukture na ispitnim uzorcima odrađeno je ulijevanje ispitnih uzoraka postupkom hladnog ulijevanja. Za dobiveni uzorak na slici 20. izmješaju se tekućina i duromerna smola u obliku praha u omjeru 2:1. Zatim, uzorci se zalijevaju i vrijeme trajanja je oko trideset minuta kako bi se mješavina stvrdnula. Nakon otvrdnjavanja uzorci se vade iz kalupa.



**Slika 20. Uzorak dobiven postupkom hladnog ulijevanja**



Slika 21. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 100x



Slika 22. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 200x





**Slika 23. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 500x**



**Slika 24. Mikrostruktura dosjednog ležaja koljenastog vratila na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 1000x**

Na slikama 21, 22, 23 i 24 jasno je vidljiva perlitno-feritna mikrostruktura uz veliki udio perlita.

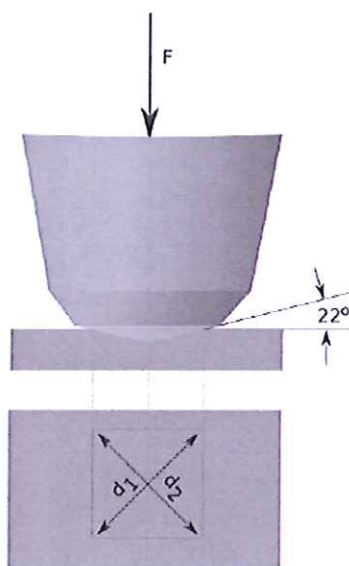
### 6.1.3. Mjerenje tvrdoće uzorka dosjednog ležaja koljenastog vratila

Kako bi dobili dodatne informacije o materijalima uzoraka provedeno je ispitivanje tvrdoće površine uzoraka prema Vicker metodi na uređaju „PMT 3“.

Tvrdoća po Vickersu (oznaka: HV) je mjera otpornosti što ga neki materijal pruža prodiranju dijamantne četverostrane piramide s vršnim kutom od  $136^\circ$ , opterećene silom  $F$  [N]. Mjere se obje dijagonale kvadrata ( $d_1$  i  $d_2$ ) i uzima se srednja vrijednost dijagonale  $d$ . Tvrdoća po Vickersu je razvijena u tvrtci *Vickers Ltd.*, kao zamjena za ispitivanja tvrdoće po Brinellu. [18]



Slika 25. Tvrdomjer PMT 3



Slika 26. Prikaz penetratora i otiska kod Vickers metode



Slika 27. Prikaz uzoraka tijekom ispitivanja tvrdoće

Izmjerene vrijednosti tvrdoće za uzorak dosjednog ležaja koljenastog vratila prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće dosjednog ležaja prema Vickersu

Redni broj mjerjenja	Mjerenje lijevo	Mjerenje desno	$(x_2-x_1)*0,302$ 0,302-konst. tvrdomjera	HV0,2
1.	354	459	31,71	369
2.	341	467	38,052	255
3.	340	463	37,146	269
4.	338	457	35,938	288
Srednja vrijednost			35,711	<b>295</b>

Iz tablice 3. vidi se kako je tvrdoća površine dosjednog ležaja koljenastog vratila, izmjerena po Vickers metodi 295HV0,2 . Povišena tvrdoća kod dosjednog ležaja znači da je proveden dodatan postupak obrade samog ležaja, odnosno provedena je toplinska obrada, a budući da se radi o feritno-perlitnoj strukturi radi se o postupku normalizacije.



## 6.2. Klizni ležaj

Klizni ležaj je taj koji omogućuje vođenje pokretnih strojnih dijelova (osovina, vratilo) i prijenos opterećenja s rukavca osovine ili vratila na blazinicu ležaja. Klizne površine podmazane su uljem, a rjeđe mašću ili krutim sredstvima za podmazivanje [13].

Kod koljenastog vratila, klizni ležaj se oslanja na glatku, podmazivanu cilindričnu plohu. Cilindrična ploha je izrađena od mekšeg materijala nego kao što je to slučaj kod koljenastog vratila.

Prednosti kliznih ležajeva [14]:

- dozvoljavaju velike brzine vrtnje,
- hod im je miran i tih,
- uz dobro podmazivanje imaju nizak koeficijent trenja
- jednostavna izrada,
- pogodni su za prenošenje udarnih opterećenja,
- nisu osjetljivi na prašinu,
- jeftiniji su od valjnih ležajeva,
- u radijalnom smjeru zauzimaju manje prostora,
- prigušuju udarce, vibracije i šumove,
- mogu biti izrađeni u dijeljenoj izvedbi.

Nedostaci kliznih ležajeva [14]:

- veliko trenje kod pokretanja i malih brzina,
- neprecizno vođenje, odnosno pozicioniranje pokretnih strojnih dijelova,
- osjetljivi su na nedostatak podmazivanja,
- zahtijevaju ugrađivanje i pažljivo održavanje,
- na kvalitetu ležajeva bitno utječu materijal i toplinska obrada osovina



**Slika 28. Prikaz otvora na podnožju ležaja koje služi za podmazivanje rotacijskih dijelova u radu motora**

Kod letećeg ležaja sa donje strane na slici 28. vidi se otvor koji služi za dotok ulja kroz kanal u klipnjači tlačnog ventila.

#### **6.2.1. XRF-metoda za klizni ležaj**

Kao i kod koljenastog vratila, leteći ležaj na slici 29 potrebno je ispitati XRF-metodom koja je objašnjena pod točkom 6.1.1.



**Slika 29. Leteći ležaj**

Mjerenjem letećeg ležaja s vanjske i unutarnje strane na XRF- uređaju dobiveni su udjeli elemenata u letećem ležaju prikazani u tablici 4. i tablici 5.

**Tablica 4. Udio elemenata u letećem ležaju mjeren s vanjske strane**

Elementi	Cr	Mn	Fe
Udio elemenata [%]	0,04	0,19	99,66

Mjerenjem udjela elemenata u letećem ležaju mjereno s vanjske strane, dobili smo udjele elemenata prema tablici 4. kod koje vidimo da se radi o čeliku.

**Tablica 5. Udio elemenata u letećem ležaju mjeren s unutarnje strane**

Elementi	Mg	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Co	Cu	Sn
Udio elemenata [%]	30,01	32,61	0,68	0,011	0,09	0,10	34,42	0,33	0,62	1,13

Tablice 4. i 5. predstavljaju mjerenje istog uzorka ali sa različitih strana. Vanjska strana koja je u dodiru sa klipnjačom. A unutarnja strana s dosjednim ležajem koljenastog vratila. Rezultati dobiveni na 2 različita mjerenja na istome uzorku, se razlikuju. Uočavamo da je leteći ležaj izrađen od čelika, međutim sa unutarnje strane po dobivenim rezultatima ne ispada tako, odnosno s unutranje strane dobivenim rezultatima možemo zaključiti da je leteći ležaj zapravo izrađen od ležajne blazinice koja je izrađena od legure aluminija i magnezija. Povišeni sadržaj željeza označava da je na mjestu mjerenja došlo do trošenja blazinice.

### 6.2.2. Mikrostruktura materijala letećeg ležaja pomoću svjetlosnog mikroskopa

Kako bi snimili mikrostrukturu letećeg ležaja, ležaj je bilo potrebno prepoloviti na pola, i odrezati komadić ležaja kako bi postupkom ulijevanja objašnjenim pod točkom 6.1.2. dobili uzorak prikazan na slici 20. Rezanje ležaja je obavljeno ručnom pilom. Postupak se mogao obaviti i na tračnoj pili, međutim zbog nemogućnosti prihvata ležaja na tračnoj pili odabran je način rezanja pomoću „škripca“ i ručne pile.

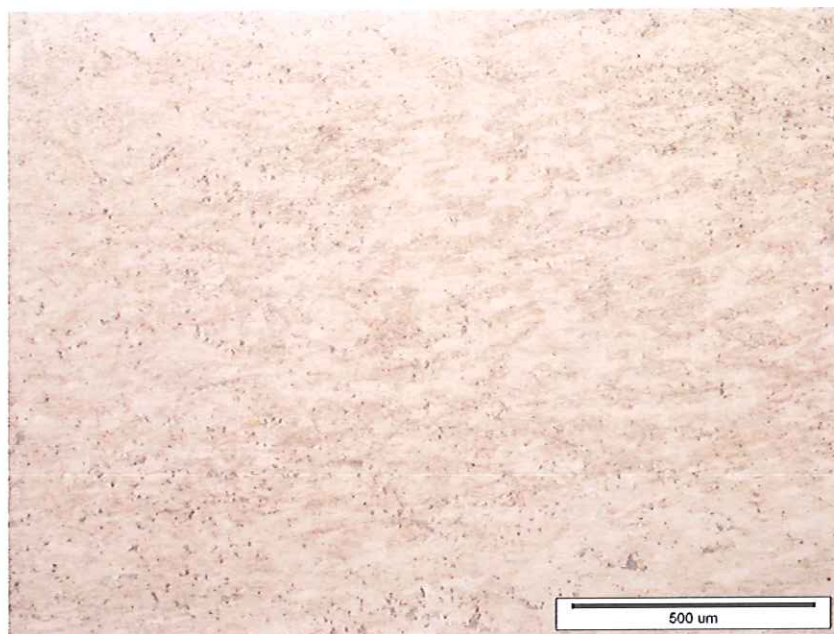
Na slici 30. prikazan je postupak rezanja letećeg ležaja te priprema za analizu mikrostrukture materijala.



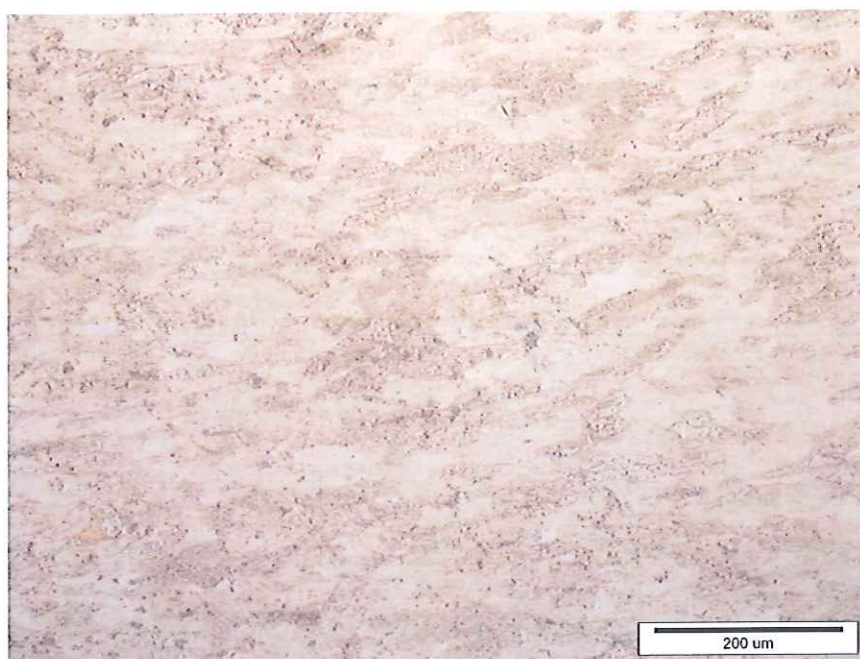
Slika 30. Rezanje ležaja za analizu mikrostrukture

Nakon rezanja, na uzorku je odrađen postupak ulijevanja za analizu mikrostrukture koja je prikazna na slikama 31, 32, 33 i 34.





Slika 31. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 100x



Slika 32. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 200x





Slika 33. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 500x



Slika 34. Mikrostruktura letećeg ležaja na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 1000x

Na slikama su vidljivi sitni percipitati intermetalnog spoja aluminijske i magnezije te kristal mješavine aluminijske.

### 6.2.3 Mjerenje tvrdoće uzorka letećeg ležaja

Sam postupak mjerenja tvrdoće uzorka opisan je pod točkom 6.1.3.

Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće uzorka letećeg ležaja

Redni broj mjerenja	Mjerenje lijevo	Mjerenje desno	$(x_2-x_1) * 0,302$ <i>0,302-konst.</i> <i>Tvrdomjera</i>	<i>HV0,2</i>
1.	329	473	43,48	196
2.	327	471	43,48	196
3.	326	470	43,48	196
4.	328	465	41,374	216
Srednja vrijednost			42,95	<b>201</b>

U tablici 6. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće letećeg ležaja s vanjske strane. Rezultati mjerenja tvrdoće upućuju na to da posteljica letećeg ležaja vjerojatno ima feritno-perlitnu strukturu.

### 6.3. Klip

Klip je najugroženiji dio motora, za njegovo dobro ponašanje treba pažljivo odrediti njegov oblik, dimenzije i materijal za izradu.

Klip je namijenjen za brtvljenje cilindra, da bi se onemogućio prolaz medija sa jedne strane klipa na drugu, na klipu su napravljeni utori koje nazivamo prstenima(karika).Na kruni klipa nalaze se utori za klipne prstene(karika) koji zajedno s klipom odjeljuju prostor poviše od prostora ispod klipa. [15]

Materijal za izradu klipa su Al-legure koje se upotrebljavaju do veličine promjera 200-250mm, a klipovi veličine više od 250mm su čelični. Kod povišenih temperatura Al-legure se rastežu gotovo tri puta više nego SL. Legura aluminija koja se koristi za većinu klipova sastoji se od 12% Si, približno 1% Cu, Ni i Mg. Klip se izrađuje lijevanjem u kokili. Lijevanje može biti ručno ili strojno ovisno o veličini serija.

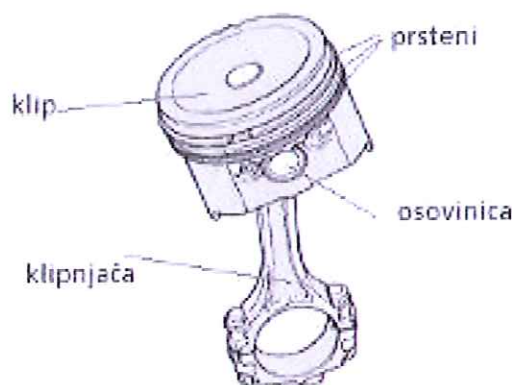
Međutim, kako tehnologija napreduje, tako je i napredovala tehnologija izrade klipova, odnosno materijali za izradu klipova. U današnje vrijeme za izradu klipova osobnih i teretnih vozila koristi se jeftino nisko legirani čelici kao npr. 38MnSiVS5.

Rashladno sredstvo za klip je ulje, koje se ubrizgava pomoću brizgaljke postavljene na bloku motora. Kada govorimo o trenju, plašt klipa se presvlači posebnim slojem grafita.

Zadaci koje mora klip izvršavati su [4]:

- prenositi sile plinova na klipnjaču
- normalnu (bočnu) silu, koja nastaje pri prenošenju sile plinova na klipnjaču, mora prenijeti na cilindar
- s pomoću brtvenih elemenata (karika) mora brtviti prostor izgaranja prema kućištu radilice
- toplinu koju prima od vrućih plinova u cilindru mora prenijeti na cilindar, da bi ona otišla dalje na rashladno sredstvo





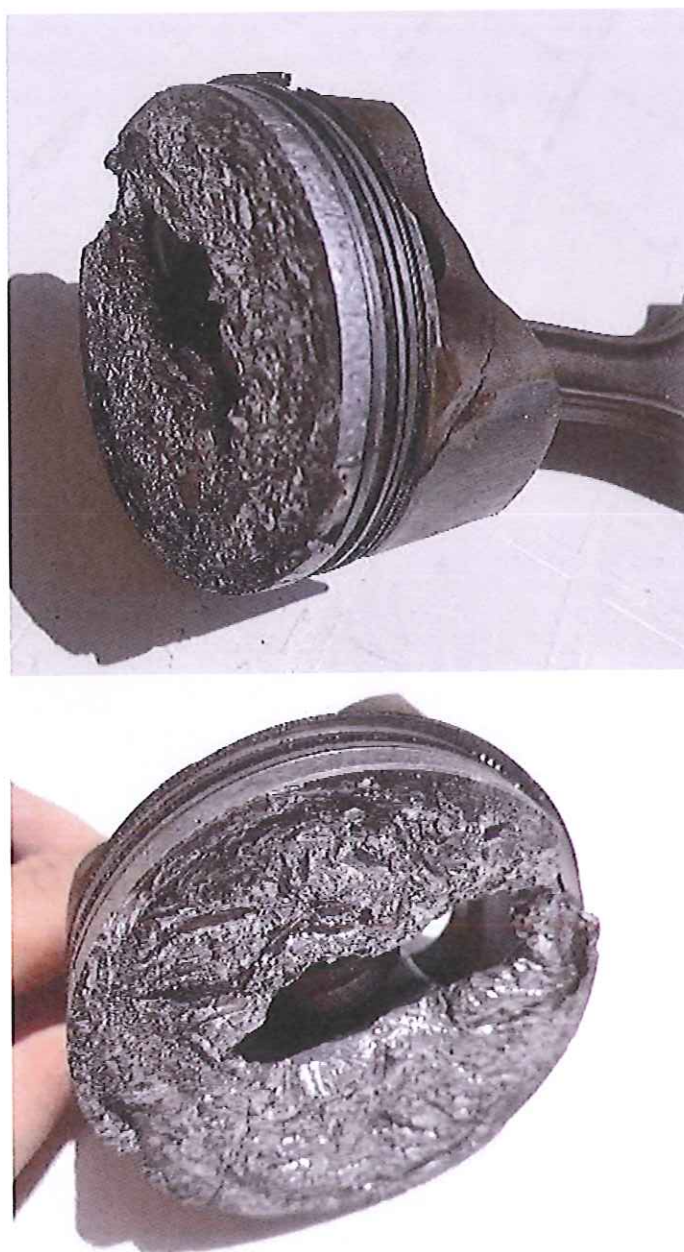
Slika 35. Dijelovi klipa

Kada govorimo o oštećenju ili puknuća klipova, za primjer je prikazan na slici 36. klip s Audi A6 4.2 TDI V8 motora. Na slici se vidi kako je glava klipa potpuno rastaljena, a plašt klipa napuknut. Ovakva oštećenja nastaju većinom kod diesel motora s direktnim ubrizgavanjem.

Uzrok oštećenja klipa je bio zrak. Odnosno, prilikom zamjene usisne grane gdje struji zrak preko turbopunjača, nova usisna grana koja se stavljala na motor nije detaljno prekontrolirana. U usisnoj grani nalazili su se ostaci metala iz prijašnjeg automobila, zato što je usisna grana bila rabljena. Neoprežnošću mehaničara, prilikom paljenja automobil je na trenutke počeo davati znakove nepravilnog rada motora, odnosno lupkanja u području motora.

Kako je mehaničar bio uvjeren da je posao odradio „kvalitetno“, pritiskom na papučicu gasa, okretaji motora su se popeli na visokih 4500 okr/min što je za dizelski motor krajnja granica vrtnje motora. U tom trenutku u motoru čuli su se zvukovi lupkanja, automobil je nakon tog hitno ugašen.

Popravak ovakvog oštećenja je izrazito skup. Na slici 36. je prikazan samo jedan od klipova tog motora.



Slika 36. Rastaljeni klip s Audi A6 4.2 TDI V8 motora



### 6.3.1. XRF-metoda za klip

Kao i kod koljenastog vratila, klip na slici 36. potrebno je ispitati XRF-metodom koja je objašnjena pod točkom 6.1.1.

**Tablica 7. Udio elemenata u klipu**

Elementi	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Zr	Pb
<b>Udio elemenata [%]</b>	1,78	77,04	14,85	0,53	0,066	0,33	2,10	3,15	0,032	0,114	0,005

Prema podacima u tablici 7. dobivenih mjerenjem, vidimo da je klip izrađen od aluminijske legure složenog sastava u kojoj je glavni legirni element silicij uz značajn udio bakra i nikla.

Aluminij ima dobru toplinsku vodljivost, dobra klizna svojstva a ujedno i zadovoljavajuću masu što je jako bitno kod klipa upravo zbog tog što je klip opterećen vertikalnim podizanjem od strane koljenastog vratila. Zbog lakše mase vratilo može proizvesti više okretaja.

### 6.3.2. Mikrostruktura materijala klipa pomoću svjetlosnog mikroskopa

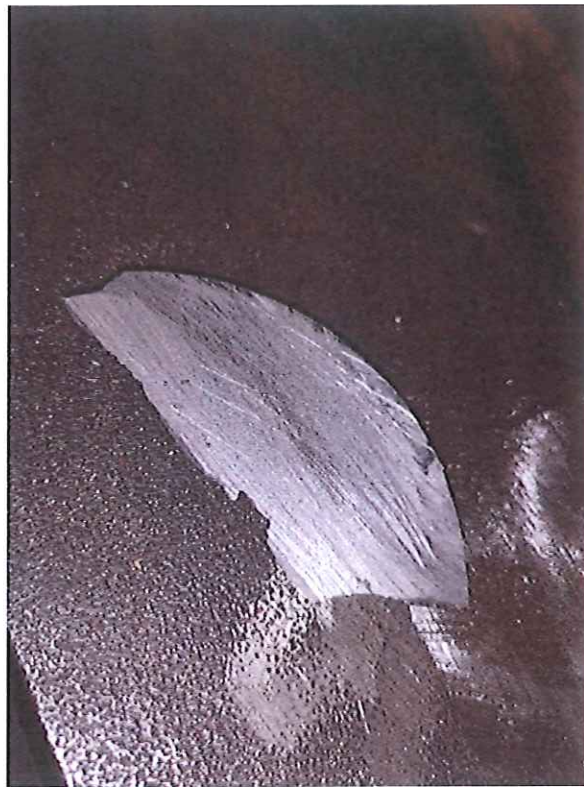
Kako bi snimili mikrostrukturu klipa, klip je bilo potrebno prepoloviti na pola te odrezati komadić ležaja kako bi postupkom ulijevanja objašnjenim pod točkom 6.1.2. dobili uzorak za određivanje mikrostrukture.

Rezanje klipa je obavljeno ručnom pilom. Postupak se mogao obaviti i na tračnoj pili, međutim zbog nemogućnosti prihvata klipa na tračnoj pili odabran je način rezanja pomoću „škripca“ i ručne pile.

Na slici 37. prikazan je klip s kojeg je navedenim postupkom uzet komadić uzorka za mjerenje, dok na slici 38. je prikazan odrezani dio s glave klipa spreman za mjerenje.



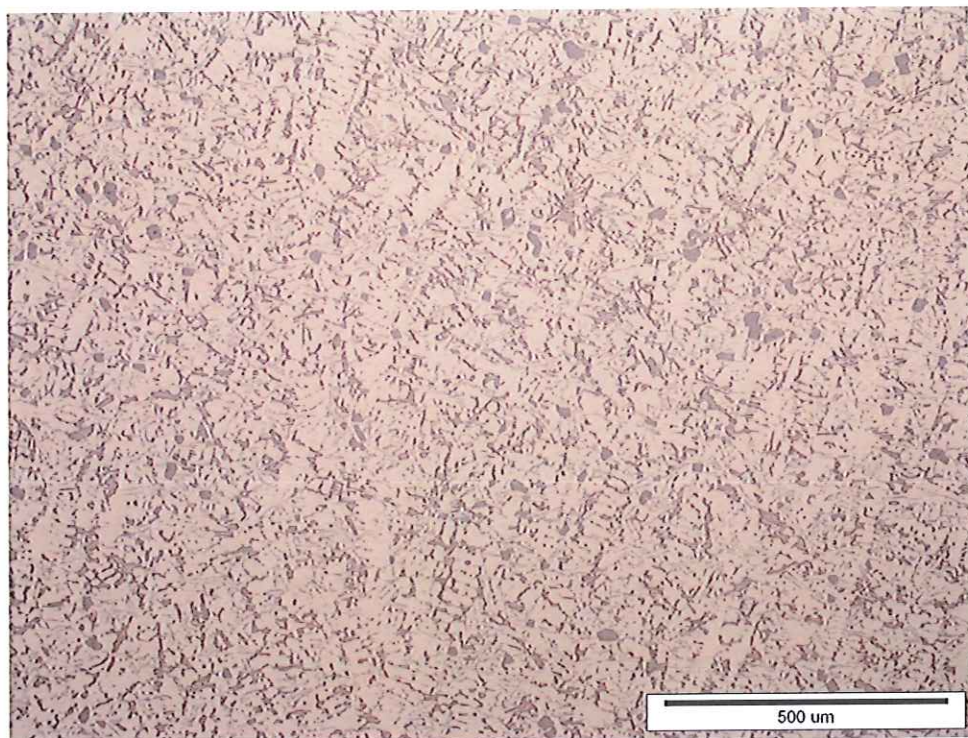
Slika 37. Mjesto rezanja na klipu za analizu mikrostrukture



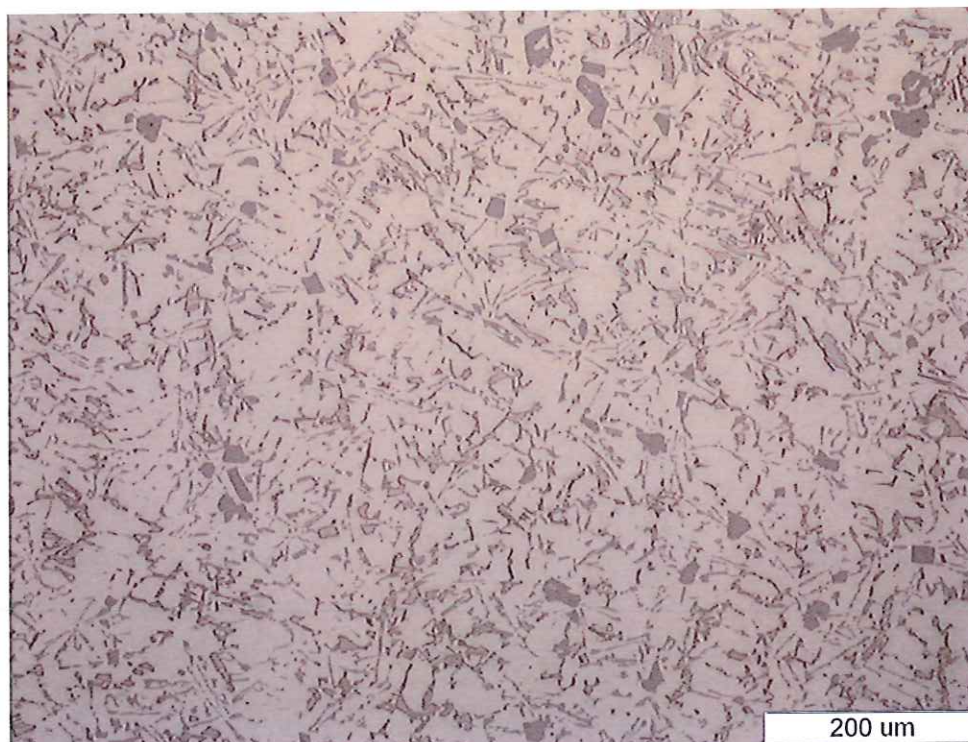
**Slika 38. Uzorak odrezan s klipa**

Nadalje, analizirana je mikrostruktura pomoću svjetlosnog mikroskopa te prikazana na slikama 39, 40, 41 i 42.





Slika 39. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 100x



Slika 40. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 200x



Slika 41. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 500x



Slika 42. Mikrostruktura klipa na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 1000x



Pri manjim povećanjima (slika 39 i 40) vidljivo je da se radi o lijevanoj mikrostrukturi. Na slikama 41 i 42 mogu se uočiti svijetle površine kristala mješanca aluminijske legure te tamne površi ne intermetalnih spojeva. Zbog kemijskog sastava legure, pretpostavka je da se radi o intermetalnim spojevima aluminijske legure i bakra, odnosno, aluminijske i nikla.

### 6.3.3 Mjerenje tvrdoće uzorka klipa

Sam postupak mjerenja tvrdoće uzorka opisan je pod točkom 6.1.3.

Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće klipa prema Vickersu

Redni broj mjerjenja	Mjerenje lijevo	Mjerenje desno	$(x_2-x_1)*0,302$ 0,302-konst. tvrdomjera	HV0,2
1.	311	487	53,152	136
2.	319	478	48,018	161
3.	320	466	44,092	182
4.	330	479	44,998	184
Srednja vrijednost			47,565	166

Dobivene vrijednosti tvrdoće su visoke, općenito za aluminijске legure, što potvrđuje da su u strukturi prisutni tvrdi intermetalni spojevi.

## **7. ZAKLJUČAK**

U ovome radu prikazani su primjeri trošenja dijelova klipnog mehanizma, te analizirani materijali od kojih su izrađeni pojedini dijelovi.

Analizom kemijskog sastava i mikrostrukture te mjerenjem tvrdoće može se zaključiti da je koljenasto vratilo izrađeno od čelika, a klizni ležajevi također od čelika pri čemu je na unutrašnju stranu letećeg ležaja nanesena legura aluminija i magnezija.

Klip je izrađen od aluminijske legure složenog kemijskog sastava pri čemu prisutni legirni elementi povisuju tvrdoću i otpornost na trošenje te poboljšavaju ostala svojstva materijala za izradu klipa.

Izbor optimalnog materijala je uzaludan ukoliko se prilikom rada ne vodi računa o pravilnom održavanju dijelova kliznog mehanizma.

## 8. LITERATURA

1. <https://www.prometna-zona.com/koljenasto-vratilo/>
2. <http://www.hrbi.hr/brodogradnja/images/stories/2013/113/putre.pdf>
3. <http://www.superchevy.com/how-to/vemp-1211-corvette-crankshafts-part-1-power-rotation/>
4. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Koljenasto\\_vratilo](https://hr.wikipedia.org/wiki/Koljenasto_vratilo) - Koljenasto vratilo
5. Mahalec, I., Kozarac, D., Lulić, Z.: Konstrukcije motora, FSB, Zagreb, 2015.
6. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kovanje#/media/File:Produkcija\\_wa%C5%82u\\_korbowe\\_go.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kovanje#/media/File:Produkcija_wa%C5%82u_korbowe_go.jpg)
7. Hrvatska obrtnička komora, Pučko otvoreno učilište: TEHNIKA motornih vozila, Zagreb, 2004
8. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Metalizacija>
9. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Stapaj>
10. [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni\\_motor](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni_motor)
11. [https://www.autoportal.hr/clanak/shto\\_treba\\_znati\\_o\\_podmazivanju](https://www.autoportal.hr/clanak/shto_treba_znati_o_podmazivanju)
12. <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>
13. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Klizni\\_le%C5%BEaj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Klizni_le%C5%BEaj)

14. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Klip\\_stroja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Klip_stroja)

15. Ivušić, Vinko; Tribologija; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 1998.

16. [http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer\\_tvr\\_hr.html](http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer_tvr_hr.html) 18.02.2017