

# Analiza uzroka kvara pogonskog vratila sa motornog vozila kategorije M1

---

Ravlić, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*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:235:862923>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Dario Ravlić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ANALIZA UZROKA KVARA  
POGONSKOG VRATILA SA  
MOTORNOG VOZILA  
KATEGORIJE M1**

Mentori:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Zagreb, 2023.

Student:

Dario Ravlić

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod nazivom „Analiza uzroka kvara pogonskog vratila sa motornog vozila kategorije M1“ izradio samostalno koristeći se znanjem stečenim tijekom studija te koristeći navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Suzani Jakovljević na brojnim korisnim savjetima te na njezinom sveopćem trudu, pristupačnosti i zalaganju pri izradi ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem i asistentici Martini Kocijan, laborantu Ivanu Vovku i prof. dr. sc. Darku Landeku koji su mi pomagali oko eksperimentalnog dijela.

Naposljetku zahvalio bi se i svojim roditeljima, sestri, djevojci kao i svim prijateljima na velikoj pruženoj podršci tijekom cijelog studiranja.

Dario Ravlić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dario Ravlić** JMBAG: 0035218412

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza uzroka kvara pogonskog vratila motornog vozila kategorije M1**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Failure analysis of the drive shaft of a motor vehicle category M1**

Opis zadatka:

Pogonsko vratilo je strojni dio koji služi kao prijenosni element ili dio prijenosnog sustava između pogonskog i pogonjenog stroja. Vratilo prenosi zakretni moment i snagu i opterećeno je na uvijanje, a može biti i na savijanje.

U radu je potrebno napraviti sljedeće:

- 1) Opisati sustav pogonskog vratila.
- 2) Analizirati oštećenja odabranog uzorka.
- 3) Komentirati rezultate i dati zaključak.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Suzana Jakovljević

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
2. POGONSKI SUSTAV .....	2
2.1. Vrste prijenosa snage prema kotačima .....	2
2.1.1. Motor naprijed – stražnji pogon .....	2
2.1.2. Motor naprijed – prednji pogon .....	3
2.1.3. Motor straga – stražnji pogon .....	4
2.1.4. Pogon na sve kotače .....	4
2.2. Osnovni dijelovi pogonskog sustava .....	5
2.2.1. Motor .....	5
2.2.2. Koljenasto vratilo .....	6
2.2.3. Prijenosni sustav .....	7
2.2.4. Pogonsko vratilo za stražnji pogon (kardan) .....	8
2.2.5. Diferencijal .....	9
2.2.6. Pogonska vratila s homokinetičkim zglobovima i kotači .....	10
3. POGONSKO VRATILO S HOMOKINETIČKIM ZGLOBOM .....	11
3.1. Vrste pogonskih vratila .....	12
4. DIJELOVI POGONSKOG VRATILA S HOMOKINETIČKIM ZGLOBOM .....	14
4.1. Vratilo .....	14
4.2. Manžeta .....	15
4.3. Unutrašnji i vanjski zglob .....	17
4.3.1. Vanjski zglob .....	17
4.3.2. Unutrašnji zglob .....	18
4.4. Dinamički prigušivač .....	18
5. MATERIJALI I TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA IZRADU POGONSKOG VRATILA .....	20
5.1. Tehnički zahtjevi .....	20
5.2. Najčešće korišteni čelici za izradu pogonskih vratila motornih vozila .....	22
5.2.1. Čelik 25CrMo4 .....	22
5.2.2. Čelik C50R .....	22
5.2.3. Čelik C40E .....	23
5.2.4. Čelik C45 .....	23
5.2.5. Čelik 36CrNiMo4 .....	24
5.2.6. Čelik C35 .....	24
6. KVAROVI POGONSKIH VRATILA S HOMOKINETIČKIM ZGLOBOM .....	26

6.1. Znakovi koji upućuju na kvar pogonskog vratila s homokinetičkim zglobom .....	27
6.1.1. Vibracije tijekom vožnje .....	27
6.1.2. Zvuk kliktanja prilikom okretanja upravljača.....	27
6.1.3. Zvuk kucanja.....	28
6.1.4. Pronađena mast u unutrašnjosti kotača .....	28
6.1.5. Oštećena manžeta.....	28
7. KOROZIJA .....	29
7.1. Kemijska korozija.....	29
7.2. Elektrokemijska korozija.....	30
7.3. Geometrijski oblici korozijskog razaranja .....	31
7.3.1. Opća korozija.....	31
7.3.2. Lokalna korozija .....	32
7.3.3. Selektivna korozija.....	33
7.3.4. Interkristalna korozija .....	34
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	36
8.1. Sakupljanje osnovnih informacija o kvaru.....	36
8.2. Vizualni pregled pogonskog vratila s homokinetičkim zglobom.....	37
8.3. Rezanje uzorka .....	39
8.4. Priprema i analiza mikrostrukture .....	39
8.5. Kvantitativna kemijska analiza uzorka .....	42
8.6. Mjerenje tvrdoće.....	42
ZAKLJUČAK .....	47
LITERATURA.....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1. Kombinacija motora naprijed - stražnji pogon [2] .....	3
Slika 2. Kombinacija motor naprijed - prednji pogon [2] .....	3
Slika 3. Kombinacija motor straga - stražnji pogon[2] .....	4
Slika 4. Pogon na sve kotače [2] .....	5
Slika 5. Prikaz motora s unutarnjim izgaranjem [4].....	6
Slika 6. Prikaz koljenastog vratila [6] .....	7
Slika 7. Prikaz ručnog i automatskog prijenosnog sustava [9] .....	8
Slika 8. Prikaz pogonskog vratila za stražnji pogon [11] .....	9
Slika 9. Prikaz diferencijala [13].....	10
Slika 10. Pogonsko vratilo s homokinetičkim (CV) zglobo[m][15].....	11
Slika 11. Prikaz lokacije unutarnjeg i vanjskog CV zgloba [17] .....	12
Slika 12. Čvrsto pogonsko vratilo sa diferencijalom[19] .....	13
Slika 13. Dijelovi pogonskog vratila s CV zglobo[m][21] .....	14
Slika 14. Pogonsko vratilo [24].....	15
Slika 15. Manžeta CV pogonskog vratila[27].....	16
Slika 16. Prikaz Rzeppa zgloba [29] .....	17
Slika 17. Vrste unutrašnjih zglobova[17] .....	18
Slika 18. Dinamički prigušivač [30].....	19
Slika 19. Kvar uzrokovan lomom manžete i curenjem masti za podmazivanje ležaja[42] .....	27
Slika 20. Klasifikacija korozijskih procesa [45] .....	29
Slika 21. Elektrokemijska korozija[45] .....	30
Slika 22. Primjer opće korozije u dekorativne svrhe[47] .....	32
Slika 23. Vrste lokalne korozije (rupičasta, potpovršinska, pjegasta, kontaktna) [48,49,50,51] .....	33
Slika 24. Selektivna korozija [52] .....	34
Slika 25. Interkristalna korozija[53].....	35
Slika 26. Područje loma promatranog pogonskog vratila.....	37
Slika 27. Mjesto loma pogonskog vratila s homokinetičkim zglobo[m] .....	38
Slika 28. Pogonsko vratilo nakon korozijskog djelovanja.....	38
Slika 29. Uzorci pogonskog vratila i dinamičkog prigušivača nakon prvog rezanja .....	39
Slika 30. Mikrostruktura uzorka C .....	40
Slika 31. Mikrostruktura rubnog sloja uzorka B.....	41
Slika 32. Mikrostruktura jezgre uzorka B.....	41
Slika 33. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće [57].....	43
Slika 34. „Uzorak B“ i „Uzorak C“ na kojima je mjerena tvrdoća.....	44
Slika 35. Graf efektivne dubine kaljenja uzorka B .....	46



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Čelici koji se koriste za izradu pogonskih vratila [22].....	14
Tablica 2. Kemijski sastav čelika 25CrMo4[33].....	22
Tablica 3. Kemijski sastav čelika C50R[35].....	23
Tablica 4. Kemijski sastav čelika C40E[36].....	23
Tablica 5. Kemijski sastav čelika C45 [38].....	24
Tablica 6. Kemijski sastav čelika 36CrNiMo4 [39].....	24
Tablica 7. Kemijski sastav čelika C35[40].....	25
Tablica 8. Tijek analize uzroka kvara.....	36
Tablica 9. Rezultati kvantitativne kemijske analize uzorka B.....	42
Tablica 10. Rezultati mjerenja tvrdoće „Uzorka C“.....	44
Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće "Uzorka B".....	45

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
<i>F</i>	N	Sila
<i>A</i>	mm <sup>2</sup>	Ploština utisnutog plašta piramide
<i>d</i> <sub>1</sub>	mm	Dijagonala 1
<i>d</i> <sub>2</sub>	mm	Dijagonala 2
SHD	-	Efektivna dubina kaljenja
HG	-	Granična tvrdoća

---

**SAŽETAK**

Pogonsko vratilo s homokinetičkim zglobom je spoj dizajniran za prijenos ravnomjerne snage kroz širok raspon kutova uz minimalno trenje i unutarnju zračnost. Pogonska vratila imaju dva zgloba na oba kraja vratila koja omogućuju okretanje kotača, dok dopuštaju da se ovjes prilagođava neravninama i da se prednji kotači okreću lijevo i desno. U radu je opisan pogonski sustav i njegovi dijelovi, te najčešći materijali i uzroci kvarova pogonskih vratila s homokinetičkim zglobom. U eksperimentalnom dijelu rada analiziran je uzrok kvara pogonskog vratila.

Ključne riječi: pogonsko vratilo, homokinetički zglob, pogonski sustav

---

**SUMMARY**

A drive shaft with a constant velocity joint is a connection designed to transmit consistent power across a wide range of angles with minimal friction and internal clearance. Drive shafts have two joints at both ends of the shaft that allow the wheels to turn while enabling the suspension to articulate over uneven terrain and allowing the front wheels to steer left and right. This work describes the drivetrain system and its components, as well as the most common materials and causes of failures in drive shafts with constant velocity joints. The experimental section of the work analyzes the cause of failure of the driveshaft.

Key words: a driveshaft, a constant velocity joint, drivetrain

## 1. UVOD

Najvažniji dio svakog vozila je njegov pogonski sustav koji ispunjava osnovnu namjenu vozila, a jedan od vitalnih dijelova pogonskog sustava je pogonsko vratilo. Pojam pogonsko vratilo (poznatije po netočnom nazivu poluosovina) prvi put se pojavio sredinom 19. stoljeća. U Storerovom ponovnom izdanju patenta iz 1861. za stroj za blanjanje, izraz se koristi za označavanje vratila pogonjenog remenom pomoću kojeg se stroj pokreće. Još jedna rana upotreba izraza pojavljuje se u ponovnom izdanju patenta iz 1861. godine za Watkins and Brysonov stroj za košenje odnosno kosilicu na konjsku vuču. Ovdje se izraz odnosi na vratilo koje prenosi snagu s kotača stroja na zupčanik koji pokreće mehanizam za rezanje. U 1890-ima se termin počeo koristiti na način bliži modernom smislu. Na primjer, 1899. godine, Bukey je upotrijebio taj izraz za opisivanje vratila koja prenosi snagu s kotača na pogonski stroj univerzalnim zglibom u svojoj knjizi Horse-Power. Iste godine, Clark je opisao svoj Marine Velocipede koristeći izraz koji se odnosi na vratilo pogonjeno zupčanikom koja prenosi snagu kroz kardanski zglib na osovinu propelera. Danas sva vozila s prednjim pogonom imaju CV (engl. *constant velocity*) ili homokinetičke zglibove koji su zaštićeni manžetom na oba kraja pogonskog vratila, također poznatog kao poluosovina. Unutarnji CV zglibovi povezuju pogonska vratila s mjenjačem ili diferencijalom, dok vanjski CV zglibovi povezuju pogonska vratila s kotačima. Ovisno o vrsti ovjesa koji se koristi, vozila sa stražnjim pogonom, pogonom na sve kotače i pogonom na sva četiri kotača također mogu imati CV zglibove i manžete. Pogonska vratila s CV zglibovima su potrebna za prijenos okretnog momenta s prijenosa i diferencijalnog sustava na pogonske kotače pri konstantnoj brzini, dok se prilagođavaju gibanju ovjesa gore-dolje. Omogućuju sve vrste kretanja i sve kutove potrebne dok vozilo prelazi preko neravnina na cesti. CV zglib u osnovi sprječava lom pogonskog vratila svaki put kada vozilo naiđe na neravninu [1].

## 2. POGONSKI SUSTAV

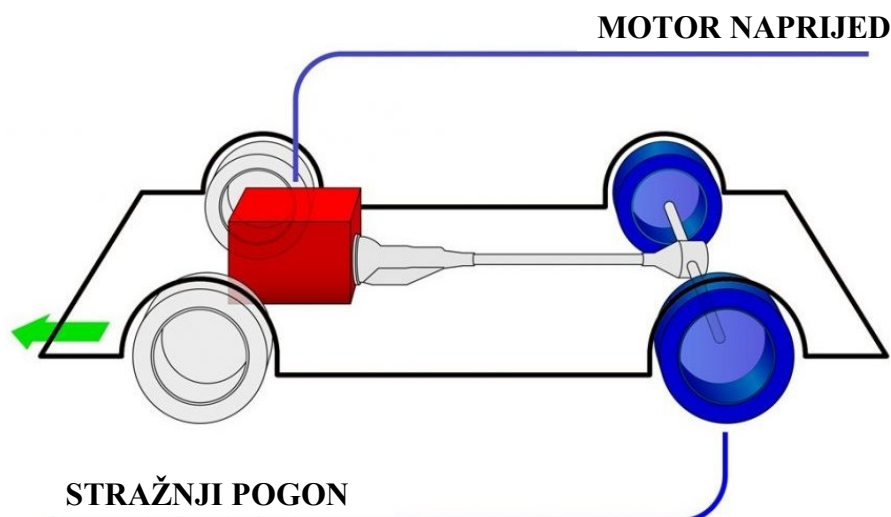
Proces prijenosa snage s motora na kotače vozila je osnovna radnja pogonskog sustava. Obično se to postiže kombinacijom mehaničkih i prijenosnih sustava. Točan mehanizam može se razlikovati ovisno o vrsti vozila i njegovom pogonskom sustavu (npr. motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor). U ovom poglavlju će biti objašnjen prijenos snage u konvencionalnom vozilu s motorom s unutarnjim izgaranjem.

### 2.1. Vrste prijenosa snage prema kotačima

Postoje različiti načini prijenosa snage od motora do kotača, a uobičajene vrste i tipovi prijenosa objašnjeni su detaljnije u nastavku.

#### 2.1.1. Motor naprijed – stražnji pogon

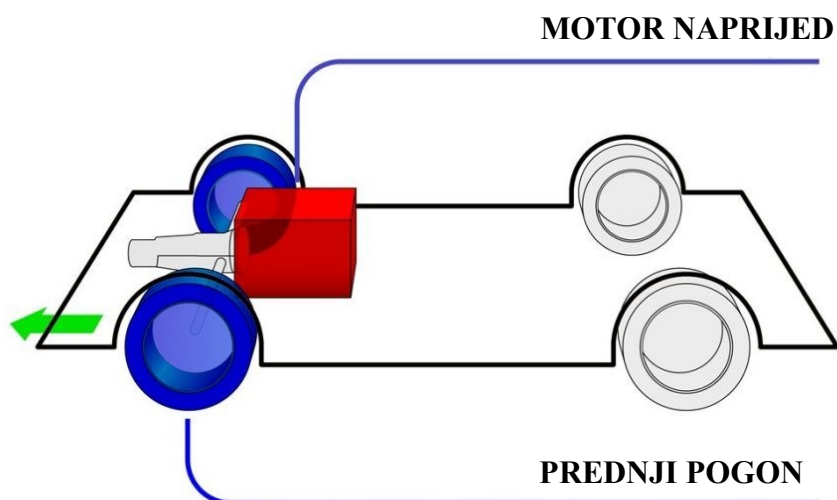
Veliki udio vozila koristi raspored pri kojem je se motor nalazi naprijed, a pogon je na stražnjim kotačima. U ovom slučaju, snaga motora prenosi se na stražnje kotače vozila putem spojke, prijenosnog sustava, pogonsko vratila za stražnji pogon, diferencijala i stražnjeg mosta. Glavne prednosti ovog sustava uključuju bolje hlađenje, budući da su upravljanje i pogon neovisni, konstrukcija je jednostavna i upravljanje vozilom je olakšano. S ovim rasporedom može se osigurati podjednaka raspodjela opterećenja između vratila, ali je potreban dugačak kardan. Zbog kardanskog vratila udaljenost od poda će se povećati, čime se težište nalaži na višoj poziciji i smanjuje stabilnost vozila [2].



Slika 1. Kombinacija motora naprijed - stražnji pogon [2]

### 2.1.2. Motor naprijed – prednji pogon

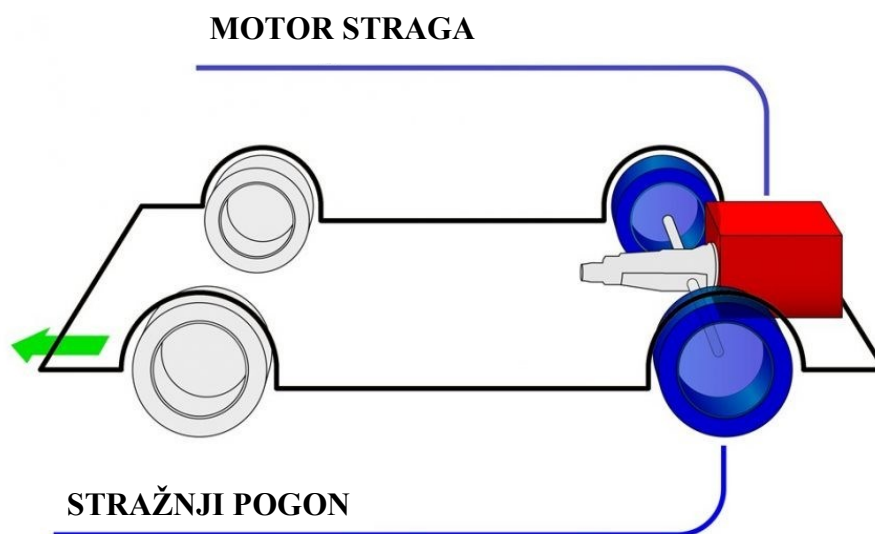
Najčešći raspored u motornim vozilima danas je prednji pogon i motor koji se nalazi u prednjem dijelu vozila. U ovom slučaju, snaga motora prenosi se na prednje kotače putem spojke, prijenosnog sustava, diferencijala i pogonskih vratila. S ovim rasporedom postiže se kompaktniji pogonski sustav jer više nije potrebno dugo kardansko vratilo s križnim zglobovima i spojka i mjenjač kombiniraju se s pogonskim vratilom. Ostale prednosti uključuju bolje hlađenje, bolju kontrolu vozila jer je težište niže, što rezultira većom stabilnošću. Međutim, teže je osigurati istovremeno upravljanje i pogon [2].



Slika 2. Kombinacija motor naprijed - prednji pogon [2]

### 2.1.3. Motor straga – stražnji pogon

U slučaju kada se motor nalazi straga i vozilo ima stražnji pogon, snaga motora prenosi se na stražnje kotače putem spojke, mjenjača, diferencijala i pogonskih vratila. S ovakvim rasporedom lakše je izraditi izlaz ispušnih plinova, a prednji dio motornog vozila ima aerodinamičniju strukturu. Ovaj raspored omogućuje bolji pregled ceste i pouzdano odvaja motor od putnika. Jedna od prednosti su smanjena buka i prodor ispušnih plinova u unutrašnjost vozila. Glavna poteškoća ovog rasporeda je kompliciranije upravljanje motorom, prijenosnim sustavom i spojkom, budući da su pozicionirani daleko od vozača. Osim toga, s ovim rasporedom, vozač i putnik na prednjem sjedištu sjede blizu prednjeg dijela vozila i u slučaju frontalnog sudara mogu biti teško ozlijeđeni. Također, hlađenje motora postaje problem. Stabilnost je manja, pogotovo kada vozilo vozi po nagibu [2].



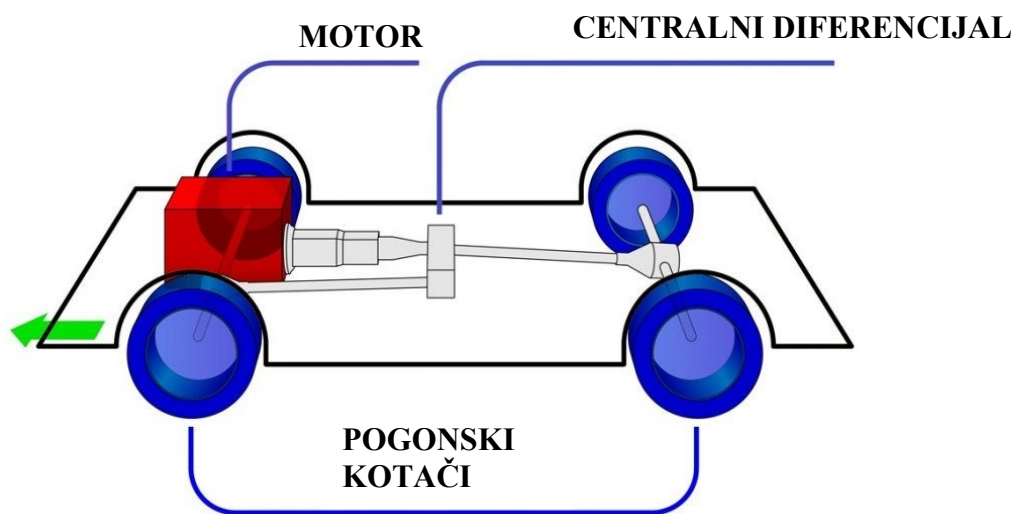
Slika 3. Kombinacija motor straga - stražnji pogon [2]

### 2.1.4. Pogon na sve kotače

U daljnjoj povijesti pogon na svim kotačima su samo koristila terenska motorna vozila, dok se danas ovakav raspored proširio na razne kategorije vozila. U ovom slučaju, snaga motora prenosi se na sva četiri kotača vozila. Glavna prednost ovog rasporeda je što cijela težina vozila stoji na raspolaganju za vuču, što poboljšava trenje na različitim vrstama terena. Međutim, ovaj



raspored uključuje i razne dodatne troškove servisiranja zbog mnogo dodatnih dijelova potrebnih za izradu takve vrste pogona [2].

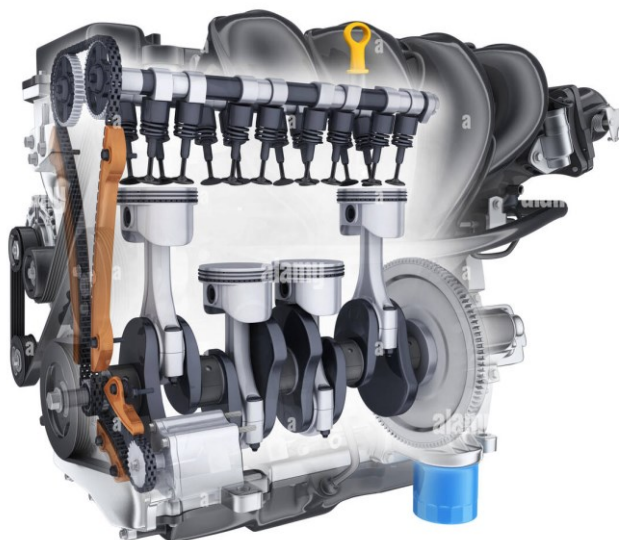


Slika 4. Pogon na sve kotače [2]

## 2.2. Osnovni dijelovi pogonskog sustava

### 2.2.1. Motor

Proces pretvaranja toplinske energije u mehaničku energiju okretanja kotača započinje s motorom s unutarnjim izgaranjem koji je toplinski motor jer pretvara energiju iz topline sagorijevanja (najčešće dizela ili benzina) u mehanički rad ili okretni moment. Taj okretni moment se primjenjuje preko nekoliko komponenti na kotače kako bi motorno vozilo bilo pokretno. Gorivo se ubrizgava izravno u cilindre blizu vrha kompresijskog hoda te neposredno prije nego što klip dosegne vrh svog hoda, poznati kao gornji mrtvi centar, svjećice paljenja zapaljuju smjesu zraka i goriva. Rezultirajuća ekspanzija vrućih, gorivih plinova gura klip u suprotnom smjeru (prema dolje) tijekom hoda izgaranja. Takav hod klipova pokreće indirektno kotače na vozilu. Kad hod izgaranja dosegne donju „mrtvu“ točku, ispušni ventili se otvaraju kako bi omogućili izlaz plinova izgaranja (kao šprica koja istiskuje zrak) dok klip ponovno ide prema gore [3].



**Slika 5. Prikaz motora s unutarnjim izgaranjem [4]**

### ***2.2.2. Koljenasto vratilo***

Koljenasto vratilo je mehanička komponenta koja pretvara linearno gibanje klipova u rotacijsko kretanje i pokreće kotače vozila. Povezano je s klipom putem spojne šipke. Glavna funkcija koljenastog vratila je pretvoriti linearno kretanje klipa u rotacijsko kretanje i pokretati kotače vozila. Bez koljenastog vratila, oscilacijski motor ne može prenijeti oscilacijsko kretanje klipa na pogonsko vratilo. Koljenasto vratilo nalazi se unutar bloka motora i ima mnogo osovina i krakova. Povezuje ga s klipovima motora putem tih osovina i krakova [5].



**Slika 6. Prikaz koljenastog vratila [6]**

### ***2.2.3. Prijenosni sustav***

Prijenosni sustav je dio pogonskog sustava odgovoran za optimalan prijenos snage s motora na kotače putem mehaničkog sustava zupčanika. Omogućuje vozilu promjenu brzine i smjera. Postoje dva osnovna tipa: ručni i automatski prijenosni sustav.

Ručni prijenosni sustav je sustav zupčanika s tri ili više stupnja prijenosa koji omogućuju promjenu brzine i smjera vozila. Važna komponenta ručnog prijenosnog sustava je papučica spojke. Spojka je mehanizam koji zaustavlja protok snage između motora i mjenjača. Tijekom vožnje snaga motora prenosi se na prijenosni sustav jer su motor i mjenjač povezani. Kada vozač pritisne papučicu spojke, dotok snage do mjenjača će se prekinuti i doći će do zaustavljanja vozila. Dok je protok snage između motora i mjenjača zaustavljen vozač može mijenjati stupanj prijenosa, a zatim otpustiti spojku za daljnju vožnju [7].

U motornim vozilima s automatskim mjenjačem odnosno automatskim prijenosnim sustavom ne postoji papučica spojke. Umjesto toga, pretvarač zakretnog momenta u sustavu automatskog mjenjača obavlja posao papučice spojke. Pretvarač zakretnog momenta napunjen je tekućinom pod tlakom za ubrzavanje ili usporavanje vozila, što se naziva hidrauličko upravljanje. Tlak ulja vrti turbinu u motoru i šalje snagu kroz mjenjač. Kad motor ne radi, mjenjač nema tlak ulja, pa se vozilo ne može kretati. Mijenanje stupnjeva prijenosa obavlja se uređajem za upravljanje osjetljivim na brzinu koji mijenja položaj ventila koji kontroliraju protok hidrauličke tekućine. Brzine vozila pri kojima se mijenjaju stupnjevi prijenosa ovise o položaju papučice gasa, a

vozač može odgoditi prebacivanje u viši stupanj prijenosa dok se ne postigne veća brzina daljnjim pritiskanjem papučice gasa [8].



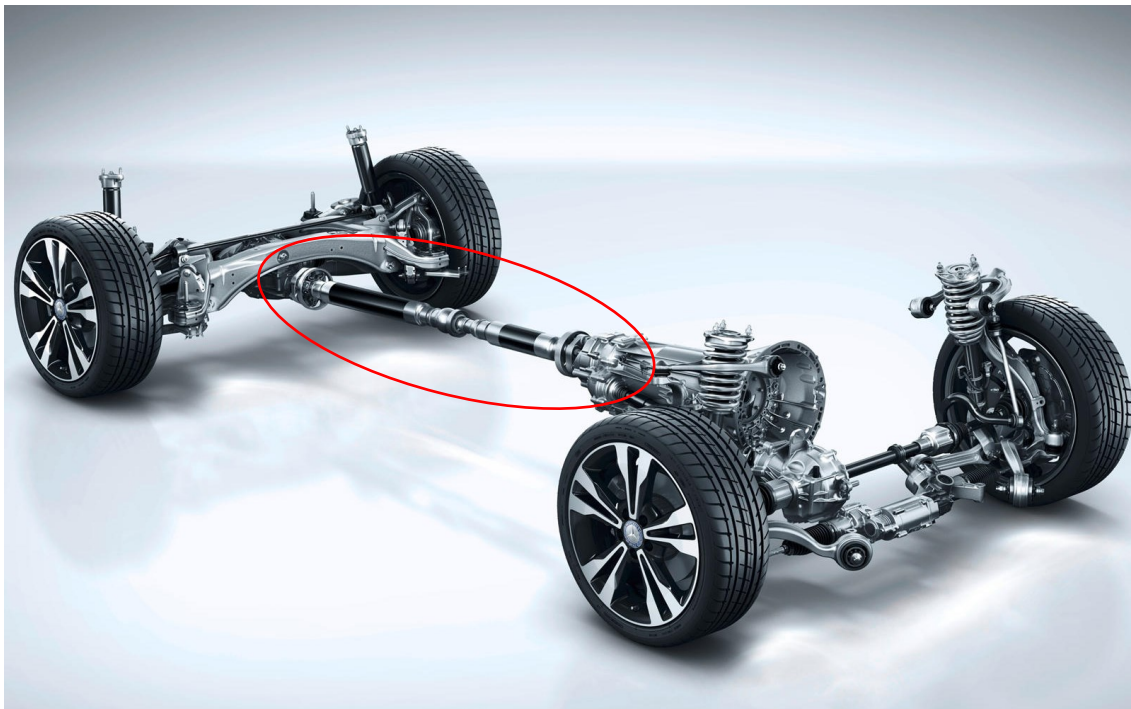
RUČNI PRIJENOSNI SUSTAV

AUTOMATSKI PRIJENOSNI  
SUSTAV

Slika 7. Prikaz ručnog i automatskog prijenosnog sustava [9]

#### **2.2.4. Pogonsko vratilo za stražnji pogon (kardan)**

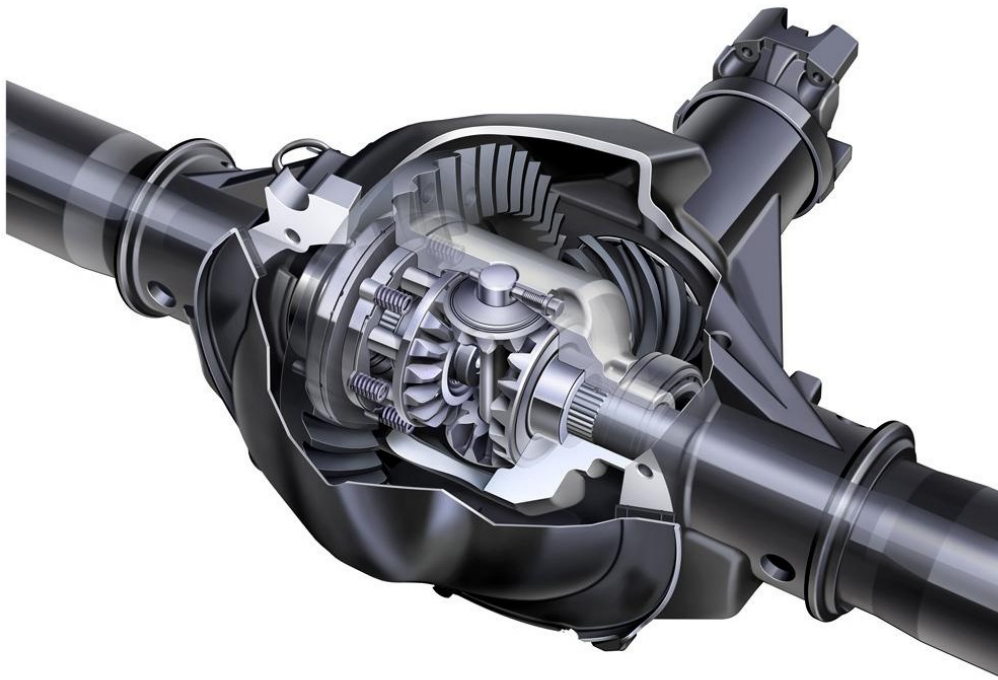
U slučaju vozila sa stražnjim pogonom ili vozila sa pogonom na sve kotače snaga iz prijenosnog sustava se prenosi na pogonsko vratilo, koje je rotirajuće vratilo koje se proteže duž duljine vozila. Pogonsko vratilo za stražnji pogon šalje snagu stražnjem mostu [10].



**Slika 8. Prikaz pogonskog vratila za stražnji pogon [11]**

### ***2.2.5. Diferencijal***

Diferencijal ima ključnu ulogu kod primjene okretnog momenta (rotacijske sile) na pogonske kotače i sastoji se od sustava zupčanika. Prstenasti zupčanik pričvršćen je na sklop nosača, a unutar nosača nalazi se skup manjih zupčanika. Manji zupčanici često se nazivaju stožnici, koji se sastoje od drugog skupa zupčanika i bočnih zupčanika. Ovaj skup zupčanika osigurava diferencijalno djelovanje. Prateći tok snage unutar diferencijala, zupčanik pogoni prstenasti zupčanik, koji rotira nosač [12].



**Slika 9. Prikaz diferencijala [13]**

### ***2.2.6. Pogonska vratila s homokinetičkim zglobom i kotači***

Na kraju procesa prijenosa snage od motora do kotača, snaga se prenosi iz diferencijala na stražnje kotače putem pogonskih vratila s homokinetičkim zglobom na lijevoj i desnoj strani vozila. Kod vozila s prednjim pogonom, snaga se šalje izravno na prednje kotače. Kod vozila s pogonom na sve četiri kotača, snaga se raspoređuje na prednje i stražnje kotače. Kotači su tada odgovorni za pretvaranje prenesene snage u pokret i guranje vozila naprijed ili unatrag [14].

### 3. POGONSKO VRATILO S HOMOKINETIČKIM ZGLOBOM

Pogonska vratila s homokinetičkim zglobom ili CV pogonska vratila (CV-engl. *constant velocity*) se koriste u većini vozila s pogonom na prednje kotače, mnogim vozilima s pogonom na sve kotače i nekim vozilima s pogonom na stražnje kotače. Pogonsko vratilo s homokinetičkim zglobom je spoj dizajniran za prijenos ravnomjerne snage kroz širok raspon kutova uz minimalno trenje i unutarnju zračnost. Pogonska vratila imaju dva zgloba na oba kraja vratila koja omogućuju okretanje kotača, dok dopuštaju da se ovjes artikulira preko neravnina i da se prednji kotači okreću lijevo i desno. Vozila s pogonom na dva kotača imaju dva zgloba, a vozila s pogonom na sve kotače mogu imati do četiri zgloba.



**Slika 10. Pogonsko vratilo s homokinetičkim (CV) zglobom [15]**

Pogonska vratila u sebi imaju mast koja je tamnozeleno ili smeđkastozelene boje. Gumena ili neoprenska fleksibilna manžeta drži ovu mast oko i unutar samog homokinetičkog zgloba i pritom podmazuje sve pokretne dijelove unutar njega. Pogonsko vratilo osigurava da se kotači okreću prilikom pritiskanja papučice gasa. Ako pogonsko vratilo ne radi ispravno, to može utjecati na način upravljanja vozila odnosno onemogućiti ga u potpunosti. U slučaju neispravnog rada se često čuje pucketanje ili zveket prilikom mijenjanja brzina, što ukazuje da nešto nije u redu. Ako pogonsko vratilo potpuno pukne, može zaustaviti kretanje motornog

vozila i uzrokovati ozbiljna oštećenja, što ga čini bitnom komponentom motornog vozila koju treba održavati u dobrom stanju da bi motorno vozilo radilo ispravno.[16]. Vrlo važan dio pogonskog vratila je već spomenuti homkinetčki (CV) zglob. Svako pogonsko vratilo se sastoji od dva CV zgloba; unutarnji i vanjski. Unutarnji CV zglobovi povezuju pogonska vratila s mjenjačem ili diferencijalom, dok vanjski CV zglobovi povezuju pogonska vratila s kotačima (slika 11) [1].



Slika 11. Prikaz lokacije unutarnjeg i vanjskog CV zgloba [17]

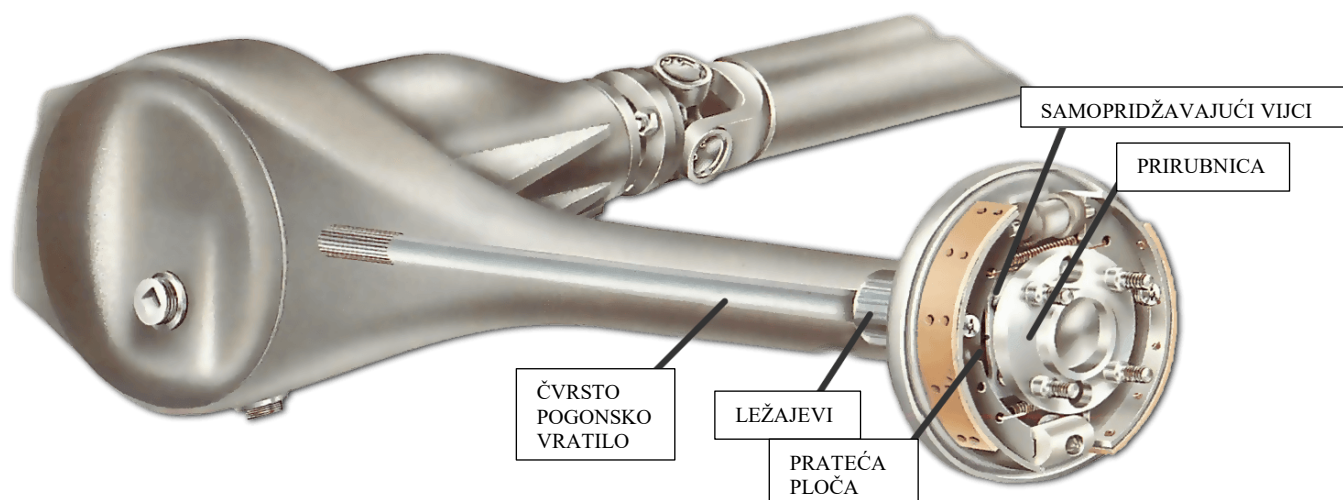
### 3.1. Vrste pogonskih vratila

Općenito postoje dvije vrste pogonskih vratila, a to su: čvrsta pogonska vratila i pogonska vratila sa CV zglobom.

Čvrsta pogonska vratila (slika 12) korištena su prvotno u svim vrstama osobnih motornih vozila i kamiona. Fiksno pozicioniranim vratilima na diferencijal, čvrsta pogonska vratila stvaraju snažnu platformu za daljnji razmještaj dijelova i dizajn vozila. Najčešće se koriste u stražnjem dijelu vozila sa stražnjim pogonom te se često nalaze i na prikolicama, kamionetima, kombijima i u prednjim i stražnjim dijelovima kamiona s pogonom na sva četiri kotača. Prvenstveno korištena zbog niske cijene potrebne za proizvodnju, čvrsta pogonska vratila ne daju tako udobnu vožnju kao pogonska vratila sa CV zglobom zbog svoje vrlo velike težine i loše



apsorpcije neravnina. Obično su ovješena ovjesom tipa lisnatih opruga, a također mogu biti ovješena spiralnim oprugama i povremeno će koristiti Panhard šipku za održavanje položaja vratila u predviđenim okvirima šasije. Iako ne pruža kvalitetu vožnje kao neovisna stražnja vratila, može pružiti visoku kvalitetu vožnje kroz pažljiv odabir opruga i amortizera. Kvalitetna kombinacija opruga i amortizera može pomoći u smanjenju neapsorbirane težine koju stvara stražnji dio vozila koji poskakuje kada naiđe na neravninu [18].

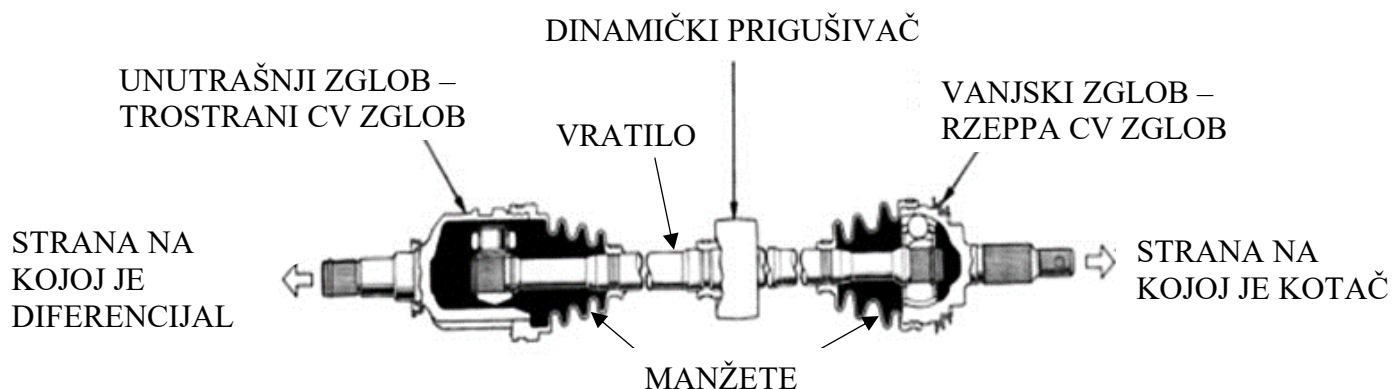


**Slika 12. Čvrsto pogonsko vratilo sa diferencijalom [19]**

Pogonska vratila s CV ili homokinetičkim zglobovima (slika 10) su vratila koja pomažu u prijenosu snage na kotače čak i dok se okreću bez ikakvih fluktuacija brzine. Iako se najčešće koriste u vozilima s prednjim pogonom, ove se vrste vratila također mogu naći na vozilima s pogonom na sve kotače i nekim vozilima sa stražnjim pogonom koja koriste neovisni ovjes. U usporedbi s čvrstim pogonskim vratilima pridonose većoj udobnosti u vožnji. CV pogonsko vratilo radi prijenosom snage s motora na kotače dok na njega ne utječu spone koje guraju kotač i mijenjaju njegovu geometriju, kao i modulacije ovjesa. CV pogonsko vratilo se sastoji od dva zgloba – unutrašnjeg i vanjskog. Bez obzira na radni kut zgloba, ulazna i izlazna brzina uvijek su iste. Stoga se zove zglob konstantne brzine. Unutarnji CV zglobovi razlikuju se od vanjskih jer trebaju samo omogućiti hod ovjesa, a ne mijenjati kut upravljanja. Unutarnji zglob konstantne brzine je klizna jedinica koja se u većini slučajeva povezuje s prijenosom motornih vozila [20].

## 4. DIJELOVI POGONSKOG VRATILA S HOMOKINETIČKIM ZGLOBOM

Pogonska vratila s CV zglobom se sastoje od: manžete, unutrašnjeg i vanjskog zgloba, vratila i ponekad od dinamičkog prigušivača.



Slika 13. Dijelovi pogonskog vratila s CV zglobom [21]

### 4.1. Vratilo

Materijali koji se koriste za proizvodnju vratila moraju biti čvrsti da izdrže pritisak i naprezanja uzrokovana velikim težinama. Otpornost na umor i trošenje vratila, trošenje zubaca duž pogonskog vratila koja olakšava prijenos kružnog gibanja s prijenosnog sustava na kotače, također su važne karakteristike za ovu komponentu. Pretežno se koriste ugljični čelici koje sadrže krom, nikal ili molibden jer zadržavaju mehaničku čvrstoću pod velikim naprezanjem [23]. Neki od čelika koji se koriste za izradu pogonskih vratila nalaze se u Tablici 1.

Tablica 1. Čelici koji se koriste za izradu pogonskih vratila [22]

ČELIK	%C	%Mn	%P	%S	%Fe
SAE 1541	0,36 – 0,44	1,35 – 1,65	0,040	0,050	Ostatak
SAE 1050	0,48 – 0,55	0,60 – 0,90	0,030	0,035	Ostatak
SAE 1055	0,60 – 0,90	0,50 – 0,60	0,040	0,050	Ostatak
SAE 1039	0,36 – 0,44	0,70 – 1,00	0,040	0,050	Ostatak

Čelična vratila su kovana i toplinski obrađena indukcijskim kaljenjem. Brzim provlačenjem materijala kroz elektromagnetsku zavojnicu, zagrijavanje i hlađenje materijala može se pažljivo kontrolirati. Na taj način inženjeri proizvode vratila koja imaju:

- Tvrde, čvrste površine
- Žilava jezgra
- Visoka duktilnost za poboljšane funkcije vratila
- Produženi vijek trajanja

Uobičajena dubina površinske tvrdoće za vratila originalne opreme kreće se između 2,54 mm – 4,57mm [23].



**Slika 14. Pogonsko vratilo [24]**

## 4.2. Manžeta

Dvije glavne funkcije manžete su zadržavanje masti i zaštita od nečistoća. CV zglobovi se okreću značajnim brzinama kad god se vozilo kreće, tako da mast koja se nalazi u njima ima težnju izbacivanja tijekom uporabe.[25] Najprikladnija vrsta masti za CV zglobove je litijeva mast. To je mast vrhunske kvalitete za teške uvjete rada koja sadrži molibden disulfid i grafit. Mast štiti CV zglobove tijekom različitih uvjeta, kao što su teški udarci ili udarna opterećenja [13]. Budući da je manžeta zabrtvljena i za zglob i za vratilo, ta se mast zadržava i može

nastaviti s podmazivanjem, odnosno neće iscuriti. Lom manžete je najčešći uzrok kvara na pogonskom vratilu. Ako je manžeta oštećena stranim tijelom, ili je uslijed starenja izgubila elastičnost i postala krhka pa su se pojavile pukotine, dolazi do gubitka masti za podmazivanje, što dovodi do viška topline u zglobu zbog trenja i eventualnog kvara. Do kvara također može doći ako abrazivni materijali uđu u oštećenu manžetu i ometaju unutarnje ležajeve [13]. Obično se pukotine od normalnog trošenja prvo pojavljuju na manžetama na vanjskim zglobovima, najbližim kotačima jer su podložne većem rasponu kretanja gore-dolje. U većini svakodnevnih situacija u vožnji do oštećenja manžete dolazi tijekom vožnje kroz tvrd snijeg ili na cestama prekrivenim većim količinama šljunka ili kamenja. Naravno, vožnja izvan ceste preko stijena ili kroz vodu uvelike povećava vjerojatnost oštećenja manžete [26]. Zbog činjenice da oštećena manžeta može dovesti do kvara CV zgloba, te se komponente često mijenjaju na prvi znak istrošenosti ili oštećenja. Zamjena manžete obično uključuje uklanjanje CV zgloba, a često također zahtijeva uklanjanje cijelog sklopa pogonskog vratila iz vozila. Dok je većina manžeta izrađena od gume, neke su izrađene od drugih materijala kao što su poliuretan ili neopren za veću izdržljivost [12].

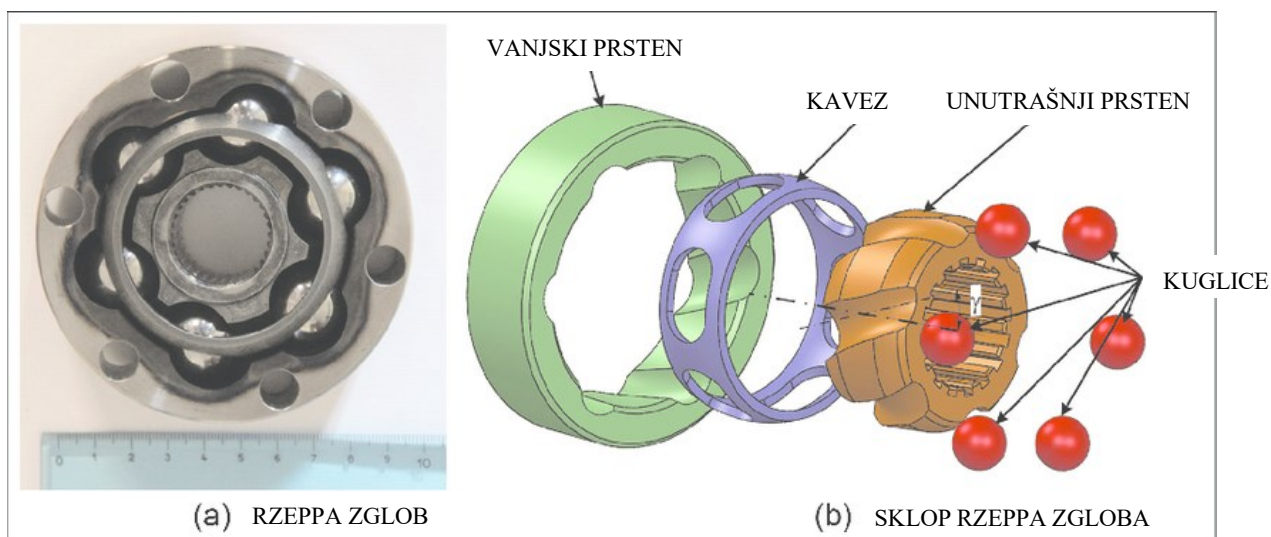


**Slika 15. Manžeta CV pogonskog vratila [27]**

### 4.3. Unutrašnji i vanjski zglob

#### 4.3.1. Vanjski zglob

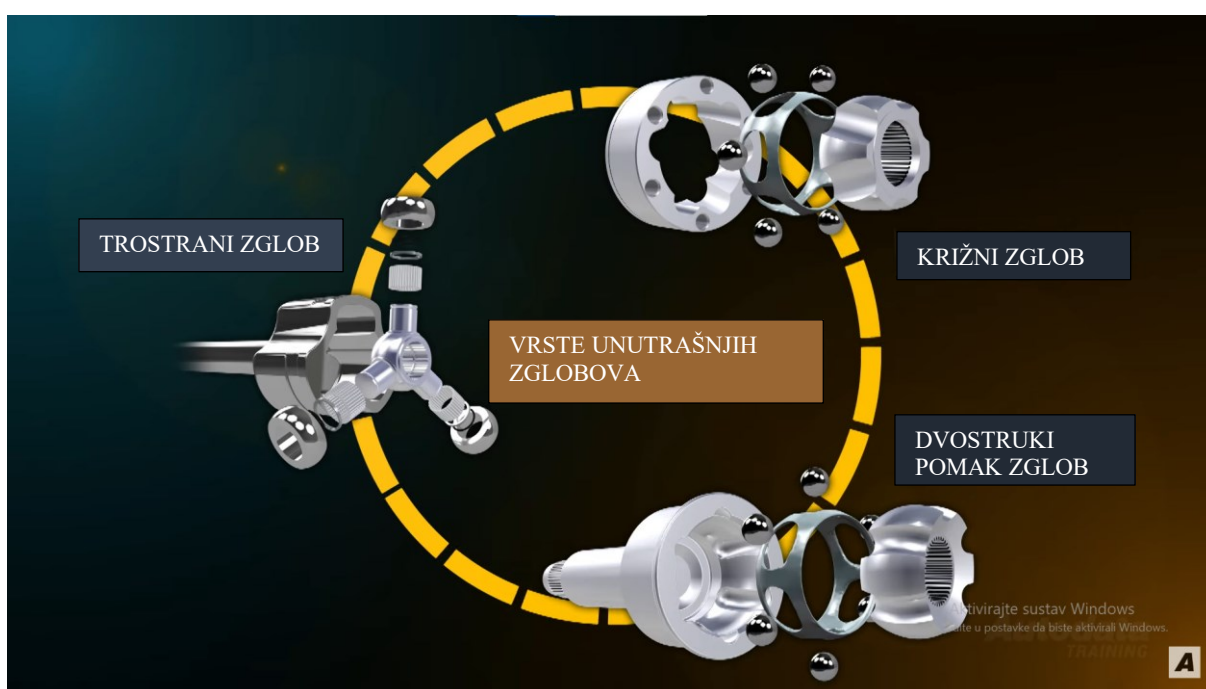
Za vanjski zglob se koristi fiksni kuglični zglob, poznatiji pod nazivom Rzeppa zglob (slika 16.). Naziv Rzeppa je dobio po inženjeru po imenu Alfred H. Rzeppa koji je izumio ovaj zglob 1926. godine i posljedično došao do poboljšanog dizajna desetljeće kasnije. Dizajn ovog zgloba omogućio je prijenos snage kroz 6 sfera (kuglica) koje su bile smještene između vanjskog i unutarnjeg prstena. Ove sferne kuglice učvršćene su na svom mjestu uz pomoć malih prozora unutar sklopa kaveza. Kavez je ono što se nalazi između vanjskog i unutarnjeg prstena. Spoj je dizajniran tako da kuglice prepolovljuju radni kut. Način rada ležaja je sličan konusnom zupčaniku. Razlika je u tome što se okretni moment ne prenosi preko zgloba preko zubaca zupčanika. Umjesto toga, u vanjskom i unutarnjem kućištu, sferne kuglice se pomiču prema naprijed prema svakoj od svojih staza [28]. Strojno obrađeni utori ili gusjenice omogućuju klizanje tih kuglica. Ova konstrukcija dopušta savijanje tijekom rada. Spoj je podmazan mašću na bazi litija, dok fleksibilna manžeta zadržava mazivo unutra i štiti od prljavštine. Bez obzira na radni kut zgloba, ulazna i izlazna brzina uvijek su iste. Stoga se svi zglobovi u ovom odjeljku nazivaju CV (engl. *constant velocity* – konstantna brzina) ili homokinetički zglobovi [7].



Slika 16. Prikaz Rzeppa zgloba [29]

### 4.3.2. Unutrašnji zglob

Unutarnji CV zglobovi razlikuju se od vanjskih jer trebaju samo omogućiti hod ovjesa, a ne mijenjati kut upravljanja. Unutarnji zglob konstantne brzine je klizna jedinica koja se u većini slučajeva povezuje s prijenosom motornih vozila. Ovaj dio CV pogonskog vratila poznat je kao klizni zglob jer klizi unutra i van vodoravno. Zanimljivo je da se ova komponenta naziva i uronjeni zglob jer je njeno kretanje slično pokretu klipa [7]. Najčešće se koriste 3 glavna tipa unutrašnjih zglobova, a to su: trostrani zglob ili pauk (engl. *tripod*) kod kojih se nalaze valjci u funkciji ležajeva, zatim križni zglob (engl. *cross-groove*) i dvostruki pomak zglob (engl. *double offset*) koji koriste kuglične ležajeve [28].

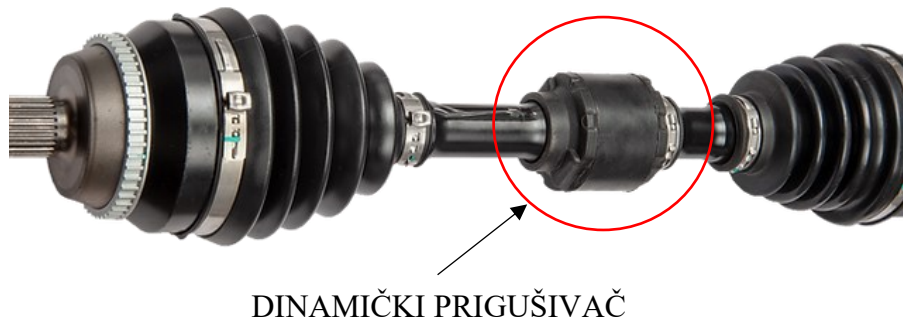


Slika 17. Vrste unutrašnjih zglobova [17]

### 4.4. Dinamički prigušivač

Kao što je već spomenuto CV pogonsko vratilo podvrgnuto je raznim naprezanjima kao što su naprezanje na savijanje, smicanje, itd. Osim ovih naprezanja, također je podvrgnut vibracijama, zbog neuravnotežene gume ili kotača i „neokrugle“ gume ili kotača ili savijene felge. Dinamički prigušivač se koristi za minimiziranje vibracija nastalih kretanjem vozila, koje su prisutna u sustavu tijekom vožnje, u zvuk. Kada sustav vibrira u rezonanciji, prigušivač smanjuje amplitudu vibracija, što zauzvrat rezultira manjim zračenjem zvuka. Dodatna masa prigušivača

može pomoći u promjeni rezonantne frekvencije i time pomoći u smanjenju prigušenja. Labavost u ležaju ili nosaču također može uzrokovati vibracije kao i trešnju motora koje proizvodi određene vibracije koje se preko prijenosa prenose na pogonsko vratilo. Dinamički prigušivač pričvršćen je na pogonsko vratilo i služi za prigušivanje harmonijskih oscilacija i vibracija u pogonskom sklopu i za stabilizaciju vratila dok se okreće. Nije nužan za rad CV pogonskog vratila, ali može učiniti vožnju ugodnijom, stoga treba napomenuti da ga nemaju sva CV pogonska vratila [21].



**Slika 18. Dinamički prigušivač [30]**

## 5. MATERIJALI I TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA IZRADU POGONSKOG VRATILA

### 5.1. Tehnički zahtjevi

Pogonska vratila rade u vrlo zahtjevnim uvjetima i vrlo su bitna komponenta svakog vozila. Ukoliko dođe do loma ili bilo kakvog kvara na pogonskom vratilu, daljnja vožnja nije moguća jer je onemogućen prijenos snage i momenta na kotače. Mehanička svojstva koja su važna prilikom izrade pogonskog vratila uključuju:

**1. Vlačna čvrstoća** - Ona mjeri maksimalno opterećenje koji materijal može podnijeti dok se isteže ili vuče. Visoka vlačna čvrstoća ključna je za pogonska vratila kako bi izdržala sile koje se javljaju tijekom ubrzanja, kočenja i skretanja [31].

**2. Granica elastičnosti** - Ona predstavlja količinu naprezanja koji materijal može podnijeti bez trajnog deformiranja. Visoka granica elastičnosti osigurava da pogonska vratila mogu nositi teške terete bez savijanja ili lomljenja [31].

**3. Tvrdoća** - Tvrdoća mjeri otpornost materijala na trošenje površine, udubljenje i prodiranje stranog materijala. Tvrdi materijal pogonskog vratila manje je sklon brzom trošenju, što je ključno za trajnost [31].

**4. Umor materijala** - Ovo svojstvo odnosi se na sposobnost materijala da odoli ponovljenom opterećenju i oslobađanju bez pojave pucanja zbog cikličkog naprezanja. Pogonska vratila trebaju dobru visoku otpornost na umor materijala kako bi izdržala stalne vibracije ceste i promjene opterećenja [31].

**5. Duktilnost** -Duktilnost se odnosi na sposobnost materijala da se plastično deformira pod naprezanjem pri vlačnom naprezanju bez pucanja. Određena duktilnost je potrebna kako bi se apsorbirala energija i spriječio nagli, katastrofalni lom [31].

**6. Izdržljivost** - Izdržljivost kombinira čvrstoću i duktilnost i mjeri sposobnost materijala da apsorbira energiju prije loma. Ključno je za sprečavanje lomova pogonskog vratila, posebno u hladnim uvjetima ili prilikom udara [31].



**7. Modul elastičnosti** - Također poznat kao Youngov modul, predstavlja krutost materijala ili otpornost na elastičnu deformaciju. Veći modul elastičnosti može pomoći očuvati oblik i osigurati da ne dođe do savijanja pogonskog vratila pod opterećenjem [31].

**8. Otpornost na udarce** – Pogonska vratila trebaju moći izdržati nagla, visoka opterećenja bez loma ili prekomjerne deformacije [31].

**9. Otpornost na koroziju** - Iako nije mehaničko svojstvo samo po sebi, otpornost na koroziju važna je kako bi se spriječilo propadanje i lom pogonskog vratila tijekom vremena, posebno u područjima s teškim vremenskim uvjetima ili izloženosti soli na cestama [31].

Određena mehanička svojstva potrebna za pogonska vratila mogu se mijenjati ovisno o faktorima kao što su težina vozila, primjena (npr. osobno motorno vozilo, teretno ili terensko vozilo) i namjena (npr. sportska izvedba ili teški teret). Proizvođači biraju materijale i postupke toplinske obrade kako bi optimizirali navedena svojstva prema namjeni i zahtjevima za izvedbom [31].

Pogonska vratila vozila obično se izrađuju od srednje i visoko ugljičnih čelika i legiranih konstrukcijskih čelika koji su kaljeni i popušteni ili normalizirani. Kako bi se spriječila pojava pukotina tijekom kaljenja, koriste se metode hlađenja uranjanjem u ulje ili vodu.

Za manja vozila, uglavnom se koriste materijali poput 40MnB i 25CrMo4. Za pogonska vratila promjera manjeg od 40 mm, koriste se srednje ugljični čelici kaljeni i popušteni kao što su čelici C35, C40E i C45, itd. Za teška vozila, pogonska vratila se izrađuju od legiranih konstrukcijskih čelika s većom kaljivošću, kao što su 25CrMo4 40Cr i 40CrMn, 40MnB, 40CrMo, 40CrNiMo, 47MnTi, 40CrMnMo, 40CrMnTi, 40CrNi, itd.

Za kaljenje pogonskih vratila vozila koriste se najčešće prstenasti induktori za kontinuirano kaljenje i zagrijavanje kako bi se dobila viša tvrdoća površinskog sloja. Primjer parametara procesa i tehnički zahtjevi za površinsko zagrijavanje i kaljenje pogonskog vratila su sljedeći: snaga zagrijavanja iznosi 150-300 kW, frekvencija iznosi 2500-3000 Hz, pritom pogonsko vratilo se zagrijava indukcijskim grijanjem srednje frekvencije za površinsko kaljenje, a brzina protoka rashladne vode ne smije biti manja od 10 m/s. Površinsko tlačno opterećenje komada nakon kaljenja može doseći 700-800 MPa, a nakon popuštanja na 250°C, smanjit će se na 400-500 MPa. Time se osigurava da određeni ostatak tlačnog naprezanja na površini pogonskog vratila ostane trajno, što će pomoći da pogonsko vratilo ima veću otpornost na umor materijala.

Može se samo ohladiti ili popušitati u peći. Temperatura se kontrolira na 180 ~ 250 °C, a vrijeme

traje od 90 do 120 minuta. Kako bi se osiguralo ravnomjerno zagrijavanje zaobljenih kutova krajeva pogonskog vratila, na induktor se može dodati propusni magnet [32].

## 5.2. Najčešće korišteni čelici za izradu pogonskih vratila motornih vozila

Za izradu pogonskih vratila koriste se razni čelici, a u nastavku su navedeni samo najčešće korišteni.

### 5.2.1. Čelik 25CrMo4

25CrMo4 je razred čelika koji je posebno dizajniran za upotrebu u proizvodnji komponenata i dijelova koji su izloženi visokim razinama napreznja. Ovaj čelik poznat je po svojoj izvanrednoj čvrstoći i otpornosti, stoga se često primjenjuje u proizvodima gdje je trajnost ključna. Općenito se koristi u proizvodnji zupčanika, vratila, ventila i drugih komponenata koje su podložne visokim napreznjima [33]. Kemijski sastav prikazan je u Tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika 25CrMo4 [33]

Čelik	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Fe
25CrMo4	0.22-0.29	0.4	0.60-0.90	0.035	0.04	0.9-1.2	0.15-0.3	ostatak

### 5.2.2. Čelik C50R

C50R je visoko ugljični, hladno valjani čelik koji sadrži približno 0,50% ugljika. Meko žareni visoko ugljični čelik namijenjen je primjenama koje zahtijevaju umjereno oblikovanje, dok je meko sferodizirano žaren čelik C50R namijenjen upotrebama koje zahtijevaju maksimalno hladno oblikovanje. Meki sferodizirani žareni čelik C50R se obrađuje kako bi se dobila najniža tvrdoća za maksimalnu mogućnost oblikovanja. Ova vrsta čelika koristi se za proizvodnju noževa, držača, kočionih diskova, vratila, spojnice, spojki, opruga, podložaka i zupčanika te za širok raspon primjena koje mogu iskoristiti njegovu dobru kombinaciju mehaničkih svojstava [34]. Kemijski sastav prikazan je u Tablici 3.

**Tablica 3. Kemijski sastav čelika C50R [35]**

Čelik	%C	%Si	%Mn	%Ni	%P	%S	%Cr	%Mo	%Fe
C50R	0.47-0.55	0.4	0.6-0.9	0.4	0.03	0.02-0.04	0.4	0.1	ostatak

### 5.2.3. Čelik C40E

Čelik C40E široko je korištena vrsta ugljičnog čelika koja pripada standardu EN kemijskog sastava. Ova vrsta čelika poznata je po svojoj žilavosti, odličnoj zavarljivosti i visokoj vlačnoj čvrstoći. Čelik C40E prikladan je za sve opće inženjerske primjene koje zahtijevaju veću čvrstoću kao što su: vratila opće namjene, vratila, zupčanicima, vijci i klinovi, vretena, automobilske i opće inženjerske komponente, itd. Kemijski sastav prikazan je u Tablici 4.

**Tablica 4. Kemijski sastav čelika C40E [36]**

Čelik	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Fe
C40E	0.36-0.44	0.10-0.40	0.60-1.0	0.05	0.005	ostatak

Čelik C40E ima vlačnu čvrstoću od 700-900 MPa, granicu razvlačenja od 420-700 MPa i istežanje od 9-16 %. Ova svojstva čine čelik C40E idealnim za primjene koje zahtijevaju čvrste i izdržljive materijale [37].

### 5.2.4. Čelik C45

Čelik 45 koristi se u toplo i hladno valjanim proizvodima i otkivcima koji se zatim koriste u metalnim konstrukcijama i komponentama za izgradnju strojeva različitih oblika i veličina. C45 ugljični čelik ima široku primjenu u vretenima, ekscentrima, zupčanicima, pričvrstnim elementima i raznim vrstama vratila. Ovaj se čelik primjenjuje za konzole konstrukcije, vratila, šipke, grede, klipove itd., koje se toplinski obrađuju kako bi se povećala njihova čvrstoća [38]. Kemijski sastav prikazan je u Tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika C45 [38]

Čelik	%C	%Si	%Mn	%P	%Ni	%S	%Cr	%Cu	%As	%Fe
C45	0.42-0.5	0.17-0.37	0.5-0.8	0.035	0.25	0.04	0.25	0.25	0.08	ostatak

### 5.2.5. Čelik 36CrNiMo4

36CrNiMo4 legirani čelik je srednje ugljični, niskolegirani čelik poznat po svojoj žilavosti i čvrstoći u relativno velikim presjecima. 36CrNiMo4 legirani ima dobru obradljivost, čvrstoću i izdržljivost. Također 36CrNiMo4 legirani čelik ima dobru otpornost na udarce, kao i otpornost na trošenje nakon provedene toplinske obrade. Legirani čelik 36CrNiMo4 ima dobru duktilnost u žarenom stanju, što mu omogućuje savijanje ili oblikovanje. Ovaj čelik se koristi za izradu zupčanika, vratila, dijelova klipa i drugih posebnih dijelova koji zahtijevaju otpornost na trošenje za motorna vozila i zrakoplove [39]. Kemijski sastav prikazan je u Tablici 6.

Tablica 6. Kemijski sastav čelika 36CrNiMo4 [39]

Čelik	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ni	%Cr	%Fe
36CrNiMo4	0.32-0.4	0.4	0.50-0.80	0.035	0.035	0.9-1.2	0.9-1.2	ostatak

### 5.2.6. Čelik C35

Kao visokokvalitetni ugljični konstrukcijski čelik, C35 je definiran kao nelegirani čelik s umjerenim sadržajem ugljika od 0,35% prema europskim standardima. C35 čelik ima odgovarajuću čvrstoću, dobru plastičnost i dobre opća svojstva. U usporedbi s čelikom C22, lošija im je mogućnost zavarivanja.. Čelik C35 koristi u normaliziranom i kaljenom i poboljšanom stanju. C35 čelik naširoko se koristi u proizvodnji raznih kovina i vruće prešanih dijelova, hladno vučenih i prešanih čelika, bešavnih čeličnih cijevi, dijelova u proizvodnji strojeva, kao što su koljenasta vratila, pogonska vratila, klinovi osovine, poluge, klipnjače, grede, rukavci, podloške, vijci, matice, itd. [40]. Kemijski sastav prikazan je u Tablici 7.

**Tablica 7. Kemijski sastav čelika C35 [40]**

Čelik	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Fe
C35	0.32-0.39	0.4	0.5-0.8	0.045	0.045	0.4	0.1	0.4	ostatak

## **6. KVAROVI POGONSKIH VRATILA S HOMOKINETIČKIM ZGLOBOM**

Pogonska vratila s homokinetičkim (CV) zglobom sastoje se od nekoliko komponenti. Glavni uzrok kvara ili loma pogonskog vratila je udarno opterećenje. Do udarnog opterećenja dolazi kada se kotač tijekom rotacije (odnosno tijekom kretanja vozila), podigne s tla, a zatim se naglo vrati na tlo. To je radnja koja se odvija često u slučaju sustava s neovisnim ovjesom zbog ograničenog hoda zgloba. Uzroci takvih udarnih opterećenja su najčešće loša površina po kojoj se vozi, bilo da je riječ o lošoj cesti ili van cestovnim putevima tj. vožnjama u prirodi CV zglobovi pogonskog sklopa su najslabija mjesta pri djelovanju velikih udarnih dinamičkih opterećenja. Udarne opterećenja mogu uzrokovati fizički lom kaveza CV zgloba; ili će se u nekim slučajevima samo vratilo posmicati, ali to nije tako uobičajeno. Udarne opterećenja su najčešći uzrok kvara pogonskih vratila, ali nije jedini faktor koji pridonosi. Umor materijala pogonskih vratila može biti uzrok loma i također je jedan od češćih uzroka kvara. Nakon prijeđenih više stotina tisuća kilometara, može doći do umora materijala kugličnih ležajeva koji se kotrljaju u kućištu što može oštetiti i okolni materijal. Pogotovo u slučaju kada je manžeta oštećena (slika 19.) i iscure sva mast koja se nalazi u njoj, a koja služi za podmazivanje odnosno smanjenje trenja u ležajevima. U tom slučaju ležajevi će pomalo trenjem trošiti okolni materijal i zatim će doći do loma CV zgloba. Još jedan od uzroka loma je preopterećenje. U slučaju previše tereta ili previše putnika, vratila neće imati dovoljnu čvrstoću da izdrže masu vozila. Preopterećenje je jedan od najčešćih uzroka loma pogonskih vratila kod teretnih vozila kao što su kombiji i kamioni [41].



**Slika 19. Kvar uzrokovan lomom manžete i curenjem masti za podmazivanje ležaja [42]**

## **6.1. Znakovi koji upućuju na kvar pogonskog vratila s homokinetičkim zglobom**

### **6.1.1. Vibracije tijekom vožnje**

Budući da se zglobovi CV pogonskog vratila nalaze odmah uz kotače vozila, svako njihovo oštećenje može izravno utjecati na vožnju. U slučaju da vozilo vibrira više nego što je normalno, to može značiti da je pogonsko vratilo oštećeno, tj da je vratilo izvan ravnoteže što može dovesti i do loma. Međutim, postoje i mnogi drugi problemi koji mogu uzrokovati dodatne vibracije, pa je važno potražiti i druge znakove koji upućuju na problem sa pogonskim vratilom s homokinetičkim zglobom [43].

### **6.1.2. Zvuk kliktanja prilikom okretanja upravljača**

Važna funkcija pogonskog vratila je da omogućuje okretanje kotača dok im daje snagu. Manžeta na homokinetičkom zglobu pogonskog vratila štiti zglob koji omogućuje okretanje kotača. Ako je manžeta oštećena, to bi moglo utjecati na skretanje vozila. Ako se čuje glasno škljocanje ili kliktanje tijekom skretanja, bilo samo u jednom smjeru ili u svim smjerovima, to je dobar pokazatelj oštećenog CV zgloba [43].

### **6.1.3. Zvuk kucanja**

Slično prethodnom potpoglavlju, ako se iznenada počne čuti zvuk kucanja tijekom vožnje, potencijalni uzrok može biti kvar na CV vratilu. Čak i ako zvuk kucanja nije krivnja pogonskog vratila, rijetko postoji manji razlog za takav zvuk [43].

### **6.1.4. Pronađena mast u unutrašnjosti kotača**

Unutrašnjost manžete pogonskog vratila sa homkinetičkim zglobom je dobro podmazana kako bi se osiguralo što ugladnije kretanje ležajeva. Ako se manžeta ošteti, ta mast za podmazivanje može iscuriti na kotače. Ovo nije tako očito kao zvuk kliktanja ili kucanja, ali to je jednostavan način da se potvrde sve sumnje u vezi sa oštećenjem pogonskog vratila [43].

### **6.1.5. Oštećena manžeta**

Najočitiji znak oštećenog pogonskog vratila sa homkinetičkim zglobom, osim njegovog loma, je oštećenje manžete. Da bi se provjerilo je li došlo do oštećenja manžete potrebno je pronaći pogonsko vratilo koje spaja kotače sa diferencijalom i zatim pronaći manžetu na njemu. U slučaju da se manžeta oštetila treba je zamijeniti. Ako je oštećenje manžete brzo utvrđeno od trenutka nastanka, onda je zamjena manžete sve što treba napraviti. Međutim, ako se oštećena manžeta brzo ne riješi, zglob može raditi bez masti i kao rezultat toga biti oštećen uslijed trenja. U tom slučaju obično je najbolja zamjena cijelog CV pogonskog vratila [43].



## 7. KOROZIJA

Korozija je nenamjerno razaranje konstrukcijskih materijala uzrokovano fizikalnim, fizikalno-kemijskim, i biološkim agensima. dolazi od latinske riječi „corrodere“ ,što znači nagristi. Korozija je jedan od najčešćih, ako ne i najčešći uzrok preranog propadanja metalnih konstrukcija [44].

Korozijski procesi se klasificiraju prema mehanizmu procesa / mediju i geometrijskom obliku korozijskog razaranja (slika 20.).



Slika 20. Klasifikacija korozijskih procesa [45]

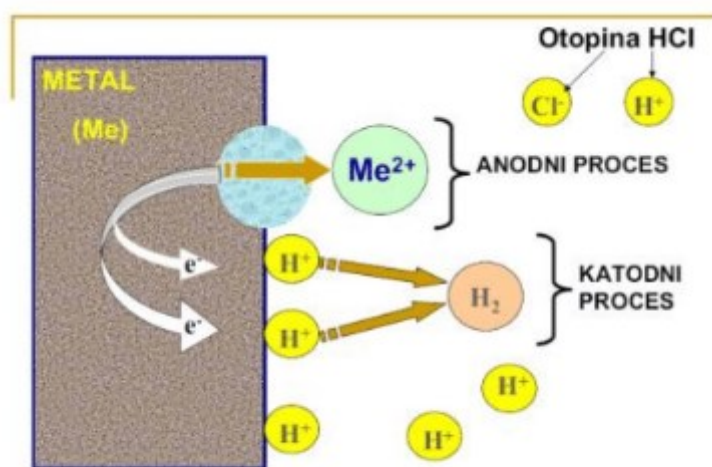
### 7.1. Kemijska korozija

Postoje dva oblika kemijske korozije. Prvi oblik nastaje djelovanjem agresivnog kemijskog elementa na površinu materijala, a odvija se direktnim sudarima atoma (reaktanta) plina i metala. Proces se odvija u ne elektrolitima, tj. u medijima koji ne provode električnu struju, a prepoznaje se po vanjskoj promjeni izgleda i pojavi opne na površini metala. Postoji i plinska korozija uzrokovana plinovima izgaranja na visokim temperaturama, a pojavljuje se kod ventila i u ispušnim cijevima motora broda. Do kemijske korozije dolazi i uslijed toplinske obrade čelika kao i pri radu uređaja na visokim temperaturama, gdje se korozijski oksidni produkt pojavljuje u obliku okuine.

Drugi oblik kemijske korozije nastaje u tekućim ne elektrolitima kao što su organske tekućine i otopine raznih supstancija u njima (npr. razaranje metala u nafti pod utjecajem sumpora ili njegovih spojeva). Organske tekućine također mogu izazvati kemijsku koroziju, ali samo ako su bezvodne jer inače dolazi do elektrokemijske korozije [45].

## 7.2. Elektrokemijska korozija

Elektrokemijska korozija je spontano razaranje metala i legura uslijed odvijanja elektrokemijskih reakcija u elektrolitima pri kojima metali ili legure sudjeluju i pritom se otapaju. Odvija se na granici faza metal/elektrolit pri čemu metal oksidira, a nastaju metalni ioni dok anioni iz elektrolita ili talina soli se reduciraju. Elektrokemijska korozija je kemijski redukcijsko-oksidacijski proces, tzv. redoks-proces u sustavu metal/elektrolit, koji se sastoji od oksidacije i redukcije. Oksidacija je reakcija kojom neka tvar oslobađa elektrone pri čemu nastaje druga tvar ili skupina tvari. U slučaju elektrokemijske korozije metala govorimo o oksidaciji metala, kao donora elektrona u slobodni kation. Pri elektrokemijskoj koroziji atom metala oksidira u slobodni kation i prelazi u elektrolit oslobađajući elektrone koji u prvom trenutku kao višak naboja zaostaju u metalu i taj proces se naziva ionizacija metala. Redukcija je reakcija kojom neka tvar veže elektrone pri čemu nastaje druga tvar ili skupina tvari. U slučaju elektrokemijske korozije metala govorimo o redukciji nekog oksidansa, tzv. depolarizatora (akceptora elektrona). Neka tvar ili skupina tvari ima ulogu depolarizatora, tj. reducira se vežući višak elektrona i to se zove depolarizacija metala [45].



Slika 21. Elektrokemijska korozija [45]

## **7.3. Geometrijski oblici korozijskog razaranja**

### **7.3.1. Opća korozija**

Opća korozija smatra se korozija koja je ravnomjerno raspoređena preko površine materijala i najčešći je tip korozije. Također je i najbenigniji budući da se razmjer djelovanja relativno lako procjenjuje, a rezultirajući utjecaj na svojstva materijala prilično se lako procjenjuje zbog mogućnosti dosljedne reprodukcije i testiranja pojave. Zbog predvidivosti ovaj tip korozije rijetko dovodi do katastrofalnih kvarova ako se vodi briga o održavanju. Ova vrsta korozije obično se javlja na relativno velikim površinama površine materijala i u mnogim je slučajevima nepoželjna samo sa stajališta izgleda. Budući da se korozija javlja ravnomjerno po cijeloj površini metalne komponente, može se praktički kontrolirati katodnom zaštitom, upotrebom premaza ili boja ili jednostavno određivanjem dopuštenja za koroziju. U drugim slučajevima ravnomjerna korozija dodaje boju i privlačnost površini. Dva najčešća slučaja u tom smislu su patina stvorena prirodnim potamnjenjem bakrenih krovova i nijanse hrđe nastale na čeliku pri raznim vremenskim utjecajima.

Kvar sustava zaštitnih premaza na konstrukcijama često dovodi do ovog oblika korozije. Zamućenje svijetle ili polirane površine, nagrizanje kiselim sredstvima za čišćenje ili oksidacija (promjena boje) čelika primjeri su opće korozije. Legure otporne na koroziju i nehrđajući čelik mogu potamniti ili oksidirati u korozivnom okruženju. Međutim, površinska korozija može ukazivati na kvar u sustavu zaštitnog premaza i treba je pažljivo ispitati radi naprednijeg napada. Ako se dopusti da se površinska korozija nastavi, površina može postati hrapava, a površinska korozija može dovesti do ozbiljnijih vrsta korozije [46].



**Slika 22. Primjer opće korozije u dekorativne svrhe [47]**

### **7.3.2. Lokalna korozija**

Lokalna korozija je najčešći oblik korozije. Dijeli se na rupičastu koroziju, potpovršinsku koroziju, pjegastu koroziju i kontaktnu koroziju (slika 23.). Uvjeti pod kojima nastaje lokalna korozija: kada su u mediju pristupačni oksidansi, koncentracija kloridnih iona, povišen i snižen pH, povišena temperatura i opća stagnacija. Lokalizirani procesi korozije mogu uzrokovati brzo otapanje mase metala što dovodi do krhkosti materijala i ranog mehaničkog kvara pri naprezanjima znatno ispod granice tečenja materijala. Lokalna korozija obično se javlja na mjestima gdje postoje nehomogenosti materijala ili promjene u lokalnom okruženju. Lokalni učinci korozije kompliciraju proces analize korozije na metalu. Uzrokuje neujednačenu degradaciju, što rezultira ranim mehaničkim kvarom, a očigledna nasumična priroda kvara može učiniti točno predviđanje mehaničkih svojstava metala izazovom [45].

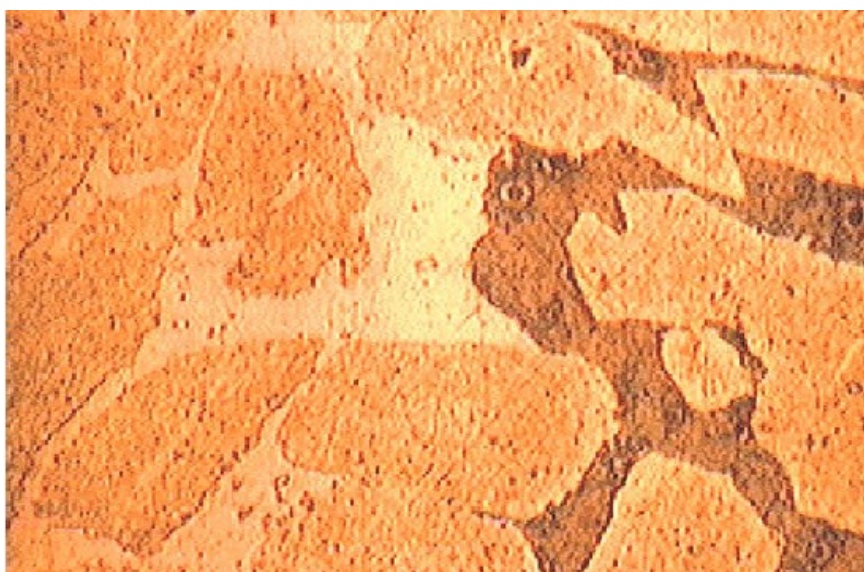


**Slika 23. Vrste lokalne korozije (rupičasta, potpovršinska, pjegasta, kontaktna)  
[48,49,50,51]**

### ***7.3.3. Selektivna korozija***

Selektivna korozija ili "selektivno otapanje", uključuje selektivno otapanje jednog od elemenata u jednofaznoj leguri ili jedne od faza u višefaznoj leguri. Korozija legura kod koje sastojci reagiraju u udjelima različitim od njihova udjela u leguri, a neke komponente/faze legure su elektrokemijski aktivnije i anodno se otapaju u galvanskom kontaktu s plemenitijim komponentama/fazama. Najvažniji primjeri selektivnog otapanja su: grafitizacija sivog lijeva i

decinkacija ili deniklizacija mjedi. Najpoznatiji primjer je uklanjanje cinka iz legure mesinga (npr. 70Cu - 30Zn). U ovom slučaju, mjed poprima crvenu bakrenu nijansu kako se cink uklanja. Također postaje porozan i vrlo krhak, bez promjene ukupnih dimenzija dijela. Ovaj se problem može prevladati odabirom legure koja je manje sklona, kao što je legura Cu-Ni bogata bakrom. Mjed s nižim sadržajem cinka ili elementima poput kositra (1%) i/ili malim količinama arsena, antimona ili fosfora ima mnogo veću otpornost. I brojne druge legure podložne su selektivnoj koroziji u određenim uvjetima [52].



**Slika 24. Selektivna korozija [52]**

#### **7.3.4. Interkristalna korozija**

Interkristalna korozija odnosi se uglavnom na korozivnu dezintegraciju na granicama zrna mikrostrukture nehrđajućeg čelika. Dezintegracija zrna koja se može pojaviti kod čelika koji ne korodiraju u kritičnom temperaturnom rasponu (od 400 do 900 °C). Javlja se uglavnom na i u području granica zrna koje su osiromašene kromom zbog toplinske obrade. U ovom procesu, ugljik koji je rastaljen u nehrđajućem čeliku posebno brzo difundira na granicama zrna. Veže se s reaktivnim kromom i difundira kao krom karbid. Slobodni krom se smanjuje u tom rasponu (osiromašenje kroma) i više nije dostupan za stvaranje zaštitnog sloja protiv korozije. Kod austenitnih čelika ovaj proces teče posebno brzo na temperaturama oko 475 °C (stvaranje Chi ( $\chi$ ) faze) i u području između 600 i 850 °C (stvaranje  $\sigma$  faze). Općenito, stvaranje interkristalne korozije može se smanjiti smanjenjem sadržaja ugljika u kemijskom sastavu nehrđajućeg čelika. Ova vrsta nehrđajućeg čelika označena je s L (engl. *Low Carbon*). Kao alternativa,

međutim, mogu se dodati reaktivni elementi (titan, niobij) koji će vezati ugljik zbog njihove velike tendencije da to učine kako bi se spriječila daljnja reakcija s kromom [53].



**Slika 25. Interkristalna korozija [53]**

## 8. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu analiziran je uzrok loma pogonskog vratila na Toyoti Corolla-i i u eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja kemijskog sastava, mikrostrukture, tvrdoće uzorka materijala pogonskog vratila s homokinetičkim zglobovom. Sva ispitivanja su provedena u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

**Tablica 8. Tijek analize uzroka kvara**

	Koraci ispitivanja
1.	Sakupljanje osnovnih informacija o kvaru
2.	Vizualni pregled pogonskog vratila s homokinetičkim zglobovom
3.	Rezanje uzorka
4.	Priprema i analiza mikrostrukture
5.	Kvantitativna kemijska analiza uzorka
6.	Mjerenje tvrdoće

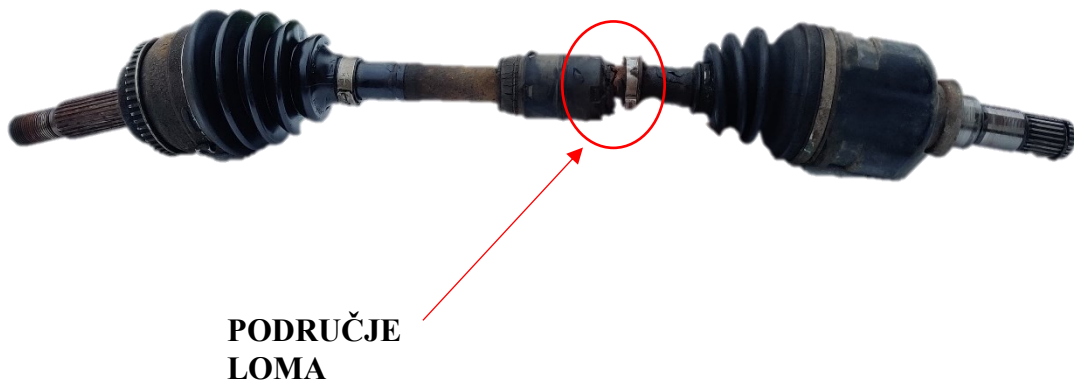
### 8.1. Sakupljanje osnovnih informacija o kvaru

Kvar pogonskog vratila se dogodilo 2022. godine tijekom vožnje na osobnom vozilu marke Toyota, modelu Corolla (deveta generacija). Osobno vozilo je 2006. godište i u trenutku loma vratila prešlo je 210 000 km. Toyota preporuča redovno godišnje pregledavanje CV pogonskih vratila i tvrdi da bi se manžeta trebala mijenjati nakon prijeđenih 200 000 km. Pogonska vratila s homokinetičkim zglobovom se ne mijenjaju nakon prijeđenog određenog broja kilometara ili nakon određenog vremenskog razdoblja, ali se preporuča redovno godišnje pregledavanje u slučaju starijih vozila. Zamjena pogonskog vratila s homokinetičkim zglobovom se radi kada se primijete znakovi istrošenosti kao što su određeni zvukovi ili masne nakupine u blizini kotača i samog pogonskog vratila. U ovom slučaju došlo je loma pogonskog vratila u blizini dinamičkog prigušivača po cijelom presjeku vratila te je daljnja vožnja motornog vozila bila onemogućena.



## 8.2. Vizualni pregled pogonskog vratila s homokinetičkim zglobom

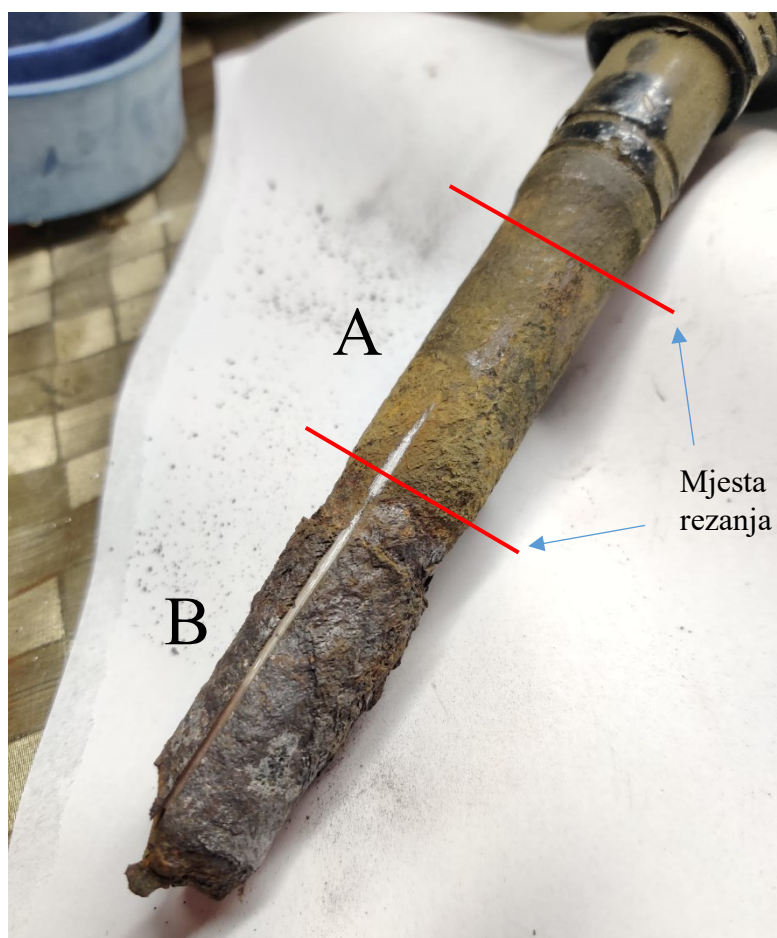
Vizualnim pregledom pogonskog vratila s homokinetičkim zglobom jasno je vidljivo mjesto loma. Na slici 26. i 27. prikazano je mjesto loma unutar dinamičkog prigušivača. Na slici 28 vidljiv je smanjen promjer samog vratila zbog djelovanja korozije. Manžete koje su najčešći problematični dio CV pogonskih vratila, su bile u dobrom stanju te nisu nigdje puštale mast koja se nalazi unutar njih u svrhu podmazivanja zglobova.



Slika 26. Područje loma promatranog pogonskog vratila



Slika 27. Mjesto loma pogonskog vratila s homokinetičkim zglobom



Slika 28. Pogonsko vratilo nakon korozijskog djelovanja

### 8.3. Rezanje uzorka

CV pogonsko vratilo je odrezano ručnom pilom na dva veća uzorka (slika 28.) pogonskog vratila (A i B) i jedan uzorak metala unutar dinamičkog prigušivača (C). Uzorci A i B pogonskog vratila i uzorak C metala unutar dinamičkog prigušivača dodatno izrezani su u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje zbog daljnjih ispitivanja.

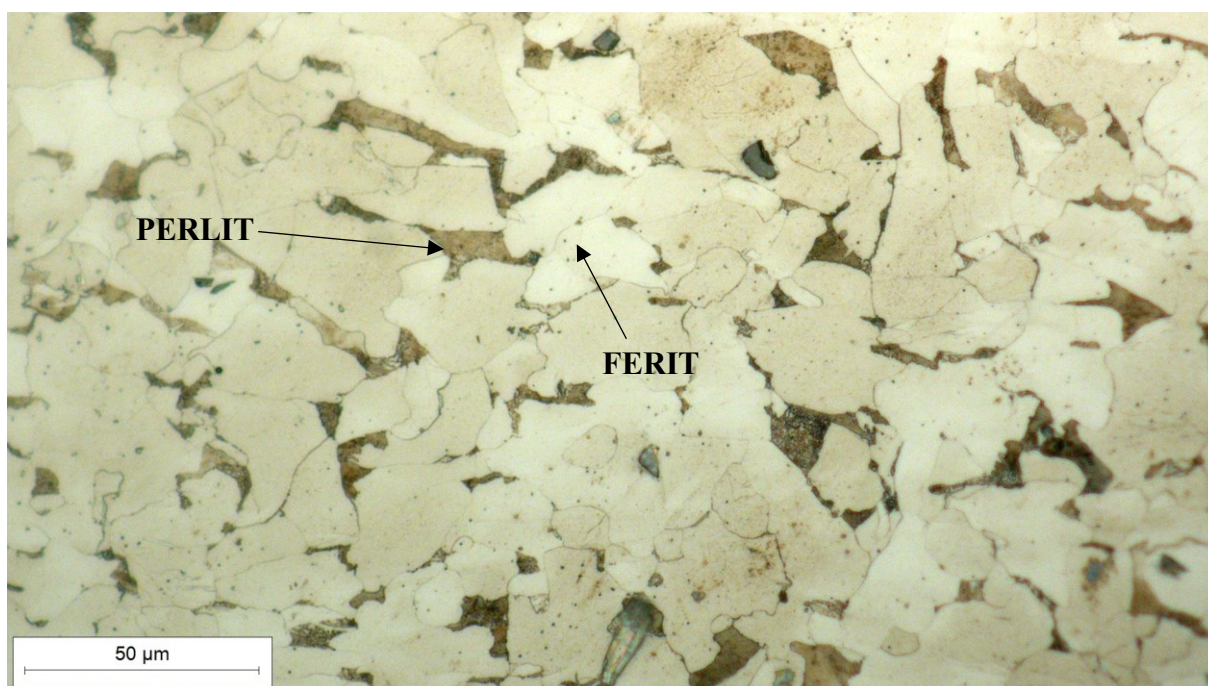


Slika 29. Uzorci pogonskog vratila i dinamičkog prigušivača nakon prvog rezanja

### 8.4. Priprema i analiza mikrostrukture

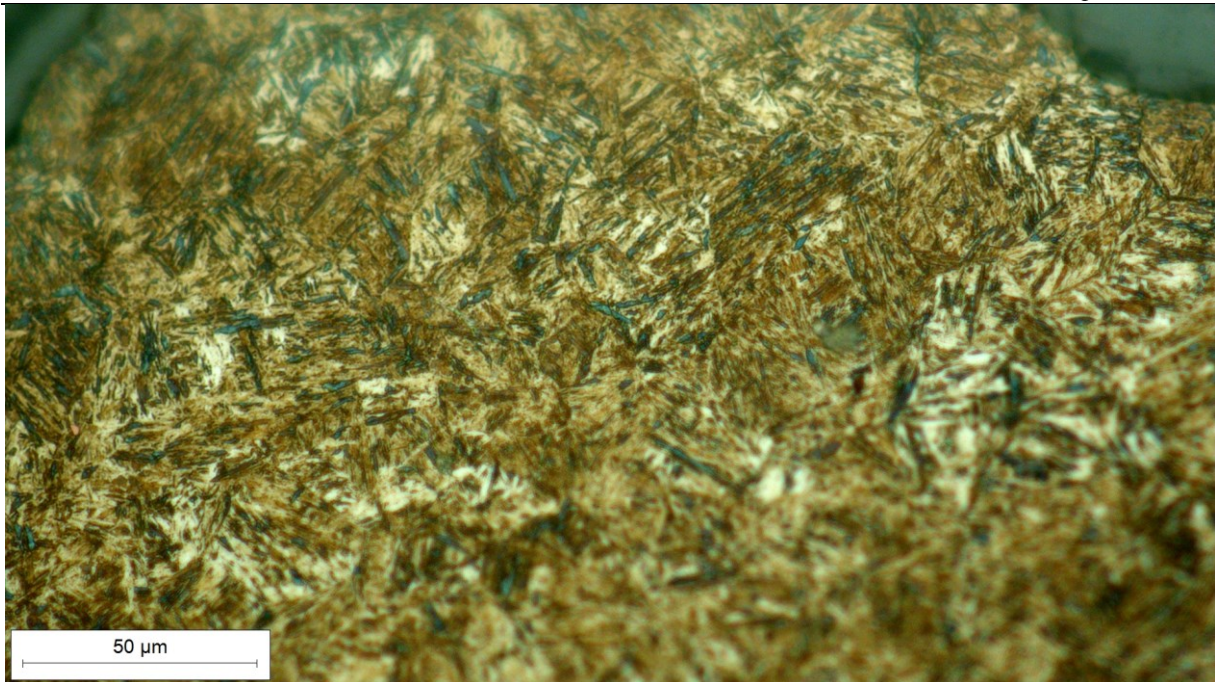
Za mikroskopsku analizu potrebno je pripremiti uzorke. Priprema uzoraka i analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za metalografiju, FSB.. Prvi korak pripreme je brušenje uzoraka koje se provodi radi uklanjanja sloja oksida, sloja prljavštine te sloja adsorbiranih plinova. Uklanjanje tih slojeva je bitno jer mogu utjecati na izgled mikrostrukture

uzorka. Brušenje je obavljeno na uređaju PRESI Mecatech 250 pri brzini okretaja ploče 300 okr/min, a za hlađenje i podmazivanje je korištena voda. Prilikom brušenja korišteni su redom slijedeći brusni papiri: P320, P600, P1200, P2400, P4000. Nakon brušenja proveden je postupak poliranja kako bi se dobila površina bez brazdi i oštećenja. Za poliranje uzorka korišten je stroj Struers DAP-V pri brzini okretaja 150 okr/min. U prvoj fazi poliranja korištena je dijamantna pasta 3  $\mu\text{m}$  kao abraziv i lubrikant, a u drugoj fazi lubrikant s dijamantnom pastom 0.03  $\mu\text{m}$ . Nakon poliranja uzorci su se nagrizli u otopini za nagrizanje kako bi se uklonio deformirani sloj i dobile reljefne površine. U ovom slučaju za nagrizanje je korišten 3% nital. Nakon pripreme uzorka provedena je analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51. Na slikama 30, 31 i 32 prikazane su mikrostrukture uzoraka.



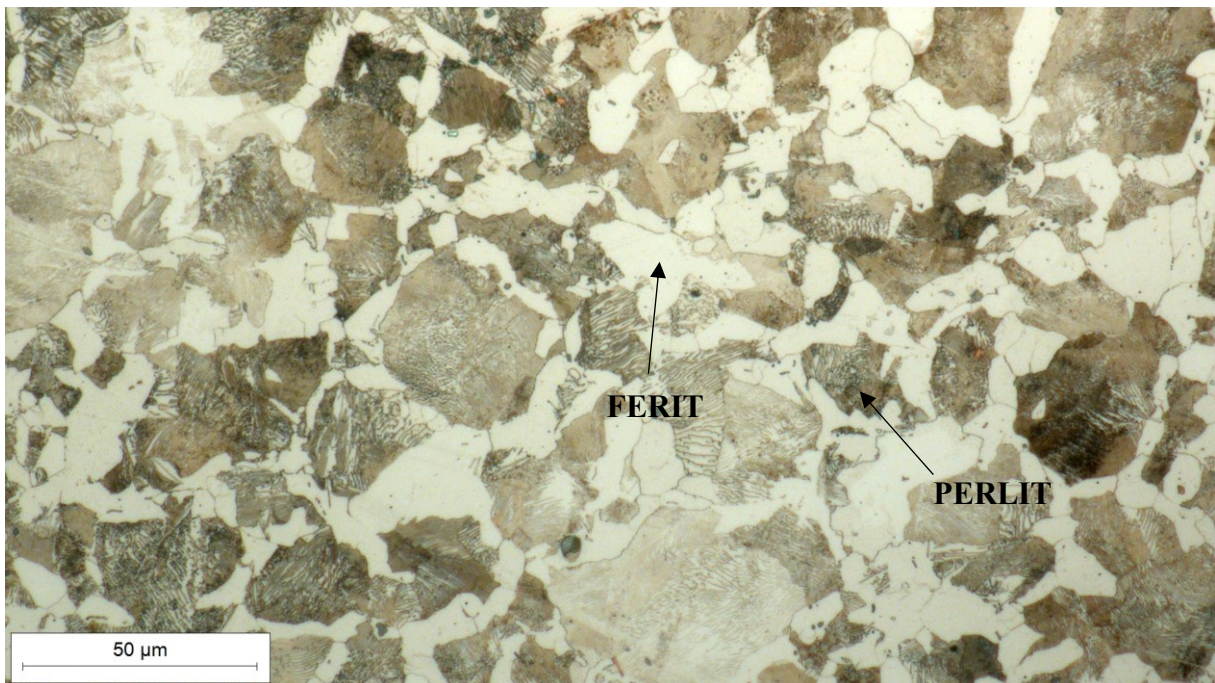
**Slika 30. Mikrostruktura uzorka C**

Na slici 30 prikazana je feritno - perlitna mikrostruktura uzorka C unutar dinamičkog prigušivača.



**Slika 31. Mikrostruktura rubnog sloja uzorka B**

Analiza rubnog sloja pogonskog vratila (uzorak B) na slici 31 prikazuje martenzitnu mikrostrukturu što daje tvrdoću i otpornost površinskom sloju pogonskog vratila.



**Slika 32. Mikrostruktura jezgre uzorka B**

Na slici 32 prikazana je feritno – perlitna mikrostruktura jezgre pogonskog vratila (uzorak B).

## 8.5. Kvantitativna kemijska analiza uzorka

U Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza uzorka pogonskog vratila. Korištena metoda određivanja kemijskog sastava uzorka je optička emisijska spektrometrija, a instrument koji je korišten za metodu je optički emisijski spektrometar GDS 850 A, LECO. Rezultati su prikazani u tablici 9.

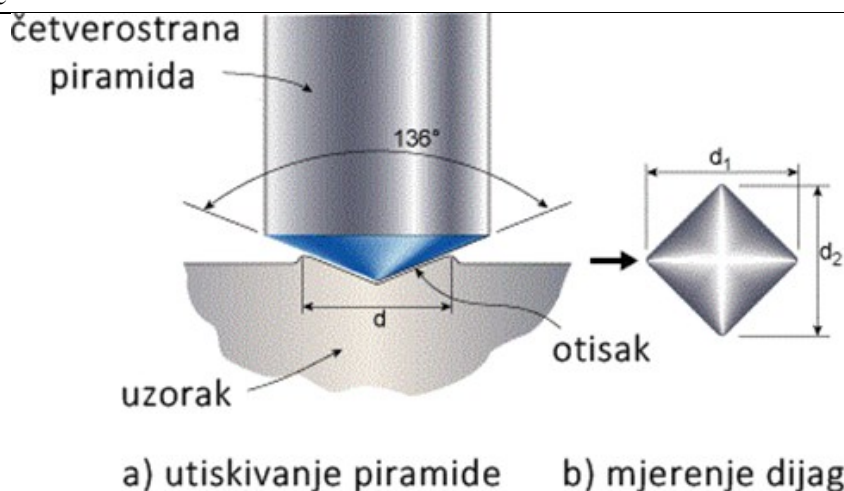
**Tablica 9. Rezultati kvantitativne kemijske analize uzorka B**

Oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
NU	0.33	0.29	0.94	0.009	0.020	0.20	0.01	0.08	0.13	ostatak

Rezultati kvantitativne kemijske analize uzorka B upućuju da je prema udjelu konstituenata riječ o čeliku C35. Kvantitativna kemijska analiza uzorka C nije bila moguća zbog premalih dimenzija uzorka.

## 8.6. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je mjerena Vickersovom metodom na metalnom dijelu unutar dinamičkog prigušivača (uzorak C) i po poprečnom presjeku pogonskog vratila od površine do jezgre (središnjeg dijela) uzorka. Ispitivanje je provedeno na tvrdomjeru Indentec ZHV  $\mu$ -ST, tako što se u površinu ispitivanog materijala (slika 33.) utisnuo dijamantni vrh u obliku četverostrane piramide, s vršnim kutom  $136^\circ$ , proizvoljnom silom  $F$ . Vickersova tvrdoća HV omjer je sile  $F$  i površine utisnutog plašta piramide  $A$ , koja se određuje mjerenjem dijagonala  $d_1$  i  $d_2$  [56].



**Slika 33. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće [57]**

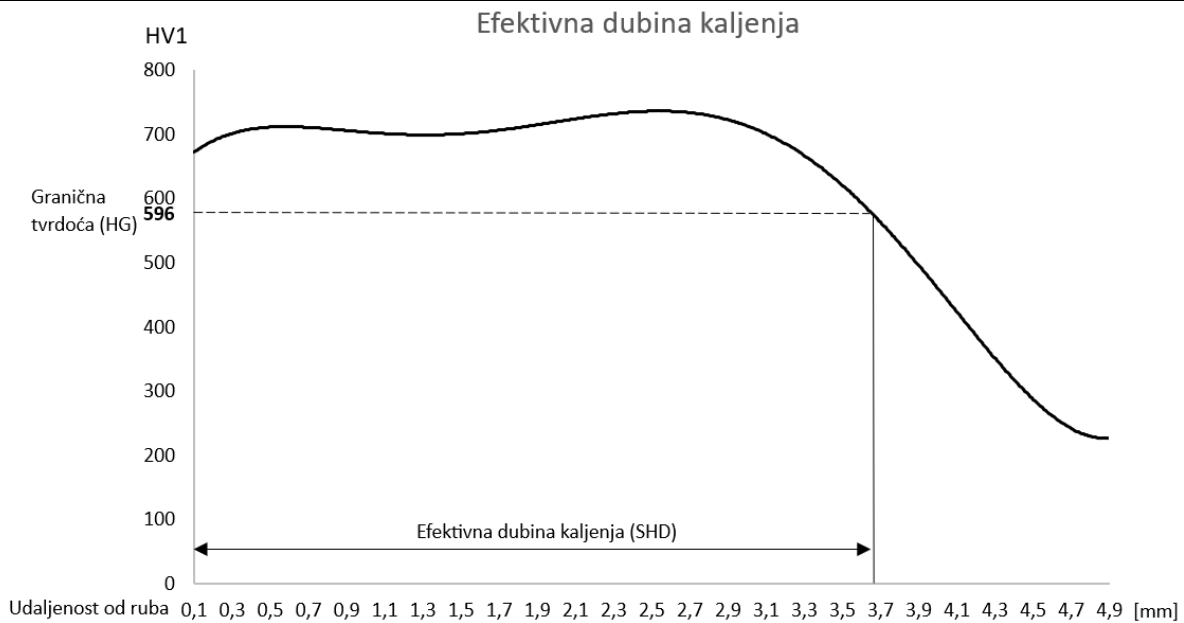
Tvrdoća je mjerena silom 9.807 N (HV1), te je za uzorak C (metalni dio unutar dinamičkog prigušivača) mjerenje obavljeno na pet različito pozicioniranih točaka mjerenja (Tablica 10), dok je za uzorak B (pogonsko vratilo) mjerenje obavljeno na dvadeset različitih točaka mjerenja od ruba uzorka prema jezgri (Tablica 11).





**Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće "Uzorka B"**

Točka mjerenja	Udaljenost od ruba na poprečnom presjeku u mm	HV1
1	0.1	665
2	0.3	725
3	0.5	707
4	0.7	694
5	0.9	700
6	1.1	683
7	1.3	719
8	1.5	694
9	1.7	745
10	1.9	719
11	2.1	725
12	2.3	732
13	2.5	713
14	2.7	713
15	3.1	677
16	3.5	683
17	3.9	494
18	4.1	412
19	4.5	271
20	4.9	235



**Slika 35. Graf efektivne dubine kaljenja uzorka B**

Prema normi DIN EN 10328 efektivna dubina kaljenja se nalazi na udaljenosti od površine na kojoj je postignuto 80% maksimalne tvrdoće površine. Efektivna dubina kaljenja (SHD) je ona udaljenost od površine obratka prema sloju gdje je tvrdoća jednaka po vrijednosti specificiranoj graničnoj tvrdoći (HG) [58]. U ovom radu efektivna dubina kaljenja (slika 35) je 3.7 mm. Iznos SHD do 5 mm je najčešća dubina indukcijskog kaljenja površine za pogonska vratila za osobna motorna vozila kako bi se dobila površina otpornija na trošenje česticama prilikom vožnje, a jezgra ostala žilava kako ne bi došlo do loma pri naletu na neravnine.

---

## ZAKLJUČAK

Nakon detaljne analize uzoraka pogonskog vratila s homokinetičkim zglobovom koja je obuhvatila :

- kemijsku analizu metodom optičke emisijske spektrometrije,
- analizu mikrostrukture uz pomoć optičkog mikroskopa,
- mjerjenje tvrdoće po Vickersu (HV1),

može se zaključiti sljedeće:

- Materijal uzorka vratila po kemijskom sastavu i mikrostrukтури odgovara čeliku za poboljšavanje **C35**
- Analizom mikrostrukture vratila (uzorka B ) vidljiva je tvrda martenzitna struktura površinskog sloja tvrdoće do 745HV1, dok je jezgra žilava, feritno-perlitna struktura tvrdoće do 596HV1
- Efektivna dubina kaljenja iznosi oko 3.7 mm pri tvrdoći od 596HV1. Prema tome se zaključuje da je postupak kaljenja ispravno proveden, te da nema nepravilnosti prilikom obrade materijala
- Analiza metalnog dijela unutar dinamičkog prstena (uzorak C) je feritno-perlitne mikrostrukture i tvrdoće 203HV1
- Glavni uzrok loma je loše postavljen dinamički prigušivač koji nije pravilno spojen s pogonskim vratilom te je dolazilo do nakupljanja vode. Nakupljanje vode je dovelo do pojave korozije koja se vremenom postepeno širila i smanjila promjer samog vratila što je dovelo do nedovoljne čvrstoće i loma vratila
- Lom se mogao spriječiti redovitim godišnjim provjerama pogonskog vratila s homokinetičkim zglobovom prema preporuci proizvođača.

---

## LITERATURA

- [1] <https://motor-car.net/innovation/drivetrain/item/14985-drive-shaft>, 18.01.2023.
- [2] <https://blogmech.com/types-of-power-transmission-to-the-wheels/>, 05.10.2023.
- [3] <https://www.caranddriver.com/features/a26962316/how-a-car-works/>, 05.10.2023.
- [4] <https://www.alamy.com/stock-photo-transparent-engine-car-on-white-background-3d-illustration-176233572.html>, 07.10.2023.
- [5] Hiroshi Yamagata: *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*, Woodhead Publishing, Cambridge England, 2005.
- [6] <https://haynes.com/en-gb/tips-tutorials/what-is-car-crankshaft>, 07.10.2023.
- [7] <https://www.kia.com/dm/discover-kia/ask/what-is-a-transmission-in-a-car.html>, 07.10.2023.
- [8] <https://www.britannica.com/technology/automobile/Transmission>, 07.10.2023.
- [9] <https://www.mechanicalbooster.com/2016/08/manual-vs-automatic-transmission.html>, 08.10.2023.
- [10] <https://www.kia.com/dm/discover-kia/ask/what-is-a-powertrain.html>, 08.10.2023.
- [11] <https://carbuzz.com/car-advice/tips-on-how-to-spot-a-bad-driveshaft>, 08.10.2023.
- [12] <https://www.uti.edu/blog/automotive/differential>, 08.10.2023.
- [13] <https://carfromjapan.com/article/car-maintenance/how-a-differential-works/>, 08.10.2023.
- [14] <https://www.tiresplus.com/blog/maintenance/what-is-drivetrain/>, 08.10.2023.
- [15] <https://www.amazon.com/Complete-Passenger-Axle-SUPERCHARGED-MODELS/dp/B00LUS5XLW>, 21.01.2023.
- [16] <https://www.autostanic.hr/blog/simptomi-kvara-poluosovine>, 21.01.2023.
- [17] [https://www.youtube.com/watch?v=tf5PO4KxYNY&ab\\_channel=AutodataTraining](https://www.youtube.com/watch?v=tf5PO4KxYNY&ab_channel=AutodataTraining), 21.01.2023.
- [18] <https://www.wikimotors.org/what-is-a-beam-axle.htm>, 21.01.2023.
- [19] <https://www.howacarworks.com/transmission/checking-the-half-shafts>, 21.01.2023.
- [20] <https://newparts.com/articles/how-does-a-cv-axle-work/>, 21.01.2023.
- [21] [https://www.scirp.org/html/9-6201338\\_20222.htm](https://www.scirp.org/html/9-6201338_20222.htm), 24.01.2023.
- [22] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6533>, 24.01.2023.
- [23] <https://www.avonmachining.com/products/axle-shafts/>, 24.01.2023.
- [24] <https://www.motortrend.com/reviews/1406-12-front-axle-upgrades-axleshaft-alternatives/>, 24.01.2023.

- [25] <https://www.wikimotors.org/what-is-an-axle-boot.htm>, 25.01.2023.
- [26] <https://www.carid.com/articles/cv-boot-repair-kits-replace-boot-not-whole-axle.html>, 25.01.2023.
- [27] <https://eduwingserp.com/x-new-universal-split-cv-boot-kit-drive-shaft-cc-11638743>, 25.01.2023.
- [28] <https://cartreatments.com/types-of-cv-joints/>, 26.01.2023.
- [29] Pier Paolo Valentini: *Effects of the dimensional and geometrical tolerances on the kinematic and dynamic performances of the Rzeppa ball joint*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, Vol 228(1), 2014, 37-49
- [30] <https://www.ssl-cvjoint.com.tw/copy-of-quality-control-1>, 26.01.2023.
- [31] Henry Toledo, Javier Martínez-Gómez, Juan Francisco Nicolalde: *Selection of rear axle tip alternative material of a car by multi-criteria means*, International Journal of Mathematics in Operational Research, Inderscience Enterprises Ltd, vol. 21(1), 2022, 46-66
- [32] <https://www.vacfurnace.com/vacuum-furnace-news/heat-treatment-process-of-automobile-half-shaft/>, 13.10.2023.
- [33] <https://xometry.eu/wp-content/uploads/2022/08/Steel-1.7218-25CrMo4.pdf>, 13.10.2023.
- [34] <https://rolledmetalproducts.com/carbon-steel-1050/>, 13.10.2023.
- [35] [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=189](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=189), 13.10.2023.
- [36] <https://www.astmsteel.com/product/en8-carbon-steel-080m40-bs-970/>, 14.10.2023.
- [37] <https://blog.thepipingmart.com/grades/c40e-steel-composition-properties-and-uses/>, 14.10.2023.
- [38] <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/45>, 14.10.2023.
- [39] <https://www.otaisteel.com/36crnimo4-alloy-steel/>, 15.10.2023.
- [40] <https://www.round-bars.com/products/c35-carbon-steel-ck35-din-1-0501/>, 15.10.2023.
- [41] <https://mr4x4.com.au/what-is-a-cv-joint-and-why-do-they-break/>, 20.10.2023.
- [42] <https://www.9thgencivic.com/threads/im-confused.227899/>, 20.10.2023.
- [43] <https://www.captoyota.com/service/information/5-signs-of-a-bad-cv-axle.htm>, 20.10.2023.
- [44] Alar Vesna, Šimunović Vinko, Juraga Ivan; *Korozija i zaštita*, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2011.
- [45] Ćurković, Lidija; *Podloge iz kolegija „Kemijska postojanost materijala“*, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2011.

- [46] <https://www.ampp.org/technical-research/impact/corrosion-basics/group-1/uniform-corrosion>, 21.10.2023.
- [47] <https://atrasim.com/forms-of-corrosion-part-i-uniform-corrosion-galvanic-corrosion/>, 21.10.2023.
- [48] <https://www.abfad.co.uk/editorial/pitting-corrosion-and-storage-tank-failure/>, 28.10.2023.
- [49] <https://www.rac.co.uk/drive/advice/how-to/car-rust-guide-how-to-remove-and-prevent-it/>, 28.10.2023.
- [50] <https://blog.belzona.com/why-you-should-be-concerned-about-pitting-corrosion-and-the-proven-solutions-to-combat-it/>, 20.10.2023.
- [51] <https://www.belmontmetals.com/galvanic-and-electrolytic-corrosion-reducing-damage-with-zinc-anodes/>, 20.10.2023.
- [52] [https://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_selective\\_gb.htm](https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_selective_gb.htm), 20.10.2023.
- [53] <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/intercrystalline-corrosion-4793/?cHash=b7df99fd3da6fe4c7ffddbde917641>, 20.10.2023.
- [54] P. Kah, J. Martikainen, P. Layus; *Methods of Evaluating Weld Quality in Modern Production (Part 1)*, Proceedings of 16th International Conference. Mechanika. 2011, Lithuania, 165-169
- [55] <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=357a6b6b51804330a9d4bf98ab10e109>, 28.10.2023.
- [56] Kraut, B.; *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb, 2009.
- [57] Gourab Saha; *Abrasive wear of alloys for ground engaging tools*, Deakin University, 2017.
- [58] M. Gojić; *Površinska obradba materijala*, Metalurški fakultet, Zagreb, 2010.