

# Analiza dotrajalosti bregaste osovine četverotaktnog motora s unutarnjim izgaranjem

---

Šućur, Nada

Master's thesis / Diplomski rad

2015

*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:235:699199>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Nada Šućur**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**ANALIZA DOTRAJALOSTI BREGASTE OSOVINE  
ČETVEROTAKTNOG MOTORA S UNUTARNJIM  
IZGARANJEM**

Mentor:

Doc. dr. sc. Suzana Jakovljević

Student:

Nada Šučur

Zagreb, 2015.

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

Veliku zahvalnost dugujem svojoj mentorici doc.dr.sc. Suzani Jakovljević na podršci i poticanju na rad, te pomoći, razumijevanju i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada. Također zahvaljujem prof.dr.sc. Darku Landeku na pruženoj pomoći i savjetima. Naposljetku zahvaljujem suprugu i obitelji na bezuvjetnoj podršci i ljubavi u najtežim trenucima.

Nada Šućur



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Nada Šućur** Mat. br.: 0035178059

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza dotrajalosti bregaste osovine četverotaktnog motora s unutarnjim izgaranjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Failure of camshaft of four-stroke internal combustion engine**

Opis zadatka:

Bregasta osovina je jedan od najvažnijih dijelova motora, a naziv joj dolazi od "brijegova" koji otvaraju i zatvaraju ventile. Bregasta osovina ima oblik čeličnog valjka s tzv. brijegovima uzduž cijele površine. U modernim motorima bregasta osovina je najčešće smještena u glavi motora, iznad cilindra, a ventili dolaze do cilindra s gornje strane. Pogon bregaste osovine uglavnom se prenosi zupčastim remenom.

U radu je potrebno:

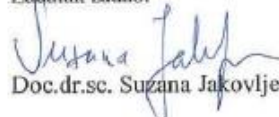
- 1) opisati tribosustav bregaste osovine i podizača ventila,
- 2) analizirati oštećenja elemenata tribosustava,
- 3) komentirati rezultate i dati zaključak.

Zadatak zadan:  
7. svibnja 2015.

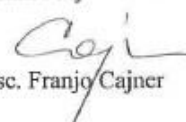
Rok predaje rada:  
9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:  
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
I POPIS SLIKA .....	II
II POPIS TABLICA .....	IVV
III POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD-MOTOR .....	1
1.1. Ottov četverotaktni motor .....	1
1.1.1. Razvodni mehanizam .....	2
1.1.1.1. Dijelovi razvodnog mehanizma .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1.2. Princip rada motora .....	8
1.1.2.1. Prvi takt - usis .....	9
1.1.2.2. Drugi takt - kompresija .....	10
1.1.2.3. Treći takt – izgaranje i ekspanzija (radni takt) .....	10
1.1.2.4. Četvrti takt - ispuh .....	11
1.1.3. Teoretski i stvarni p-v dijagram .....	12
1.1.4. Upotreba četverotaktnih motora .....	14
2. TRIBOLOGIJA .....	15
2.1. Tribosustav .....	16
2.2. Procesi trenja .....	16
2.2.1. Vrste trenja .....	17
2.2.1.1. Trenje klizanja .....	17
2.2.1.2. Trenje kotrljanja .....	18
2.3. Mehanizmi trošenja .....	19
2.3.1. Abrazijsko trošenje .....	20
2.3.2. Adhezijsko trošenje .....	24
2.3.3. Umor površine .....	27
2.3.4. Tribokorozija .....	29
2.3.5. Djelovanje mehanizama trošenja .....	29
2.3.6. Tribološke mjere .....	30
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	31
3.1. Kemijski sastav i mikrostruktura analizirane bregaste osovine .....	32
3.2. Mjerenje promjene dimenzija ispitnih uzoraka brijegova i rukavaca osovine .....	34
3.3. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) .....	35
3.4. Stereo mikroskopija .....	39
3.5. Ispitivanje tvrdoće .....	40
4. ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA .....	43
PRILOZI .....	45

## I POPIS SLIKA

Slika 1.	Konstrukcija Ottova motora [2] .....	2
Slika 2.	Razvodni mehanizam bregasta osovina – ventili [3].....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 3.	Bregasta osovina [4].....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 4.	Sklop bregaste osovine i ležajeva [5] .....	4
Slika 5.	Oblici brijegova [6] .....	4
Slika 6.	Primjer asimetrične konstrukcije brijega[7] .....	4
Slika 7.	Princip otvaranja i zatvaranja ventila [8] .....	5
Slika 8.	Proces trošenja brijega i podizača [9].....	5
Slika 9.	Viševentilska tehnika (4 ventila) [10] .....	6
Slika 10.	Konstrukcija ventila [11].....	6
Slika 11.	Ventilske opruge [12].....	8
Slika 12.	Četiri takta radnog ciklusa [14] .....	8
Slika 13.	Prvi takt - usis [15] .....	9
Slika 14.	Drugi takt - kompresija [16].....	10
Slika 15.	Treći takt – izgaranje i ekspanzija [17] .....	11
Slika 16.	Četvrti takt - ispuh [18] .....	12
Slika 17.	Teoretski dijagram četverotaktnog Otto motora .....	12
Slika 18.	Stvarni dijagram četverotaktnog Otto motora [1] .....	13
Slika 19.	Razvodni dijagram četverotaktnog Otto motora [1] .....	13
Slika 20.	Četverotaktni Otto motor [19] .....	14
Slika 21.	Primjer korisnog trenja i trošenja [21] .....	15
Slika 22.	Shema jednostavnog tribosustava [22] .....	16
Slika 23.	Primjer nepoželjnog djelovanja trenja [23] .....	16
Slika 24.	Trenje klizanja .....	17
Slika 25.	Jedinični događaj procesa klizanja[22] .....	18
Slika 26.	Trenje kotrljanja [22] .....	19
Slika 27.	Jedinični događaj abrazije [22] .....	20
Slika 28.	Abrazija u dodiru dva tijela [24] .....	20
Slika 29.	Abrazija u dodiru tri tijela [24] .....	21
Slika 30.	Mikrobrzdanje [22] .....	21
Slika 31.	Mikrorezanje [22] .....	21
Slika 32.	Mikronaprsnuća [22] .....	21
Slika 33.	Mikroumor [22] .....	22
Slika 34.	„Čista“ abrazija [22] .....	22
Slika 35.	Izgled površine – „čista“ [20] .....	22
Slika 36.	Selektivna abrazija [22] .....	23
Slika 37.	Izgled površine – selektivna [20] .....	23
Slika 38.	„Nulta“ abrazija [22] .....	23
Slika 39.	Izgled površine – „nulta“ [20] .....	23
Slika 40.	Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [20] .....	24
Slika 41.	Jedinični događaj adhezije [22] .....	24
Slika 42.	Površina s koje su adhezijom iščupane čestice [25] .....	25
Slika 43.	Površina na koju su čestice spontano navarene adhezijom .....	25
Slika 44.	Rabinowitz-ova karta tribološke kompatibilnosti [22] .....	26
Slika 45.	Jedinični događaj umora površine [22] .....	27
Slika 46.	Izgled površine oštećene umorom [26] .....	27

---

Slika 47.	Kuglasta čestica trošenja nastala umorom površine [27] .....	28
Slika 48.	Jedinični događaj tribokorozije [22] .....	29
Slika 49.	Opći oblik procesa trošenja [22] .....	30
Slika 50.	Ispitivana bregasta osovina s tragovima povećanog trošenja .....	31
Slika 51.	Najoštećeniji brijeg – ispitni uzorak .....	31
Slika 52.	Kontakt brijeg – podizač ventila [28] .....	32
Slika 53.	Mikrostruktura materijala brijegova (povećanje 1000 puta) .....	33
Slika 54.	Mikrostruktura materijala osovine (povećanje 1000 puta) .....	33
Slika 55.	Bregasta osovina sa oznakama brijegova i rukavaca .....	34
Slika 56.	Princip rada SEM [31] .....	36
Slika 57.	Tescan Vega TS5136 [32] .....	36
Slika 58.	SEM analiza – brijeg broj 1 .....	37
Slika 59.	SEM analiza – brijeg broj 3 .....	37
Slika 60.	SEM analiza – brijeg broj 5 .....	37
Slika 61.	SEM analiza – brijeg broj 7 .....	37
Slika 62.	SEM analiza – brijeg broj 4 .....	38
Slika 63.	SEM analiza – brijeg broj 8 .....	38
Slika 64.	SEM analiza – osovina (rukavci ležajeva) .....	38
Slika 65.	Rupice nastale umorom površine – brijegovi .....	39
Slika 66.	Tragovi trošenja – osovina .....	39
Slika 67.	Tvrdoća po Vickersu (indentor i otisak) [33] .....	40
Slika 68.	Tvrdoća po Rockwellu (indentor) [34] .....	41



## **II POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kemijski sastav materijala brijega .....	32
Tablica 2. Duljine brijegova po simetrali (od baze do vrha).....	35
Tablica 3. Promjeri rukavaca.....	35
Tablica 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće HV1 po dubini rubnog sloja brijega.....	40
Tablica 5. Rezultati ispitivanja tvrdoće HV1 za materijal osovine.....	41
Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće HRC za neke od brijegova .....	41

### III POPIS OZNAKA

<u>Oznaka</u>	<u>Opis</u>	<u>Mjerna jedinica</u>
$p$	Tlak	Pa
$V$	Volumen	$m^3$
$\mu$	Faktor trenja	-
$F_{tr}$	Sila trenja	N
$F_n$	Normalna sila	N
$\Sigma F_1$	Otpor na elastičnu deformaciju	N
$\Sigma F_2$	Otpor na plastičnu deformaciju	N
$\Sigma F_3$	Otpor na brazdanje	N
$\Sigma F_4$	Otpor na kidanje adhezijskih veza	N
$\mu_{kotr}$	Faktor kotrljanja	-
G	Težina	N
$H_a$	Tvrdoća abraziva	HV
$H_m$	Tvrdoća osnovnog materijala	HV
$\Delta V$	Promjena volumena	$mm^3$
t	Vrijeme	h
$d_1$	Duljina dijagonale	mm
$d_2$	Duljina dijagonale	mm
$d$	Srednja vrijednost dijagonale	mm
HV	Tvrdoća po Vickersu	HV
HRC	Tvrdoća po Rockwellu	HRC
$R_e$	Granica razvlačenja	$N/mm^2$
$R_m$	Vlačna čvrstoća	$N/mm^2$
$R_{mt}$	Tlačna čvrstoća	$N/mm^2$
$R_{ms}$	Savojna čvrstoća	$N/mm^2$

## **SAŽETAK**

U radu je analizirana dotrajalost i oštećenje bregaste osovine četverotaktnog motora s unutarnjim izgaranjem, koji su doveli do nepravilnog rada motora. Bregasta osovina je jedan od najvažnijih dijelova motora, a naziv joj dolazi od brijegova, uzduž cijele površine, koji otvaraju i zatvaraju ventile. Trajanje otvorenosti, brzine otvaranja i zatvaranja, te hod ventila određeni su oblikom brijegova. U modernim konstrukcijama motora, bregasta osovina je najčešće smještena u glavi motora, iznad cilindra. Pogon bregaste osovine uglavnom se prenosi zupčastim remenom. Nepravilan rad bregaste osovine može dovesti do ozbiljnih kvarova i nepravilnog rada motora, što je bio slučaj na konkretnom primjeru koji se analizira. Analizom elemenata i oštećenja tribosustava, pokušat će se dati odgovor na pitanje što je dovelo do oštećenja bregaste osovine (brijegovi i rukavci ležajeva), te koji mehanizam trošenja je prisutan. U sklopu eksperimentalnog dijela ispitana je tvrdoća pripremljenih uzoraka, te je provedena elektronska mikroskopija i analiza kemijskog sastava uzoraka.

Ključne riječi: bregasta osovina, četverotaktni motor, brijegovi, glava motora, tribosustav, mehanizmi trošenja

## **SUMMARY**

The main theme of this research is damage and failure of camshaft of four-stroke internal combustion engine. The damage of camshaft has caused problems that occurred while engine was working. Camshaft is one of the most important parts of the engine and the name comes from “cam” or “cams”, which are designed to open and close valves. The shape of cams determine speed and duration for opening and closing valves. In modern engine designs camshaft is placed in head of engine, above the cylinders. The propulsion of camshaft is transferred with timing belt. Failure of camshaft can cause malfunction and damage of engine, which was exactly case in analysed example. The main problem is to detect what has caused the damage of camshaft (triboelements) and which wear mechanism was present (in this tribosystem). Hardness examination, SEM analysis of the wear marks and chemical composition analysis were performed within experimental part.

Key words: camshaft, four-stroke engine, cams, head of engine, tribosystem, wear mechanism

## 1. UVOD –MOTOR

Motor je stroj koji pretvara neki oblik energije u mehanički rad. Toplinski motori su strojevi koji pretvaraju toplinsku energiju (sadržanu u kemijskim gorivima) u mehanički rad [1]. Postoji nekoliko glavnih podjela automobilskih motora ovisno o promatranim karakteristikama [1].

Motori se mogu podijeliti ovisno o mjestu izgaranja goriva na:

- 1) Motore s vanjskim izgaranjem (gorivo izgara izvan radnog prostora)
- 2) Motore s unutarnjim izgaranjem (gorivo izgara neposredno unutar radnog prostora)

Kod motora s unutarnjim izgaranjem iskoristivost kemijske energije goriva vrlo je visoka, te nisu potrebni posrednici ni dodatni uređaji.

Motori s unutarnjim izgaranjem mogu se podijeliti prema nekoliko karakteristika. Prema stvaranju smjese i paljenju (termodinamičkom procesu) motore dijelimo na:

- 1) Otto motore
- 2) Dizelske motore

Prema radnim taktovima motori mogu biti:

- 1) Dvotaktni – radni ciklus odvija se u 2 takta (1 okretaj radilice), otvorena izmjena plinova
- 2) Četverotaktni – radni ciklus odvija se u 4 takta (2 okretaja radilice), zatvorena izmjena plinova

Prema smještaju cilindra razlikuju se:

- 1) Redni motori
- 2) V-blok motori
- 3) Bokser motori
- 4) VR-motori

Podjela prema gibanju klipova:

- 1) Motori s potisnim klipovima
- 2) Motori s rotacijskim klipovima

Podjela prema načinu hlađenja:

- 1) Tekućinom hlađeni motori
- 2) Zrakom hlađeni motori

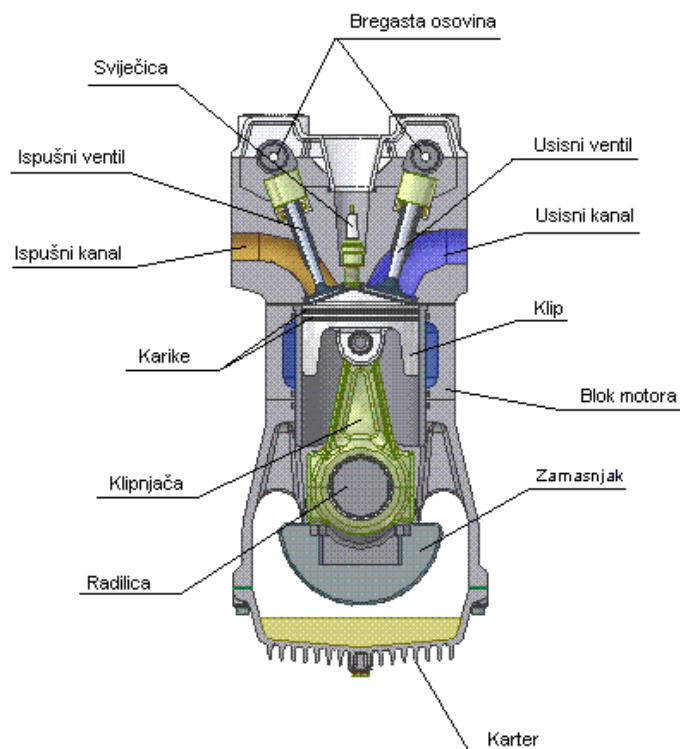
### 1.1. Ottov četverotaktni motor

Četverotaktni motor je motor koji svoj radni ciklus obavi u 4 takta, tj. dva kruga koljenastog vratila. Četverotaktni Ottov motor, ima 4 osnovna dijela i dodatne sustave [1]:

- 1) Kućište motora - karter, blok motora, glava motora, poklopac glave, brtva
- 2) Klipni mehanizam - klipovi, klipnjače, koljenasto vratilo
- 3) Razvodni mehanizam - ventili, podizači ventila, opruge, bregasta osovinica, remeni ili lančani prijenos
- 4) Sustav za stvaranje smjese - spremnik, pumpa, filter goriva, usisna cijev, sustav ubrizgavanja

## 5) Dodatni sustavi – sustav za paljenje, podmazivanje, hlađenje

Na slici 1. prikazana je konstrukcija Ottova motora.



**Slika 1. Konstrukcija Ottova motora [ 2]**

### 1.1.1. Razvodni mehanizam

Budući da je glavna tema rada analiza dotrajnosti i oštećenja bregaste osovine, naglasak će se staviti na teoretsko objašnjenje rada tog dijela motora i drugih bliskih dijelova.

Zadatak razvodnog mehanizma je upravljanje izmjenom radnog medija kroz otvore za usis i ispuh, tj. mehanizam određuje trenutak otvaranja i zatvaranja otvora.

Razvodni mehanizam dobiva pogon od radilice (koljenastog vratila) preko zupčastog remena, lančastog prijenosa ili zupčanika na bregastu osovinu. Brijegovi bregaste osovine preko prijenosnih članova, podizača, suprotstavljajući se silama opruga ventila otvaraju usisne i ispušne ventile. Sile opruge potom zatvaraju ventile. Kako se radni proces odvija tijekom četiri takta, tj. dva okreta radilice, a ventili se pritom pokreću samo jednom, bregasta osovinica mora imati dvostruko manji broj okretaja od radilice. Zupčanik bregaste osovine u odnosu na zupčanik radilice, mora imati dvostruko više zubaca. Prijenosni omjer između radilice i bregaste osovine je 2:1.

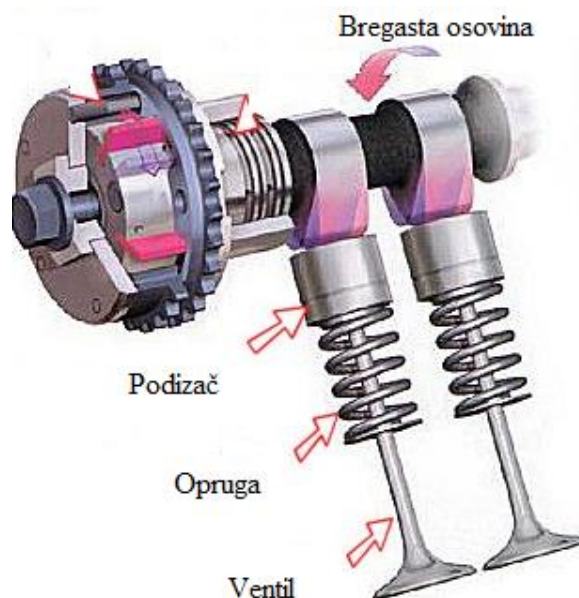
Položaji ventila mogu biti prema [1]:

- 1) Viseći – otvori se zatvaraju gibanjem ventila prema gore. Motori s visećim ventilima nazivaju se OHV motori (*eng.* over head valves – ventili u glavi motora)
- 2) Ležeći ili stojeći – gibanjem ventila prema dolje zatvaraju se otvori. Ventili su smješteni sa strane, pa je oblik prostora izgaranja nepovoljan. Motori s takvim ventilima nazivaju se i SV motori (*eng.* side valves)

Razvodni mehanizam prema položaju bregaste osovine dijelimo na:

- 1) Donji razvod
- 2) Gornji razvod – npr. OHC (bregasta osovina iznad glave motora), DOHC (dvije bregaste osovine iznad glave motora), CIH (bregasta osovina je smještena u glavi motora)

Na slici 2. prikazan je razvodni mehanizam.



**Slika 2. Razvodni mehanizam bregaste osovine – ventili [3]**

#### 1.1.1.1. Dijelovi razvodnog mehanizam

##### 1) Bregasta osovina

Bregaste osovine (brijegovi) su dijelovi koji pretvaraju rotacijsko gibanje u translacijsko. Na bregastoj osovini (slika 3.) smješteni su brijegovi za podizanje ispušnih i usisnih ventila. Zadatak bregaste osovine je zatvaranje i otvaranje ventila određenim redoslijedom i u određenom trenutku. Brijegovi usisnih i ispušnih ventila pomaknuti su za određeni kut. Vremena i redoslijed otvaranja ventila određena su položajem brijegova. Trajanje otvorenosti, brzine otvaranja i zatvaranja, te hod ventila određeni su oblikom brijega.

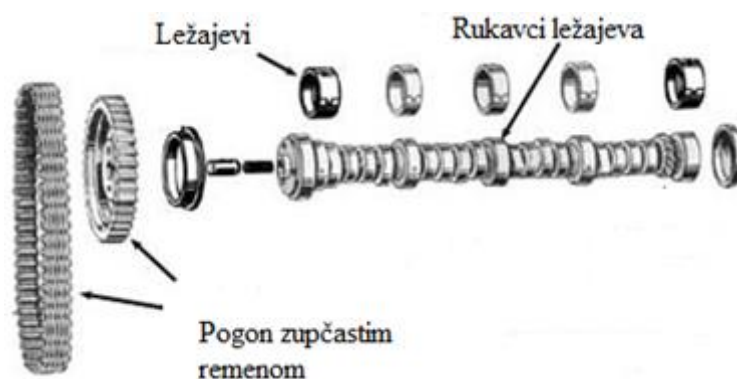


**Slika 3. Bregasta osovina [4]**

Okrećući se, brijeg počinje pritiskati na podizač ventila, koji gura ventil prema sredini cilindra, omogućujući time dotok smjese zraka i goriva. Daljnjim okretom osovine spušta se

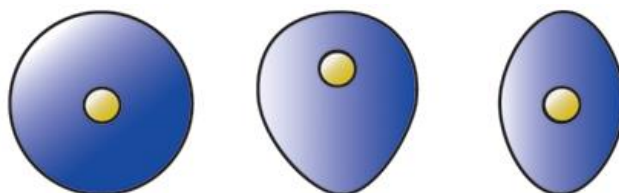
vrh brijega s podizača ventila, a opruga ventila uzrokuje vraćanje ventila u poziciju zatvaranja. Budući da bregasta osovina direktno djeluje na punjenje cilindra smjesom goriva i zraka, ali i ispuh plinova, poboljšanje u njenom radu može donjeti mjerljive rezultate u boljem radu motora [1].

Bregasta osovina je fiksirana na mjesto ležajevima (slika 4.), a u situaciji kad je između ležajeva i rukavaca prevelik zazor dolazi do nepravilnog rotiranja osovine (jačeg oštećenja i trošenja), što na kraju može uzrokovati nepravilan rad motora. Ovaj problem će biti dodatno razmatran u nastavku rada.

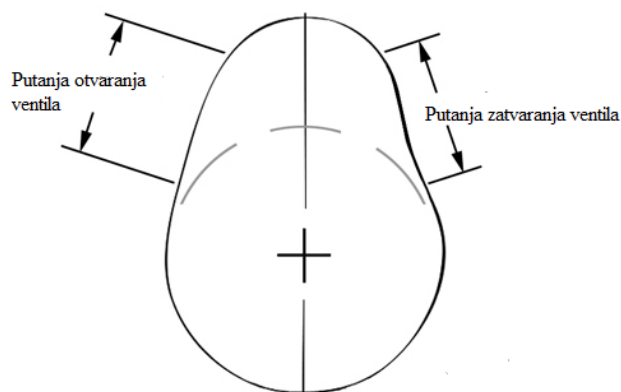


Slika 4. Sklop bregaste osovine i ležajeva [5]

Oblici brijegova mogu biti različiti npr. okrugli, jajoliki, eliptični, itd. (slika 5.). Često uzlazne i silazne putanje brijegova nisu simetrične (slika 6.).



Slika 5. Oblici brijegova [6]

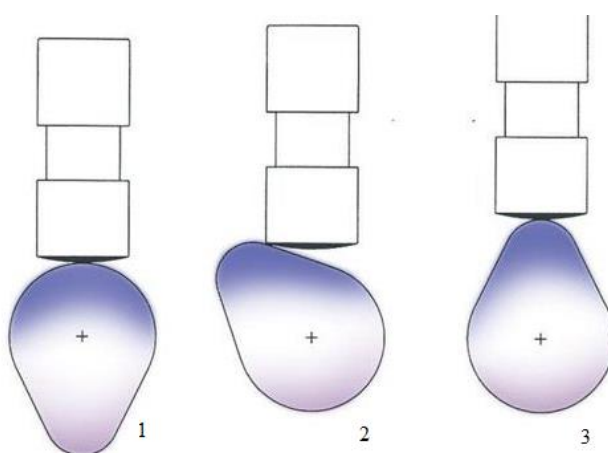


Slika 6. Primjer asimetrične konstrukcije brijega [7]



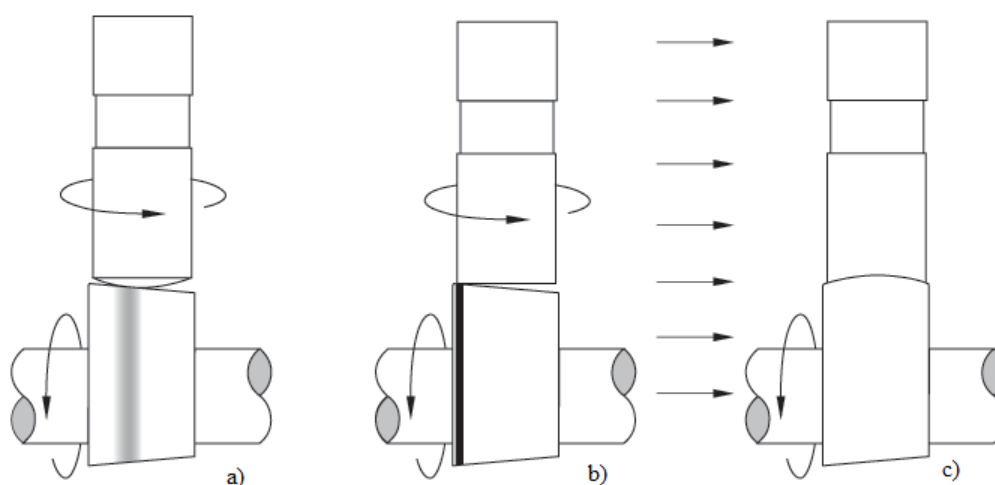
Desetljećima su konstrukcije brijegova bile simetrične, no kad su se uočile prednosti asimetričnog dizajna, sve je češće bio u upotrebi. Prednost je svakako manja brzina pri zatvaranju ventila, što osigurava manje trošenje između tribopara brijeg-podizač ventila. Kao što se može vidjeti sa slike 6., što je strmija putanja otvaranja i zatvaranja ventila, to će se oni brže otvarati i zatvarati, no za stabilan rad potrebno je slijediti optimalne dimenzije. Kod otvaranja teži se većoj brzini, a kod zatvaranja ipak nešto smirenijem zatvaranju ventila, upravo je zato pogodna asimetrična konstrukcija.

Otvaranje i zatvaranje ventila (slika 7.) funkcionira na način da se u trenutku okretanja brijega, kada podizač klizi po uzlaznoj putanji brijega (prema tzv. „špicu“) ventil otvara (omogućujući usis smjese zraka i goriva ili pak ispuh plinova), sve do maksimalne visine brijega, nakon koje počinje zatvaranje ventila. Dakle dok se podizač „uspinje“ na eliptični dio brijega započinje otvaranje ventila, a nakon što prijeđe vrh elipse brijega, započinje zatvaranje ventila [1].



Slika 7. Princip otvaranja i zatvaranja ventila [8]

Problem može nastupiti ukoliko se kod podizača ventila potrošila kruna sa skošenjem, što može uzrokovati koncentrirani dodir ruba brijega i podizača, koji nakon nekog vremena rezultira pretjeranim trošenjem i nepravilnostima u radu (slika 8.). Također problem može uzrokovati i nepravilno podmazivanje.



Slika 8. Proces trošenja brijega i podizača [9]

## 2) Ventili

Svaki cilindar četverotaktnog motora ima najmanje jedan usisni (UV) i jedan ispušni ventil (IV). Promjer i hod ventila tako su odabrani da se izmjena plinova odvija uz što manje otpore. Zbog boljeg brtvljenja ventili se otvaraju prema cilindru, čime tlak izgaranja pripomaže brtvljenju. Ispušni ventil vrlo često ima manji promjer od usisnog, jer visok tlak ispušnih plinova pri njegovu otvaranju osigurava brzo pražnjenje prostora izgaranja.

Radi brže izmjene plinova postavlja se više istovrsnih ventila (viševentilska tehnika) (slika 9.). Manji otpori strujanju povisuju snagu motora zbog većeg koeficijenta punjenja. Kombiniraju se dva ili tri usisna s jednim ili dva ispušna ventila. Prednost viševentilske tehnike je manja težina ventila, tj. manja inercija uz velike površine otvora (manja mehanička opterećenja na sjedala, opruge i površine brijegova). Najčešća izvedba u viševentilskoj tehnici je sa 4 ventila. Dva veća usisna stavljena su nasuprot dva manja ispušna ventila. Za takav pogon potrebne su dvije bregaste osovine: jedna upravlja usisnim, a druga ispušnim ventilima [1].

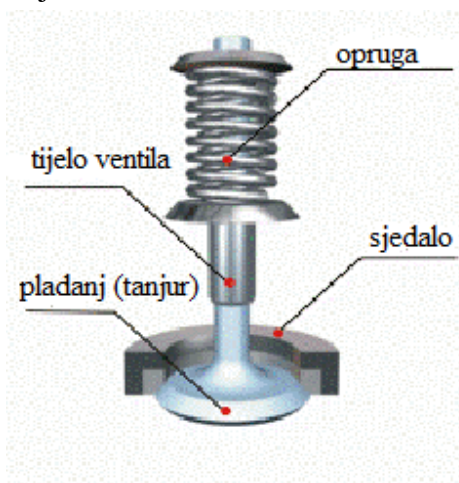


**Slika 9. Viševentilska tehnika (4 ventila) [10]**

Kod konstrukcije ventila razlikuje se [1]:

- 1) tijelo ili struk
- 2) pladanj ili tanjur

Konstrukcija ventila prikazana je na slici 10.



**Slika 10. Konstrukcija ventila [11]**

Kako pladanj ventila sjeda na sjedište i brtvi prostor izgaranja, ono mora biti fino tokareno ili fino brušeno. Na tijelu ventila nalazi se utor ili više žljebova u koje zahvaćaju konusni segmenti, tlačeni tanjurićem opruge.

Budući da su ventili izloženi visokim mehaničkim i toplinskim opterećenjima (zatvaraju i otvaraju do 3000 puta u minuti), trošenju su najviše izložene dosjedne plohe i gornji dijelovi tijela ventila, a raskivanju pladanj.

Iako se usisni ventili intenzivno hlade tijekom usisa, postižu temperature i do 500°C. Usisni su ventili izrađeni obično od jednog materijala, niskolegiranog ili austenitnog ugljičnog čelika. Površine izložene trošenju, otvrdnute su nekim od postupaka toplinske obrade.

Ispušni ventili zbog vrelih ispušnih plinova jako su toplinski opterećeni (do 800 °C na pladnju). Na njih djeluje i visokotemperaturna kemijska korozija. Stoga se najčešće izrađuju kao bimetalni ventili. Pladanj i donji dio struka izloženi izgarnim plinovima izrađeni su od vatrostalnih čelika otpornih na koroziju, a gornji dio struka izrađen je od čelika za kaljenje s vrlo dobrim vođenjem topline. Spajaju se zavarivanjem (npr. čeonu). Za ispušne ventile koriste se Cr-Ni, Cr-Ni-W ili Cr-Ni-Mo čelici [1].

Porastom temperature motorni se dijelovi više ili manje rastežu (dilatiraju), a veličina rastezanja ovisi o razlici temperatura i materijalu. Osim dilatacije, dimenzije dijelova mijenjaju se i zbog trošenja. Da bi usisni i ispušni ventili mogli pri svojim pogonskim uvjetima uspješno zatvarati, između prijenosnih elemenata postoji određena zračnost, pa dijelovi mogu dilatirati. Zbog zračnosti ventil se zatvara udarcem dosjedne plohe pladnja na sjedalo ventila. Takvo udaranje pomalo raskiva obje plohe. Ukoliko je prevelika zračnost, ventili kasnije otvaraju i prije zatvaraju, uz primjetno lupanje snaga motora je smanjena (slabije punjenje cilindra) i veća su mehanička naprezanja (trošenje brjegova, vrha struka ventila i klackalica). Ako je pak riječ o premaloj zračnosti, ventili ranije otvaraju i kasnije zatvaraju. Kako su kraće vrijeme i ne potpuno zatvoreni, toplina se s pladnja ventila kreće i slabije odvodi na sjedalo. Zbog toga se ventili pregrijevaju, propuštajući sve veću količinu ispušnih plinova. Zbog zagrijavanja struk ventila se iskrivljuje i sve slabije brtvi, što vodi gubitku kompresije i smanjenoj snazi motora. Vodicice ventila imaju zadatak vođenja i hlađenja ventila. Materijal vodicice ne smije se previše trošiti i mora osigurati dobro podmazivanje pri povišenim temperaturama (obično sivi lijev, lijevačka bronca) [1].

U cilindarske glave moraju se ugraditi i posebna prstenasta sjedala ventila. Materijal sjedala mora biti postojan na toplinu i trošenje, te izgaranje. Takva se zasebna sjedala ventila mogu zamijeniti ukoliko se istroše ili pregore. Materijal od kojih se izrađuju sjedala je visokolegirani čelik ili specijalni sivi lijev. Sjedala ventila obično imaju kut konusa koji odgovara onom na pladnju ventila [1].

### 3) Opruge (ventilske)

Bregasta osovina, svojim potiskivanjem, daje dijelovima ventilskeg mehanizma velika ubrzanja. Nastale sile mogu biti toliko velike da podizači više ne prate oblik brijegova. Zadatak ventilske opruge (slika 11.) je spriječiti odvajanje podizača od brijegova, ublažiti udarce i titraje nastale zbog ubrzanja ili usporenja masa i prenijeti sile na ostale dijelove motora. Sile nastale ubrzanjem i usporenjem masa ovise o broju okretaja, obliku brijegova i samoj masi ubrzavanih dijelova sustava. Konstrukcijski gledano je poželjno da dijelovi ventilskeg mehanizma budu lakši. Zbog oslabljivanja opruga motor gubi snagu. Koriste se

isključivo torzijske zavojne opruge (s promjenjivim usponom ili promjerom žice zbog izbjegavanja pojave rezonancije) [1].



Slika 11. Ventilske opruge [12]

#### 4) Prijenosi

Razvodni mehanizam dobiva pogon od radilice preko zupčastog remena, lančastog prijenosa ili zupčanika na bregastu osovinu.

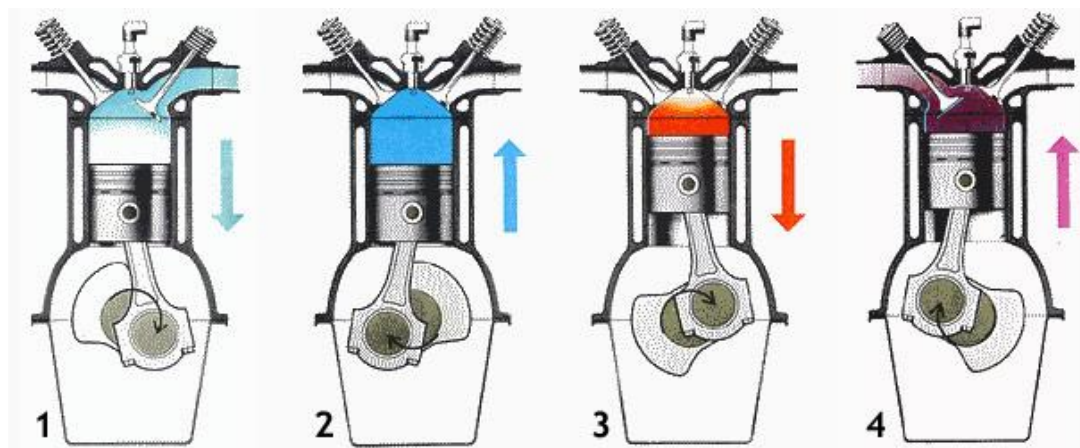
Remenski prijenos sa zupčastim remenom – zupčasti remen izrađen je iz umjetnih materijala. Armatura iz staklenih vlakana preuzima vlačne sile i ograničava istezanje remena. Remenica ima bočni graničnik koji sprječava padanje remena u radu. Značajke ovakvog vida prijenosa su: mala masa, tihi rad, jeftina konstrukcija, male sile zatezanja, nema potrebe za podmazivanjem.

Lančani prijenos – primjenu nalazi u prijenosu većih sila, te kad se vremena otvaranja i zatvaranja ventila moraju strogo zadržavati. Prigušenju buke doprinose klizna staza i dodatno gumirani lančanik na radilici. Kako se lanac podmazuje uljem iz kartera, lančani prijenos je smješten unutar bloka (pogodan za donji razvod).

Zupčasti prijenos – koristi se kad je bregasta osovinu smještena u bloku motora. Primjenjuje se koso ozubljenje čelnika zbog tišeg prijenosa [1].

#### 1.1.2. Princip rada motora

Krajnje točke gibanja klipa zovu se mrtve točke. Budući da cilindri stoje okomito, razlikujemo donju (DMT) i gornju (GMT) mrtvu točku. Takt je hod klipa od jedne do druge mrtve točke. Budući da se kod četverotaktnog Otto motora radni proces odvija unutar 4 takta (slika 12.), za to vrijeme radilica napravi dva, a bregasta osovinu jedan puni okretaj. Za svaki okretaj radilice klip napravi dva hoda od jedne do druge mrtve točke [13].



Slika 12. Četiri takta radnog ciklusa [14]

## 1.1.2.1. Prvi takt – usis

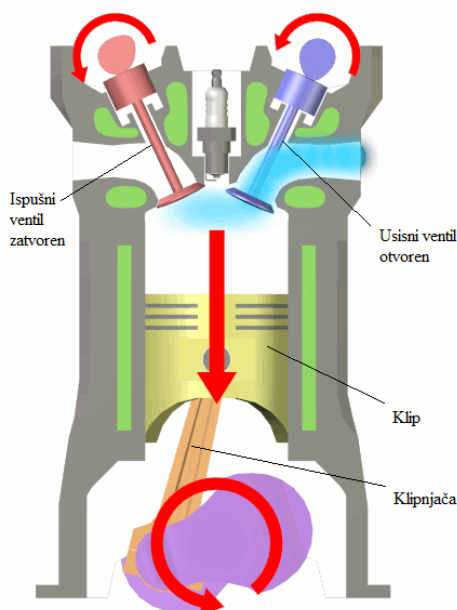
Prvi takt (slika 13.) započinje otvaranjem usisnog ventila  $10^{\circ}$ - $30^{\circ}$  prije GMT, a završava njegovim zatvaranjem  $40^{\circ}$ - $60^{\circ}$  poslije DMT. Klip se giba od GMT prema DMT, volumen se povećava, zbog čega u cilindru nastaje podtlak od 0,7-0,8 bara, pa u njega ulazi smjesa goriva i zraka brzinom približno 100 m/s. Temperatura u cilindru je približno  $50$ - $120^{\circ}\text{C}$ . U nekih starijih motora u kojih se klip i ventili ne mogu dodirnuti usisni ventil je potpuno otvoren u GMT pa u njih usis započinje ranije, no u većini slučajeva gdje je moguć dodir ventila i klipa usis započinje kasnije. U svakom slučaju, ventil je potpuno otvoren tek kad se klip dovoljno odmakne od GMT. Kod nekih motora u klipu su urezani utori za ventile kako bi usis mogao početi ranije. Kut otvaranja i zatvaranja ventila ovisi i o obliku brijegova bregaste osovine. Oštrijim brijegovima ventili se otvaraju i zatvaraju brže pa to utječe na početak njihova pomicanja.

Kasnije zatvaranje usisnog ventila (nakon DMT) događa se zbog dva razloga.

Prvi razlog je da smjesa koja struji usisnim kanalima ima određenu inerciju. Osim toga, kad klip stigne u DMT, tlak u cilindru je ispod atmosferskog i potreban je određeni pomak klipa prema GMT da se tlak u cilindru izjednači s atmosferskim. Zbog toga smjesa ulazi i onda kad se klip počne gibati prema gore. Najbolji trenutak za zatvaranje usisnog ventila je onaj kad se smjesa na ventilskom otvoru zaustavi prije nego što bi je klip počeo vraćati kroz usisne kanale, tj. nešto prije postizanja atmosferskog tlaka na ventilskom otvoru.

Drugi razlog kasnijeg zatvaranja usisnog ventila je skraćenje drugog takta. Za komprimiranje ili stlačivanje usisne smjese potrebno je uložiti određeni rad. Što kasnije započinje drugi takt, manje će se energije utrošiti za komprimiranje smjese i motor će raditi sa većim stupnjem iskoristivosti.

Koliko će smjese ući u cilindar ovisi o volumenu cilindra, veličini ventila, konstrukciji usisnih kanala, tlaku pod kojim se smjesa nalazi i temperaturi smjese. Veća količina smjese je poželjnija jer neposredno utječe na povećanje tlaka izgaranja i povećanje sile koja djeluje na klip. Omjer između volumena smjese koja je ušla u cilindar i radnog volumena cilindra naziva se stupanj punjenja. Veći stupanj punjenja znači povećanje snage motora uz neznatno povećanje potrošnje goriva [13].



Slika 13. Prvi takt – usis [15]

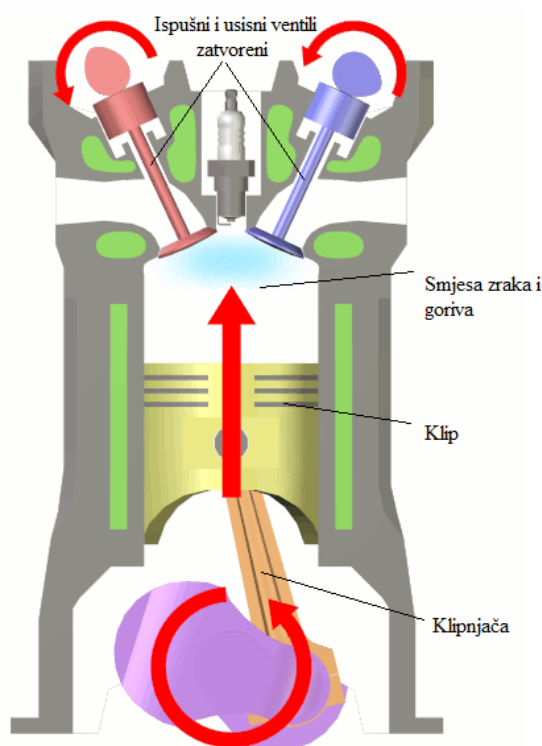
### 1.1.2.2. Drugi takt – kompresija

Drugi takt (slika 14.) započinje zatvaranjem usisnog ventila,  $40^{\circ}$ - $60^{\circ}$  poslije DMT i traje sve do GMT. Klip se giba prema GMT, volumen se smanjuje, a tlak i temperatura rastu. Usisana smjesa komprimira se na 7 do 12 puta manji volumen od usisanog. Omjer između ukupnog volumena cilindra i kompresijskog volumena naziva se omjer kompresije. Što je veći omjer kompresije, to će biti bolji stupanj iskorištenja motora, što znači da motori za jednaku potrošnju goriva, a s višim omjerom kompresije, imaju veću snagu. Omjer kompresije ograničen je temperaturom samozapaljenja goriva jer s povišenjem tlaka raste i temperatura. Temperatura kompresije iznosi približno  $400$ - $500^{\circ}\text{C}$ . Tlak kompresije iznosi 10 do 20 bara. Ako se prilikom kompresije ne postigne tlak koji je naveden u tehničkim podacima motora, snaga će biti manja, a potrošnja veća [13].

Uzrok smanjenja tlaka kompresije može biti [13]:

- 1) Propuštanje komprimirane smjese između prstena i cilindra
- 2) Propuštanje kroz usisne i ispušne cilindre
- 3) Propuštanje kroz brtvu glave
- 4) Propuštanje kroz pukotine u glavi ili cilindru

Uzrok povećanja tlaka kompresije je propuštanje ulja u cilindar motora.



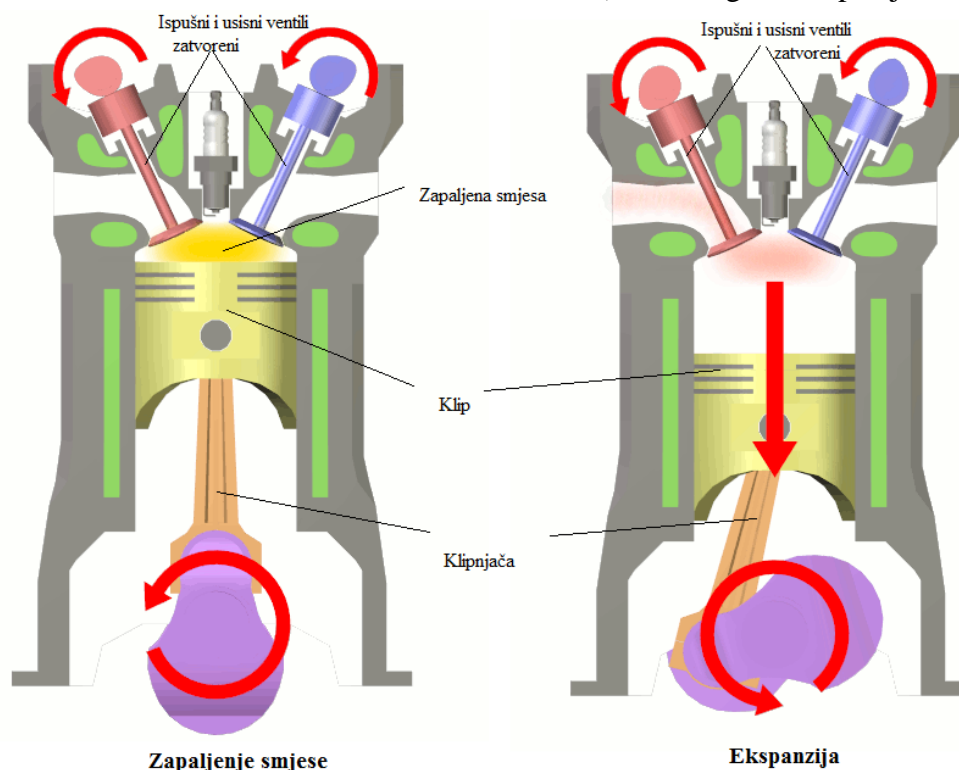
**Slika 14. Drugi takt – kompresija [16]**

### 1.1.2.3. Treći takt – izgaranje i ekspanzija (radni takt)

Treći takt (slika 15.) započinje u GMT zapaljenjem i izgaranjem smjese, a završava otvaranjem ispušnog ventila  $40$  do  $50^{\circ}$  prije DMT. Nakon zapaljenja počinje izgaranje smjese zbog kojeg se temperatura povisi na  $2000$  do  $2700^{\circ}\text{C}$ , a tlak na  $40$  do  $60$  bara. Nastali tlak djeluje na čelo klipa silom koja pomiče klip prema DMT. Izgaranje goriva odvija se samo na



prvom dijelu klipa prema DMT, dok na drugom dijelu vreli plinovi ekspandiraju potiskujući klip. Ovo je jedini takt u kojem se dobiva koristan rad. Paljenje mora uslijediti u pravom trenutku kako bi maksimalni tlak bio što bliže GMT, a bez negativnih posljedica.

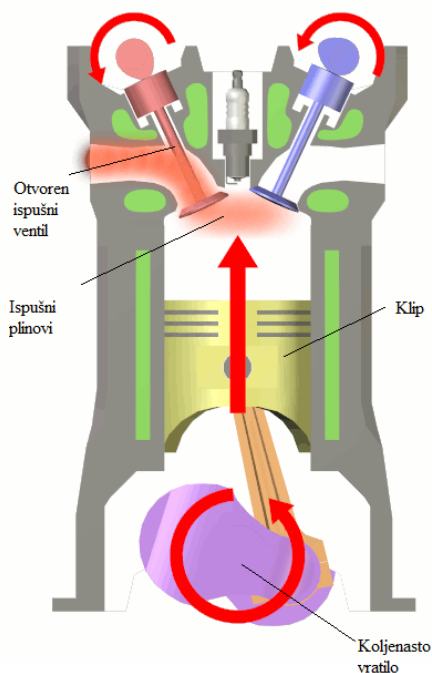


Slika 15. Treći takt – izgaranje i ekspanzija [17]

Time se postiže minimalna potrošnja goriva uz maksimalnu snagu. Ispušni ventili otvaraju 40 do 50° prije nego što klip dođe u DMT, pa dio plinova izlazi iz cilindra vlastitim tlakom. Time se gubi nešto korisnog rada, ali zato klip u taktu ispuha ima manji protutlak, a to znači da motor ima veću snagu. Ono što je bitno naglasiti za radni takt je da se energija vrelih plinova (toplina) pretvara u mehanički rad [13].

#### 1.1.2.4. Četvrti takt – ispuh

Četvrti takt (slika 16.) započinje otvaranjem ispušnog ventila 40 do 50° prije DMT i završava njegovim zatvaranjem 4 do 30° poslije GMT. Ispušni plinovi iz cilindra potiskuju se kretanjem klipa od DMT prema GMT. Jedan dio plinova, zbog višeg tlaka, izlazi u atmosferu odmah po otvaranju ispušnog ventila (predispuh), a kad se klip počne gibati od DMT prema GMT on izbacuje ostatak plinova. Na kraju radnog takta ispušni plinovi imaju 3-5 bara i do 900 °C, pa prolazeći preko ispušnih ventila još uvijek ekspandiraju i ulaze u ispušni vod velikom brzinom, što im daje prilično veliku inerciju. Zato ispušni ventili zatvaraju i do 22 ° nakon GMT, kako bi se iskoristila velika brzina ispušnih plinova radi čišćenja izgarnog prostora. Osim toga na kraju ispuha u cilindru se pojavljuje podtlak, što daje mogućnost otvaranja usisnih ventila i prije GMT. Na kraju ispuha kao i na početku usisa, otvoreni su i usisni i ispušni ventili. Takvim prekrivanjem ventila povisuje se koeficijent punjenja cilindra [13].



Slika 16. Četvrti takt – ispuh [18]

### 1.1.3. Teoretski i stvarni p-v dijagram

Radni ciklus četverotaktnog motora, najlakše je radi razumijevanja pratiti u teoretskom p-v dijagramu (slika 17.).

Prvi takt – od 1' do 1 – klip se giba od GMT prema DMT i usisava zrak u cilindar

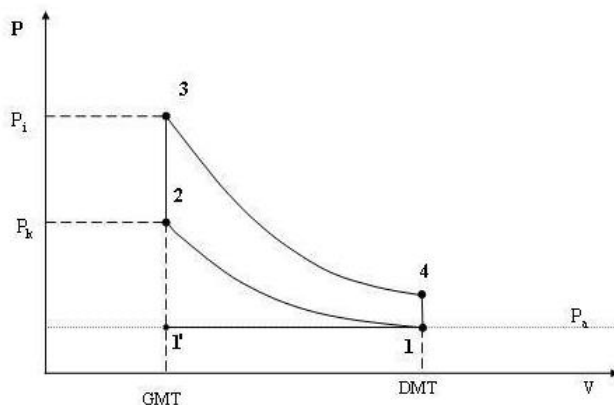
Drugi takt – od 1 do 2 – klip se giba od DMT prema GMT i komprimira smjesu goriva i zraka unutar cilindra, u točki 2 odvija se trenutno zapaljenje smjese goriva i zraka

Treći takt – od 2 do 3 izgaranje, te od 3 do 4 ekspanzija

Četvrti takt - od 4 do 1 slobodan ispuh (pad tlaka na atmosferski), te od 1 do 1' ispuh tjeran gibanjem stapa, u točki 1' zatvara se ispušni ventil, a otvara usisni

Idealni p-v dijagram dobiva se uz određene pretpostavke:

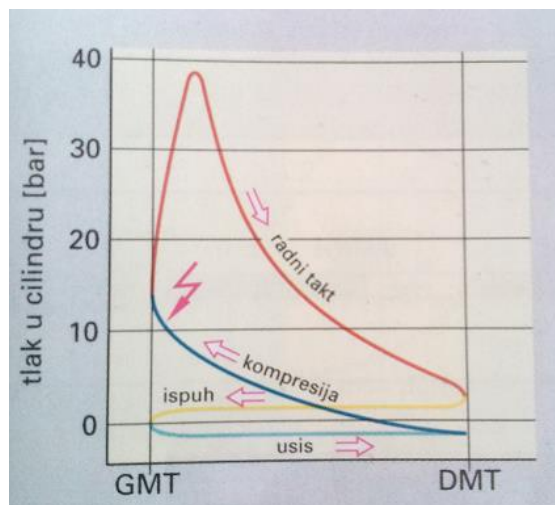
- 1) U cilindru nema zaostalih plinova izgaranja
- 2) Izgaranje je potpuno, a radni medij ne izmjenjuje toplinu s cilindrom
- 3) Izgaranje je trenutačno, odvija se pri konstantnom volumenu
- 4) Nema gubitaka kroz klipne prstenove



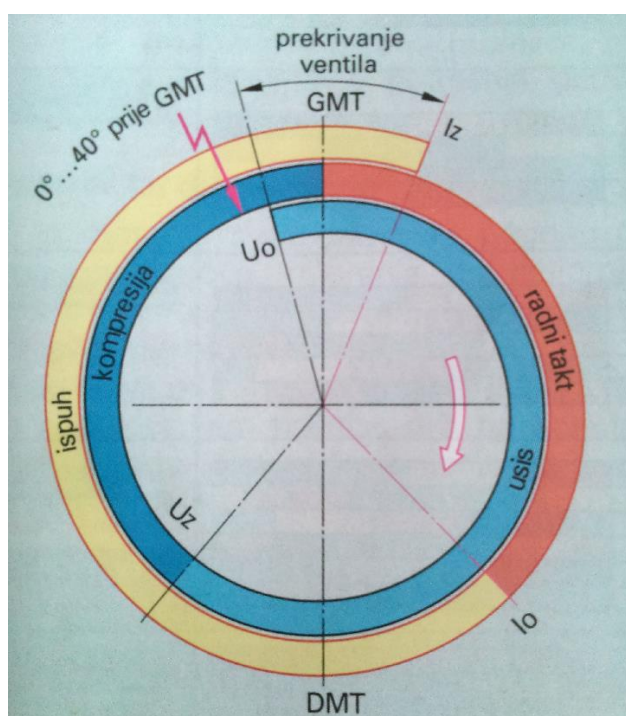
Slika 17. Teoretski dijagram četverotaktnog Otto motora [13]



U stvarnosti p-v dijagram Otto motora znatno odstupa od teoretskog (idealnog). Izgaranje nije i ne smije biti trenutačno. Također ne mogu se zanemariti gubici zbog lošeg brtvljenja i izmjene topline s cilindrom [13].



Slika 18. Stvarni dijagram četverotaktnog Otto motora [1]



Slika 19. Razvodni dijagram četverotaktnog Otto motora [1]

Razvodni dijagram pokazuje otvaranje i zatvaranje ventila u ovisnosti o položaju, odnosno hodu radilice. S razvodnog dijagrama se može vidjeti prekrivanje ventila, te kut otvaranja i zatvaranja ventila u odnosu na GMT i DMT. Kut otvaranja ventila i oblik brijegova bregaste osovine eksperimentlano se utvrđuju za svaku konstrukciju motora kako bi se dobila maksimalna snaga uz minimalnu potrošnju goriva. Kako se promjenom broja okretaja i opterećenjem motora mijenjaju optimalna vremena otvaranja i zatvaranja ventila, odabir je

uvijek kompromisno rješenje. Kutovi otvaranja i zatvaranja ventila razlikuju se od motora do motora, tako da svaki motor ima svoj vlastiti razvodni mehanizam [1].

#### **1.1.4. Upotreba četverotaktnih motora**

Četverotaktni motori danas imaju vrlo široku primjenu. Najraširenija primjena je u automobilske industriji, koja uz vrlo male izuzetke skoro isključivo upotrebljava četverotaktne motore. Također velika i sve češća primjena četverotaktnih motora je u brodogradnji (brodovi i brodice), kao porivni motori ili agregati za električnu energiju. Vanbrodski motori koji su nekad bili dvotaktni, danas se izrađuju kao četverotaktni zbog manje štetnog utjecaja na okoliš. No za veće motore koji se upotrebljavaju na brodovima i dalje se dosta koriste dvotaktni motori, zbog većeg stupnja iskorištenja. Visoka učestalost radnih ciklusa dvotaktnih motora (u odnosu na četverotaktne) daje ravnomjerniji okretni moment, ali dovodi do povećanog zagrijavanja elementa i mehanizma motora, čime se ugrožava podmazivanje, povećava habanje, smanjuju mehaničke karakteristike materijala, a time i skraćuje radni vijek dvotaktnih motora. Stoga se zaključno može reći da su danas četverotaktni motori prvi izbor za većinu namjena i polako istiskuju dvotaktne motore iz upotrebe [1]. Na slici 20. prikazan je primjer četverotaktnog motora (BMW).



**Slika 20. Četverotaktni Otto motor –BMW [19]**

## 2. TRIBOLOGIJA

Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju, te o pratećim aktivnostima [20]. Također se može reći da je tribologija znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja [20]. Trenje i trošenje su procesi koje čovjek poznaje još iz pradoba (npr. paljenje vatre, transport, itd.), a mogu biti korisni (slika 21.), ali i štetni. Tako bi bez trošenja bila nemoguća obradba odvajanjem čestica, ali nepoželjno trošenje stvara pak goleme gubitke materijala. Bez trenja bi bilo kakav oblik transporta na zemlji bio onemogućen, ali ono uzrokuje također goleme nepoželjne gubitke energije.



Slika 21. Primjer korisnog trenja i trošenja – kočenje automobila [21]

Tribologija je interdisciplinarna znanost i crpi znanja iz nekih fundamentalnih znanosti: kemije, fizike, matematike, mehanike, mehanike fluida, metalurgije, znanosti o materijalima i strojarstva [20].

Glavna područja primjene tribologije su dijelovi mehaničkih konstrukcija (npr. zupčanici, ležaji, klizni elementi, itd.), materijali (npr. novi materijali, keramika, polimeri, metali, itd.), obradba materijala (npr. alatni materijali, sredstva za hlađenje i podmazivanje, lakoobradljivi materijali, itd.), te podmazivanje (npr. ulja, masti, aditivi, itd.) [20].

U mnogim primjenama sve više raste potreba za smanjenjem trenja i trošenja zbog produžetka vijeka trajanja radnih sustava, povećanja efikasnosti radnih sustava, smanjenja troškova održavanja, smanjenja troškova zastoja, poboljšanja pouzdanosti, povećanja sigurnosti, očuvanja oskudnih izvora materijala, očuvanja energije, smanjenja otpada, itd.

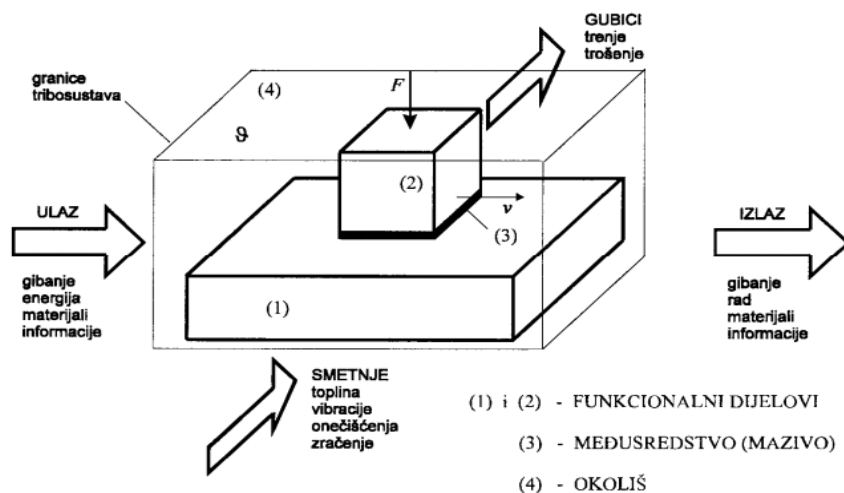
Tribološke mjere (postupci i metode) koje imaju za cilj postizanje prihvatljivih vrijednosti trenja i trošenja u realnim tribosustavima mogu se podijeliti na [20]:

- 1) Izbor materijala triboelemenata
- 2) Zaštita površina od trošenja
- 3) Uhodavanje
- 4) Podmazivanje

Nakon što je objašnjeno na koji način se tribologija bavi problemom trenja i trošenja, u daljnjem tekstu biti će opisani različiti mehanizmi trošenja, te na primjeru bregaste osovine četverotaktnog motora biti će definirani mehanizmi trošenja koji se javljaju u zadanom primjeru.

## 2.1. Tribosustav

Pri rješavanju triboloških problema treba uzeti u obzir sve dijelove tribosustava (slika 22.), uvjete rada, protok kroz sustav (gibanja, energije, materijala i informacija), smetnje, gubitke i sva važna međudjelovanja [22].



Slika 22. Shema jednostavnog tribosustava [22]

Na ovaj će se način pokušati razraditi konkretan problem bregaste osovine kod koje je došlo do oštećenja (trošenja) brijegova i rukavaca ležajeva, s ciljem otkrivanja koji mehanizam tj. mehanizmi trošenja su nastupili i što je uzrok tome.

## 2.2. Procesi trenja

Trenje je sila ili otpor koja se suprotstavlja relativnom kretanju krutih tijela u dodiru. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja [20]. Riječ trenje dolazi od glagola trti, trljati, *engl.* friction, *lat.* Fricare.

Iako kao što je to već navedeno postoje slučajevi gdje je trenje vrlo korisno. U većini slučajeva, u uređajima i postrojenjima, trenje je štetna i nepoželjna pojava (slika 23.). Na savladavanje sile trenja kao otpora kretanju bilo koje vrste troši se znatna količina mehaničke energije. Kao posljedica trenja na površinama u kontaktu dolazi do trošenja i zagrijavanja materijala površina. Utrošena mehanička energija prelazi u nepoželjnu i izgublenu toplinsku energiju [20].



Slika 23. Primjer nepoželjnog djelovanja trenja [23]

### 2.2.1. Vrste trenja

Podjela trenja prema agregatnom stanju tijela u kontaktu [22]:

- 1) Trenje među čvrstim površinama (vanjsko trenje)
- 2) Trenje među dijelovima fluida, odnosno između čvrstog tijela i fluida (tekućinsko trenje ili viskoznost)

Vanjsko trenje se pak dijeli prema podmazivanju na [22]:

- 1) Suho trenje
- 2) Trenje uz podmazivanje

Prilikom pokretanja tijela razlikujemo [22]:

- 1) Trenje mirovanja (statičko trenje)
- 2) Trenje kretanja (dinamičko trenje)

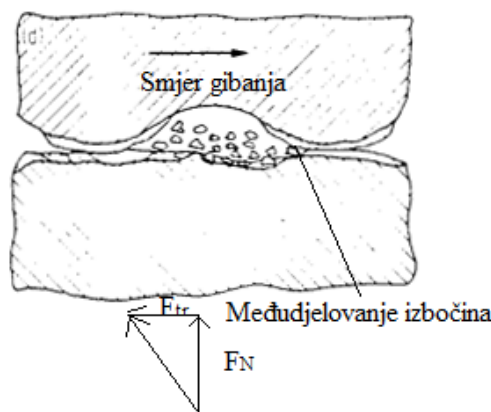
Faktor proporcionalnosti koji povezuje silu trenja i normalnu silu zove se faktor trenja. Često se koristi i naziv koeficijent trenja.

Faktor trenja je dakle bezdimenzijski omjer sile trenja između dva tijela i normalne sile kojom tijela pritišću jedno o drugo [22]:

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_N} \quad (1)$$

Za ostvarenje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba svladati silu trenja. Razlikuju se trenje klizanja i trenje kotrljanja.

#### 2.2.1.1. Trenje klizanja



Slika 24. Trenje klizanja [22]

Za trenje klizanja vrijedi (slika 24.):

- 1) Sila trenja djeluje suprotno smjeru relativnog gibanja
- 2) Kod suhog dodira sila trenja proporcionalna je normalnom opterećenju
- 3) Sila trenja ne ovisi o nominalnoj dodirnoj površini

Sila trenja klizanja sastoji se od zbroja 4 komponente koje su i same zbroj pojedinačnih komponenta koje djeluju na svakom dodiru mikroizbočina [22].

$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4 \quad (2)$$

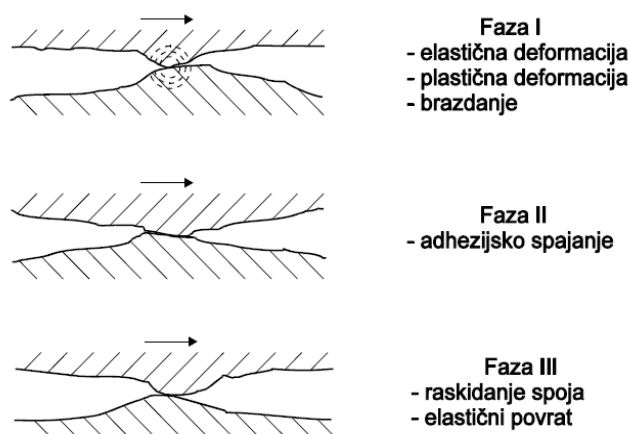
$\Sigma F_1$  - otpor na elastičnu deformaciju

$\Sigma F_2$  - otpor na plastičnu deformaciju

$\Sigma F_3$  - otpor na brazdanje

$\Sigma F_4$  - otpor na kidanje adhezijskih veza

Otpor na elastičnu deformaciju proporcionalan je modulima elastičnosti materijala tarnog para, otpor na plastičnu deformaciju ovisi o njihovim granicama tečenja, otpor na brazdanje ovisi o njihovim duktilnostima, a otpor na kidanje adhezijskih veza ovisi o jačini adhezijske veze uspostavljene između materijala tarnog para [22].



**Slika 25. Jedinični događaj procesa klizanja [22]**

Jedinični događaj procesa klizanja (od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina) kojim se objašnjava porijeklo sile trenja (slika 25.).

Na trenje utječu kemijski sastav materijala, stanje obrade površine oba tijela, sastav okoline, opterećenje, brzina kretanja, način kretanja, vrsta kontakta, temperature, prethodno klizanje po toj površini [22].

### 2.2.1.2. Trenje kotrljanja

Trenje kotrljanja je otpor što se pojavljuje pri kotrljanju kružnih ploča, kotača ili valjaka. Općenito vrijedi da je ovo trenje mnogo manje nego trenje klizanja. To je zbog toga što u slučaju ovog trenja izostaju komponente sile trenja koje potječu od brazdanja i raskidanja adhezijskih veza. Zato vrijedi [22]:

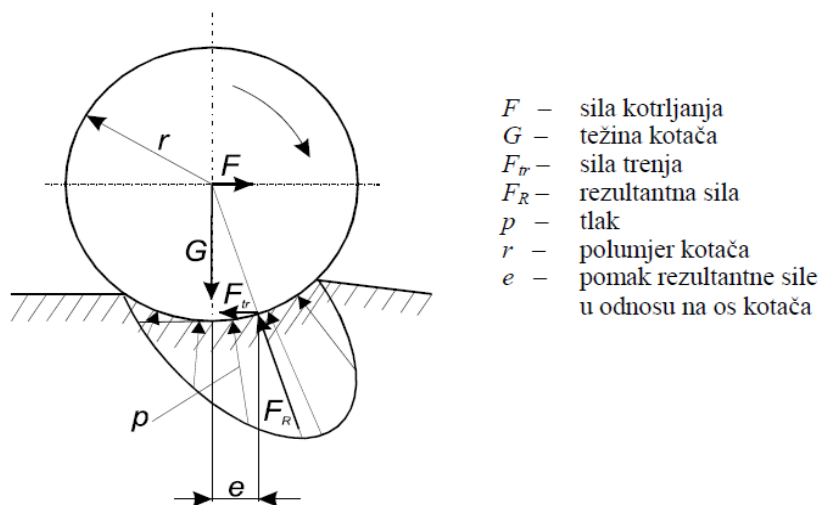
$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 \quad (3)$$

$\Sigma F_1$  - otpor na elastičnu deformaciju

$\Sigma F_2$  - otpor na plastičnu deformaciju



Približno opterećenje krutog kotača što se kotrlja po deformabilnoj podlozi prikazano je na slici 26.



Slika 26. Trenje kotrljanja [22]

Izraz koji povezuje silu trenja i težinu kotača [22]:

$$F_{tr} = \frac{e}{r} G = \mu_{korr} G \quad (4)$$

Faktor kotrljanja koji je omjer sile otpora i težine, a sličan je faktoru statičkog i kinetičkog trenja, ovisi o brojnim čimbenicima koje je vrlo teško pobrojati i opisati.

U dosadašnjem dijelu ovog poglavlja u kratko su opisane razne vrste i njihove karakteristike jer je za shvaćanje mehanizama trošenja, koji su glavna tema ovog rada, nužno i shvaćanje procesa trenja zbog njihove bliske povezanosti.

### 2.3. Mehanizmi trošenja

Trošenje je postupni gubitak materijala sa površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Iako između trenja i trošenja u jednom tribosustavu nema jednoznačne veze, u većini slučajeva povećanje trenja prati i intenzivnije trošenje (no može biti i obrnuto) [20].

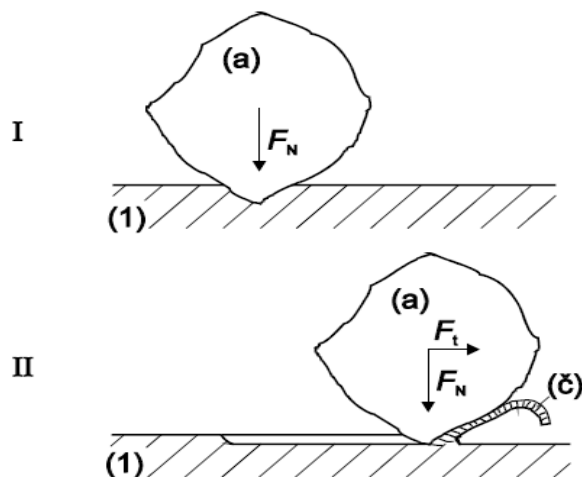
Četiri su osnovna mehanizma trošenja [20]:

- 1) Abrazija
- 2) Adhezija
- 3) Umor površine
- 4) Tribokorozija

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine, te uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina. Upravo oblik čestica trošenja i izgled trošenih površina čine osnovu za identifikaciju mehanizma trošenja [20].

### 2.3.1. Abrazijsko trošenje

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama [22].



Slika 27. Jedinični događaj abrazije [22]

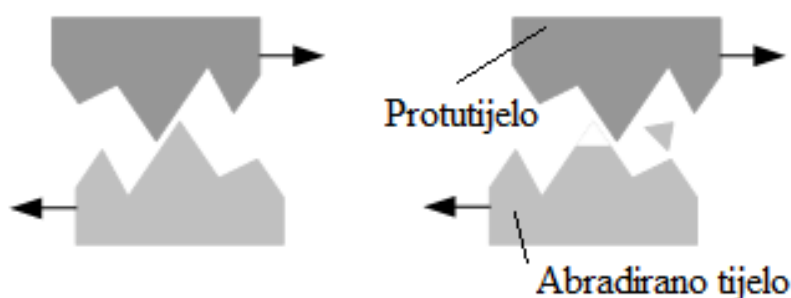
Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze (slika 27.):

- 1) I faza prodiranja abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ .
- 2) II faza istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ .

Mehanizam abrazije moguće je sagledati s nekoliko različitih gledišta:

- 1) Ovisno o strukturi tribosustava u kojem se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije [20]:

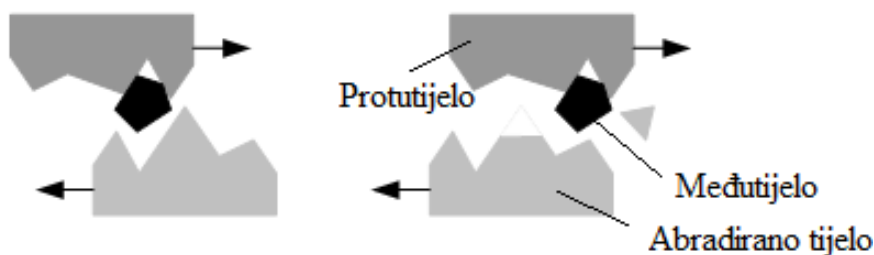
- a) Abrazija u dodiru dva tijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo) (slika 28.)



Slika 28. Abrazija u dodiru dva tijela [24]

- b) Abrazija u dodiru tri tijela (abrazivno tijelo, protutijelo, te međutijela koja se slobodno gibaju između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski) (slika 29.)

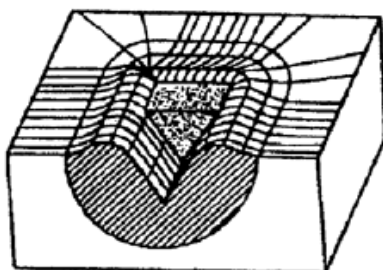




Slika 29. Abrazija u dodiru tri tijela [24]

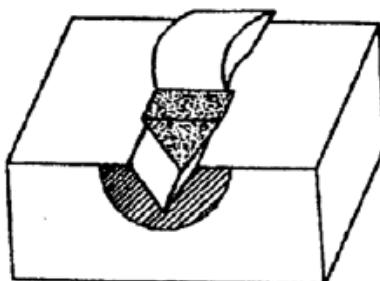
2) Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene abrazija se dijeli na [22]:

a) Mikrobrazdanje (slika 30.) - odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice (no rubovi brazde odvajaju se od površine u obliku produkata trošenja).



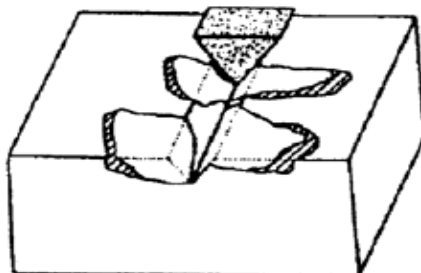
Slika 30. Mikrobrazdanje [22]

b) Mikrorezanje (slika 31.) – odnošenje materijala jednako volumenu zarezanog prolaskom abrazivne čestice.



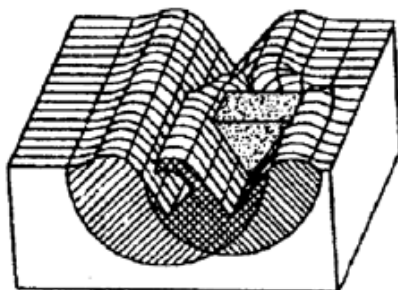
Slika 31. Mikrorezanje [22]

c) Mikronaprnuća (slika 32.) – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. Pri tome se s površine odnose veliki djelići materijala.



Slika 32. Mikronaprnuća [22]

d) Mikroumor (slika 33.) - odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine.

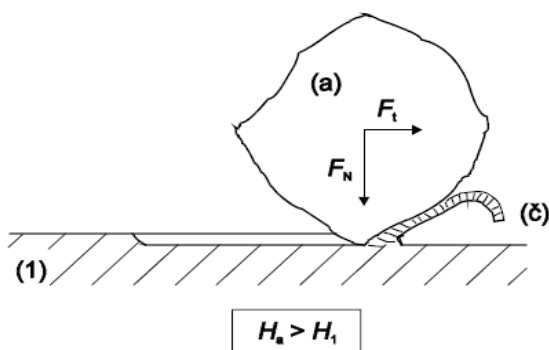


Slika 33. Mikroumor [22]

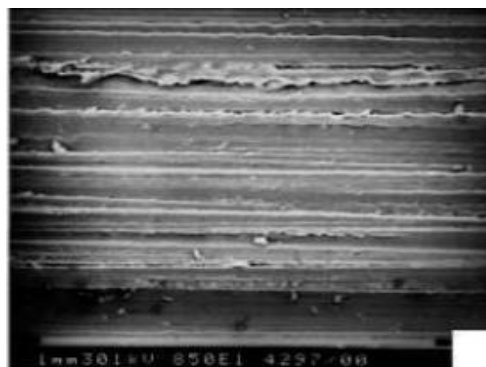
3) Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja [22]:

- a) "Čista" abrazija
- b) Selektivna abrazija
- c) "Nulta" abrazija

"Čista" abrazija (slika 34.) nastupa kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge. Površina je izbrazdana (slika 35.), a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine kada je abradirani materijal krhak [22].

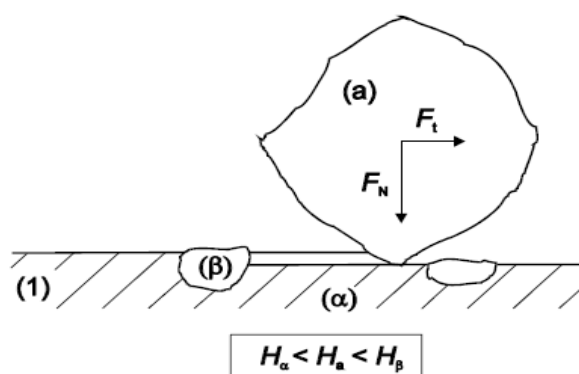


Slika 34. „Čista“ abrazija [22]

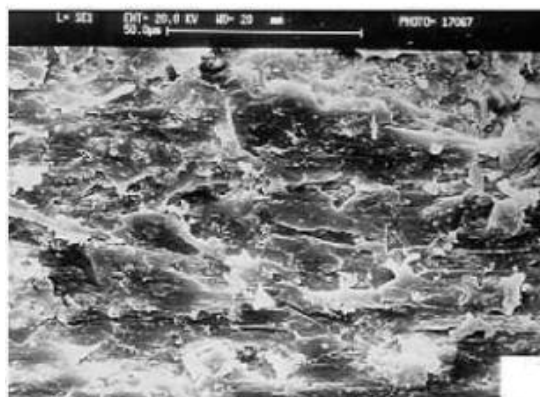


Slika 35. Izgled površine – „čista“ [20]

Selektivna abrazija (slika 36.) nastupa kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv reže samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze (slika 37.). Među česticama trošenja pojavit će se povremeno i zrna tvrde faze, kada trošenjem mekše faze izgube uklještenje i budu izbačena iz trošene površine.

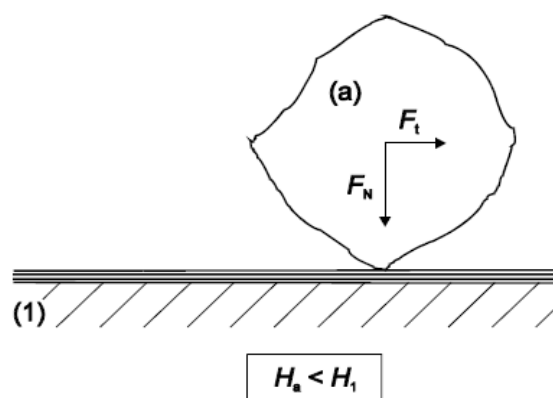


Slika 36. Selektivna abrazija [22]

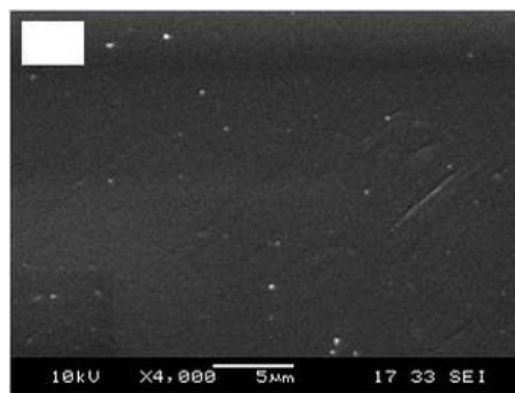


Slika 37. Izgled površine – selektivna [20]

“Nulta” abrazija (slika 38.) nastaje kad je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled (slika 39.), a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice (koje potječu od vanjskog graničnog sloja). Ovaj tip abrazije najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine (PVD, CVD, boriranje, itd.)



Slika 38. “Nulta” abrazija [22]

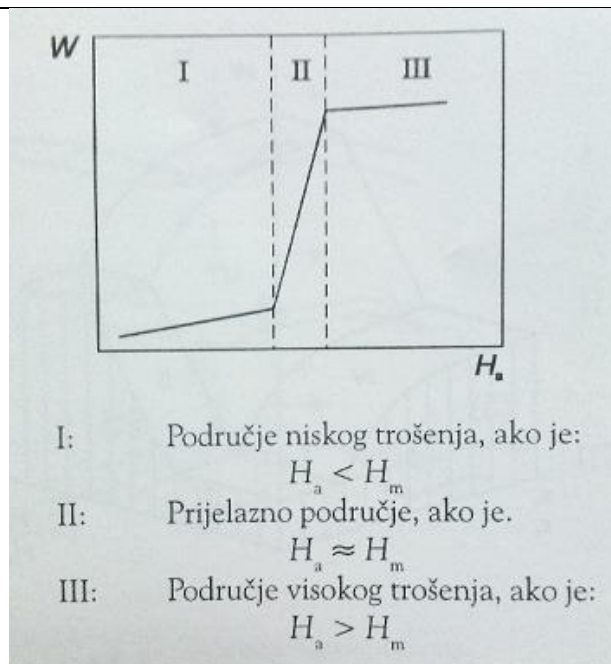


Slika 39. Izgled površine – “nulta” [20]

### Otpornost na abrazijsko trošenje

Otpornost na abraziju povezana je s međusobnim odnosom tvrdoće abraziva i materijala trošene podloge odnosno njegovih strukturnih konstituenata. Upravo je taj odnos odlučujući za prvu fazu jediničnog događaja abrazije tj. prodiranje koje je preduvjet za nastajanje početne pukotine, čijim napredovanjem će nastati čestica trošenja. Za postignuće selektivne ili čak nulte abrazije (koje se nastoji postići u praksi jer daje manje iznose abrazijskog trošenja nego čista abrazija) odlučujuća je tvrdoća strukturnih konstituenata ili površinskih slojeva, koja se mjeri s opterećenjima manjim od 10 N i naziva mikrotvrdoća.

Ovisnost abrazije o tvrdoći nije linearna, nego ima oblik S krivulje (Slika 40.).

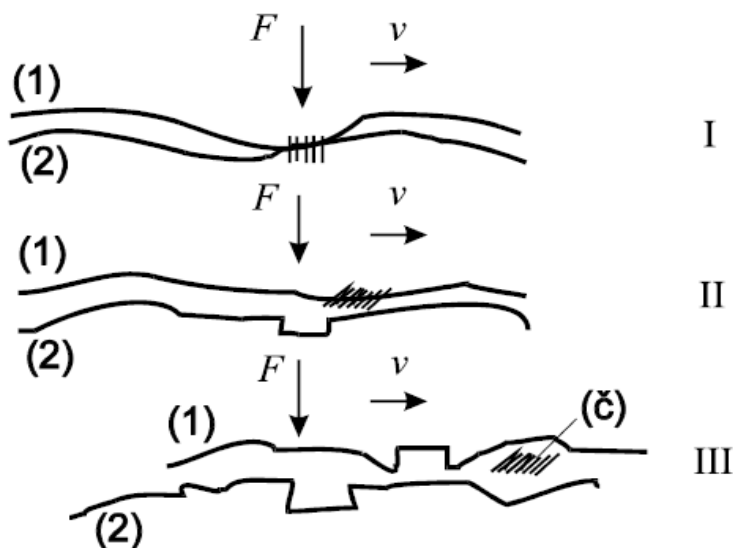


**Slika 40. Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [20]**

Utjecajni čimbenici otpornosti na abraziju: tvrdoća materijala, kohezija, modul elastičnosti, odnos tvrdoća abraziv/materijal, mikrostruktura, udio karbida, vrsta karbida, veličina zrna karbida, žilavost, udio perlita, %C, raspored karbida, strukturne pretvorbe, oblik zrna abraziva, razdioba mikrotvrdoća, poroznost, itd [20].

### 2.3.2. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne tarne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze (slika 41.) [22].



**Slika 41. Jedinični događaj adhezije [22]**

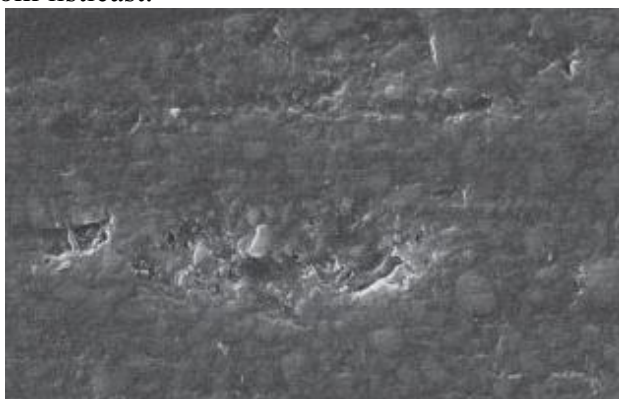
Faza I – Nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina

Faza II – Raskidanje adhezijskog spoja (čestica trošenja ostaje spontano “nalijepljena” na jednom članku kliznog para)

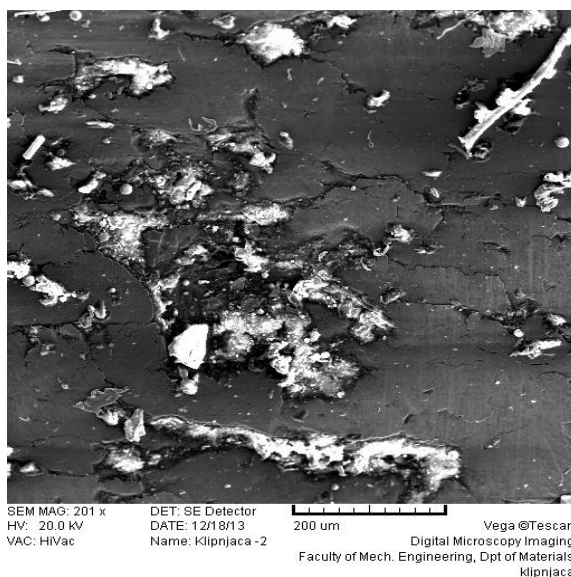
Faza III – Otkidanje čestice, oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima

Čestice iščupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno “nalijepljene” odnosno navarene na drugu tarnu površinu.

U nastavku su na slikama dani prikazi površine s koje su iščupane čestice (slika 42.) i površine na koju su čestice spontano navarene (slika 43.), a oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, ali je uglavnom lističast.



**Slika 42. Površina s koje su adhezijom iščupane čestice [25]**



**Slika 43. Površina na koju su čestice spontano „navarene“ adhezijom**

### Otpornost na adhezijsko trošenje

Budući da se mikrozaravani spojevi uspostavljaju u prvoj fazi adhezijskog mehanizma, sklonost stvaranju tih spojeva i jakost uspostavljenih adhezijskih veza određivat će otpornost na adhezijsko trošenje (uvijek za tarne par, ne za pojedinačni materijal). Materijali koji nisu skloni mikrozaravanju u međusobnom dodiru su tribološki kompatibilni tj. prikladni za rad u paru. Stoga je osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara njihova tribološka kompatibilnost tj. prikladnost za rad u kliznom paru. Tribološka

kompatibilnost pojedinih kombinacija materijala prikazana je Rabinowitz-ovom kartom tribološke kompatibilnosti (slika 44.)[20].

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb
In				2	2				1	2	2	1	1	4	2	1	1	1	1
Pb	3	3	4	4	4	4	4	1	1	1	4	3	2	4	4	2	2	1	
Sn	2		4	2	2	3	2	1	2	1	2	1	1	3	2	3	1		
Cd			2	2	3	3		1	1	2	2	1	1	4	1	1			
Mg		2		2	3	3	3		1	3	1	1	1	1	2				
Zn		2	1	1	1	1	3	1	3	2	1	1	1	1					
Al	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1						
Ag	4	3	4	4	4	4	3	1	2	1	2	1							
Au	1	2	1	2	1	1		1	1	2	1								
Cu	3	4	4	1	1	2	3	1	1	2									
Ti	1	1	1	2	1	1	1	1	1										
Zr	2	1	2	1	2	3	1	2											
Pt	1	1	1	1	1	1	1												
Nb	1	1	1	1	1	1													
Fe	1	1	1	1	1														
Ni	1	1	1	1															
Co	1	1	1																
Cr	1	1																	
Mo	1																		

4 - Dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1 %

3 - Dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju veća od 0,1 %, ili jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1 %

2 - Jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju između 0,1 i 1 %

1 - Jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju preko 1 %

□ - Nema podataka

Kompatibilnost		Adhezija
najbolja	4	najslabija
dobra	3	slaba
loša	2	jaka
najlošija	1	najjača

Slika 44. Rabinowitz-ova karta tribološke kompatibilnosti [22]

Na tribološku kompatibilnost povoljno utječe i smanjenje broja kliznih sustava [20].

FCC/FCC – najlošija kompatibilnost

BCC/BCC, BCC/FCC - loša kompatibilnost

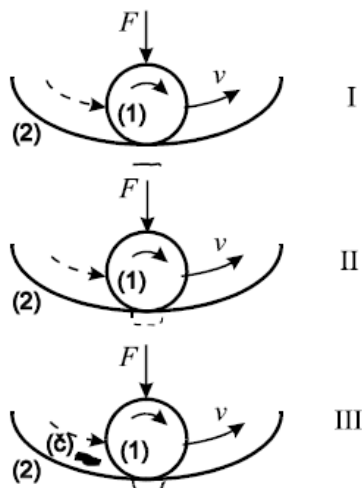
HCP/HCP – najbolja kompatibilnost

Gore navedeni podaci služe samo za orijentacijsku procjenu tribološke kompatibilnosti.

Za realni tarni par tribološka kompatibilnost se može utvrditi samo pokusima ili procijeniti na osnovi zabilježenih rezultata ispitivanja.

### 2.3.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena napreznja. Jedinični događaj umora površine prikazan je s tri faze (slika 45.)[20].



**Slika 45. Jedinični događaj umora površine [22]**

Faza I – Stvaranje mikropukotine (ispod površine)

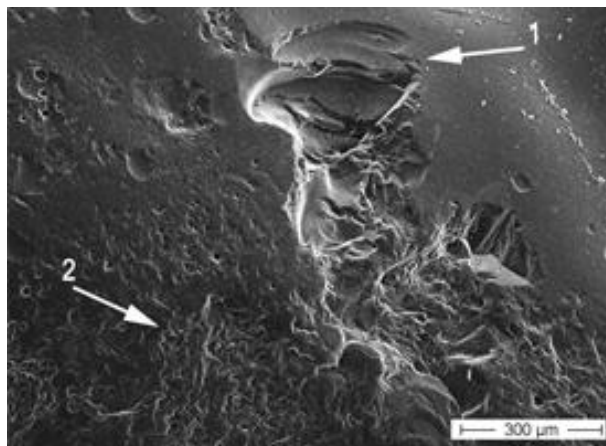
Faza II – Napredovanje mikropukotine

Faza III – Ispadanje čestice trošenja (oblik pločice ili iverka)

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično napreznje kod koncentriranog dodira (Hertzovo napreznje) uvijek ispod same površine. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica.

U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od tog trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. Ove kuglaste čestice su toliko sitne da se ne mogu registrirati kao gubitak mase, ali mogu poslužiti kao važan pokazatelj stanja procesa trošenja umorom površine.

U trećoj fazi jediničnog događaja umora dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenja oblika rupica (1 na slici 46.) i nabora (2 na slici 46.), zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje) [20].



**Slika 46. Izgled površine oštećene umorom [26]**



Na slici 47. prikazana je čestica trošenja nastala umorom površine.



**Slika 47. Kuglasta čestica trošenja nastala umorom površine [27]**

Mehanizmi nastajanja prvih pukotina kod umora površine su [20]:

- a) Gomilanje dislokacija na granicama zrna
- b) Međudjelovanje dviju kliznih ravnina
- c) Nastajanje pukotina na malokutnim granicama

Stvaranje početnih pukotina kod umora površine povezano je s procesom gibanja dislokacija, otpornost materijala na umor površine ovisit će o otporu gibanja dislokacija, a na to pak utječe velik broj čimbenika. Neki od njih su [20]:

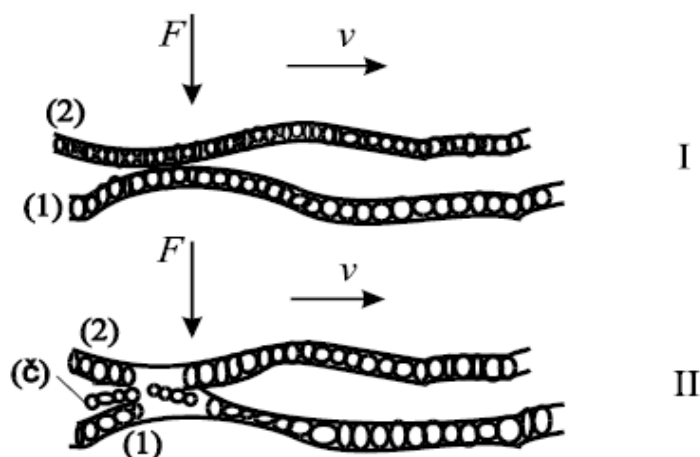
- 1) Podpovršinski koncentratori naprezanja: - oksidi i druge, tvrde uključine
  - sulfidi, karbidi i ostali konstituenti druge faze
  - granice zrna, malokutne granice zrna
- 2) Površinska obilježja: - zaostala naprezanja
  - topografija i tekstura površine
  - mikrostruktura
  - onečišćenja
  - razina površinske energije
- 3) Površinske pogreške: - uključine i čestice druge faze
  - ogrebotine i udubljenja
- 4) Diskontinuiteti u geometriji dodira: - čestice u području dodira
  - odstupanje od linijske geometrije dodira
- 5) Raspodjela opterećenja u ležaju: - elastične deformacije
  - unutrašnja zračnost
  - međusobna neprilagođenost dijelova ležaja
- 6) Elastohidrodinamika
- 7) Tangencijalne sile: - bez znatnog klizanja
  - kotrljanje uz klizanje

Otpornost na umor površine naziva se dinamička izdržljivost površine. Utvrđuje se pokusima.



### 2.3.4. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj tribokorozije prikazan je u dvije faze (slika 48.) [22].



Slika 48. Jedinični događaj tribokorozije [22]

Faza I – Stvaranje sloja produkata korozije

Faza II – Mjestimično razaranje sloja produkata korozije

Izgled površina izloženih tribokoroziji ovisi o intenzivnosti odnošenja stvorenih čestica trošenja. Pri maloj intenzivnosti na površini se pojavljuju proizvodi korozije, a kod veće intenzivnosti odnošenja površina je naizgled polirana. Čestice trošenja su praškastog oblika uglavnom oksidne. Čestice trošenja kod tribokorozije se stvaraju unutar vanjskog površinskog sloja. Budući da se radi o vrlo tankim slojevima, tribokorozija je redovito slabo intenzivan mehanizam trošenja. Iako se tribokorozija ubraja u osnovne mehanizme trošenja ona je ipak kombinacija između kemijskih reakcija na površini triboelementa i jednog od prethodno opisanih osnovnih mehanizama trošenja tj. abrazije, adhezije ili umora površine [22].

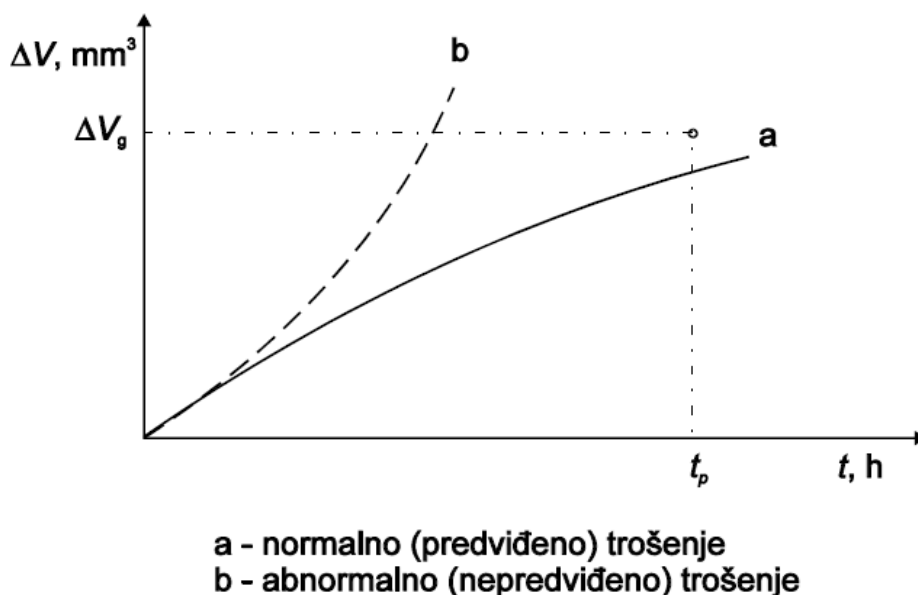
#### Otpornost na tribokoroziju

Osnovni kriterij za otpornost materijala na tribokoroziju je kemijska postojanost materijala u određenom mediju. Treba također reći da slojevi proizvoda korozije zaštićuju metalne površine od neposrednog dodira metal/metal pa se često i namjerno izazivaju u svrhu zaštite. Dakle tribokorozija može biti “poželjan” mehanizam trošenja jer bi drugi mehanizmi trošenja u istoj situaciji izazvali mnogo intenzivnije trošenje. No pojedini oblici tribokorozije mogu biti vrlo opasni, npr, u sprezi s vibracijama, visokim temperaturama ili vlažnim okolišem. Posebno je ozbiljan problem tribokorozije u kapljevitom kisiku ili u kapljevitom fluoru [22].

### 2.3.5. Djelovanje mehanizama trošenja

Svaki proces trošenja sastoji se od najmanje dva mehanizma trošenja ili više njih, koji djeluju istodobno ili u vremenskom slijedu, ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima. Stupanj opasnosti od pojedinih mehanizama različit je za različite tribosustave, a zadaća je tribologije izbjeći pojavu opasnijih mehanizama trošenja ili ju pak odgoditi. Dakle

treba postići da određeni tribosustav funkcionira pretežno u režimu tzv. normalnog trošenja (slika 49.).



**Slika 49. Opći oblik procesa trošenja [22]**

Proces trošenja može se pratiti preko neke od mjerljivih veličina tribosustava. Najčešće se to radi praćenjem sile trenja, buke i vibracija, temperature, spektografskom analizom ulja, magnetnim detektorima čestica, radioaktivnim metodama, ferografijom, itd [22].

### 2.3.6. Tribološke mjere

To su postupci i metode koji imaju za cilj postizanje prihvatljivih vrijednosti trenja i trošenja u realnim tribosustavima. Osim konstrukcijskih mjera, kojima je svrha izbjegavanje ili smanjenje utjecaja uzroka trošenja, glavne tribološke mjere su [20]:

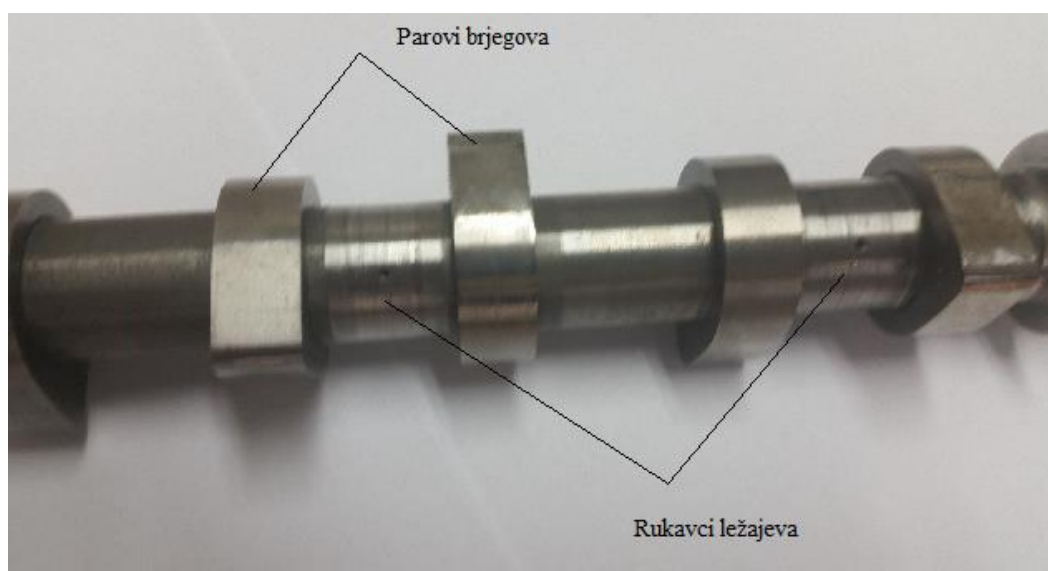
- a) Izbor materijala triboelemenata
- b) Zaštita površina od trošenja
- c) Uhodavanje
- d) Podmazivanje

Odabir gore navedenih stavki ključan je pri sprječavanju i smanjenju djelovanja nepoželjnog trošenja.

Budući da je tema ovog rada nepoželjno trošenje i oštećivanje bregaste osovine četverotaktnog motora (brijegovi i rukavci ležaja), potrebno je eksperimentalno analizirati i utvrditi mehanizme trošenja koji su nastupili, te koji su uzroci takvog nepoželjnog trošenja funkcionalnih dijelova motora automobila.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Kao što je već prethodno navedeno, glavna tema ovog rada je analiza dotrajalosti i oštećenja bregaste osovine četverotaktnog motor. Osovina je dostavljena na analizu zbog pojave nepravilnosti u radu motora (povišena razina buke motora, smanjena snaga motora). Vizualnom analizom osovine uočava se da su vrhovi brijegova (slika 51.) vidno oštećeni, a na rukavcima ležajeva također se vide tragovi trošenja (slika 50.).



**Slika 50. Ispitivana bregasta osovina s tragovima povećanog trošenja**



**Slika 51. Najoštećeniji brijeg – ispitni uzorak**

Kao što je već navedeno brijegovi bregaste osovine preko prijenosnih članova, podizača ventila, suprotstavljajući se silama opruga ventila otvaraju usisne (dovod smjese zraka i goriva u cilindar) i ispušne ventile (odvod ispušnih plinova iz cilindra) (slika 52.). Sile opruge potom zatvaraju ventile. Bregasta osovina dobiva pogon od radilice (koljenastog vratila) preko zupčastog remena, lančastog prijenosa ili zupčanika. Dakle, zadatak bregaste

osovine je zatvaranje i otvaranje ventila određenim redosljedom i u određenom trenutku. Brijegovi usisnih i ispušnih ventila pomaknuti su za određeni kut. Vremena i redosljedi otvaranja ventila određena su položajem brijegova. Trajanje otvorenosti, brzine otvaranja i zatvaranja, te hod ventila određeni su oblikom brijega.



**Slika 52. Kontakt brijeg – podizač ventila [28]**

Budući da su osim na brijegovima, tragovi trošenja vidljivi i na mjestima rukavaca ležajeva, potrebno je utvrditi mehanizme trošenja za oba slučaja, te ih pokušati uzročno-posljedično povezati.

Prve pretpostavke temeljene na iskustvenim činjenicama iz servisnih radionica ukazuju na nepravilnu rotaciju bregaste osovine s povećanom zračnosti u ležajevima, koja uzrokuje nepravilni klizni kontakt brijega i podizača ventila. Također je moguće pretpostaviti i pojavu nedovoljnog podmazivanja ovog kliznog kontakta.

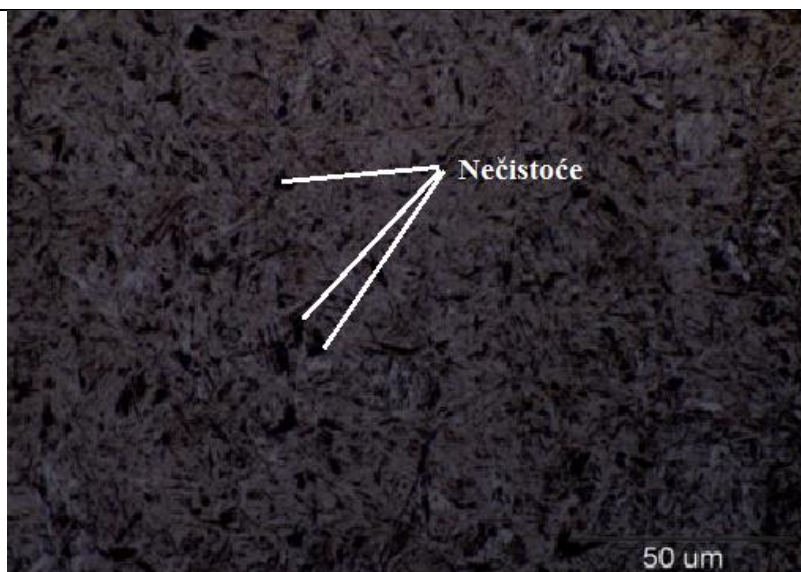
Kako bi se točno utvrdilo koji su mehanizmi trošenja nastupili, pripremljeni uzorci (izrezani iz istrošene bregaste osovine) analizirani su elektronskim i stereo mikroskopom, te im je ispitana tvrdoća. A kako bi se točno odredilo od kojih materijala su načinjeni navedeni dijelovi, provedeno je također i ispitivanje kemijskog sastava.

### 3.1. Kemijski sastav i mikrostruktura analizirane bregaste osovine

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza dostavljenih uzoraka. Metodom optičke emisijske spektometrije, dobiveni su sljedeći rezultati:

**Tablica 1. Kemijski sastav materijala brijega**

oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
Klipnjača	0,63	0,23	0,77	0,004	0,009	0,23	0,11	0,05	0,19	ostatak

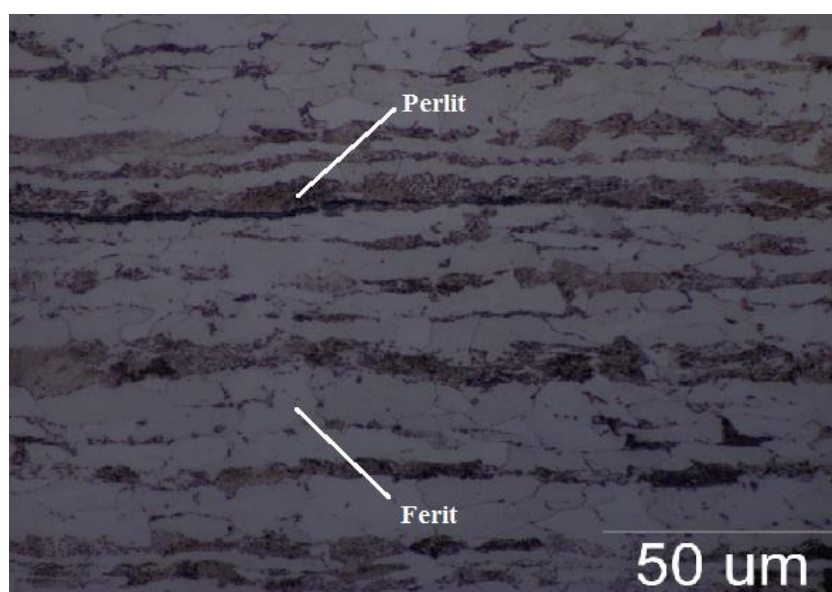


**Slika 53. Mikrostruktura materijala brijegova (povećanje 1000 puta)**

Za materijal od kojih su napravljeni brijegovi, ustanovljeno je analizom mikrostrukture i podataka o kemijskom sastavu da se radi o čeliku koji pripada skupini čelika za poboljšavanje, martenzitne mikrostrukture (popušteni martenzit), oznake EN C62D2 (DIN W.Nr. 1.1221 (Ck 60), DIN W.Nr. 1.1222 i DIN W.Nr. 1.1223 (Cm 60)). Na slici 53. se uz fazu martenzita vide i nečistoće, koje mogu biti mjesta začetaka jamica (pitting) i lomova.

Navedeni čelik primjenjuje se za dinamički jače opterećene strojne dijelove, koji su izloženi jačem trošenju. To su: osovine, zupčanici, zglobovi, torzijske opruge, itd [29].

Skupina čelika za poboljšavanje sadrži od 0,2...0,6 %C. Prema svojem kemijskom sastavu pripadaju kvalitetnim i plemenitim čelicima. Podvrgavaju se postupku poboljšavanja (kaljenje i visokotemperaturno popuštanje) u cilju postizanja visoke granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, uz visoku žilavost i dinamičku izdržljivost. Zbog toga primjenjuju se za mehanički, posebno dinamički visoko opterećene dijelove strojeva i uređaja kao što su npr. osovine, vratila, zupčanici, poluge, vijci, zatici, itd.[29]



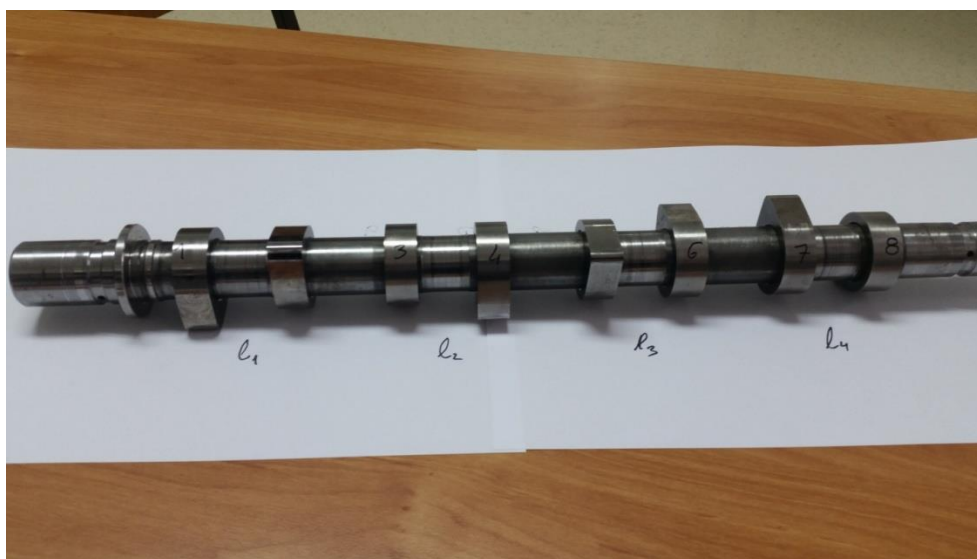
**Slika 54. Mikrostruktura materijala osovine (povećanje 1000 puta)**

Iz dobivenih informacija se daljnjom analizom podataka iz [29] i Metals Handbook [30], te fotografijom mikrostrukture (dobivene optičkim mikroskopom, model Olympus GX51) može zaključiti da materijal od kojeg je osovina izrađena pripada skupini općih konstrukcijskih čelika (ugljični, nelegiran), feritno-perlitne mikrostrukture. Također na slici 54. se jasno vidi usmjerenost strukture dobivene valjanjem (što bitno utječe na svojstva – anizotropnost).

Kao što i sam naziv govori, konstrukcijski se čelici primjenjuju za tipične konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju – prenose gibanja, preuzimaju sile ili momenata, spajaju elemente konstrukcija, itd. To su osovine, vratila, zupčanici, nosači, opruge, itd. Od svih čelika najzastupljeniji su u proizvodnji i primjeni. Zahtjevi na konstrukcijske čelike su mehanička svojstva (dobra granica razvlačenja  $R_e$ , vlačna ( $R_m$ ), tlačna ( $R_{mi}$ ) i savojna ( $R_{ms}$ ) čvrstoća, žilavost (naročito pri nižim temp.)), otpornost na trošenje, otpornost na koroziju, tehnološka svojstva (rezljivost, zavarljivost, hladna oblikovljivost). Kemijski sastav nije im propisan, a zbog nehomogenosti u mikrostrukтури nisu predviđeni za toplinsku obradu [29].

### 3.2. Mjerenje promjene dimenzija ispitnih uzoraka brijegova i rukavaca osovine

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje, izmjerene su dimenzije ispitnih uzoraka (brijegovi i rukavci). Bregasta osovina sastoji se od 8 brijegova (po dva u paru – jedan za usisne, drugi za ispušne ventile), a između svakog para nalaze se rukavci za ležajeve (slika 55.). Do trošenja je došlo na brijegovima, ali i rukavcima. Stoga su provedena mjerenja promjera rukavaca i duljine brijegova po simetrali (od baze do vrha brijega).



**Slika 55. Bregasta osovina sa oznakama brijegova i rukavaca**

Kao što se vidi sa slike 55. brijegovi su označeni brojkama od 1 do 8, a rukavci oznakama od 11 do 14.

Za svaku poziciju (8 brijegova i 4 rukavca), mjerenje je provedeno 3 puta, nakon čega su izračunate srednje vrijednosti mjerenja.

Korištena mjerna oprema :

1) Digitalno pomično mjerilo rezolucije 0,01 mm



2) Pasametar rezolucije  $2\mu\text{m}$   
 Temperatura:  $20 \pm 1^\circ\text{C}$

Srednji promjer brijega iznosi: 43,776 mm

**Tablica 2. Duljine brijegova po simetrali (od baze do vrha)**

Pozicija	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Promjer brijega, mm</i>	43,776	43,161	42,920	43,993	44,605	43,451	44,368	43,931
<i>Odstupanje od srednjeg promjera, mm</i>	0	0,615	0,856	0,217	0,829	0,325	0,592	0,155
<i>Relativno odstupanje od srednjeg promjera, %</i>	0	1,41	1,96	0,5	1,89	0,74	1,35	0,35

Iz priloženih mjerenja (tablica 2.) može se zaključiti da je najveće relativno odstupanje od srednjeg promjera u slučaju brijega broj 3, tj. radi se o brijegu koji je najviše potrošen. Brijegovi 5 i 7 su također više potrošeni u odnosu na ostale brijegove. To se može povezati sa činjenicom da brijegovi rade u paru (jedan je zadužen za usisni, a drugi za ispušni ventil). Dakle ovisno o funkciji brijegova 3, 5 i 7 (usis ili ispuh) došlo je do pojačanog trošenja.

Srednji promjer rukavaca iznosi: 24,969 mm

**Tablica 3. Promjeri rukavaca**

Pozicija	1	2	3	4
<i>Promjer rukavca, mm</i>	24,979	24,968	24,970	24,962
<i>Odstupanje od srednjeg promjera, mm</i>	0,01	0,001	0,001	0,007
<i>Relativno odstupanje od srednjeg promjera, %</i>	0,04	0,004	0,004	0,028

Najveće relativno odstupanje od srednjeg promjera je u slučaju rukavca broj 1 i rukavca broj 4. Budući da je osovina nepravilno rotirala zbog zračnosti u ležajevima, upravo su rukavci 1 i 4 kao rubni dijelovi konstrukcije podnijeli najveće opterećenje, a ujedno i trošenje.

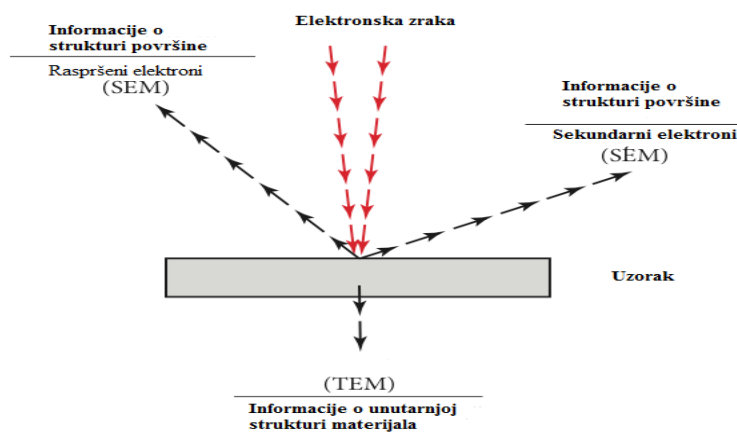
### 3.3. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM)

Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) jedna je od najčešće korištenih metoda u karakterizaciji površine materijala. SEM uređaji rade na povećanjima od 10 do preko 500000, pa osim morfologije mogu poslužiti i za saznavanje informacija o kemijskom sastavu materijala blizu njegove površine. U standardnom SEM ispitivanju generira se snop primarnih

elektrona fokusiran u spot promjera oko 5 nm, sa energijama elektrona koje variraju od 100 eV do 50 keV[31].

Kod tipičnog SEM elektroni se uz pomoć toplinske emisije izbacuju iz elektronskog topa koji sadrži katodu od volframa. Volfram je pogodan jer je jeftin i ima najvišu točku topljenja od svih metala, te se može zagrijati tako da emitira elektrone.

Skeniranje površine se ostvaruje prelaženjem uskog snopa primarnih elektrona preko površine uzorka. U svakoj točki uzorka u interakciji atoma primarnog snopa i atoma uzorka dolazi do stvaranja signala koji se detektira. Signal se mapira na ekranu, a svaka točka interakcije odgovara posebnoj slici na ekranu. Oštrina slike ovisi o jačini signala sa uzorka (energija sekundarnih elektrona). Upadni elektroni se vraćaju bilo kao primarno raspršeni prema natrag (backscattered electrons) ili kao sekundarno raspršeni koji se najviše koriste za istraživanje površine. Sekundarni elektroni su niskih energija tako da samo oni stvoreni nekoliko nanometara ispod površine uzorka mogu izaći i biti detektirani. Podatak prema natrag raspršenih elektrona ovisi o rednom broju atoma, tako da to dodatno može poslužiti za kemijsku analizu. Najlakše se detektiraju sekundarni elektroni jer su vrlo brojni i malih energija. Na slici 56. prikazan je princip rada SEM.



**Slika 56. Princip rada SEM [31]**

Rade pod vakuumom  $10^{-2}$  do  $10^{-8}$  Pa. Razlučivanje i dubina prodiranja ovise o naponu, materijalu uzorka i veličini spota.

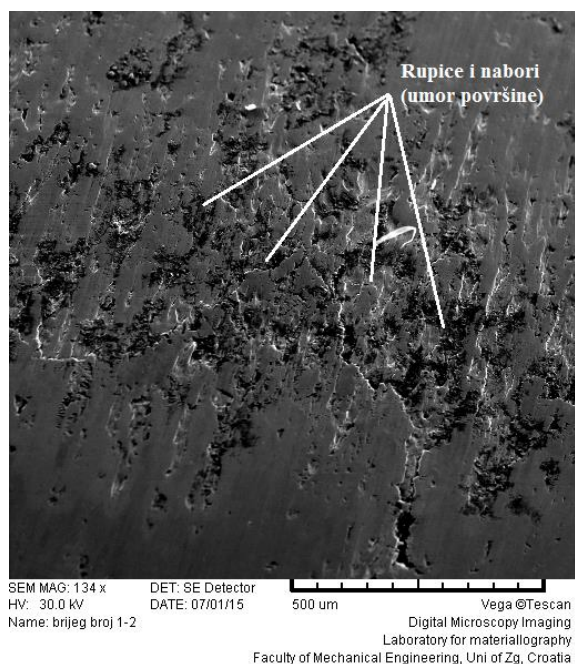
SEM analiza uzorka obavljena je s Tescan Vega TS5136 MM (slika 57.) modelom skenirajućeg elektronskog mikroskopa.



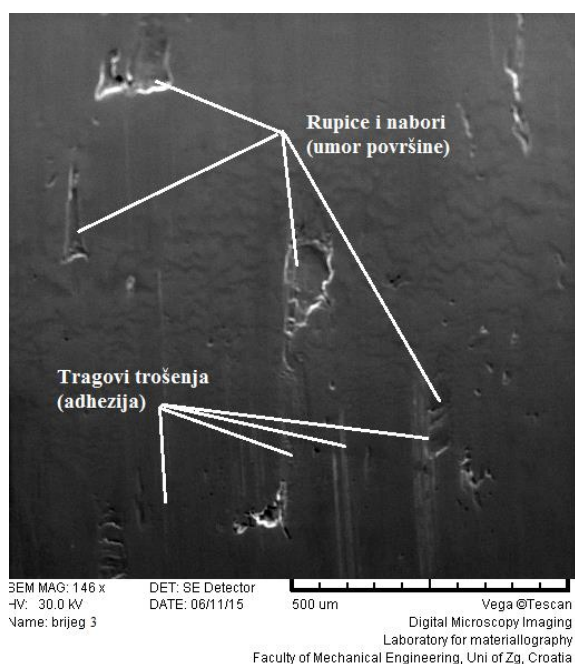
**Slika 57. Tescan Vega TS5136 MM [32]**



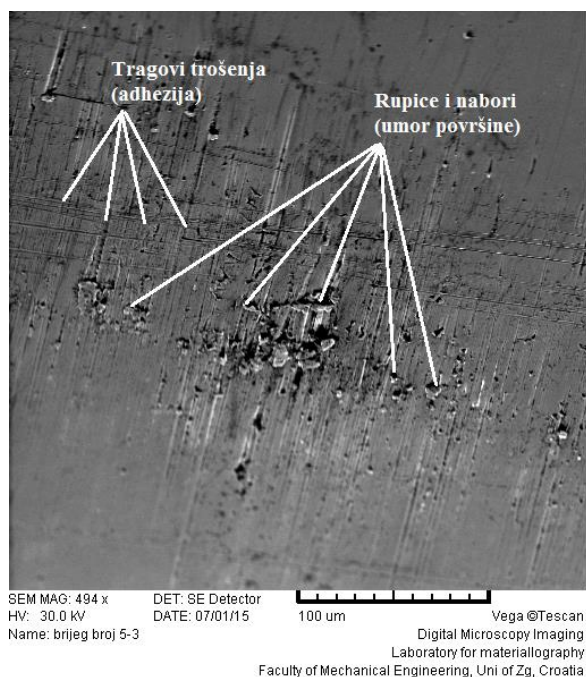
Budući da je mjerenjem promjene dimenzija ispitnih uzoraka ustanovljeno da je kod neparnih brijegova došlo do pojačanog trošenja, u nastavku slijede fotografije neparnih brijegova i rukavaca dobivene SEM analizom.



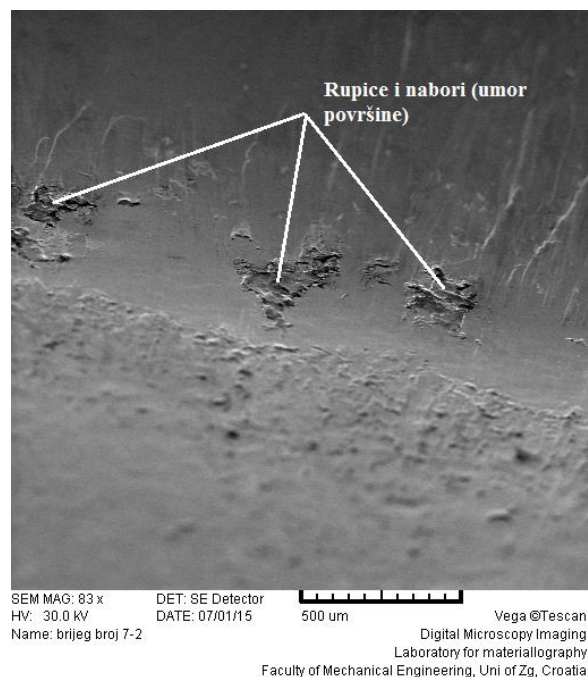
Slika 58. SEM analiza – brijeg broj 1



Slika 59. SEM analiza – brijeg broj 3

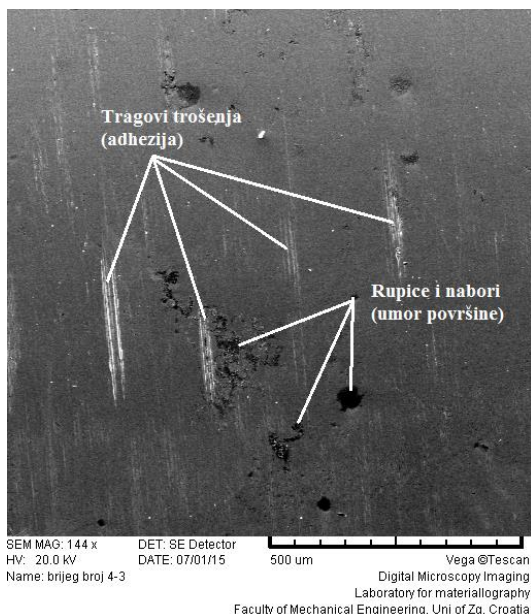


Slika 60. SEM analiza – brijeg broj 5

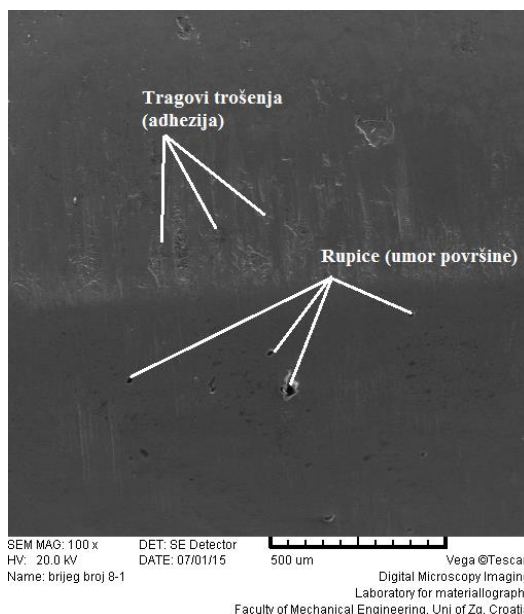


Slika 61. SEM analiza – brijeg broj 7

Na slikama 58. do 61. jasno se vidi da su na površini brijegova prisutne jamice (rupice, pitting) i nabori karakteristični za umor površine. Pojačano trošenje neparnih brijegova povezano je sa činjenicom da neparni brijegovi obavljaju istu funkciju (usis ili ispuh). Na parnim brijegovima također postoje jamice (rupice, pitting) i tragovi adhezijskog trošenja, no ne toliko brojni i intenzivni kao na neparnim brijegovima (slika 62. i 63.).



Slika 62. SEM analiza – brijeg broj 4



Slika 63. SEM analiza – brijeg broj 8

Tribopar brijeg – podizač ventila pripada u skupinu klznog trošenja, no budući da je došlo do nepravilne rotacije osovine zbog zračnosti u ležajevima, ovaj tribopar svrstava se u skupinu kotrljajućeg trošenja.

U slučaju kotrljajućeg trošenja, najveća opasnost kod takvih tribosustava prijeti od umora površine, manja od abrazijskog trošenja i adhezijskog trošenja, a najmanja je opasnost od tribokorozijskog trošenja. Adhezijsko trošenje najčešće nastupa u tom slučaju zbog zakazivanja funkcionalnih dijelova, a umor površine nastupa često zbog neispravnog podmazivanja.



Slika 64. SEM analiza – osovina (rukavci ležajeva)



Na slici 64. jasno se vide tragovi trošenja na osovini (rukavcima ležajeva). Takvi tragovi trošenja potječu od adhezijskog i abrazijskog trošenja. Do pretjeranog trošenja između osovine i ležajeva došlo je zbog nepravilne rotacije osovine, tako da ona više nije rotirala po kružnici, već po nekoj nepravilnoj krivulji i na taj način „udarala“ o ležajeve pri čemu su se javile adhezija i abrazija.

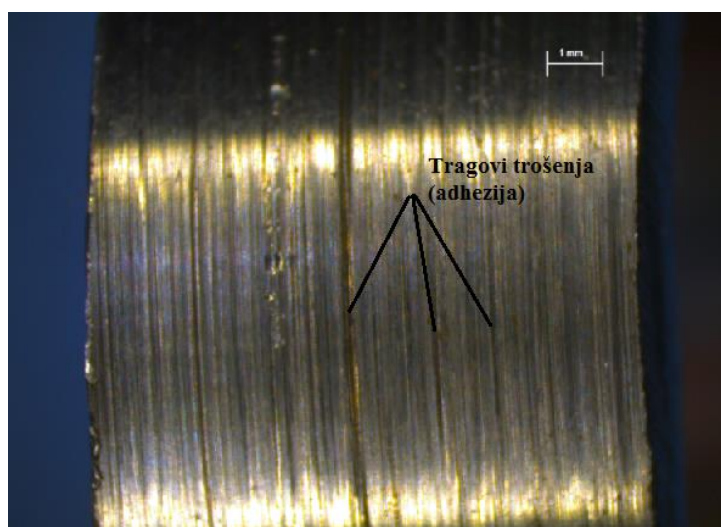
### 3.4. Stereo mikroskopija

Analizom fotografija površine brijegova (slika 65.), dobivenih na stereo mikroskopu (Leica DFC290), mogu se uočiti područja rupica i nabora karakterističnih za umor površine, što je još jedna potvrda o postavljenim tvrdnjama. Na površini brijegova došlo je do umora površine.



**Slika 65. Rupice nastale umorom površine - brijegovi**

Na fotografijama površine osovine (slika 66.) jasno se vide tragovi trošenja nastali adhezijsko-abrazijski trošenjem.

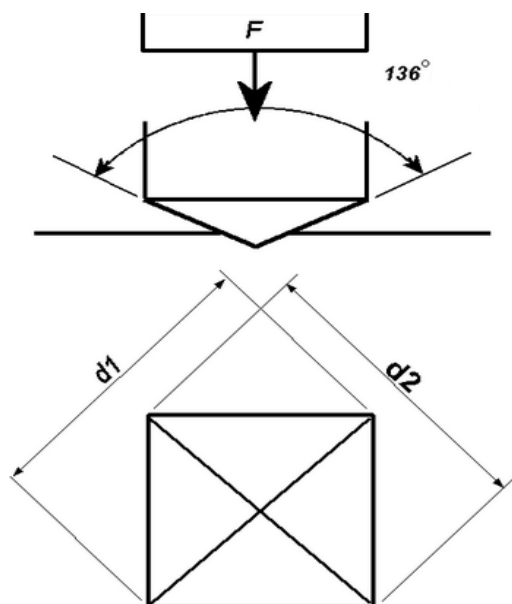


**Slika 66. Tragovi trošenja – osovina**

### 3.5. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća po Vickersu je mjera otpora što ga neki materijal pruža prodiranju dijamantne četverostrane piramide s vršnim kutom od  $136^\circ$ , opterećene nekom silom  $F$  (slika 67.).

Otisak indentora u pravilu je kvadratnog oblika na površini uzorka, ali zbog netočnosti ispitivanja, nesavršenosti pripreme uzorka i ostalih pogrešaka, otisak se može iskriviti. Stoga se uobičajeno mjere obje dijagonale otiska ( $d_1$  i  $d_2$ ) i uzima se njihova srednja vrijednost  $d$ .



Slika 67. Tvrdoća po Vickersu (indentor i otisak) [33]

U Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje provedeno je ispitivanje tvrdoće (po Vickersu) materijala osovine i brijegova. Dobiveni su sljedeći rezultati:

Tablica 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće HV1 po dubini rubnog sloja brijega

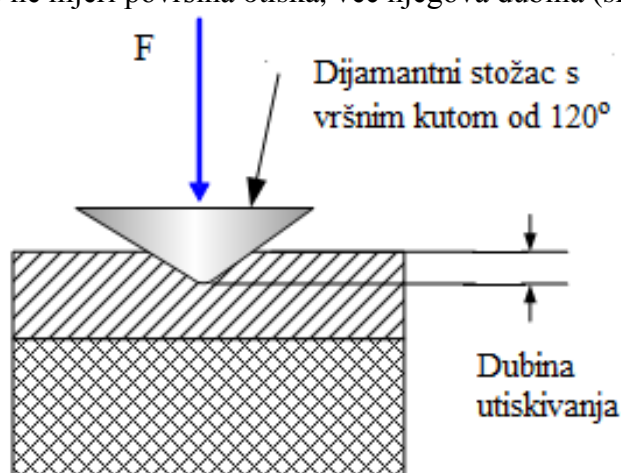
Uzorak 1 – brijeg osovine	
Udaljenost od ruba, mm	Tvrdoća, HV1
0,10	673,00
0,20	767,00
0,40	788,00
0,60	788,00
0,80	742,00
1,00	742,00
1,25	643,00
1,50	666,00
1,75	666,00
Srednja vrijednost	719,44

**Tablica 5. Rezultati ispitivanja tvrdoće HV1 za materijal osovine**

Uzorak 2 – jezgra osovine
Tvrdoća, HV1
212
214
Srednja vrijednost
213

Također je provedeno i ispitivanje tvrdoće (po Rockwellu) za materijal brijegova. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Tvrdoća po Rockwellu je postupak za određivanje tvrdoće materijala, kod koje se utiskuje poseban indenter (dijamantni stožac s vršnim kutom od  $120^\circ$ ) u površinu ispitivanog materijala, pri čemu se ne mjeri površina otiska, već njegova dubina (slika 68.).

**Slika 68. Tvrdoća po Rockwellu (indenter) [34]**

U nastavku slijede rezultati ispitivanja tvrdoće HRC za materijal brijegova (tablica 6.).

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće HRC za neke od brijegova**

HRC (F = 1 471 N)			
Brijeg br. 1	Brijeg br. 3	Brijeg br. 6	Brijeg br.7
56	56	56	59
58	57	58	59
57	55	57	59
Srednja vrijednost			
57	56	57	59

Zbog položaja brijegova nije bilo moguće ispitati tvrdoće svih 8 brijegova, no rezultati tvrdoće HRC za 4 ispitana brijega ukazuju na ujednačene vrijednosti tvrdoće (kod Rockwell metode uobičajeno odstupanje iznosi  $\pm 2$  HRC) svih brijegova (čak i brijeg 3 koji je najviše potrošen). Za svaki brijeg mjerenje je provedeno 3 puta.

## 4. ZAKLJUČAK

U slučaju bregaste osovine koja je dostavljena na analizu zbog oštećenja, važno je istaknuti da uz osovinu nisu dostavljeni podizači ventila i ležajevi, tako da nedostaju elementi triboparova brijeg–podizač ventila i rukavac–ležaj. No usprkos tome, detaljnom analizom i ispitivanjima brijegova i rukavaca, može se izraditi rekonstrukcija događaja koji su doveli do trošenja (oštećivanja).

Analizom mikrostrukture i podataka o kemijskom sastavu, zaključeno je da su brijegovi izrađeni od poboljšanog čelika martenzitne mikrostrukture. Uz fazu martenzita prisutne su i nečistoće koje su potencijalna mjesta začetka jamica i pukotina za mehanizam trošenja umor površine. Osovina je izrađena od nelegiranog ugljičnog konstrukcijskog čelika, feritno-perlitne mikrostrukture. Usmjerena struktura postignuta je valjanjem, što bitno utječe na mehanička svojstva (anizotropnost).

Mjerenje promjene dimenzija ispitnih uzoraka brijegova pokazalo je da su se najviše potrošili brijegovi označeni neparnim brojevima (1,3,5,7), a fotografije dobivene elektronskom i stereo mikroskopijom potvrđuju takve rezultate mjerenja (vidljiva oštećenja, tj. tragovi trošenja). Usporedbom fotografija dobivenih na skenirajućem elektronskom mikroskopu i stereo mikroskopu, potvrđuje se da na površini brijegova postoje oštećenja nastala pretjeranim trošenjem. Mehanizam trošenja koji ih je uzrokovao je umor površine. Takav zaključak potvrđuje izgled oštećenja - jamice (rupice, pitting). Osim rupica, na površini se vide i tragovi trošenja od adhezijsko-abrazijskog trošenja.

Razlog oštećenja i pretjeranog trošenja rukavaca ležajeva je problem u radu bregaste osovine, tj. nepravilna rotacija osovine uzrokovana zračnošću u ležajevima. Analizirajući fotografije elektronske i stereo mikroskopije, oštećenja na rukavcima potječu od adhezijsko-abrazijskog mehanizma trošenja. Rukavci na krajevima osovine su podnijeli najveće trošenje. Dakle nepravilnim rotiranjem bregasta osovine je uzrokovala nepredviđene interakcije (konformni dodir) brijegova i podizača ventila, što je na poslijetku dovelo do pretjeranog trošenja brijegova (umorom površine) uz moguće nedostatno podmazivanje koje je dodatno pogodovalo takvom razvoju događaja.

## LITERATURA

- [1] Popović Goran; Tehnika motornih vozila; Pučko otvoreno učilište, Zagreb, 2004.
- [2] <http://www.auto-info.hr/images/phocagallery/tehnologije/ottomotor/shematskiprikazottomotozs2.gif>, posjećeno 05.06.2015.
- [3] [http://www.2carpros.com/images/articles/engine/valve/variable\\_timing\\_camshaft\\_lifter.jpg](http://www.2carpros.com/images/articles/engine/valve/variable_timing_camshaft_lifter.jpg), posjećeno 05.06.2015.
- [4] <http://www.dacia-delovi.com/files/Bregasta%20Logan%20Sandro%20dci.jpg>, posjećeno 05.06.2015.
- [5] <http://www.secondchancegarage.com/articles/images/valvetrain/cam.jpg>, posjećeno 05.06.2015.
- [6] <https://msc-ks3technology.wikispaces.com/file/view/CamShapes.png/32381893/CamShapes.png>, posjećeno 05.06.2015.
- [7] [http://www.dragracingonline.com/technical/2011/xiii\\_7-camshaft/CalloutsCamProfile-C.jpg](http://www.dragracingonline.com/technical/2011/xiii_7-camshaft/CalloutsCamProfile-C.jpg), posjećeno 06.06.2015.
- [8] [http://image.superchevy.com/f/8566166+w640+h426+q80+re0+cr1+ar0+st0/p114216\\_image\\_large.jpg](http://image.superchevy.com/f/8566166+w640+h426+q80+re0+cr1+ar0+st0/p114216_image_large.jpg), posjećeno 06.06.2015.
- [9] <https://www.lunatipower.com/Images/Tech/Cams/NewVsOldLifters.gif>, posjećeno 06.06.2015.
- [10] <http://www.mahindramaxximominivan.com/images/product/engine/big/4-valves-per-cylinder.png>, posjećeno 06.06.2015.
- [11] <http://diesel.hrbeu.edu.cn/lxlweb/UploadFile/20061226154951867.gif>, posjećeno 07.06.2015.
- [12] <http://www.compcams.com/Images/image/COMPCams/Products/Valve%20Springs/valve-tech-1.jpg>, posjećeno 07.06.2015.
- [13] Kalinić, Zoran; Motori s unutrašnjim izgaranjem; Školska knjiga, Zagreb, 2004
- [14] <http://www.autonet.hr/pic/900/8131/original.jpg>, posjećeno 07.06.2015.
- [15] [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni\\_motor#/media/File:Four\\_stroke\\_cycle\\_intake.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni_motor#/media/File:Four_stroke_cycle_intake.png), posjećeno 10.06.2015.

- [16] [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni\\_motor#/media/File:Four\\_stroke\\_cycle\\_compression.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni_motor#/media/File:Four_stroke_cycle_compression.png), posjećeno 10.06.2015
- [17] [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni\\_motor#/media/File:Four\\_stroke\\_cycle\\_spark.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni_motor#/media/File:Four_stroke_cycle_spark.png), posjećeno 10.06.2015.
- [18] [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni\\_motor#/media/File:Four\\_stroke\\_cycle\\_exhaust.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni_motor#/media/File:Four_stroke_cycle_exhaust.png), posjećeno 10.06.2015.
- [19] <http://brightfutureenterprises.com/images/14.%20Thermo%20Dynamic%20Lab/Cut%20Section%20Model%20Of%20Multi-Cylinder%204%20Stroke%20Diesel%20Engine.jpg>, posjećeno 10.06.2015.
- [20] Ivušić, Vinko; Tribologija; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 1998.
- [21] [http://blog.truecar.com/wp-content/uploads/2012/08/volvo-pedestrian-detection-34595\\_2\\_1-truecar-pricing1.jpg](http://blog.truecar.com/wp-content/uploads/2012/08/volvo-pedestrian-detection-34595_2_1-truecar-pricing1.jpg), posjećeno 10.06.2015.
- [22] Grilec, Krešimir; Ivušić, Vinko; Tribologija, autorizirana predavanja; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2011.
- [23] [http://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rappports-reports/aviation/2010/a10p0388/images/a10p0388\\_photo\\_2.jpg](http://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rappports-reports/aviation/2010/a10p0388/images/a10p0388_photo_2.jpg), posjećeno 12.06.2015.
- [24] [http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=abrasive\\_wear.png](http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=abrasive_wear.png), posjećeno 12.06.2015.
- [25] [http://www.scielo.br/img/revistas/mr/2012nahead/aop\\_1306-12fig04.jpg](http://www.scielo.br/img/revistas/mr/2012nahead/aop_1306-12fig04.jpg), posjećeno 12.06.2015.
- [26] [http://www.jcda.ca/uploads/b31/Schmitt\\_Fig6.png](http://www.jcda.ca/uploads/b31/Schmitt_Fig6.png), posjećeno 14.06.2015.
- [27] <http://failure-analysis.info/wp-content/uploads/2010/07/7-micro-soccer-balls.jpg>, posjećeno 14.06.2015.
- [28] [http://www.aalcar.com/library/camshaft\\_roller\\_lifters.jpg](http://www.aalcar.com/library/camshaft_roller_lifters.jpg), posjećeno 14.06.2015.
- [29] Filetin, Tomislav; Kovačićek, Franjo; Indof, Janez; Svojstva i primjena materijala; Udžbenici sveučilišta u Zagrebu; Zagreb, 2009.
- [30] Metals Handbook, 8th Edition, Volume 7: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys; American Society for metals
- [31] [http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni\\_materijali/EMUMF/SEM.pdf](http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni_materijali/EMUMF/SEM.pdf), posjećeno 20.06.2015.
- [32] <http://www.eos.ca/TS5136.htm>, posjećeno 20.06.2015.
- [33] <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.gif>, posjećeno 20.06.2015.
- [34] <http://www.amesportablehardnesstesters.com/wp-content/uploads/2013/04/Superficial-Rockwell-Hardness.png>, posjećeno 29.06.2015.



## **PRILOZI**

I. CD-R disc