

# Analiza uzroka istrošenosti klipa četverotaktnog benzinskog motora

---

Grgurić, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2025

*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:235:077507>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Iva Grgurić**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Iva Grgurić, bacc.ing.

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na prijedlogu i pronalasku teme za ovaj diplomski rad i potrebnoj pomoći tijekom njegove izrade.

Također, zahvaljujem se lab. tehničaru Ivanu Vovku i automehaničaru Kristianu Badovincu na njihovom značajnom doprinosu u izradi ovog diplomskog rada.

Veliko hvala mojoj obitelji i svim prijateljima koji su mi pružili podršku i motivirali me tijekom čitavog studiranja.

Posvećujem ovaj diplomski rad svom ocu jer mu život nije pružio mogućnost da bude ovdje i dijeli ovaj poseban trenutak sa mnom. Voljeni tata, koji si negdje na boljem mjestu, nadam se da si ponosan!

Iva Grgurić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Iva Grgurić** **JMBAG 0035226122**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza uzroka istrošenosti klipa četverotaktnog benzinskog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear analysis of a piston of a four stroke gasoline engine**

Opis zadatka:

Motori s unutarnjim izgaranjem su toplinski strojevi koji, nakon kompresije zraka ili smjese zraka i goriva te izgaranjem goriva u cilindru, ekspanzijom vrućih plinova visokog tlaka koji potiskuju klip, pretvaraju kemijsku energiju goriva u koristan mehanički rad. Klip je u svom radu izložen značajnim mehaničkim i toplinskim opterećenjima.

U redu je potrebno napraviti sljedeće:

- 1) opisati princip rada četverotaktnog benzinskog motora
- 2) analizirati oštećenja klipa
- 3) komentirati rezultate i dati zaključak.

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

Zadatak zadan:

26.rujna 2024.

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

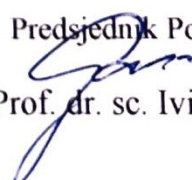
Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Ivice Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
1.1 Razrada teme, definiranje istraživačkog problema i ciljeva .....	2
1.2. Tehničke karakteristike osobnog vozila modela Golf 7 GTI TCR, 2.0 TSI .....	2
2. TEORIJSKE OSNOVE.....	3
2.1. Karakteristike i funkcije motora 2.0 TSI EA888/3 DNUC.....	3
2.1.1. Razvoj modela motora kroz generacije proizvodnje.....	3
2.1.3. Konstrukcija i izgled motora.....	5
2.1.4. Najznačajnije komponente u radu motora EA888/3 DNUC.....	6
2.1.4.1. Turbopunjač IHI IS38 .....	6
2.1.4.2. Izravni (direktni) sustav ubrizgavanja goriva .....	8
2.1.4.3. Elektronička upravljačka jedinica.....	10
2.1.4.4. Sustav hlađenja klipova .....	11
2.2. Klipovi motora .....	12
2.2.1. Četverotaktni Otto ciklus .....	12
2.2.1. Konstrukcija klipa .....	14
2.2.3. Najčešći kvarovi i uzroci kvarova na klipovima.....	15
2.3. Ubrizgavalica .....	17
2.3.1. Najčešći kvarovi i uzroci kvarova na ubrizgavalicama .....	19
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	21
3.1. Osnovni podaci, opis kvara.....	21
3.2. Preliminarno ispitivanje dijelova .....	22
3.3. Izbor, čuvanje i čišćenje prijelomnih površina te makroskopska ispitivanja.....	26
3.4. Priprema metalografskih uzoraka .....	28
3.5. Mikroskopsko ispitivanje.....	30
3.6. Mjerenje tvrdoće .....	33
3.6.1. Ispitivanje ubrizgavalica .....	35
2.7. Sigurnosne preporuke i rješenje kvara .....	36
4. ANALIZA REZULTATA.....	39
5. ZAKLJUČAK .....	40
LITERATURA.....	41

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Izgled motora EA888/3 DNUC [9] .....	5
Slika 2.	Turbopunjač [11] .....	7
Slika 3.	Zidno ubrizgavanje goriva [16] .....	9
Slika 4.	Ubrizgavanje goriva raspršivanjem [16] .....	9
Slika 5.	Ubrizgavanje goriva vođeno zrakom [16] .....	10
Slika 6.	Mreža rada elektroničke upravljačke jedinice [18] .....	11
Slika 7.	Sustav hlađenja klipa [20] .....	12
Slika 8.	Četverotaktni Otto ciklus [22] .....	13
Slika 9.	Sustav klipa i njegovi najvažniji dijelovi [27] .....	15
Slika 10.	Ubrizgavalica [30] .....	17
Slika 11.	Dijelovi ubrizgavalice [31] .....	18
Slika 12.	Model osobnog vozila Golf 7 GTI TCR .....	22
Slika 13.	Unutrašnjost osobnog vozila ispod poklopca motornog prostora [34] .....	22
Slika 14.	Blok motora, pogled sa strane .....	23
Slika 15.	Blok motora, pogled odozgora .....	23
Slika 16.	Unutrašnjost cilindra prije vađenja klipa .....	24
Slika 17.	Tragovi trošenja na plaštu klipova 1, 2, 3 i 4 .....	25
Slika 18.	Klip broj 2: A) tragovi trošenja na plaštu klipa; B) odmašćena glava klipa .....	26
Slika 19.	Prikaz prstenova i osovinice .....	27
Slika 20.	Kompresijski prstenovi motora s klipom 2 .....	27
Slika 21.	Pripremljen ispitni uzorak .....	28
Slika 24.	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 .....	30
Slika 25.	Mikrostruktura klipa i odgovarajućih faza u području unutrašnjosti klipa, 500x .....	31
Slika 26.	Mikrostruktura u području gornjeg kompresijskog prstena, 500x .....	32
Slika 27.	Utor gornjeg kompresijskog prstena .....	33
Slika 28.	Ubrizgavalica uklonjena iz osobnog vozila .....	36
Slika 29.	Novi klipovi, klipnjače i prstenovi za potrebe popravka .....	37
Slika 30.	Blok motora s novim klipovima .....	38

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Tehničke karakteristike osobnog vozila Golf 7 GTI TCR, 2.0 TSI [3].....	2
Tablica 2.	Osnovne karakteristike motora EA888/3 DNUC .....	4
Tablica 3.	Parametri brušenja uzoraka .....	29
Tablica 4.	Parametri poliranja uzoraka.....	29
Tablica 5.	Tvrdoća aluminijske legure (klip) .....	34
Tablica 6.	Tvrdoća sivog lijeva (utor) .....	34
Tablica 7.	Tvrdoća izotermički poboljšanog noduliranog lijeva (gornji kompresijski prsten) .....	35



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$d$	mm	Promjer
$d_v$	mm	Srednja vrijednost dvije izmjerene dijagonale otiska
$F$	N	Sila
$HV$	HV	Tvrdoća
$L$	mm	Duljina
$M$	Nm	Moment sile
$m$	kg	Masa
$n$	okr min <sup>-1</sup>	Brzina vrtnje
$p$	Pa	Tlak
$P$	W	Snaga
$T$	K	Temperatura
$t$	s	Vrijeme
$U$	V	Električni napon
$V$	m <sup>3</sup>	Obujam
$v$	m/s	Brzina

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Engleski naziv</b>	<b>Opis</b>
GTI	<i>Grand Touring Injection</i>	Oznaka za sportske verzije Volkswagenovih osobnih vozila
TCR	<i>Touring Car Racing</i>	Oznaka za modele osobnih vozila inspiranih trkaćim osobnim vozilima
TSI	<i>Turbocharged Stratified Injection</i>	Oznaka za osobna vozila s turbomotorom s izravnim ubrizgavanjem
DSG	<i>Direct – Shift Gearbox</i>	Automatski mjenjač s dvostrukom spojkom za brzo prebacivanje brzina bez prekida snage
FSI	<i>Fuel Stratified Injection</i>	Tehnologija izravnog ubrizgavanja goriva u cilindre motora
MPI	<i>Multipoint Injection</i>	Tehnologija ubrizgavanja goriva u više točaka usisa zraka
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>	Elektronička upravljačka jedinica koja upravlja raznim aspektima rada motora
PCM	<i>Power Train Control Module</i>	Modul za upravljanje pogonskim sustavom koji koordinira rad motora i prijenosa
TCM	<i>Transmission Control Module</i>	Elektronički modul koji upravlja radom automatskog mjenjača
BCM	<i>Brake Control Module</i>	Modul za upravljanje kočnim sustavom

## **SAŽETAK**

U radu je analiziran uzrok kvara motora EA888/3 oznake DNUC osobnog vozila Golf 7 GTI TCR. U uvodnom dijelu obrađena je teorijska pozadina samog modela motora sa svim potrebnim tehničkim karakteristikama. U eksperimentalnom dijelu rada provedena je analiza kvara i sva potrebna ispitivanja u laboratorijski osiguranim uvjetima.

Rezultati ovog istraživanja doprinose boljem razumijevanju izazova s kojima se suočavaju sustavi ubrizgavanja goriva i mogu pomoći u razvoju učinkovitijih strategija održavanja, što bi dugoročno moglo rezultirati većom pouzdanošću, manjim troškovima održavanja te produženjem radnog vijeka motora.

Ključne riječi: EA888/3 DNUC, klip, ubrizgavalica, trošenje

## **SUMMARY**

The paper analyzes the cause of failure in the EA888/3 engine, model code DNUC, from the Golf 7 GTI TCR personal vehicle. The introductory section covers the theoretical background of the engine model, including all relevant technical specifications. In the experimental section, a failure analysis was conducted along with all necessary testing in laboratory – controlled conditions.

The results of this study contribute to a better understanding of the challenges facing fuel injection systems and may assist in the development of more effective maintenance strategies, potentially leading to greater reliability, reduced maintenance costs, and an extended engine lifespan in the long term.

Key words: EA888/3 DNUC, piston, injector, wear

## 1. UVOD

Autoindustrija je tijekom godina postala značajan dio globalne ekonomije s dugom povijesti razvoja. Od prvih motora s unutarnjim izgaranjem do današnjih naprednih električnih i hibridnih vozila, osobna vozila su prošla kroz nevjerojatne promjene u tehnologiji, sigurnosti i efikasnosti. Moderna osobna vozila više nisu samo prijevozna sredstva, oni su odraz iznimnog tehnološkog napretka s brojnim sustavima koji unapređuju i pojačavaju doživljaj i iskustvo vožnje, smanjuju potrošnju goriva i emisiju štetnih plinova te povećavaju sigurnost putnika. Osobna vozila su postala odraz osobnosti, objekti vrijedni ljudskog divljenja, maštanja i sanjarenja [1].

Unatoč brzom i rastućem napretku u materijalima i tehnologijama, motori s unutarnjim izgaranjem i dalje predstavljaju temeljnu moć većine vozila, a njihova složenost, isto tako, nosi sa sobom rizik od raznih kvarova. Kvarovi motora mogu imati različite uzroke, npr. trošenje, nepravilno održavanje ili moguće pogreške u proizvodnji. U ovom diplomskom radu analiziran je Volkswagenov EA888 motor, oznake motora DNUC, koji je poznat po svojoj snazi i učinkovitosti. Motor koristi napredne tehnologije u svom radu koje omogućuju izvrsna svojstva i mogućnost postizanja velikih brzina, zbog čega se ovakvi motori koriste u proizvodnji brzih i dinamičnih osobnih vozila. Unatoč tome, motor je podložan kvaru, pa je u ovom radu, za bolje razumijevanje, opisan sam motor i njegov rad [2].

U eksperimentalnom dijelu je procedurom analize kvarova utvrđen glavni razlog kvara na ovom motoru, točnije na njegovim klipovima.

## 1.1 Razrada teme, definiranje istraživačkog problema i ciljeva

U ovom diplomskom radu za osobno vozilo sportske linije Volkswagena (Golf 7 GTI TCR) utvrđen je kvar u radu motora. Procedurom analize kvarova cilj je utvrditi razlog zbog kojeg je došlo do kvara u radu motora kako bi kvar bio uklonjen. Na temelju svih zaključaka o kvaru želi se smanjiti rizik od budućih oštećenja motora i njegovih komponenti.

## 1.2. Tehničke karakteristike osobnog vozila modela Golf 7 GTI TCR, 2.0 TSI

Volkswagen proizvodi razne modele osobnih vozila (Polo, Golf, Arteon, Tiguan, Caddy i brojne druge). U ovom radu kvar je imalo osobno vozilo modela Golf GTI (eng. *Grand Touring Injection*), koji je bio inspiriran trkaćim automobilima te zbog toga ima oznaku TCR (eng. *Touring Car Racing*). Oznaka TCR donosi poboljšane značajke u odnosu na standardne GTI modele, najčešće uz dodatnu snagu i poboljšane sustave upravljanja. Oznaka TSI (eng. *Turbocharged Stratified Injection*) je oznaka za motore s turbopunjačem i izravnim (direktnim) ubrizgavanjem goriva. Turbopunjač povećava količinu zraka koja ulazi u motor te se omogućava veća snaga, bez povećanja veličine motora. Izravno ubrizgavanje goriva utječe na izgaranje i poboljšava efikasnost motora što će biti detaljnije opisano u narednim poglavljima. Broj 2.0 oznaka je zapremnine motora, tj. radni obujam. Motor ima zapremninu od 2.0 litara. Zapremnina motora mjeri se količinom prostora unutar cilindra koje klipovi koriste za kretanje i izgaranje smjese goriva i zraka [3].

**Tablica 1.** Tehničke karakteristike osobnog vozila Golf 7 GTI TCR, 2.0 TSI [3]

Godina proizvodnje	2019.
Vrsta goriva	benzin
Oznaka motora	DNUC
Mjenjač	sedmostupanjski DSG (eng. <i>Direct – Shift Gearbox</i> )
Pogon	prednji
Maksimalna snaga	213 kW/290 konjskih snaga (pri 5400 do 6400 okretaja u minuti)
Maksimalni okretni moment	380 Nm (na od 1950 do 5300 okretaja u minuti)
Broj cilindara	4
Masa	1410 kg

## 2. TEORIJSKE OSNOVE

### 2.1. Karakteristike i funkcije motora 2.0 TSI EA888/3 DNUC

#### 2.1.1. Razvoj modela motora kroz generacije proizvodnje

Motori serije EA888 koje proizvodi Volkswagen imali su značajan utjecaj tijekom posljednjih desetak godina na razvoj automobilske industrije jer su motori zbog svojih iznimnih karakteristika (učinkovitosti, ekonomičnosti, pouzdanosti, konstrukcije, dugovječnosti) postali popularan odabir za mnoge vrste osobnih vozila izvan Volkswagen grupacije [4].

U 2006. godini ugrađen je prvi motor novog tipa EA888, koji je dio „Gen0.“, u model osobnog vozila Audi A3, a umjesto remena za okretanje bregaste osovine (razvodni remen) imao je lanac za okretanje bregaste osovine (razvodni lanac). Razvodni lanac je komponenta koja sinkronizira okretanje radilice i bregaste osovine, omogućujući da se ventili otvaraju i zatvaraju u točnom trenutku u odnosu na pokrete klipova, a dužeg je vijeka trajanja u odnosu na razvodni remen. U istoj godini razvila se nova generacija motora „Gen1“ u kojoj je došlo do promjene u sustavu ventilacije motora i ugradnje podesive uljne pumpe [4].

Nakon 2008. godine, sve do 2011. godine, dogodio se prijelaz na „Gen2.“ uz nove nadogradnje na motoru, koje su nažalost donijele nove probleme, poput povećane potrošnje ulja i goriva i prekomjerenih naslaga nešistoća na usisnim ventilima. Novonastali problemi bili su rezultat nadogradnje: manja radilica, tanji klipni prstenovi, podesiva pumpa za gorivo, nova brtva glave klipa [4].

Od 2011. godine do 2022. godine, u upotrebi su motori „Gen3.“ koji su se počeli ugrađivati i u vozila drugih marki (Audi, Seat, Škoda). Cilj ove generacije je povećanje uštede goriva i rješavanje ostalih nedostataka prošle generacije. Blok cilindara je postao lakši (smanjena je debljina stijenki), radilica je također postala lakša, a glava cilindra dobila je nove bregaste osovine, ventile i usisnu granu s kombiniranim ubrizgavanjem goriva:

1. FSI (eng. *Fuel Stratified Injection*): direktno ubrizgavanje kada je potrebna veća snaga i to izravno u komoru za izgaranje, točno iznad glave klipova.

2. MPI (eng. *Multipoint Injection*): ubrizgavanje na nižim okretajima, gdje se gorivo ubrizgava u usisni razvodnik te se miješa sa zrakom prije nego uđe u cilindre. U ovoj generaciji proizveden je motor oznake DNUC [4].

U 2022. godini započeo je razvoj motora EA888 Evo4, kojim će se moći postizati i do 315 konjskih snaga, što će uvelike promijeniti automobilsku industriju [4].

### 2.1.2. Osnovne karakteristike motora EA888/3 DNUC

Prema [3], [5], [6] izdvojene su najznačajnije karakteristike motora EA888/3 DNUC i prikazane su u Tablici 2.

**Tablica 2.** Osnovne karakteristike motora EA888/3 DNUC

Tehničke karakteristike	Vrijednost	Mjerna jedinica
Godina proizvodnje	2014. – 2020.	
Vrsta goriva	benzin	
Masa	140	kg
Zapremnina	1984	cm <sup>3</sup>
Sustav ubrizgavanja goriva	FSI	
Izlazna snaga	213	kW
Izlazni zakretni moment	380	Nm
Provert cilindra	82,5	mm
Hod klipa	92,8	mm
Kompresijski omjer	9,3:1	
Kapacitet motornog ulja	5,7	l
Cijena	4 199,00	€
Punjenje	turbopunjač IHI IS38	



### 2.1.3. Konstrukcija i izgled motora

Motor EA888 iz treće generacije motora sastoji se od četiri cilindra poredanih u jedan red i turbobenzinskog motora s brojnim naprednim tehnološkim karakteristikama. Blok motora izrađen je od lijevanog željeza, dok je glava motora izrađena od aluminijeve legure AlSi10Mg [7].

Svi cilindri rade u paru, redom 1-3-4-2. Motor koristi jedan turbopunjač IHI IS38, koji je smješten na stražnjem dijelu motora, a povezan je s ispušnim sustavom i sustavom hlađenja. Turbopunjač provodi kompresiju zraka prije nego li zrak uđe u cilindre te time povećava snagu i efikasnost motora. Sustav radi na principu izravnog ubrizgavanja goriva. Motor koristi razvodni lanac za pogon bregastih osovina. Sustav hlađenja je potreban za osiguravanje optimalne temperature tijekom rada, a sustav za podmazivanje koristi uljnu pumpu koja kontrolira količinu ulja za podmazivanje motora [8].



**Slika 1.** Izgled motora EA888/3 DNUC [9]

Osnovni dijelovi motora su: blok motora, klipovi i klipni prstenovi, klipnjače s letećim ležajevima, radilica, bregasta osovina, ventili, svjećice u ovom slučaju jer je riječ o benzinskom motoru, razvodni lanac, uljno korito i uljna pumpa s filterima [10].

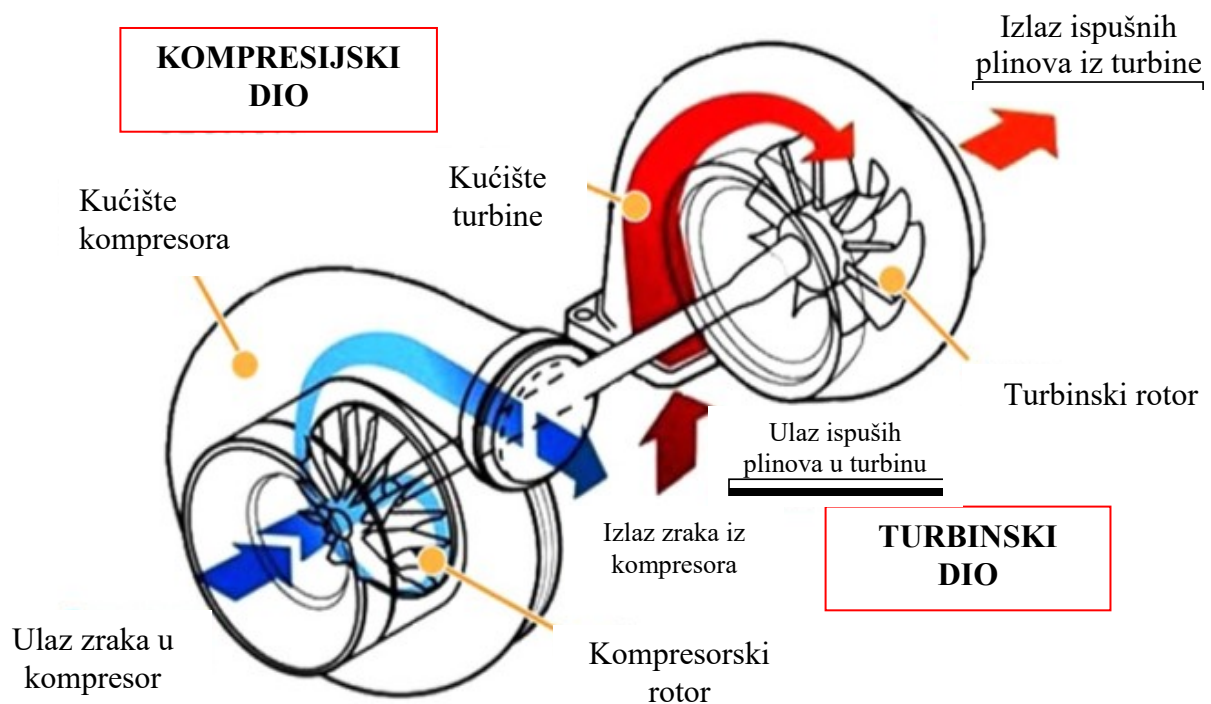
#### 2.1.4. Najznačajnije komponente u radu motora EA888/3 DNUC

Ispod poklopca motornog prostora započinje protok zraka koji ulazi kroz otvor za usis zraka u prednjem dijelu osobnog vozila, nakon toga prolazi kroz zračni filter koji uklanja nečistoće i prljavštinu. Zatim nastavlja tok u stražnji dio i ulazi u ulaz turbopunjača koji pokreće turbinu koja komprimira i stlačuje zrak prije nego uđe u cilindar. Zrak prolazi međuhladnjak (eng. *Intercooler*) koji hladi zrak stlačen turbopunjačem, zaokružuje natrag prema kućištu i u usisni razvodnik koji ravnomjerno distribuira zrak prema svakom cilindru motora. U cilindru motora zrak se miješa s gorivom tijekom procesa izravnog ubrizgavanja goriva (FSI). Kada je smjesa zraka i goriva dovoljno komprimirana, svjećica stvara iskrnu koja preskače i uzorkuje izgaranje. Eksplozija izgara smjesu, što proizvodi snagu koja pomiče klip prema dolje. Ispušni plinovi nastali izgaranjem izlaze iz cilindra kroz ispušne ventile, prolaze natrag kroz turbopunjač (ispušna strana), katalizator, filter za čestice te na kraju kroz prigušivač (poznatiji kao auspuh) koji predstavlja izlaz ispuha [11].

##### 2.1.4.1. Turbopunjač IHI IS38

IHI Corporation je japanski proizvođač turbopunjača, model IS38 je veći od standardnog turbopunjača IS20. Model IS38 omogućuje motorima brži odziv, bolje ubrzanje i veću snagu pri višim okretajima [12].

Turbopunjači se koriste za povećanje snage motora, s ciljem smanjenja veličine motora. Smješten je na ispušnoj grani blizu motora, a radi na dva osnovna principa. Na jednoj strani nalazi se turbinski dio kroz koji prolaze ispušni plinovi koji pokreću rotorske lopatice unutar njegovog kućišta pri visokim temperaturama, a nakon prolaska kroz turbinu ulaze u ispušni sustav te nakon obrade u atmosferu. S druge strane je kompresijski dio gdje rotorske lopatice pri velikoj brzini vrtnje uvlače svježi zrak u kućište kompresora i tlače ga dok prolazi kroz kućište, a dalje ulazi u cilindar. Centrifugalna sila generirana je u kompresoru turbopunjača i pomaže u procesu kompresije zraka. Iz tog razloga korišten je izraz centrifugalni kompresor. Oba dva dijela su povezana vratilom. Na Slici 2. prikazan je sustav rada turbopunjača [11].



Slika 2. Turbopunjač [11]

Neka moderna osobna vozila (Audi, BMW) koriste napredne turbopunjače s dvostrukim načinom rada kako bi omogućili dodatnu električnu podršku pri nižim brzinama vrtnje motora, čime se smanjuje kašnjenje pri ubrzanju i poboljšava učinkovitost. Tada je kompresor, dok radi, povezan s električnim motorom, a turbina je spojena na električni generator putem spojke. Dvije spojke (najčešće elektromagnetske) omogućuju dva različita načina rada ovisno o potrebama motora:

1. **Pomoćni način rada:** Kada motor radi pri nižim okretajima, ispušni plinovi nemaju dovoljno snage za pokretanje turbine. U tom slučaju, električni motor osigurava dodatnu energiju za pogon turbopunjača.
2. **Neovisni način rada:** Kada motor radi pri višim okretajima, spojke se otpuštaju, što omogućuje turbini i kompresoru da rade neovisno jedan o drugome. Tako svaki od njih može postići svoju optimalnu brzinu rotacije, čime se poboljšavaju značajke motora. [13].

U neovisnom načinu rada, ispušni plinovi motora pokreću turbinu, u tom trenutku kada su plinovi povučeni od strane turbine, kompresor komprimira svjež zrak, zagrijava ga i šalje dalje prema međuhladnjaku koji ima svrhu hlađenja stlačenog zraka prije nego uđe u motor. Vrući zrak hlađenjem povećava gustoću, što poboljšava izgaranje. Ohlađeni zrak se dalje usmjerava prema glavi motora i ulazi u usisni ventil [11].

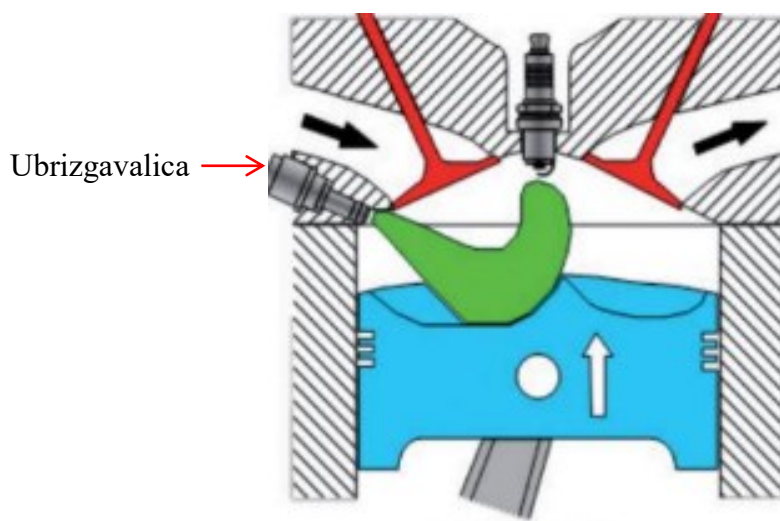
Ispušni plinovi, nakon pokretanja turbine, izlaze iz turbopunjača kroz ispušni sustav koji se sastoji od katalizatora koji ima ulogu smanjenja emisije štetnih plinova nizom kemijskih reakcija. Ukoliko osobno vozilo ima dodatni filter za čestice, bit će moguće dodatno čišćenje plinova, a ako to nije slučaj, ispušni plinovi prolaze kroz prigušivač i napuštaju vozilo kroz izlaz ispušnog sustava. Europska unija postavlja ograničenja i određuju dopuštene razine emisija štetnih plinova koje vozila smiju ispuštati. Od 2014. godine uvedena je norma EURO 6 koja postavlja stroža ograničenja, posebno za emisije dušikovih oksida kojih se proizvođači moraju pridržavati [14].

#### 2.1.4.2. *Izravni (direktni) sustav ubrizgavanja goriva*

U benzinskim motorima najčešće korištena tehnologija ubrizgavanja goriva je izravnim putem. Gorivo se ubrizgava izravno pod visokim tlakom (između 100 i 200 bar) u komoru za izgaranje svakog cilindra motora. Sustav je razvijen s poboljšanim ubrizgavanjem, gdje nema miješanja goriva sa zrakom u usisnoj grani prije ulaska u cilindar. Izravnim ubrizgavanjem goriva omogućena je veća kontrola nad smjesom goriva i zraka što rezultira poboljšanom učinkovitošću i većom izlaznom snagom motora [15].

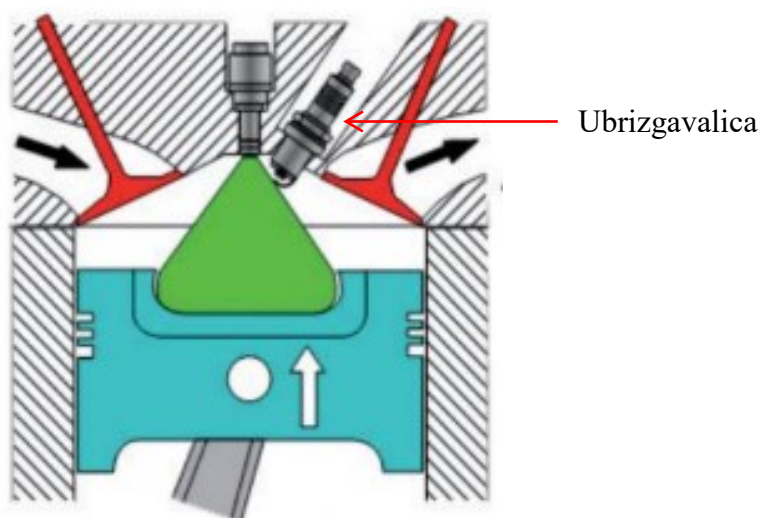
Postoje različiti oblici izravnog ubrizgavanja goriva, ovisno o položaju ubrizgavalica, pa se tako razlikuju:

1. **Zidno ubrizgavanje:** gorivo se ubrizgava na unutarnju stranu usisnog zida ili na stijenku usisnog kanala kroz ubrizgavalicu postavljenu pod kutem kao na Slici 3. Ovime je omogućeno da gorivo dođe u kontakt sa stijenkom cilindra i površinom klipa koja je posebno oblikovana, a zatim se miješa s usisnim zrakom dok se kreće prema komori za izgaranje. S obzirom da se gorivo nalazi u kontaktu sa stijenkom može ispirati ventile i smanjiti taloženje ugljika na njima. Metoda je korištena u motorima za sportske automobile, poput Golfa 7 GTI TSR koji je tema ovog rada [16].



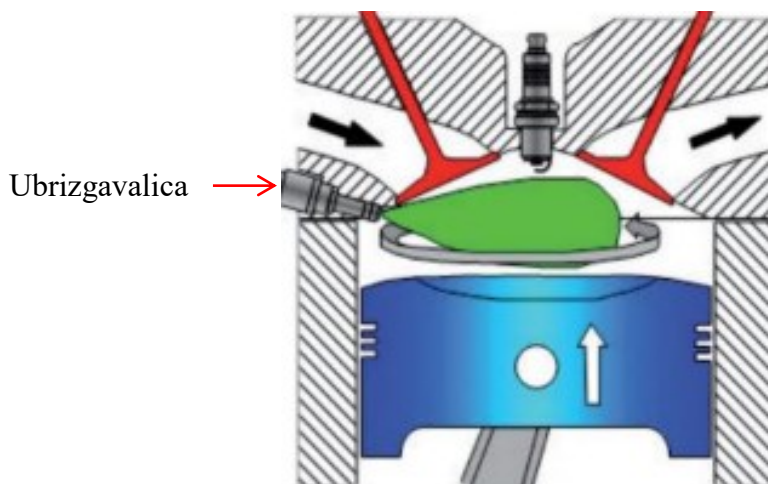
Slika 3. Zidno ubrizgavanje goriva [16]

2. **Ubrizgavanje raspršivanjem:** gorivo se ubrizgava u komoru za izgaranje u obliku maglice koja je usmjerena prema središtu komore za izgaranje kao na Slici 4. Ubrizgavalica je smještena pokraj svjeće. Ovom tehnikom omogućeno je precizno vođenje raspršivanja goriva kako bi se postiglo optimalno miješanje sa zrakom. Tijekom ovog načina rada motor radi s „viškom“ zraka i tako je osigurana izvorna učinkovitost goriva. Višestruka ubrizgavanja omogućuju podizanje motora na više okretaja u minuti. Tijekom svakog takta kompresije ostvaruje se serija ubrizgavanja u razmaku od samo djelića sekunde. To omogućuje bolje stvaranje smjese i izgaranje te manju potrošnju goriva [16].



Slika 4. Ubrizgavanje goriva raspršivanjem [16]

**3. Ubrizgavanje vođeno zrakom:** gorivo se ubrizgava u zrak koji se vodi prema komori za izgaranje kao na Slici 5. Zrak ima ključnu ulogu u vođenju i raspršivanju goriva što omogućava bolje miješanje s usisnim zrakom. Kod ove tehnike ne dolazi do kontakta između goriva i klipa ili cilindra, već se motor koristi snažnim vrtložnim gibanjem zraka i raspršivanje goriva usmjereno je izravno prema svjećici [16].



**Slika 5.** Ubrizgavanje goriva vođeno zrakom [16]

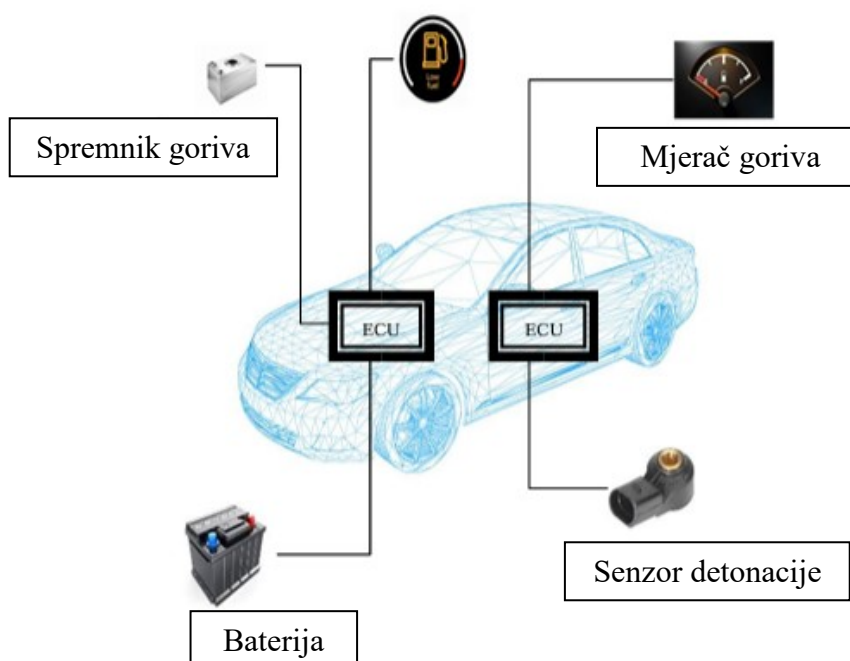
Razvoj četverotaktnih motora s paljenjem svjećicom koji su osmišljeni za ubrizgavanje benzina izravno u komoru za izgaranje važan je napredak u automobilske industriji. Termodinamički potencijal takvih motora donosi značajno poboljšanu ekonomičnost potrošnje goriva. Aktivno se istražuju procesi ubrizgavanja goriva, raspršivanja i isparavanja raspršivanjem, hlađenja punjenjem, pripreme smjese i kontrole kretanja zraka u cilindru radi što boljeg razvoja na novim modelima osobnih vozila [17].

Sustav ubrizgavanja goriva u motoru ključan je faktor koji se mora pažljivo uskladiti s karakteristikama cilindra kako bi se osigurao željeni oblak smjese goriva i zraka u cijelom radnom rasponu motora. Za učinkovito izgaranje smjese potrebna je stabilna i kompaktna geometrija raspršivanja. Utvrđeno je da je tlak ubrizgavanja goriva vrlo važan za postizanje učinkovitog raspršivanja [17].

#### 2.1.4.3. *Elektronička upravljačka jedinica*

Jedinica za upravljanje motorom, ECU (eng. *Electronic Control Unit*) je digitalni uređaj koji je povezan s ostalim ugrađenim digitalnim sustavima vozila i upravlja električnim podsustavima u vozilu. ECU prikuplja informacije iz svih senzora (senzor za temperaturu ulja i

rashladne tekućine, protok zraka, kisik, i brojni drugi) postavljenih po vozilu te na taj način upravlja nizom funkcija poput: upravljanja radom turbopunjača, ubrizgavanjem goriva, vremenom paljenja svjećice, klimatizacijskim sustavom, mjenjačem, sustavom protiv blokiranja kotača itd. U modernim osobnim vozilima prisutno je od oko 80 do 100 ECU-ova. Neki od različitih tipova ECU-ova su: modul za upravljanje motorom ECM (eng. *Engine Control Module*), modul za upravljanje pogonskim sklopom PCM (eng. *Power Train Control Module*), modul za upravljanje prijenosom TCM (eng. *Transmission Control Module*), modul za upravljanje kočnjem BCM (eng. *Brake Control Module*), i mnogi drugi. ECU radi na principu hardvera i softvera kako bi ostvario željene funkcije određenog modula [18].

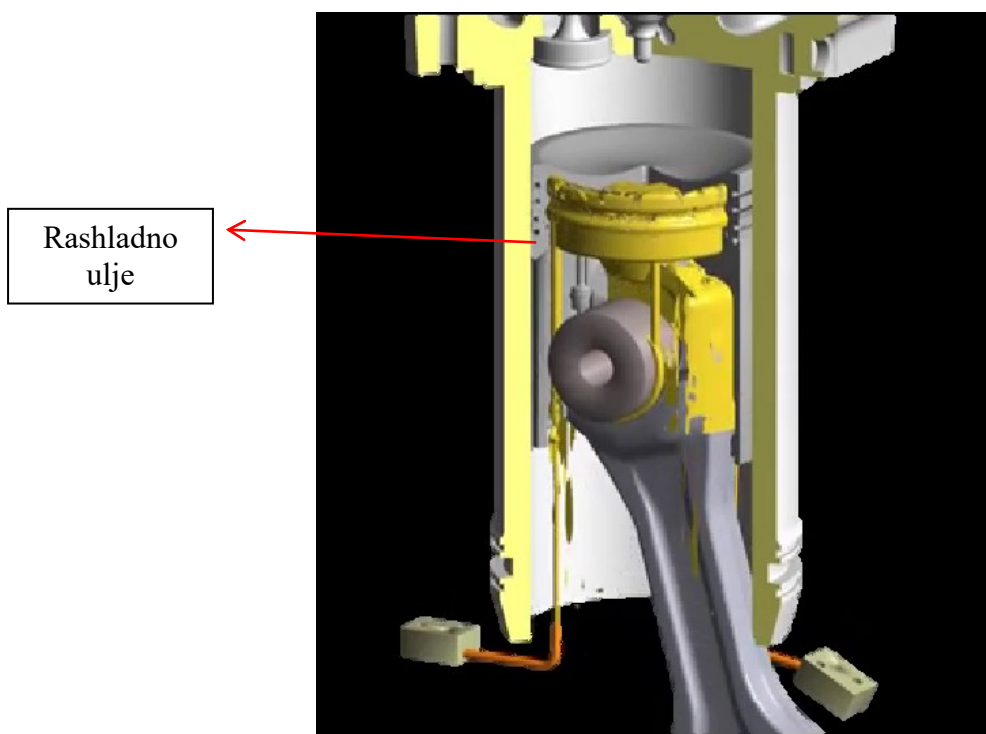


**Slika 6.** Mreža rada elektroničke upravljačke jedinice [18]

#### 2.1.4.4. Sustav hlađenja klipova

Izvedba motora s unutarnjim izgaranjem se posljednjih godina poboljšala, a kao rezultat toga, povećali su se tlak i toplinska opterećenja na mnogim dijelovima motora, posebice na klipovima. Pregrijavanje klipa smanjuje relativnu učinkovitost motora pa je poželjno hlađenje klipa. Zaštita klipa od pregrijavanja može učinkovito povećati toplinsku učinkovitost motora i smanjiti nedostatke u radu. Sustav s mlaznicama za hlađenje klipa jedan je od ključnih elemenata koji utječu na upravljanje toplinom klipa. Mlaz ulja usmjeren je prema donjem dijelu klipa koji

je u pokretu vrlo velikom relativnom brzinom i uzrokuje smanjenje temperature u klipu. Sustav hlađenja koristi iste uljne kanale kao i sustav za podmazivanje pa nije potreban dodatan sustav hlađenja za motor, što je ekonomično rješenje [19].



Slika 7. Sustav hlađenja klipa [20]

## 2.2. Klipovi motora

### 2.2.1. Četverotaktni Otto ciklus

Princip rada motora EA888/3 DNUC baziran je na četverotaktnom Otto ciklusu. Ciklus se odvija u četiri glavna koraka tj. takta [21]:

1. Usis: klip se pomiče prema dolje u cilindru i stvara se podtlak koji usisava smjesu zraka i goriva kroz otvoreni usisni ventil. U prvom koraku se priprema smjesa goriva i zraka za kasnije izgaranje.

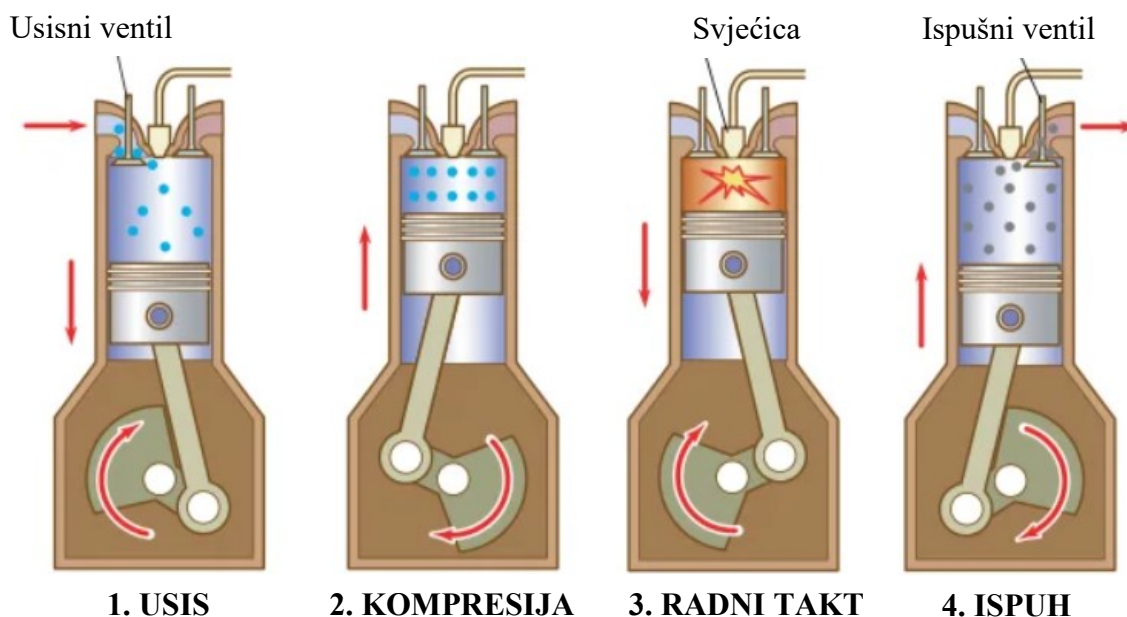
2. Kompresija: klip se pomiče prema gore, a tijekom gibanja klipa, smjesa zraka i goriva se komprimira unutar cilindra. Usisni i ispušni ventili su u ovom koraku zatvoreni.

3. Radni takt: kada klip dosegne gornju točku, goriva smjesa pali se iskrom koja preskače između elektroda svjećice. Tijekom izgaranja oslobađa se velika količina topline i povećava se



tlak u cilindru, a klip se pomiče prema dolje. Ovaj korak stvara mehaničku energiju koja pokreće motor.

4. Ispuh: klip se ponovno pomiče prema gore i pritišće ispušne plinove izgorjelog goriva kroz ispušni ventil van iz cilindra.



**Slika 8.** Četverotaktni Otto ciklus [22]

U četverotaktnom motoru s paljenjem na svjećicu klipovi rade u paru i to prema redosljedu paljenja 1-3-4-2. Raspored se odnosi na redni broj klipova koji se pomiču tijekom različitih taktova motora. Zbog takvog rasporeda omogućen je kontinuiran rad motora, smanjene su vibracije i osigurano je učinkovito izgaranje u cilindrima [21].

Svjećica je vrlo važna komponenta motora s unutarnjim izgaranjem koja zbog preskakanja iskre pali smjesu goriva u cilindru. Prilikom svakog takta izgaranja iskra preskače jer je pobuđena visokonaponskom strujom od 10 000 do 20 000 V. Svaka vrsta benzinskog motora zahtijeva svjećicu određenih svojstava, tj. promjera i uspona navoja, te toplinske vrijednosti. U prostoru između elektroda na svjećici može se sakupiti čađa ili ulje što bi moglo uzrokovati prolaz struje bez pojave iskre. Zbog toga je važno da se svjećica u pogonu dovoljno ugrije (oko 500 °C) da bi sakupljene nečistoće izgorjele i da bi se svjećica očistila. [21].

### 2.2.1. Konstrukcija klipa

Blok motora sastoji se od cilindara u koje su smješteni klipovi s prstenovima i klipnjačom povezani s radilicom. Klip je valjkasto tijelo koje se unutar cilindra giba translatorno. Klip je važna komponenta motora koja prenosi gibanje do klipnjače spojene na radilicu koja rotira. Klipnjača je pokretni element dok je glava cilindra stacionarni dio koji zatvara cilindar i sadrži ventile i svjeće unutar komore za spaljivanje [23].

Smanjenje mase klipa donijelo je brojna poboljšanja u radu motora, a sve zahvaljujući izradi klipova od aluminijevih legura. Motori s aluminijevim klipovima radili su više tisuća kilometara bez i najmanje naznake kvara za razliku od prethodnih izvedbi od čelika ili lijevanog željeza. Motor s aluminijevim klipovima može raditi dulje vrijeme prije nego što je potrebno ukloniti nečistoće koje se nakupljaju na glavi klipa. Aluminijevi klipovi bolje provode toplinu i brže se hlade, što smanjuje taloženje naslaga nečistoća na njihovim površinama. Osim toga, zbog manje mase i otpornosti na koroziju, aluminijevi klipovi omogućuju dulji rad motora bez potrebe za čestim čišćenjem. Klip, osim što je podvrgnut deformacijama zbog djelovanja topline, podvrgnut je i elastičnoj deformaciji zbog djelovanja tlaka plinova[24].

Aluminijevi klipovi šire se više nego klipovi od lijevanog željeza onda kada se zagriju, što je potrebno uzeti u obzir pri konstrukciji i oblikovanju klipa da se klip zbog prevelikog rastezanja ne bi zaglavio u cilindru. Iz tog razloga, klipovi od aluminijevih legura imaju veću zračnost na gornjem dijelu. Kada je motor s aluminijevim klipovima pri pokretanju osobnog vozila hladan, može zbog dodatnog prostora između stijenki klipa i cilindra proizvoditi blagi zvuk koji je posljedica udaranja klipa u cilindar, ali zvuk nestaje kada se klipovi zagriju i rašire do optimalne veličine [25].

Klipni mehanizam se sastoji od nekoliko ključnih komponenti prikazanih na Slici 9.

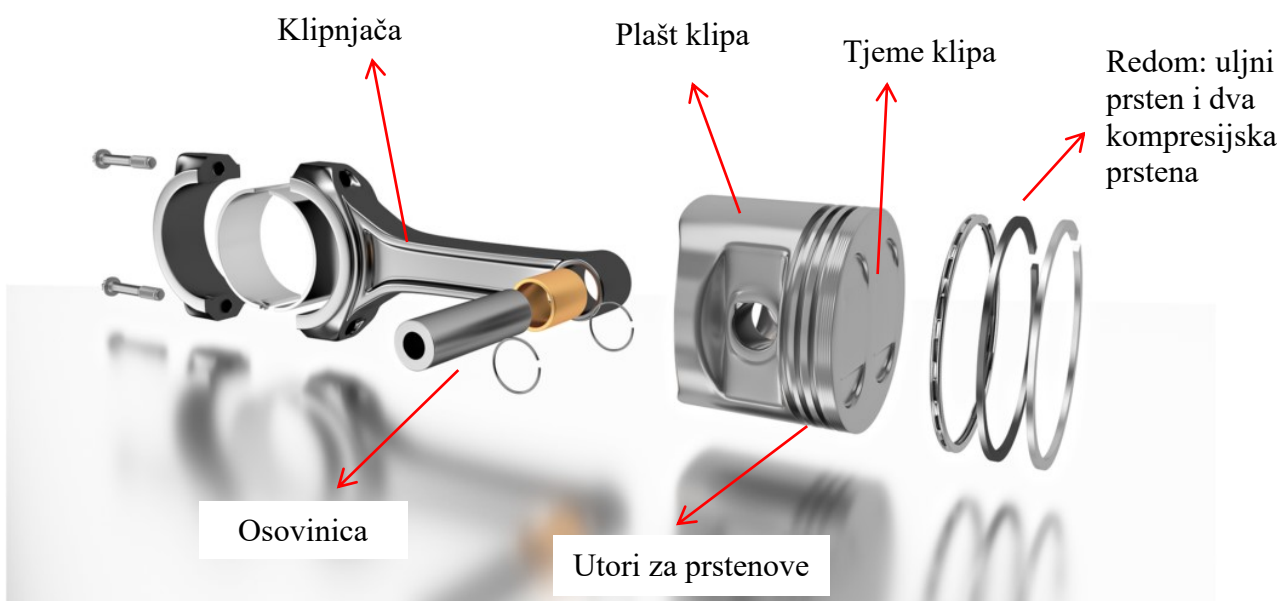
1. Tjeme klipa koje je tijekom procesa izgaranja izloženo visokim temperaturama i tlakovima.

2. Utori za klipne prstenove, redom: dva kompresijska i jedan uljni prsten. Kompresijski prstenovi sprječavaju da plinovi iz kompresijskog prostora prodiru između klipa i stijenke cilindra u komoru koljenastog vratila. Uljni prsten omogućuje da dio ulja za podmazivanje prođe prema gornjem dijelu cilindra kako bi podmazao kretanje klipa, ali i struže suvišno ulje što ga koljenasto vratilo rotacijom nabacuje na donji dio unutrašnjih ploha cilindra. Prsteni vanjskom stranom naliježu na stijenke cilindra, a s bočnim stranama na utor u klipu. Na taj način ne dolazi do nakupljanja ulja u komori za izgaranje.

3. Otvor za smještaj osovinice. Osovinica klipa prenosi silu s klipa na klipnjaču. Ima svoj ležaj, a aksijalni pomak osovinice sprečavaju osigurači.

Ostali dijelovi koji sudjeluju u radu klipa:

4. Klipnjača povezuje klip s radilicom motora, prenosi silu generiranu izgaranjem na radilicu koja se rotira i generira mehaničku energiju [26].



**Slika 9.** Sustav klipa i njegovi najvažniji dijelovi [27]

### 2.2.3. Najčešći kvarovi i uzroci kvarova na klipovima

Visok postotak neispravnih osobnih vozila koja su prešla mali broj kilometara ukazuje da je rano prepoznavanje oštećenja od izuzetne važnosti za sigurnost i pouzdanost vozila. Greške elektroničkog upravljačkog sustava i neispravnosti u radu motora mogu imati ozbiljne posljedice, uključujući oštećenje motora pa čak i potpuni gubitak kontrole nad vozilom. Posljedice mogu izazvati materijalna oštećenja, ali predstavljaju i opasnost za vozača, putnika i druge sudionike u prometu [28].

Na temelju dosadašnjih analiza kvarova u objavljenim znanstvenim i stručnim radovima [28, 29] utvrđeno je da uzroci kvarova na klipu motora mogu nastati iz različitih razloga, a najčešći uzroci uključuju:

1. Pregrijavanje: previsoke temperature mogu uzrokovati deformaciju klipa, što dovodi do gubitka kompresije i mogućih oštećenja.
2. Nedostatak podmazivanja: neadekvatno podmazivanje može uzrokovati trenje između klipa i cilindra, što vodi do trošenja i oštećenja klipa.
3. Kvaliteta goriva: upotreba niskokvalitetnog goriva može uzrokovati detonacijsko izgaranje, što može oštetiti klipove.
4. Nepravilno postavljeni razmaci: neodgovarajući razmaci između klipa i cilindra mogu dovesti do nepoželjnog trenja i trošenja klipa.
5. Oštećeni prstenovi: ako su prstenovi klipa istrošeni ili oštećeni, može doći do prodiranja ulja u prostor za izgaranje, što smanjuje efikasnost motora.
6. Nerazmjerno opterećenje: prevelika snaga ili nepravilno postavljeni dijelovi motora mogu stvoriti nerazmjerno opterećenje na klipovima.
7. Strukturni problemi: oštećenja zbog proizvodnje ili lošeg odabira materijala mogu uzrokovati kvarove.
8. Učestala opterećenja: učestala opterećenja tijekom rada motora mogu oslabiti klip.

Osiguranje redovitog održavanja, korištenje kvalitetnog goriva i pravilan rad motora ključni su za sprječavanje navedenih kvarova [29].

### 2.3. Ubrizgavalica

Ubrizgavalica (injektor) je ključna komponenta u sustavu ubrizgavanja goriva kod motora s unutarnjim izgaranjem, Slika 10. Njezina osnovna funkcija je ubrizgavanje potrebne količine goriva u usisni ili prostor za izgaranje kako bi se postigla optimalna smjesa zraka i goriva za izgaranje [31].

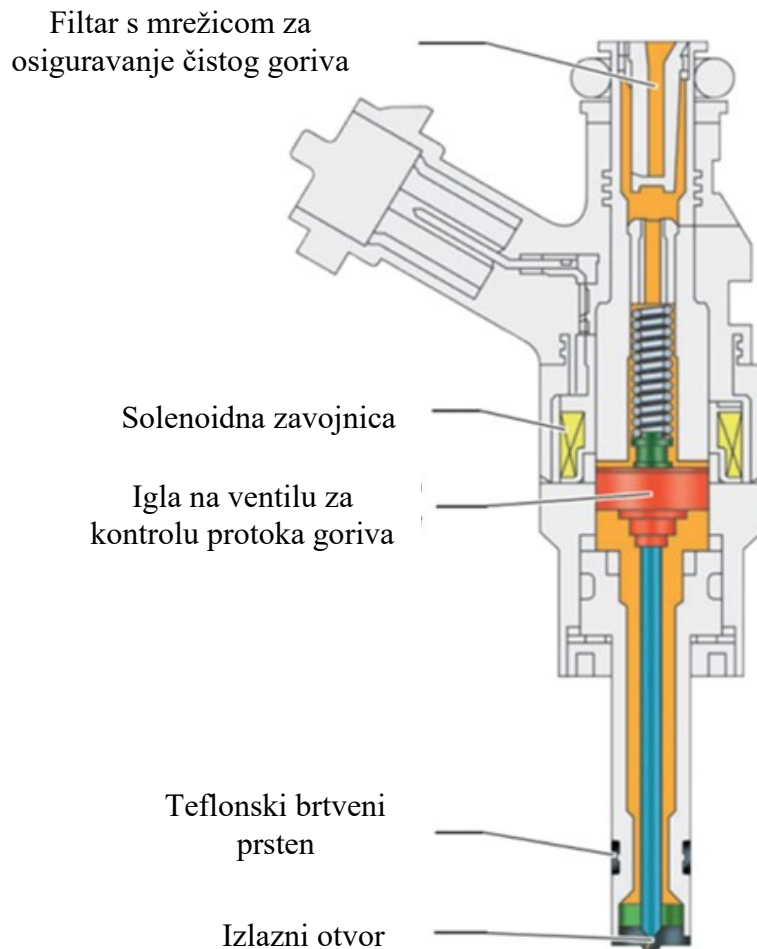


**Slika 10.** Ubrizgavalica [30]

U dijelove sustava za ubrizgavanje ubrajamo:

1. Elektromagnetski solenoid: gornji dio ubrizgavalice je solenoid, koji upravlja otvaranjem i zatvaranjem ventila unutar ubrizgavalice. ECU šalje električni signal solenoidu, koji pomoću magnetske sile kontrolira ubrizgavanje goriva.
2. Spremnik visokotlačnog goriva: iz kojeg gorivo dolazi pod visokim tlakom i spremno je za ubrizgavanje.
3. Ventil ubrizgavalice (injektorski ventil): ventil kontrolira protok goriva prema komori za izgaranje. Ventil se otvara i zatvara u vrlo kratkom vremenskom intervalu pod kontrolom ECU – a kako bi ubrizgao potrebnu količinu goriva u pravom trenutku.
4. Mlaznica za ubrizgavanje: na vrhu ubrizgavalice se nalazi mlaznica koja raspršuje gorivo direktno u komoru za izgaranje. Izgled mlaznice osigurava fino raspršivanje goriva kako bi se postiglo potpuno izgaranje smjese goriva i zraka.
5. Električni priključak: dio koji povezuje ubrizgavalicu s ECU – om i prima signale za otvaranje i zatvaranje ventila [31].

Dijelovi ubrizgavalice prikazani su na Slici 11.



**Slika 11.** Dijelovi ubrizgavalice [31]

Za rad ubrizgavalice važan je visok tlak potreban za ubrizgavanje goriva u motor, koji mora biti u mogućnosti raspršiti gorivo u finu maglicu za uglađeni rad i smanjenu potrošnju.

Najznačajniji koraci u radu ubrizgavalice su:

1. Dovod goriva: pumpa za gorivo iz spremnika za gorivo kroz cijevi i filtere pod visokim tlakom povlači gorivo do ubrizgavalice, a rad je praćen uz ECU i senzore koji prate različite parametre u radu motora i na temelju tih podataka (brzina, opterećenje, temperatura) odlučuju kada i koliko goriva treba ubrizgati.
2. Električni signal: ECU šalje električni signal solenoidnoj zavojnici unutar ubrizgavalice u određenom trenutku. Zavojnica je elektromagnetski sklop unutar ubrizgavalice koji stvara

magnetsko polje kada primi signal. Magnetsko polje uzrokuje otvaranje ventila (igle) unutar ubrizgavalice.

3. Otvaranje ubrizgavalice: otvor se otvara kada ga pokrene elektromagnetsko polje zavojnice te je na taj način omogućen prolazak goriva iz dovoda goriva prema mlaznici ubrizgavalice. Mlaznica ima ulogu raspršivanja goriva. Raspršivanje pomaže u stvaranju homogene mješavine goriva i zraka, što je ključno za učinkovito izgaranje.

4. Ubrizgavanje goriva u komoru za izgaranje: ubrizgavanje goriva traje dok je ventil ubrizgavalice otvoren. Gorivo se ubrizgava pod visokim tlakom, a količina ubrizganog goriva određuje se trajanjem signala koji dolazi iz ECU – a. Što duže traje signal, više goriva se ubrizgava. Količina goriva koja se ubrizgava je različita ovisno o stanju motora (npr. veća količina pri ubrzanju, manja pri praznom hodu).

5. Miješanje goriva sa zrakom: kada gorivo prođe kroz mlaznicu ubrizgavalice, ono se raspršuje u obliku fine maglice koja se miješa sa zrakom unutar komore za izgaranje (s obzirom da je ubrizgavanje izravno u komoru za izgaranje).

6. Zatvaranje ubrizgavalice: nakon što ECU prekine električni signal prema ubrizgavalici, magnetsko polje u zavojnici nestaje. Povratna opruga vraća ventil u zatvoreni položaj čime se zaustavlja dotok goriva u mlaznicu. Ubrizgavalica ostaje zatvorena dok ECU ne pošalje novi signal za sljedeći ciklus ubrizgavanja [32].

### *2.3.1. Najčešći kvarovi i uzroci kvarova na ubrizgavalicama*

Ubrizgavalice su, zbog visokog tlaka, temperature i stalne izloženosti gorivu podložne raznim kvarovima koji mogu utjecati na rad motora. Najčešći problemi uključuju začepljenje mlaznice, curenje goriva, kvar solenoida i neispravno raspršivanje goriva, što može dovesti do smanjene učinkovitosti, veće potrošnje goriva, ali i ozbiljnijih oštećenja motora. Česti uzroci tome su:

1. Nekvalitetno gorivo s nečistoćama je najčešći kvar jer može doći do začepjenja mlaznice na ubrizgavalici pa će umjesto raspršivanja u obliku fine maglice biti kapljice koje lošije izgaraju i uzrokuju veću potrošnju goriva.

2. Zbog nepravilnog pritiska goriva, odnosno ako sustav ne održava potreban tlak, ubrizgavalica neće moći pravilno ubrizgavati gorivo, što može uzrokovati lošu smjesu goriva i zraka.

3. Kvarovi na dijelovima ubrizgavalice (solenoid, ventil ili mlaznica) mogu nastati uslijed trošenja, posebno zbog stalnog rada pod visokim tlakom. Osim mehaničkih oštećenja, mogući su i električni problemi na sensorima, npr. solenoidna zavojnica može imati kratki spoj u namotima, što uzrokuje neispravan rad ili potpuno zatajenje ubrizgavalice.

Održavanje ubrizgavalica uključuje redovnu upotrebu aditiva za čišćenje goriva i pregled ubrizgavalica tijekom servisa kako bi se smanjila mogućnost kvarova [33].



### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Osnovni podaci, opis kvara

U radu je analizirano osobno vozilo Volkswagenovog modela: Golf 7 GTI TCR, 2.0 TSI turbobenzinski motor s oznakom motora DNUC koji posjeduje snagu od 213kW, tj. 290 konjskih snaga. Mjenjač je sedmostupanjski automatski DSG mjenjač, a pogon je prednji. Model osobnog vozila je proizveden 2019. godine i dio je posebne sportske linije poznatog Golf GTI modela, pri čemu je oznaka GTI (eng. *Grand Touring Injection*) korištena za sportski tipa Golfa s povećanom snagom, poboljšanim karakteristikama i sportskim dizajnom. Linija je inspirirana trkaćim automobilima iz TCR trkaće serije. Tako da je TCR (eng. *Touring Car Racing*) više sportska verzija GTI modela. Oznaka TSI (eng. *Turbocharged Stratified Injection*) odnosi se na tehnologiju karakterističnu za benzinske motore koja u svom radu koristi turbopunjače i sustav s direktnim ubrizgavanjem goriva. Od ostalih specifikacija u trenutku dolaska osobnog vozila u servis i informacija danih od strane automehaničara, poznato je:

- Osobno vozilo je otkupljeno od preprodavača iz Njemačke pod oznakom „vozilo s neispravnim motorom“,
- dio motora je već bio otvoren i pregledan,
- vozilo se ne pokreće ispravno, ponekad se uspije upaliti, ali uz poteškoće ili se u potpunosti gasi ubrzo nakon pokretanja,
- vozilo gubi snagu pri dodavanju gasa,
- lampica za provjeru motora svijetli na kontrolnoj ploči,
- pređeno je 94 000 km.

Motor je rastavljen na sastavne dijelove kako bi se utvrdio razlog njegove neispravnosti. Na Slici 12. je izgled osobnog vozila po dolasku kod automehaničara.



**Slika 12.** Model osobnog vozila Golf 7 GTI TCR

### 3.2. Preliminarno ispitivanje dijelova

Vizualnim pregledom motora ispod poklopca motornog prostora u osobnom vozilu (koje svojim izgledom odgovara Slici 13.), utvrđeno je da, naizgled, golim okom, nema vidljivih oštećenja na vanjskom dijelu motora.

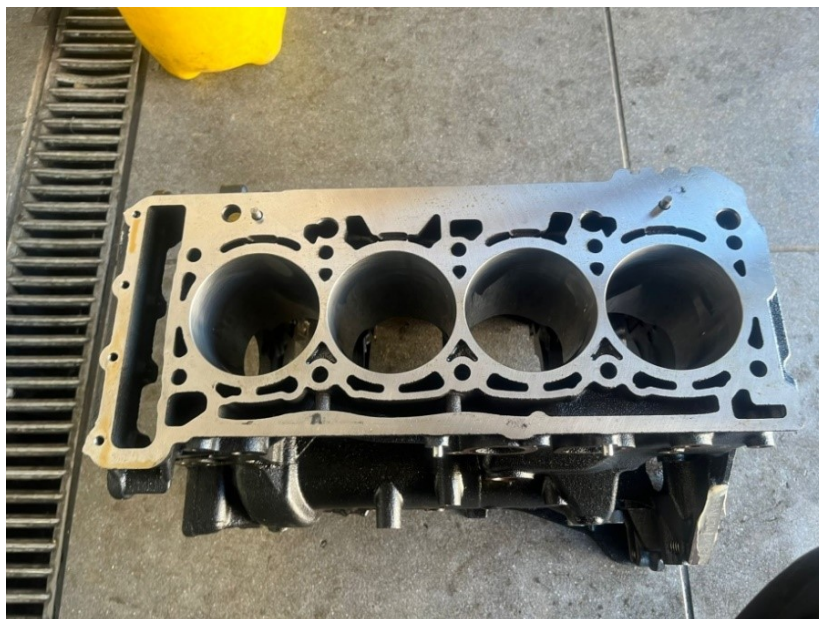


**Slika 13.** Unutrašnjost osobnog vozila ispod poklopca motornog prostora [34]

Blok motora je izvađen (Slika 14. i Slika 15.) i vizualnim pregledom je utvrđeno da glava motora nema vidljivih oštećenja.

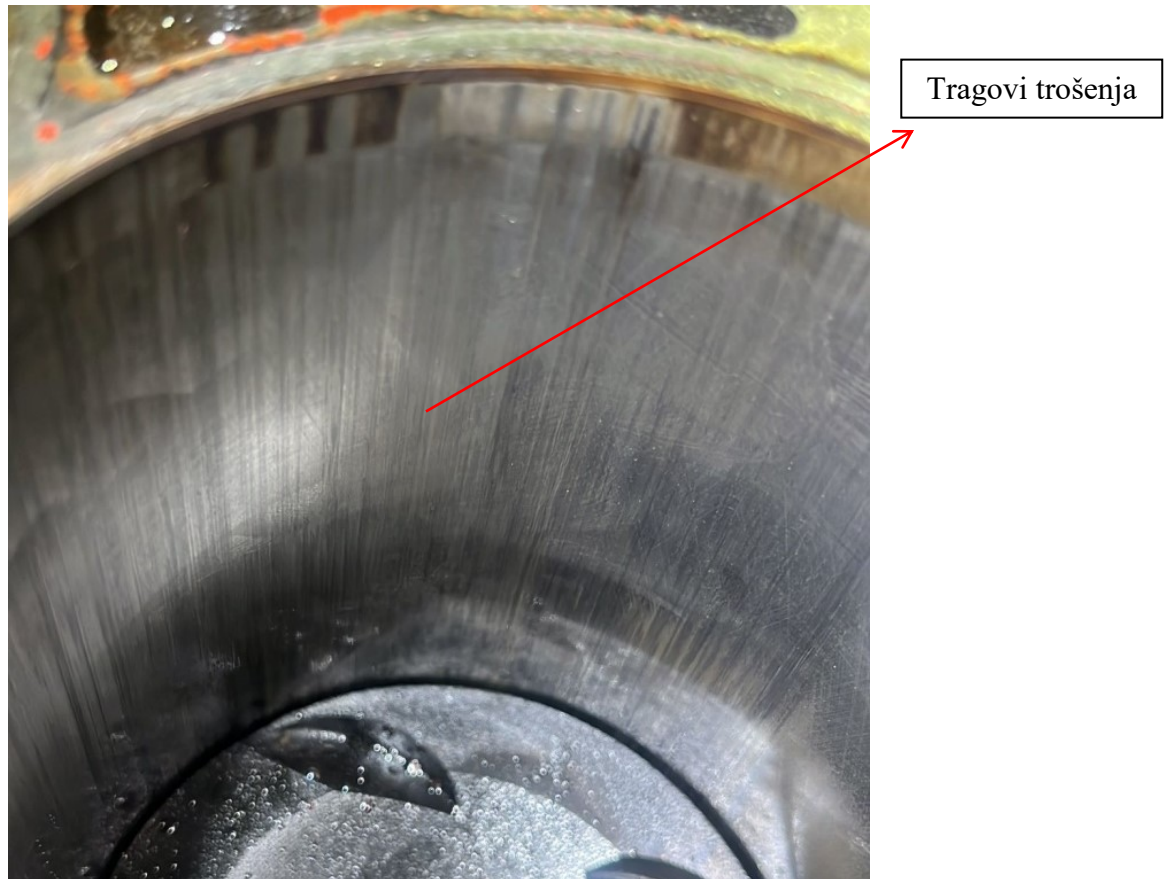


**Slika 14.** Blok motora, pogled sa strane



**Slika 15.** Blok motora, pogled odozgora

U bloku motora se nalaze četiri cilindrične šupljine u koje su postavljena četiri klipa s klipnim prstenovima. Pregledane su sve cilindrične šupljine, a najveći tragovi trošenja su na drugom cilindru (Slika 16.).



**Slika 16.** Unutrašnjost cilindra prije vađenja klipa

U daljnjem vizualnom pregledu bloka motora, utvrđeno je da nema vidljivih oštećenja na radilici, dok su klipovi vidno oštećeni i na njima je provedena daljnja analiza (Slika 17.).

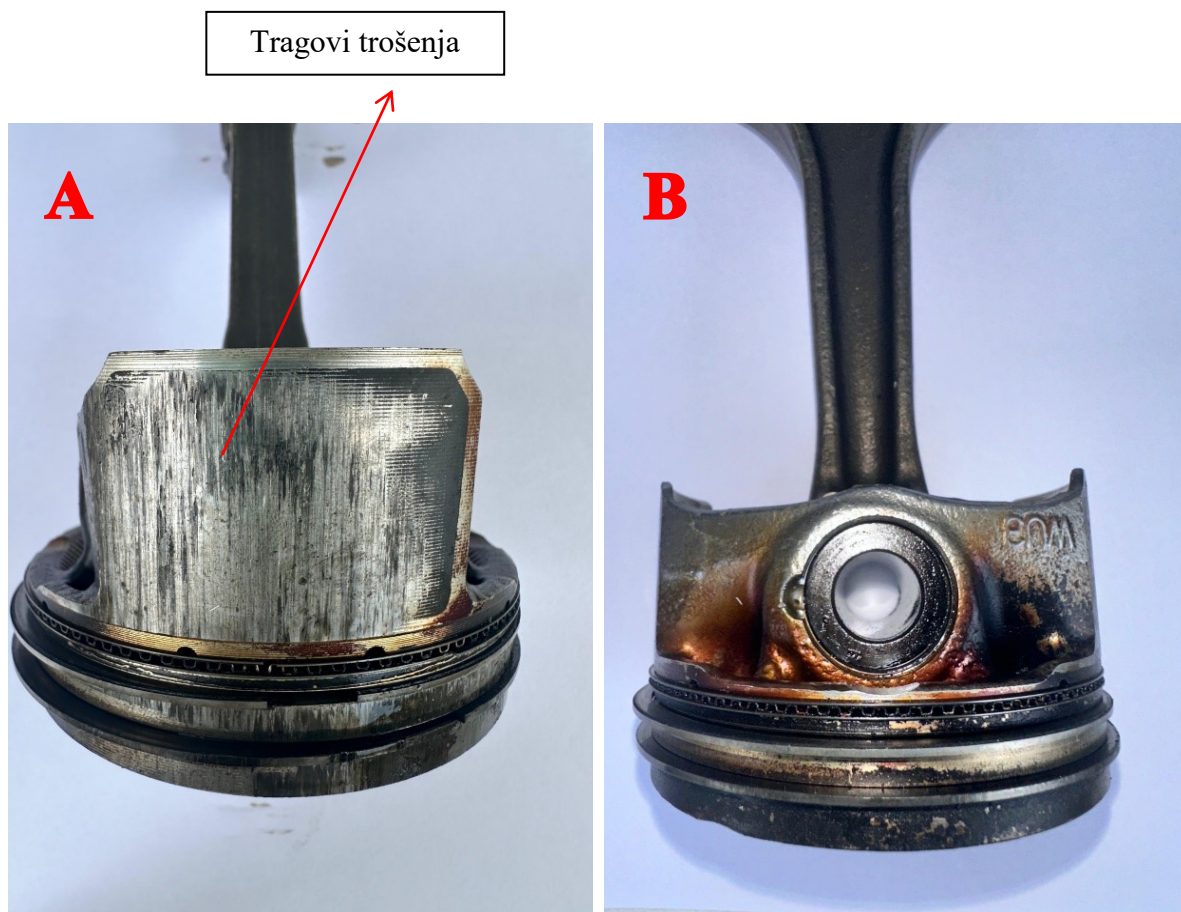
Na sva 4 klipa motora vidljivi su tragovi trošenja u području plašta klipa, označeni na Slici 17., za koje je pretpostavljeno da su posljedica trenja između plašta klipa i cilindra. Klipovi su numerirani brojevima 1, 2, 3 i 4 prema položaju u cilindrima u motoru.



**Slika 17.** Tragovi trošenja na plaštu klipova 1, 2, 3 i 4

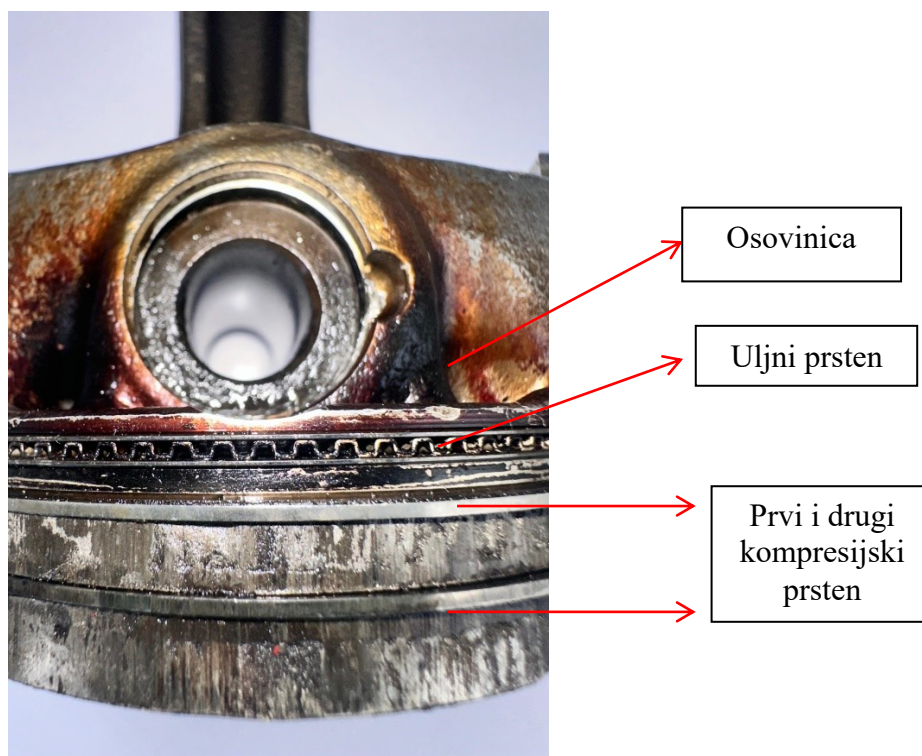
### 3.3. Izbor, čuvanje i čišćenje prijelomnih površina te makroskopska ispitivanja

Nakon vizualnog pregleda svih četiri klipova, vidljivo je da sva četiri imaju oštećenja na vanjskoj površini, točnije na plaštu klipa. Klip koji ima najizraženije tragove oštećenja je klip pod brojem 2. Klip se nije mogao ručno odvojiti od ostalih dijelova, tj. čitav klipni mehanizam s osovinicom koja povezuje klipnjaču i klip se uslijed svog rada „zapekao“, što je vjerojatno posljedica visokih temperatura i prekomjerenog trošenja. Klip broj 2 je odmašćen uz upotrebu benzina koji djeluje kao jednostavno i učinkovito otapalo koje može razgraditi i ukloniti naslage ulja i drugih nečistoća koje se nakupljaju na klipu tijekom rada motora.



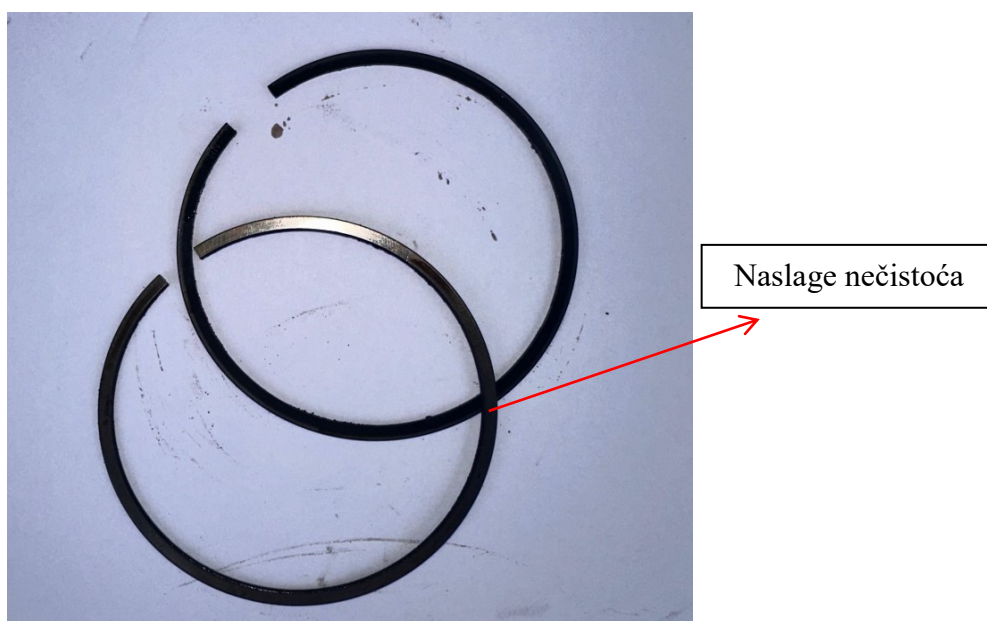
**Slika 18.** Klip broj 2: A) tragovi trošenja na plaštu klipa; B) odmašćena glava klipa

Na Slici 19. prikazani su utori s kompresijskim prstenovima i uljnim prstenom. Na drugom klipu ručno su odvojeni kompresijski prstenovi. Prstenovi nisu oštećeni niti puknuti.



**Slika 19.** Prikaz prstenova i osovinice

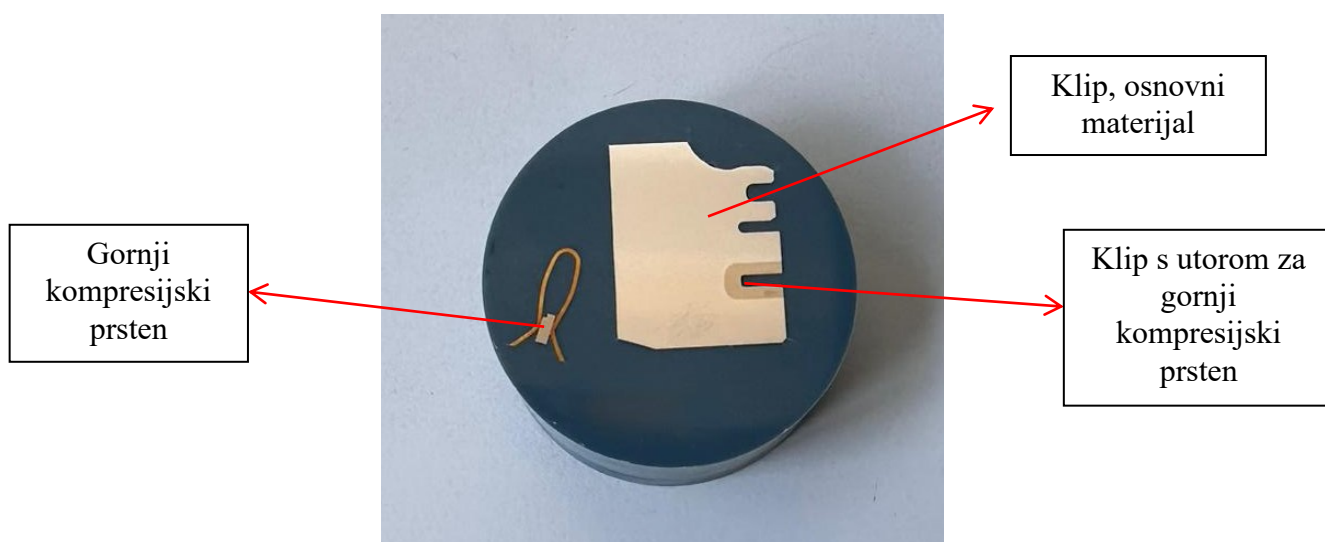
Na Slici 20. prikazani su kompresijski prstenovi. Na svojoj površini, prstenovi nemaju tragova mikropukotina, ali vidljive su naslage nečistoća.



**Slika 20.** Kompresijski prstenovi motora s klipa 2

### 3.4. Priprema metalografskih uzoraka

Nakon što je klip 2 odmašćen, izrezan je dio uzorka klipa s vidjivim utorom za kompresijski prsten te dio uzorka kompresijskog prstena na stroju za rezanje proizvođača Presi, model Mecatome T260. Uzorci su uliveni u polimernu masu radi lakšeg rukovanja, a na njima su provedeni postupci strojne obrade uključujući brušenje i poliranje na stroju istoimenog proizvođača Presi, model Mecatech250 SPI.



**Slika 21.** Pripremljen ispitni uzorak



Uzorci su brušeni da se ukloni sloj prljavštine i ostalih apsorbiranih čestica, a korišteni su brusni papiri različitih veličina abraziva (od grubljeg prema finijem brusnom papiru). Parametri brušenja uzorka prikazani su u Tablici 3.

**Tablica 3.** Parametri brušenja uzorka

Faza brušenja	1	2	3	4	5
Abraziv (SiC)	320	600	1000	2400	4000

Poliranje je veoma važno za dobivanje glatke i ravne površine, postupak je proveden na stroju za poliranje Presi, model Mecatech250 SPI..

**Tablica 4.** Parametri poliranja uzorka

Faza poliranja	I	II
Abraziv	dijamantna pasta, 3 $\mu\text{m}$	PRESI suspension SPM 0.03 $\mu\text{m}$ non cristallisam
Broj okretaja, $\text{min}^{-1}$	1500	1500
Vrijeme poliranja	2 min	1 min

Uzorci su nagrizeni s ciljem uklanjanja deformacija i dobivanja reljefne površine uslijed djelovanja sredstava na pojedine dijelove strukture (npr. granice zrna, pojedine faze, itd.). Uzorak se uranjao u otopinu 3% Nitala oko 10 sekundi, a zatim isprao u vodi da se završi kemijski proces.

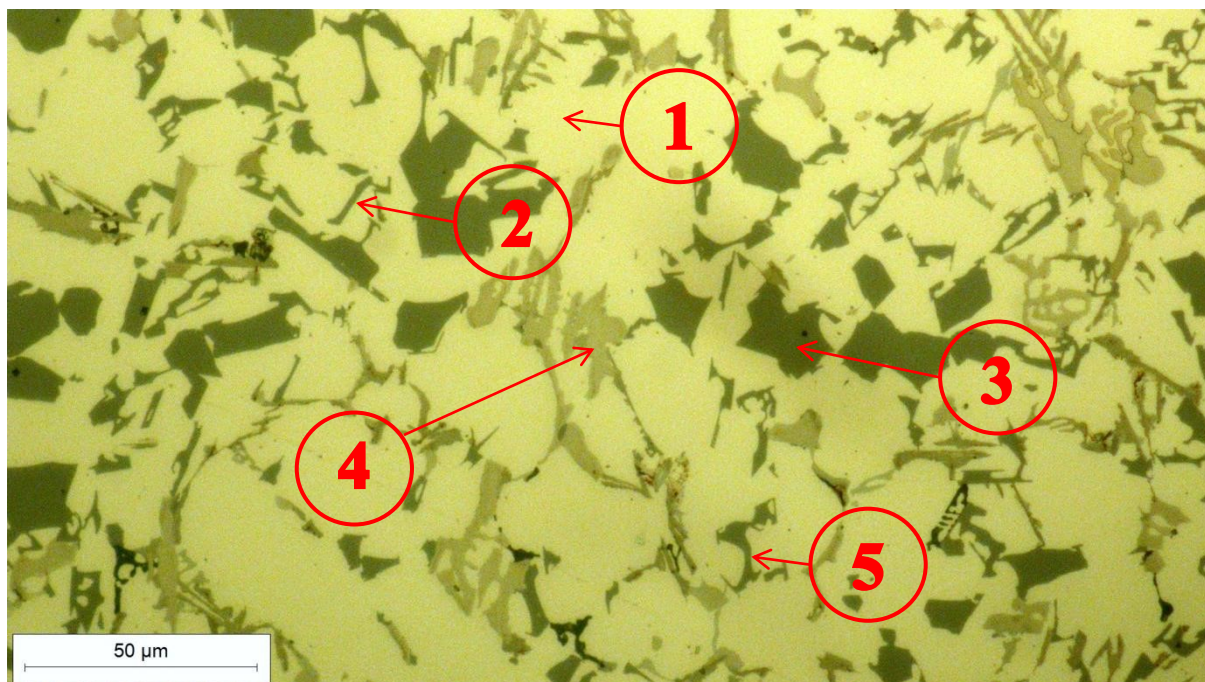
### **3.5. Mikroskopsko ispitivanje**

Svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 (Slika 24.) analizirane su površine pripremljenih uzoraka na različitim povećanjima (100x, 200x, 500x).



**Slika 22.** Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Mikrostruktura klipa broj 2 s odgovarajućim fazama prikazana je na Slici 25.

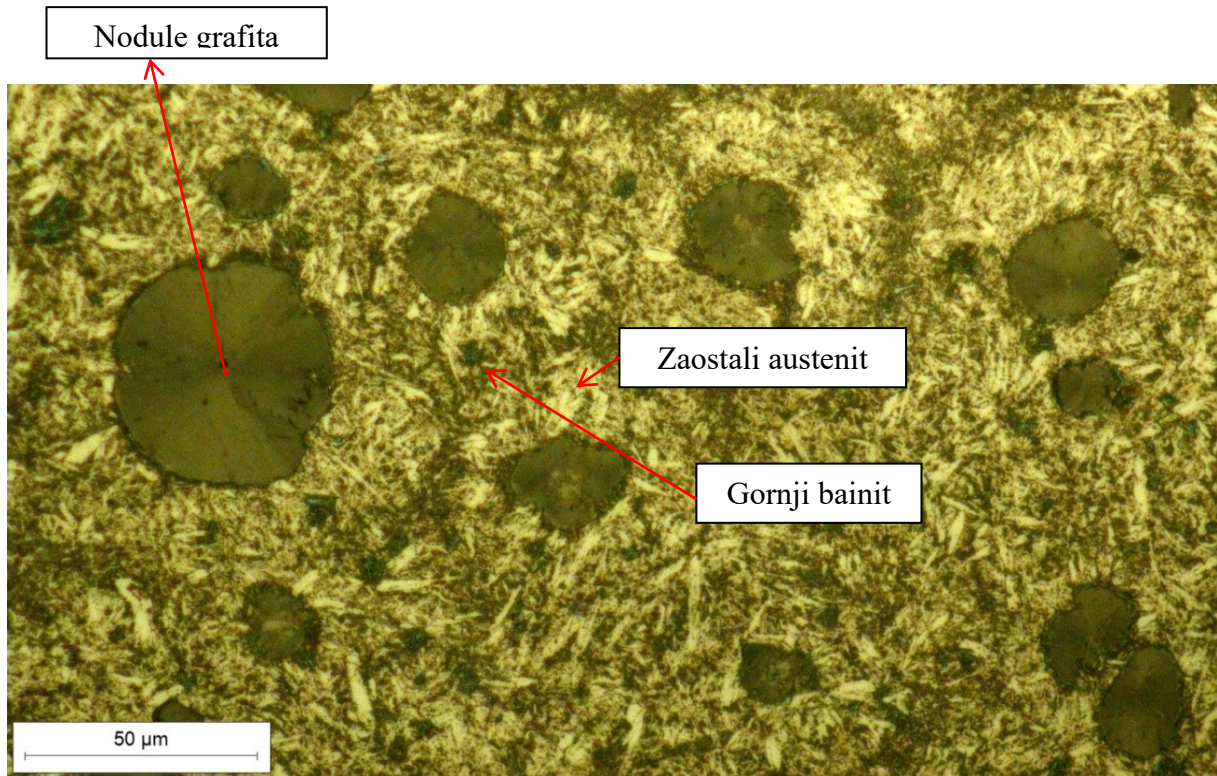


**Slika 23.** Mikrostruktura klipa i odgovarajućih faza u području unutrašnjosti klipa, 500x

Prema vidljivoj mikrostrukturi sa Slike 25. može se zaključiti da je klip izrađen od aluminijeve legure [23]. U usporedbi s literaturnim izvorom [35], mikrostruktura klipa sastoji se od:

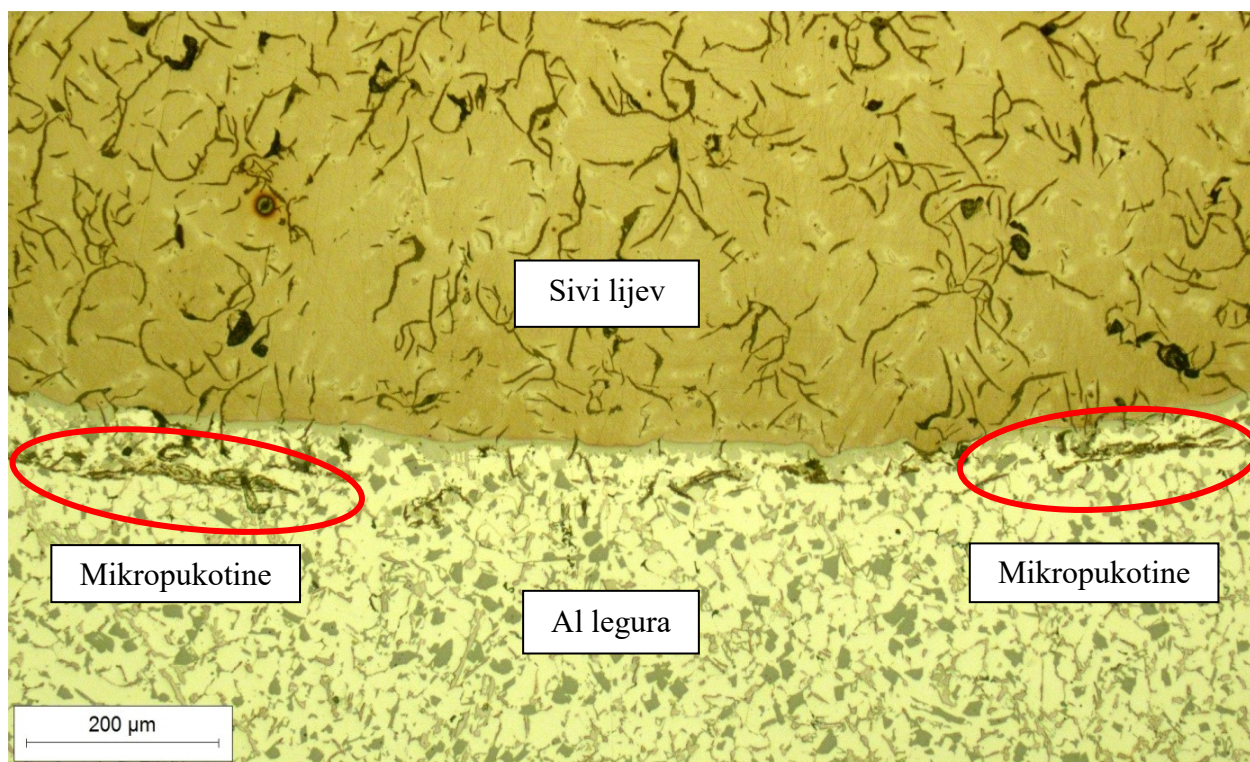
- $\alpha_{Al}$  (1)
- Si igličasti (2) i Si pločasti (3)
- Eutektik  $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$  (4)
- $Mg_2Si$  (5)

Na Slici 26. prikazana je mikrostruktura prvog gornjeg kompresijskog prstena. U usporedbi s literaturnim izvorom [35], vidljiva je mikrostruktura izotermički poboljšanog nodularnog lijeva.



**Slika 24.** Mikrostruktura u području gornjeg kompresijskog prstena, 500x

Na Slici 27. prikazana je mikrostruktura u području utora gornjeg kompresijskog prstena i to na mjestu spoja aluminijske legure i sivog lijeva. Utor je namijenjen za prvi kompresijski prsten koji je izložen najvišim temperaturama i opterećenjima jer je najbliži komori za izgaranje. U tom području je potrebna dobra otpornost na trošenje i povišene temperature što sivi lijev omogućuje.



**Slika 25.** Utor gornjeg kompresijskog prstena

Vidljivo je kako je spoj sivog lijeva i legure aluminija ispravno izveden jer nisu vidljive deformacije u mikrostrukтури. Na Slici 27. crveno zaokruženi dijelovi mogu postati potencijalna opasna mjesta za oštećenja. Čest uzrok mikropukotina je toplinska dilatacija te bi kroz neko vrijeme također mogla uzrokovati neke nove probleme u radu motora.

Mikrostruktura u ovom slučaju nije predstavljala problem, proizvođač je opravdao svojstva materijala prilikom izrade klipa.

### 3.6. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je mjerena metodom po Vickersu na uzorku osnovnog materijala klipa, gornjeg kompresijskog prstena te u području utora gornjeg kompresijskog prstena radi bolje provjere karakteristika materijala koje su propisali proizvođači. Na svakom ispitnom uzorku odrađena su po tri mjerenja na tvrdomjeru pri čemu je opterećenje bilo 200 grama (HV0,2).

Tvrdoća po Vickersu opisana je jednadžbom [36]:

$$HV = \frac{0,1891 \times F}{d_v^2}$$

Gdje je:

$F$  [N] – sila utiskivanja

$d_v$  [mm] – srednja vrijednost dvije izmjerene dijagonale otiska.

Analiziranjem lijeve (L) i desne (D) strane uzorka, najprije utiskivanjem otiska, a zatim računanjem pomoću izraza:

$$d_v = (D - L) \times 0,302$$

dobiveni su sljedeći rezultati prikazani u Tablici 5., 6. i 7.

**Tablica 5.** Tvrdoća aluminijske legure (klip)

Broj mjerenja	$L$ , mm	$D$ , mm	$d_v$ , mm	HV0,2	Srednja vrijednost tvrdoće HV0,2
1	0,304	0,488	0,0556	120	121
2	0,300	0,499	0,0601	103	
3	0,306	0,476	0,0513	141	

**Tablica 6.** Tvrdoća sivog lijeva (utor)

Broj mjerenja	$L$ , mm	$D$ , mm	$d_v$ , mm	HV0,2	Srednja vrijednost tvrdoće HV0,2
1	0,313	0,478	0,0498	150	156
2	0,312	0,476	0,0495	151	
3	0,316	0,472	0,0471	167	

**Tablica 7.** Tvrdoća izotermički poboljšanog nodulranog lijeva (gornji kompresijski prsten)

Broj mjerjenja	$L$ , mm	$D$ , mm	$d_v$ , mm	HV0,2	Srednja vrijednost tvrdoće HV0,2
1	0,341	0,464	0,0371	269	258
2	0,343	0,451	0,0326	240	
3	0,344	0,468	0,0374	265	

Rezultati ispitivanja tvrdoće materijala klipa iz Tablica 5.,6.,7. su:

- aluminijeva legura: 121HV0,2,
- sivi lijev: 156HV0,2,
- izotermički poboljšan nodulrani lijev: 258HV0,2.

Prema literaturnom izvoru [37], rezultati ispitivanja odgovaraju tvrdoćama ispitanih uzoraka.

### 3.6.1. Ispitivanje ubrizgavalica

Zbog sumnje na kvar i neispravan rad ubrizgavalica provedena je provjera rada. Ispitivanje je provedeno samostalno od strane automehaničara, ovakvo ispitivanje daje preliminarne rezultate, ali ukoliko i postoji greška u radu već ovakvim ispitivanjem dolazi se do zaključka o njihovom radu.

Uz teorijsku pozadinu, omjer goriva i zraka za benzinske motore u osobnim vozilima, prema idealnim mjerama, trebao je iznositi 14,7:1 (zrak prema gorivu). To znači da za svaki 1 gram benzina (1 jedinica goriva) je potrebno 14,7 grama zraka (14,7 jedinica zraka) da se postigne učinkovito izgaranje [38].

Ubrizgavalice kontroliraju količinu goriva koja se ubrizgava u cilindre, a senzori za kisik i ECU (elektronička kontrolna jedinica) motora reguliraju taj omjer koji se u različitim uvjetima rada mijenja, ali ECU nastoji biti što bliže idealnom omjeru.

Ispitivanje je jednostavno, potrebno je osigurati sigurno okruženje u području ubrizgavalica, tj. da nema nikakvog oblika curenja goriva, ispuha zraka ili slično. Takvi uvjeti se osiguravaju provjerom ventila, zatvaranjem cjevčica koje su direktno spojene s ubrizgavalicama na motor. Na sve četiri ubrizgavalice postave se cjevčice za ispitivanje koje su postavljene svaka

na svoju epruvetu koja mjeri razinu goriva koju ubrizgavalica ubrizgava. Pokreće se osobno vozilo i ostavlja u radu. Odmah je zapaženo u procesu ubrizgavanja goriva, da druga ubrizgavalica ubrizgava veću količinu goriva u odnosu na ostale tri.

Klip broj 2 imao je najveće tragove trošenja, a također je i ubrizgavalica broj 2 pokazala najveću manu u radu, pa možemo zaključiti da postoji korelacija između klipa i ubrizgavalice. S obzirom da više goriva „ispire“ ulje koje podmazuje klip, moguće je da je to uzrok za povećano trošenje između klipa i cilindra. Zbog neispravnosti ubrizgavalice moguće je lošije sagorijevanje unutar cilindra. Takvo nepravilno sagorijevanje može rezultirati povišenim temperaturama što može uzrokovati prekomjerno trošenje klipa.

S obzirom da ubrizgavalice pokazuju neispravnost u radu, potrebno ih je zamijeniti (Slika 28.), te ih opet provjeriti ovim jednostavnim i brzim postupkom provjere.



**Slika 26.** Ubrizgavalica uklonjena iz osobnog vozila

Nakon ponovne provjere novih ubrizgavalica, utvrđeno je da rade ispravno.

## 2.7. Sigurnosne preporuke i rješenje kvara

Za bolji rad i održavanje vozila potrebno je redovito praćenje i provjeravanje rada motora. Preporuke za smanjenje kvarova kod motora i njegovih dijelova, u ovom slučaju klipova i cilindara su sljedeće:

1. Redovita promjena ulja jer ulje je zaslužno za podmazivanje klipova, cilindara i ostalih dijelova motora te smanjuje trenje i moguće trošenje pri radu, a proizvođači preporučaju mijenjanje motornog ulja najčešće nakon svakih 10 000 – 15 000 kilometara ili jednom godišnje. Također je za veće udaljenosti putovanja potrebno provjeravati i razinu ulja u motoru, a posebice kod vozila koja koriste benzin.



Također kvaliteta ulja pruža i bolju zaštitu motora pa se uvijek preporuča korištenje ulja koja preporučuju proizvođači jer odgovaraju specifikacijama motora.

2. Vožnja u skladu s uvjetima i izbjegavanje pregrijavanja motora je od velike važnosti. Pregrijavanje može biti uzrok toplinskog oštećenja klipova i cilindara te povećanog trošenja zbog nedovoljnog podmazivanja na visokim temperaturama, na to možemo utjecati praćenjem rashladnog sustava. Također, brza i agresivna vožnja koja sadrži česta i nagla ubrzavanja kako i kočenja će opteretiti motor u radu, a samim time ubrzati i trošenje.

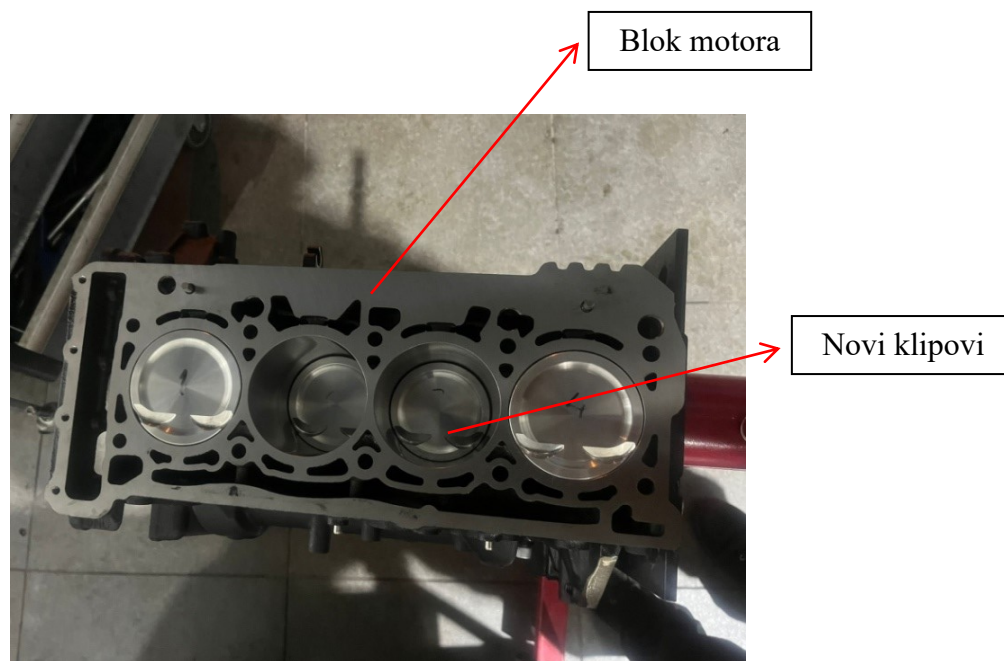
3. Izbjegavanje visokih okretaja motora u hladnom stanju. Kada je motor hladan ulje je veće gustoće pa ima manju učinkovitost u podmazivanju dijelova motora. Iz ovog razloga poželjno je omogućiti motoru da postigne radnu temperaturu prije naglih ubrzavanja ili visokih okretaja.

Naravno, neki kvarovi su neizbježni, ali uz dobro održavanje osobnog vozila, vjerojatnosti za time su mnogo manje.

Vozilo je vraćeno u rad tako da su u njega postavljena četiri nova klipa s prstenovima i klipnjače koji su prilagođeni dimenzijama cilindara (Slika 29.), a cilindri su prošireni na novu dimenziju (s 82,5 mm na radijus od 83 mm). Postupak proširivanja cilindara brusilicom se provodi u slučaju oštećenja cilindara, povećanog trošenja ili ako su istrošeni do te razine da ni prstenovi više ne mogu brtviti, a motor gubi kompresiju pri čemu je moguća povećana potrošnja ulja.



**Slika 27.** Novi klipovi, klipnjače i prstenovi za potrebe popravka



**Slika 28.** Blok motora s novim klipovima

## 4. ANALIZA REZULTATA

Procedurom analize kvara klipova, uzevši u obzir sve pretpostavke i sve rezultate ispitivanja, može se zaključiti da je osobno vozilo proizvođača Volkswagen, Golf 7 GTI TCR imao kvar koji je posljedica neispravnog rada motora. Vizualnim pregledom, utvrđeno je da ne postoje vidljivi tragovi oštećenja na bloku motora.

Nakon rastavljanja dijelova motora, klipovi su imali jasne tragove trošenja na plaštu klipa. Sva četiri klipa imaju tragove trošenja različite vidljivosti. Klip 2 iz drugog cilindra je imao najizraženije tragove trošenja što je prikazano na Slici 17. te je odabran za daljnju analizu.

Klip je odmašćen, izrezan te pripremljen za mikroskopsku analizu. Klip je aluminijska legura AlSi17Cu4Ni [39], a kompresijski prsten je izotermički poboljšani nodularni lijev. Rezultati ispitivanja tvrdoće odgovaraju vrijednostima za definirane materijale.

Prva pretpostavka: neispravan rad ubrizgavalica. Za ubrizgavalicu broj 2, nakon ispitivanja, utvrdilo se da ubrizgava previše goriva te se narušio omjer zraka prema gorivu (14,7:1). Gorivo je sa stijenki cilindra, a i klipova odstranjivalo ulje, te su klipovi i cilindri u svom dodiru bili nedovoljno podmazani što je moglo uzrokovati tragove trošenja. Ostale ubrizgavalice su također narušile omjer, ali u manjoj mjeri pa su ostali klipovi imali manja oštećenja.

Druga pretpostavka: loše brtvljenje kompresijskih prstenova. Za pretpostaviti je da je zbog naslaga nečistoća po kompresijskim prstenovima i vjerovatnog povećanja njihovog promjera uslijed djelovanja visokih temperatura izgaranja došlo do povećanog trenja između klipa i stijenke cilindra što je povećalo trošenje stijenki cilindra.

## 5. ZAKLJUČAK

Analizom motora Golfa 7 GTI TCR u ovom diplomskom radu, identificirani su uzroci povećanog trošenja klipova. Na temelju procedure analize kvarova doneseni su sljedeći zaključci:

- Plaštovi klipova imaju vidljive tragove trošenja po svojoj površini, a najveće tragove trošenja imao je klip 2 iz drugog cilindra motora.
- Aluminijska legura AlSi17Cu4Ni je materijal izrade klipa i izmjerena mu je tvrdoća 121HV0,2. Utor prvog (gornjeg) kompresijskog prstena klipa izrađen je od sivog lijeva s feritnom matricom, a izmjerena mu je tvrdoća 156HV0,2. Kompresijski prsten izrađen je od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, a izmjerena mu je tvrdoća 258HV0,2.
- Ubrizgavalice nisu radile ispravno. U njihovom radu bio je narušen poželjan omjer zraka prema gorivu (14,7:1). Najveću neispravnost u radu imala je ubrizgavalica broj 2 koja je povezana u radu s klipom broj 2. Vrlo je vjerojatno da je gorivo ispiralo mjesto dodirne površine plašta klipa i cilindra te se na taj način pojačalo trenje što je rezultiralo tragovima trošenja na plaštu klipa.
- Za pretpostaviti je da su se i kompresijski prstenovi proširili po promjeru pa nisu osigurali ispravno brtvljenje. Iz ovog razloga moguć je utjecaj na povećano trenje između plašta klipa i stijenke cilindra koje bi moglo uzrokovati povećano trošenje stijenke cilindra.

Nastali kvar u radu riješen je zamjenom klipova, proširenjem otvora cilindara te zamjenom ubrizgavalica. Preporuka je praćenje osobnog vozila u radu, odrađivanje obaveznog godišnjeg servisa te što brža zamjena oštećenih dijelova kako se ne bi prouzročili novi kvarovi.

## LITERATURA

- [1] P. Matthew: „*Car Culture and Global Environmental Politics*“, Review of International Studies, 26(2), 2019, 253–270, <http://www.jstor.org/stable/200976731>, pristupljeno 11.10.2024.
- [2] [https://www.volkswagen.com.au/en/technology/engines.html?srsId=AfmBOopzj6v2uVI AIMDeiS7Fgn7VD6FFeLfYbES\\_FvtvK2i2oGZp3-PK](https://www.volkswagen.com.au/en/technology/engines.html?srsId=AfmBOopzj6v2uVI AIMDeiS7Fgn7VD6FFeLfYbES_FvtvK2i2oGZp3-PK) pristupljeno 27.09.2024.
- [3] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/golf-gti-tcr-the-driving-presentation-4573/technical-data-the-golf-gti-tcr-in-numbers-4577> pristupljeno 27.09.2024.
- [4] <https://www.vevor.com/diy-ideas/everything-about-ea888-engines/?srsId=AfmBOoo05YV05exGXtcoyfgK4yaMai5uetKXNpldYvvdvolvDwlXcoiu> pristupljeno 27.09.2024.
- [5] Seat service: „*Workshop Manual*“, vol. 10, 2018
- [6] <https://mikmotoren.de/en/products/replacement-engine-dnuc>, pristupljeno 29.09.2024.
- [7] <https://www.fcpeuro.com/blog/the-definitive-guide-to-mk7-gti-ea888-engine-gen-3>, pristupljeno 29.09.2024.
- [8] [https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine\\_id=119](https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=119), pristupljeno 01.10.2024.
- [9] <https://mikmotoren.de/en/products/replacement-engine-dnuc>, pristupljeno 01.10.2024.
- [10] <https://www.autostanic.hr/blog/dijelovi-motora>, pristupljeno 01.10.2024.
- [11] A. Romagnolia, A. Manivannana, S. Rajoob, M.S. Chiongb, A. Feneleyc, A. Pesiridisc, R.F. Martinez-Botasd: „*A review of heat transfer in turbochargers*“, Elsevier Ltd., 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.119>
- [12] <https://www.bar-tek.com/core-assembly-2-0-tsi-ea888-turbocharger-is38>, pristupljeno 01.10.2024.
- [13] Nazih N. Bayomia, Rafea M. Abd El-Maksoudb: „*Two operating modes for turbocharger system*“, Elsevier Ltd., 2012, doi:10.1016/j.enconman.2012.01.003
- [14] A. Winkler, P. Dimopoulos, R. Hauert, C. Bach, M. Aguirre: „*Catalytic activity and aging phenomena of three-way catalysts in a compressed natural gas/gasoline powered passenger car*“, Elsevier Ltd., 2008, doi:10.1016/j.apcatb.2008.03.013
- [15] Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi, and H. Ando: „*Development of Gasoline Direct Injection Eng*“, SAE Transactions, Journal of engines, vol. 106, 1997, 774-793

- [16] D. Siano: „*Fuel Injection*“, InTech, Rijeka, Hrvatska, 2012., doi: 10.5772/9728
- [17] F. Zhao, M. – C. Lai, D. L. Harrington: „*Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines*“, Elsevier Science Ltd., 1999, [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00004-0)
- [18] M. Gorikhan, B. S. Patil, M. N. Panhalkar, K. J. Patil, S. Jadhav, G. Rudrappa, H. Mutkekar, S. Anandi, N. Vijapur: „*ECU To ECU Communication in Automotive Grade Processors and Security of Messages Exchanged*“, Journal of Pharmaceutical Negative Results, 13(3), 2022, doi: 10.47750/pnr.2022.13.S03.028
- [19] M. I. Najafabadi, M. Mirsalim, V. Hosseini, S. Alaviyou: „*Experimental and numerical study of piston thermal management using piston cooling jet*“, KSME & Springer, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 28, 2014, 1079 - 1087, doi: 10.1007/s12206-013-1183-7
- [20] <https://www.fifty2.eu/innovation/piston-cooling-jet-in-preonlab-5-0/>, pristupljeno 08.10.2024.
- [21] R. V. Kerley, K. W. Thurston: „*The Indicated Performance Otto-Cycle Engines, Research and Development Department*“, SAE Technical Paper 6205081962, vol. 70, 1962, 5-37, <https://doi.org/10.4271/620508>
- [22] <https://www.britannica.com/technology/four-stroke-cycle>, pristupljeno 08.10.2024.
- [23] S. Chatterjee, S. Chakraborty: „*A multi-attributive ideal-real comparative analysis-based approach for piston material selection*“, KSME & Springer, India, 2021, <https://doi.org/10.1007/s12597-021-00536-2>
- [24] E: Gruenewald: „*Aluminium alloy pistons*“, Society of Automobile Engineers, vol. 10, 1915, 135-142, <https://doi.org/10.4271/150029>
- [25] F. S. Silva: „*Fatigue on engine pistons– A compendium of case studies*“, Engineering Failure Analysis, vol. 13, 2006, 480–492, doi:10.1016/j.engfailanal.2004.12.023
- [26] W. Trefez: „*The Automotive Engine Piston*“, Aluminium Industries Incorporated, Ohio, 1943
- [27] <https://wuling.id/en/blog/autotips/getting-to-know-car-pistons-their-functions-and-causes-of-damage>, pristupljeno 10.10.2024.
- [28] J. Filipczyk, Z. Stanik: „*Piston damages – case studies and possibilities of early detection*“, Silesian University of Technology, Journal of KONES Powertrain and Transport, 19(4), 2012, 179 – 184, doi: <https://doi.org/10.5604/12314005.1138338>

- [29] R. K. Bakhshandi, A. Tkachuk, M. Sadek, J. Bergstrom, M. Grehk: „*Failure analysis of two cylindrical impact pistons subjected to high velocity impacts in drilling applications*“, Department of engineering and physics, Karlstad University, Švedska, Elsevier Ltd.,2022, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106623>
- [30] Robert Bosch GmbH: „*Gasoline direct injection, Key technology for greater efficiency and dynamics*“, Njemačka, 2013
- [31] G. Mitukiewicz, R. Dychto, J. Leyko: „*Relationship between LPG fuel and gasoline injection duration for gasoline direct injection engines*“, Department of Vehicles and Fundamentals of Machine Design, Poljska, Fuel, vol. 153, 2015, 526-534, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.033>
- [32] J. Dolza, E. A. Kehoe, D. Stoltman, Z. Arkus – Duntov: „*The General Motors Fuel Injection System*“, SAE Transactions, vol. 65, 1957, 739-757, <https://doi.org/10.4271/570059>
- [33] P. Czech, H. Bąkowski: „*Diagnosing of car engine fuel injectors damage using DWT analysis and PNN neural networks*“, Transport Problems, vol. 8, 2013
- [34] <https://carsart.net/en/details/2019-volkswagen-golf-vii-facelift-2017-gti-tcr-20-tsi-290-hp-dsg>, pristupljeno 15.10.2024.
- [35] American Society For Metals: „*Metals handbook, atlas of microstructures of industrial alloys*“, 8(7). Akron, Ohio: American Society for Metals, 1972
- [36] Državni zavod za mjeriteljstvo, „*Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu, provjeravanje ispitnih uređaja*“, Narodne novine, 1999.
- [37] P. A. Schweitzer, Metallic Materials: „*Physical, Mechanical, and Corrosion Properties*“, New York: Marcel Dekker, 2003, <https://doi.org/10.1201/9780203912423>
- [38] J. B. Heywood: „*Internal Combustion Engine Fundamentals*“, McGraw – Hill Series in Mechanical Engineering, New York, 1988, <https://doi.org/10.1036/1097-8542.349500>
- [39] <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=047e24a1a283410798e430002212d0de>, pristupljeno 20.10.2024.