

# Analiza kvara klipa četverotaktnog benzinskog motora

---

**Kosanović, Lovre**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:560866>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Lovre Kosanović**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Lovre Kosanović, bacc. ing.

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr.sc. Suzani Jakovljević na pronalasku problema, prijedlogu teme diplomskog rada i stručnom savjetovanju tijekom njegove izrade.

Također zahvaljujem prof. dr. sc. Željku Alaru, lab. tehničaru Ivanu Vovku te automehaničaru Kristianu Badovincu na njihovom značajnom doprinosu u izradi ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem svojim cjeloživotnim prijateljima Luki Nazliću i Jakovu Pavlu Lelasu, kolegama i prijateljima Jakovu Sladiću, Ivanu Božiću i Marinu Mandiću, članovima malonogometne ekipe Subota Balun i svim ostalim prijateljima. Njihovo društvo mi je olakšalo i one najteže dane studiranja.

Veliko hvala mojoj obitelji, majci Silvani, ocu Jakovu, braći Jeri i Nikoli, sestri Tini, baki Katici, noni Gordani i nonu Dušku. Vaša podrška i odgoj su mi vječna motivacija za rad.

Za kraj najveću zahvalnost iskazujem svojoj djevojci Ivoni Stjepić za ljubav, potporu i oslonac tijekom cijelog iskustva studiranja.

Lovre Kosanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Lovre Kosanović** **JMBAG 0035218246**

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

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

### Opis zadatka:

Motori osobnih vozila konstruiranih za vožnju po javnim cestama vrlo često se modificiraju s ciljem povećanja snage i brzine vozila. Nepravilno izvedene preinake u motoru mogu izazvati kvarove pojedinih dijelova i cijelog sustava motora. Značajke motora s unutarnjim izgaranjem, koji ima određene konstrukcijske karakteristike, najviše ovise o njegovoj brzohodnosti i količini usisanog zraka po radnom taktu.

U radu je potrebno napraviti sljedeće:

- 1) Opisati princip rada četverotaktnog benzinskog motora.
- 2) Navesti i opisati izmjene koje se provode kod motora s ciljem postizanja veće snage motora.
- 3) Analizirati oštećenja odabranog uzorka.
- 4) Komentirati rezultate i dati zaključak.

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

Zadatak zadan:

16. studenoga 2023.

Datum predaje rada:

18. siječnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

22. – 26. siječnja 2024.

Zadatak zadao:

*Suzana Jakovljević*  
Prof.dr.sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:

*Ivica Garašić*  
Prof.dr.sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Razumijevanje procesa modifikacije motora .....	2
1.2. Postavljanje istraživačkog problema i ciljeva istraživanja .....	3
1.3. Dosadašnja istraživanja o sličnim modifikacijama motora.....	4
2. TEORIJSKI OKVIR.....	9
2.1. Detaljan opis motora 2.0 TSI EA888/3 CHHA .....	9
2.1.1. Povijest i specifičnosti modela u odnosu na prethodne generacije .....	9
2.1.2. Tehnički podaci.....	11
2.1.3. Konstrukcija motora.....	12
2.1.3.1. Konstrukcija klipa.....	13
2.1.4. Ključni sustavi i komponente EA888/3 CHHA motora.....	14
2.1.5. Radni ciklus .....	18
2.2. Informacije o primijenjenoj motornoj modifikaciji .....	19
2.3. Problem prijevremene detonacije u motorima s direktnim ubrizgavanjem goriva ....	20
3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	21
3.1. Hipoteze o mogućim uzrocima loma glave klipa.....	21
3.2. Procedura analize kvara .....	21
3.2.1. Sakupljanje osnovnih podataka o kvaru – opis kvara .....	22
3.2.2. Preliminarno ispitivanje dijelova .....	22
3.2.3. Izbor, čuvanje i čišćenje prijelomnih površina .....	25
3.2.4. Priprema metalografskih uzoraka .....	27
4. REZULTATI .....	29
4.1. Makroskopska ispitivanja .....	29
4.2. Mikroskopska ispitivanja – metalografska analiza .....	30
4.2.1. Oštećeni klip – uzorak A.....	30
4.2.2. Korišteni, neoštećeni klip – uzorak B .....	36
4.2.3. Novi, nekorišteni klip - uzorak C.....	40
4.3. Ispitivanje tvrdoće.....	43
4.4. XRF analiza.....	44
5. ANALIZA REZULTATA .....	46
5.1. Utvrđivanje tipa i uzroka loma.....	46
5.2. Utvrđivanje mjesta inicijalne pukotine .....	46
5.3. Analiza pretpostavljenih hipoteza .....	48
6. ZAKLJUČAK.....	51

---

LITERATURA..... 52

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Radni uvjeti sustava pri simulaciji toplinskog opterećenja [3] .....	5
Slika 2. Radni uvjeti sustava pri simulaciji tlačnog opterećenja [3] .....	5
Slika 3. Prikaz toplinsko-mehaničkih opterećenja na aluminijskom klipu [3] .....	6
Slika 4. Prikaz toplinsko-mehaničkih opterećenja na klipu od lijevanog čelika [3] .....	6
Slika 5. Prikaz toplinsko-mehaničkog opterećenja na klipu od lijevanog željeza [4].....	7
Slika 6. Prikaz toplinsko-mehaničkog opterećenja na klipu od aluminijskog lijeva [4].....	8
Slika 7. Detalj opterećenja [4].....	8
Slika 8. Konstrukcija motora EA888 [7].....	12
Slika 9. Glava motora EA888 [7].....	13
Slika 10. Sklop klipa .....	14
Slika 11. Sustavi ubrizgavanja goriva FSI i MPI [10] .....	15
Slika 12. Shematski prikaz rada modula za upravljanje motorom [11] .....	16
Slika 13. Shematski prikaz rada turbopunjača [12].....	17
Slika 14. Sustav hlađenja klipa uljnim mlazom[14] .....	17
Slika 15. Prikaz četverotaktnog ciklusa [15].....	18
Slika 16. Novi klip .....	21
Slika 17. Neodmašćeni oštećeni klip, prednja perspektiva .....	23
Slika 18. Neodmašćeni oštećeni klip, donja perspektiva .....	24
Slika 19. Neodmašćeni oštećeni klip, bočna perspektiva.....	24
Slika 20. Odmašćeni oštećeni klip s kompresijskim i uljnim prstenovima i odlomljenim dijelovima klipa.....	25
Slika 21. Prikaz loma na odmašćenom klipu s odlomljenim dijelovima klipa .....	26
Slika 22. Odmašćeni oštećeni klip .....	26
Slika 23. Prednja strana loma na klipu .....	29
Slika 24. Stražnja strana loma na klipu .....	30
Slika 25. Mikrostruktura klipa i pripadajuće faze u području unutrašnjosti klipa, 200x .....	31
Slika 26. Mikrostruktura klipa i pripadajuće faze u području unutrašnjosti klipa, 500x .....	32
Slika 27. Kemijski nagrižena mikrostruktura klipa u području prvog kompresijskog prstena, 500x .....	33
Slika 28. Utor prvog kompresijskog prstena s detaljima 1 i 2, povećanje 50x .....	33
Slika 29. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, detalj 1 sa slike 29 .....	34
Slika 30. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, detalj 2 sa slike 29 .....	34
Slika 31. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, donji kutni spoj .....	35
Slika 32. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, donji dio spoja .....	35
Slika 33. Neoštećena površina utora drugog kompresijskog prstena, uzorak A .....	36
Slika 34. Neoštećena površina utora drugog kompresijskog prstena, uzorak A .....	36
Slika 35. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, gornji dio spoja .....	37
Slika 36. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, gornji kutni spoj.....	37
Slika 37. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, nastavak na kutni spoj.....	38
Slika 38. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B , donji dio spoja.....	38
Slika 39. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, detalji a, b.....	39
Slika 40. Preostale ispitne točke uzorka B , detalji c, d .....	40
Slika 41. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C , gornja površina utora .....	41
Slika 42. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C, gornji kutni spoj.....	41
Slika 43. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C, donji kutni spoj .....	42
Slika 44. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C, donja površina utora .....	42
Slika 45. Mikroskopski prikaz "zavarenog" uljnog prstena .....	49
Slika 46. Usporedba izvedbi uljnih prstenova.....	50





**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Tehnički podaci EA888/3 CHHA [5, 7].....	11
Tablica 2. Oznake ispitnih uzoraka .....	22
Tablica 3. Priprema metalografskih uzoraka.....	28
Tablica 4. Tvrdoća aluminijske legure .....	43
Tablica 5. Tvrdoća sivog lijeva .....	43
Tablica 6. Kemijski sastav matrice klipa, XRF ispitivanje .....	44
Tablica 7. Kemijski sastav prvog kompresijskog utora, XRF ispitivanje .....	45

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$T$	K	Temperatura
$p$	Pa	Tlak
$P$	W	Snaga
$V$	$m^3$	Obujam
$M$	Nm	Moment sile
$L$	mm	Duljina
$HV$	HV	Tvrdoća
$m$	kg	Masa
$t$	s	Vrijeme
$v$	m/s	Brzina
$d$	mm	Promjer
$n$	okr $\text{min}^{-1}$	Brzina vrtnje
$q_v$	$m^3 \text{ s}^{-1}$	Volumni protok
$F$	N	Sila
$\alpha$	$\text{K}^{-1}$	Koeficijent toplinskog istezanja
$d_v$	mm	Srednja vrijednost dvije izmjerene dijagonale otiska

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Engleski naziv</b>	<b>Opis</b>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>	Procedura analize kvara
LSD	<i>Limited slip differential</i>	Diferencijal s ograničenim proklizavanjem
MPI	<i>Multi point injection</i>	Tehnologija istovremenog ubrizgavanja goriva u više točaka usisa zraka
FSI	<i>Fuel stratified injection</i>	Tehnologija ubrizgavanja goriva direktno u cilindre
VTS	<i>Variable tumble system</i>	Sustav promjenjivog otvaranja ventila
ECM	<i>Engine control module</i>	Upravljački modul motora
LSPI	<i>Low speed pre ignition</i>	Prijevremena detonacija
XRF	<i>X-ray fluorescence</i>	Rendgenska spektrometrija

---

**SAŽETAK**

Modificiranje osobnog motornog vozila je zahtjevna praksa koja iziskuje temeljitu prilagodbu komponenti vozila u svrhu postizanja boljih performansi. Ta prilagodba podrazumijeva podešavanje softverskih postavki motora, ali i zamjenu brojnih drugih tvornički postavljenih komponenti vozila. Automehaničari su, kroz višegodišnje iskustvo provođenja takvih preinaka, utvrdili neke često ponavljajuće probleme, a jedan od takvih je i problem loma glave klipa motora EA888/3 CHHA. U ovom radu je analiziran upravo jedan takav slučaj u kojem je došlo do kvara tvornički postavljenog klipa u motoru na kojem je provedena značajna modifikacija.

U uvodnom dijelu rada su sagledane ključne informacije o motornoj modifikaciji uz direktnu konzultaciju s automehaničarom koji je modifikaciju izvršavao, a zatim se u nastavku postavlja temeljno pitanje: Koji je uzrok loma glave klipa? Ispitivanja u svrhu postizanja odgovora na to pitanje provedena su u laboratorijskim uvjetima, prateći proceduru analize kvarova (eng. FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*).

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja izveden je zaključak na temelju kojeg se ostvaruje bolje razumijevanje ove specifične problematike, a samim time i omogućava prevencija ponavljanja istog kvara.

Ključne riječi: EA888 CHHA, motorna modifikacija, klip, FMEA

---

**SUMMARY**

Modifying a car is a demanding practice that requires a thorough adjustment of vehicle components in order to achieve better performance. This adjustment includes the tuning of the software settings of the engine, but also the replacement of numerous other factory-installed components of the vehicle. Through many years of experience in carrying out such modifications, car mechanics have identified some frequently recurring problems, and one such problem is the piston head failure of the EA888/3 CHHA engine. In this paper, one such case was analyzed, in which a factory-installed piston had failed in an engine that had undergone significant modification.

In the introductory part of the paper, key information about the engine modification was reviewed through direct consultation with the car mechanic who carried out the modification. Subsequently, in the following parts of the paper, the fundamental question is asked : What is the cause of the piston head failure? In order to find an answer to that question, relevant tests were carried out in laboratory conditions, following the principles of FMEA - Failure Mode and Effects Analysis.

On the basis of the obtained test results, a conclusion was drawn on the basis of which a better understanding of this specific issue is achieved, and thus enables the prevention of repetition of the same problem.

Key words: EA888 CHHA, engine modification, piston, FMEA

## 1. UVOD

Suvremeno inženjerstvo u automobilske industriji često se usredotočuje na postizanje optimalne ravnoteže između performansi i pouzdanosti vozila. Modifikacije motora postale su uobičajena praksa među entuzijastima, vozačima automobilske utrke i inženjerima koji teže izvući maksimalne performanse iz vozila. Međutim, s povećanjem snage motora javlja se i povećana odgovornost za očuvanjem strukturne pouzdanosti određenih komponenti motora, a upravo klipovi motora su jedne od najizloženijih komponenti utjecaju povišenog opterećenja.

Ovaj diplomski rad je analiza uzorka loma glave klipa u motoru EA888/3 CHHA, koji je podvrgnut značajnoj modifikaciji kako bi se postiglo povećanje snage s tvorničkih 169 kW i 350 Nm izlaznog momenta na 313 kW i 550 Nm izlaznog momenta.

U uvodnom dijelu rada navedene su ključne informacije o motornoj modifikaciji dobivene od automehaničara koji je proveo modifikaciju motora, a zatim su nastavku provedena ispitivanja u svrhu otkrivanja uzroka kvara glave klipa.

Iako je EA888/3 CHHA motor poznat po svojoj jednostavnosti za podešavanje i nadogradnju, iskustveno je utvrđeno da se uslijed modifikacije često javlja isti problem – kvar glave klipa motora. Analiza loma ovog klipa pomoći će u razumijevanju ove specifične problematike, a samim time i omogućiti prevenciju ponavljanja istog kvara, čime bi se postigla mogućnost modifikacije vozila sa smanjenim rizikom od strukturnih oštećenja ključnih komponenti motora.

## 1.1. Razumijevanje procesa modifikacije motora

Proces preinake motora EA888/3 CHHA 2.0 se može provesti na razne načine, od „manjih“ modifikacija bez promjene unutarnjih komponenti motora, pa sve do značajnijih modifikacija koje zahtijevaju promjene unutarnjih komponenti. Najčešći načini za postizanje veće snage motora su [1, 2]:

1. Povećanjem snage pomoću softverskog podešavanja motora
  - Promjene u parametrima upravljanja motora kao što su mape ubrizgavanja goriva, paljenja i tlaka punjenja.
2. Promjene usisnog sustava
  - Mijenjanje tvornički postavljenog usisnog sustava u svrhu boljeg protoka zraka prema motoru. Postiže se povećanje snage motora povećanjem količine zraka koja dolazi do motora, a samim time i poboljšavanjem potencijala za sagorijevanje goriva.
3. Promjene ispušnog sustava
  - Mijenjanje tvornički postavljenog ispušnog sustava u svrhu boljeg protoka ispušnih plinova iz motora. Postiže se povećanje snage motora smanjenjem tlaka u ispušnom sustavu uslijed poboljšanog protoka ispušnih plinova.
4. Povećanje radnog obujma motora
  - Mijenjanje tvornički postavljenih klipova, cilindara i radilice. Ova promjena zahtjeva dodatne promjene u sustavima za dovod goriva i zraka, te je stoga direktno povezana sa softverskim podešavanjem motora.
5. Nadogradnja turbopunjača
  - Nadogradnjom turbopunjača se postiže povećanje tlaka zraka kojim se pune cilindri motora. Povećanjem tlaka punjenja cilindara se omogućuje veći volumen zraka i goriva u cilindrima, što u konačnici rezultira povećanjem snage motora. Također zahtjeva preciznu kalibraciju softvera upravljanja motorom kako bi se ostvarilo optimalno sagorijevanje goriva, ali i osigurala pouzdanost rada motora.



## 6. Poboljšanje upravljanja prijenosom snage

- To je prilagodba motora koja se radi kao dodatak jednoj od ranije navedenih prilagodbi. Izvršava se zamjena tvorničkog prijenosnog sustava sportskim u svrhu bržeg odziva pri promjeni brzina, te prilagodba prijenosnog omjera u svrhu poboljšavanja učinkovitosti prijenosa uslijed ranije povećane snage motora. Konkretno radi se o upotrebi spojki povećane čvrstoće, optimizaciji elektronskih kontrola prijenosa, povećanjem čvrstoće osovine prijenosa te ugradnji diferencijala s ograničenim slipom (tzv. LSD – eng. *Limited slip differential*).

## 7. Povećanje učinkovitosti hlađenja

- Instalacija posebnih hladnjaka za motorno ulje koji omogućavaju bolju disipaciju topline iz motora. Takvi hladnjaci svojim dizajnom i materijalima izrade poboljšavaju učinkovitost razmjene topline između motora i ulja. Daljnje modifikacije učinkovitosti hlađenja su moguće i instalacijom dodatnih hladnjaka, instalacijom ventilatora s povećanim protokom zraka, instalacijom toplinskih barijera pored vrućih dijelova motora i softverskom optimizacijom radne temperature motora.

## 8. Jačanje strukture i podvozja

- Podrazumijeva ugradnju strukturnih dijelova vozila s boljim mehaničkim svojstvima u svrhu boljeg rukovanja i izdržljivosti vozila uslijed povećanja snage nekom od ranije navedenih metoda.

## 9. Optimizacija mase vozila

- Ugradnja materijala manje gustoće u svrhu smanjenja mase vozila, a samim time se i poboljšava omjer snage na masu što rezultira boljim performansama vozila.

### **1.2. Postavljanje istraživačkog problema i ciljeva istraživanja**

Glavni istraživački problem ovog rada predstavlja analiza loma glave klipa motora EA888/3 CHHA i korelacija navedenog kvara s utjecajem izmjene radnih karakteristika motora. Specifični ciljevi ovog istraživanja podrazumijevaju identifikaciju uzroka loma klipa, opći pregled utjecaja modifikacije na strukturni integritet komponenti motora te razmatranje preventivnih mjera u svrhu povećanja sigurnosti i pouzdanosti vozila prilikom poboljšavanja performansi motora u sportske svrhe.

### 1.3. Dosadašnja istraživanja o sličnim modifikacijama motora

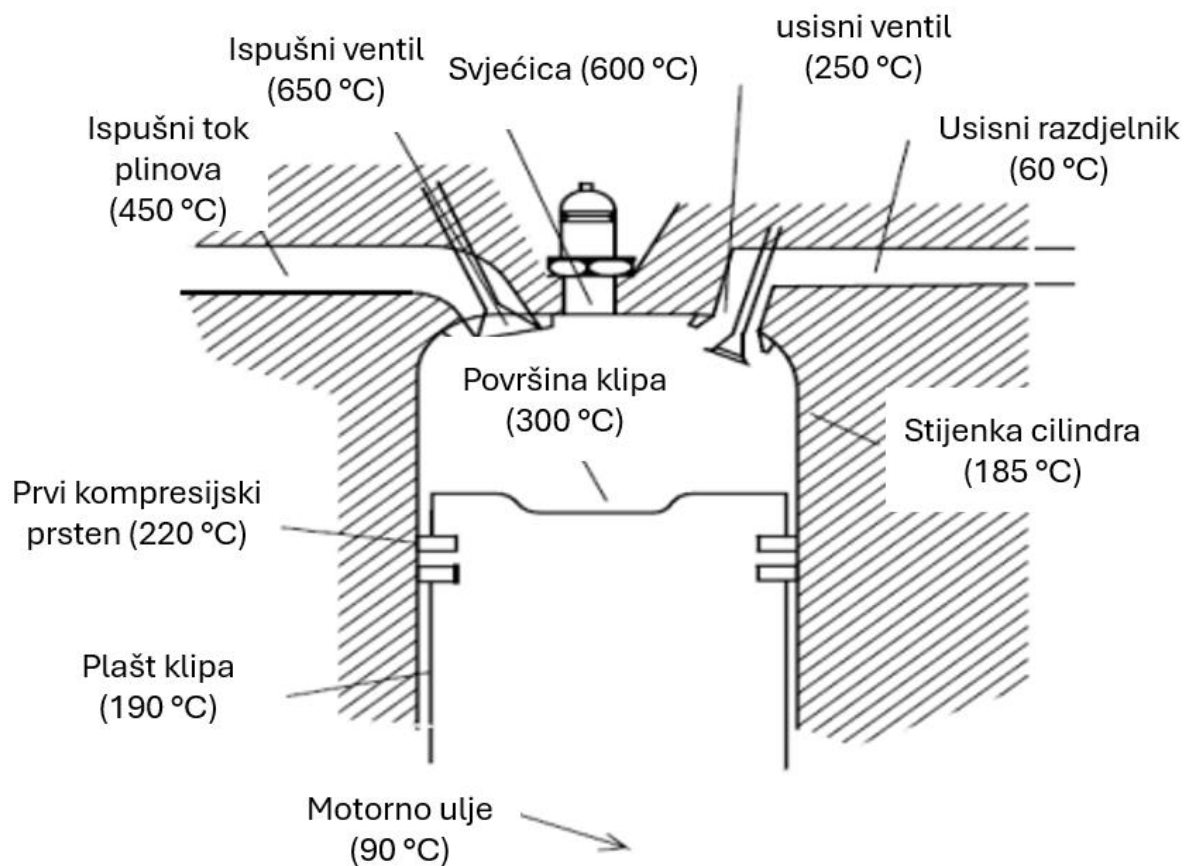
Bitno je napomenuti da se ovakve modifikacije motora najčešće provode od strane sportskih entuzijasta, koristeći se eksperimentalnim i znanstveno neprovjerenim metodama. Stoga je teško pronaći odgovarajuće znanstvene radove za ovaj specifičan slučaj, i najstručniji pristup informacijama pruža upravo autor same modifikacije motora - automehaničar. Unatoč tome, razmatranjem dosadašnjih istraživanja o klipovima motora, moguće je analoški izvesti zaključke o određenim kritičnim točkama tlačnih i toplinskih naprezanja i u slučaju rada klipa u modificiranom motoru.

Proučena su dva istraživanja [3, 4] o raspodjeli naprezanja po glavama klipova benzinskog motora izrađenih od aluminijske legure i lijevanog željeza. Parametri sustava i modeli klipova korišteni za simulacije u navedenim istraživanjima nisu identični klipu EA888/3 CHHA motora, međutim dovoljno su slični za analošku upotrebljivost informacija o raspodjeli naprezanja.

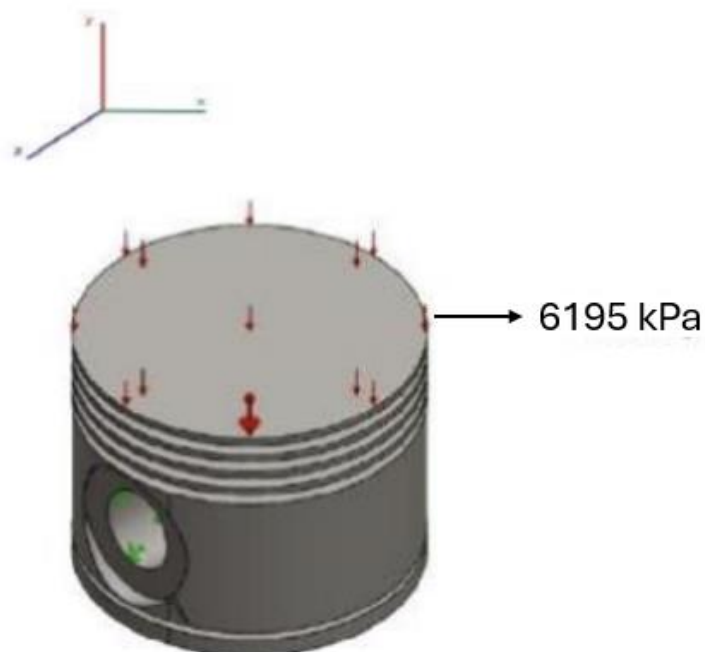
U radu [3] je provedeno simulacijsko ispitivanje uz pomoć ANSYS Workbench Simulation softvera (metodom konačnih elemenata), a model klipa je izrađen i ubačen iz softverskog paketa CATIA. Postavljeni su sljedeći uvjeti radnih temperatura [3]:

- na čeonj površini glave klipa: 573 K (300 °C)
- na površini gornjeg kompresijskog prstena: 493 K (220 °C)
- na površini bočnog plašta klipa: 463 K (190 °C)
- na donjoj površini klipa (temperatura ulja): 343 K (70 °C).

Za tlačno opterećenje pretpostavljen je slučaj ravnomjerne raspodjele naprezanja po čeonj površini klipa u iznosu od 6,195 MPa.

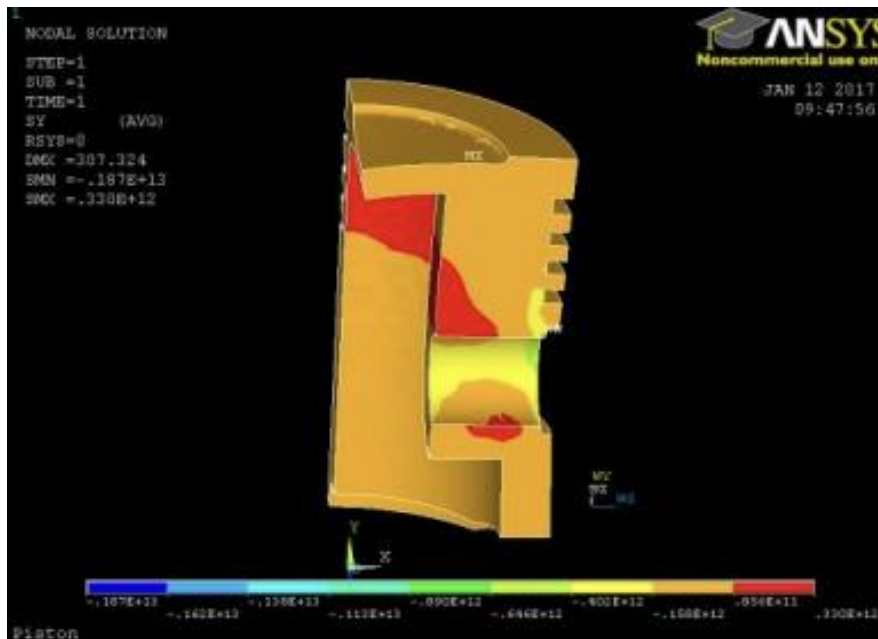


Slika 1. Radni uvjeti sustava pri simulaciji toplinskog opterećenja [3]

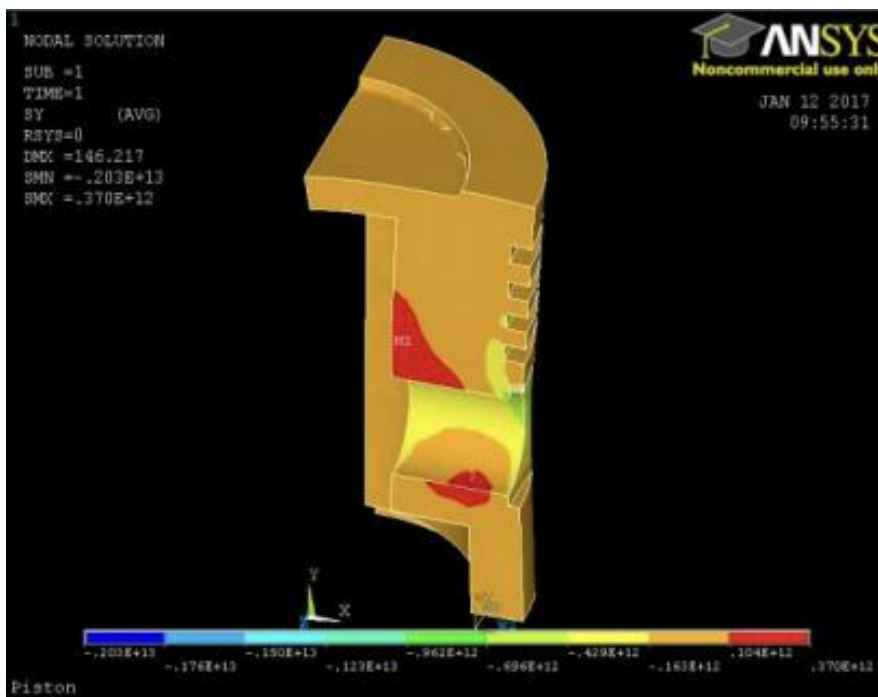


Slika 2. Radni uvjeti sustava pri simulaciji tlačnog opterećenja [3]

Zbog jednostavnosti razumijevanja raspodjele opterećenja i temperatura, za prikaz rezultata simulacije odabran je isječak klipa. Tamnije boje (crvena, narančasta) na prikazu predstavljaju kritična područja, dok svjetlije (žuta, zelena, plava) prikazuju područja manjeg opterećenja.



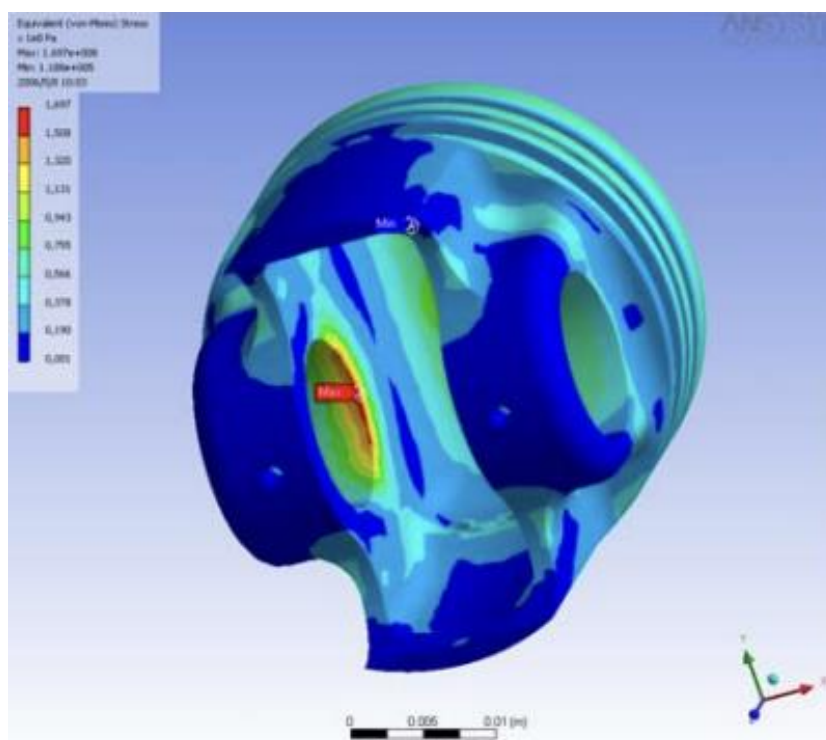
Slika 3. Prikaz toplinsko-mehaničkih opterećenja na aluminijskom klipu [3]



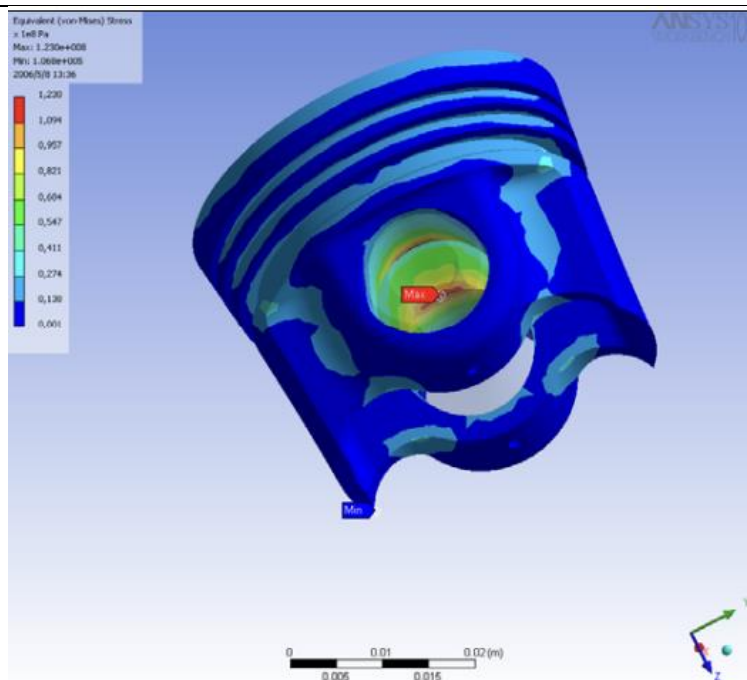
Slika 4. Prikaz toplinsko-mehaničkih opterećenja na klipu od lijevanog čelika [3]

U radu [4] model je izrađen u Autodesk Inventor softveru, te umetnut u sustav ANSYS Workbench Simulation za izvršavanje simulacija metodom konačnih elemenata. Kao i u ranijem slučaju, „toplije“ boje na modelu reprezentiraju područja većeg, dok „hladnije“ prikazuju područja manjeg iznosa opterećenja. Analizirani su klipovi u izvedbi od lijevanog željeza (nodularni lijev EN-GJS-450-10) te od aluminijske legure (A390-T5). Maksimalni tlak u cilindru postavljen je na 9 MPa, a postavljeni su sljedeći uvjeti radnih temperatura [4]:

- prosječna temperatura površina klipa: 423 K (150 °C)
- prosječna temperatura unutarnje površine cilindra: 373 K (100 °C)
- prosječna temperatura ulja: 363 K (90 °C).



Slika 5. Prikaz toplinsko-mehaničkog opterećenja na klipu od lijevanog željeza [4]



**Slika 6. Prikaz toplinsko-mehaničkog opterećenja na klipu od aluminijskog lijeva [4]**

Zaključuje se da istraživanje u radu [4] odgovara ponašanju klipa u uobičajenom radu nemodificiranog motora zbog sličnosti parametara s proizvodno propisanim radnim temperaturama i tlakovima jednog benzinskog motora. Nadalje, geometrija modela iz istraživanja u radu [4] identična je klipu iz EA888/3 CHHA motora, dok je model iz istraživanja u radu [3] drugačijeg oblika. Istraživanje iz rada [3] predstavlja slučaj povišenih temperatura i tlakova, pa je taj slučaj vjerojatno mjerodavniji za donošenje zaključaka o radu modificiranog motora jer je pretpostavka da se i u takvim uvjetima povećavaju radne temperature i tlakovi. Stoga, uzevši u obzir ključne informacije iz oba primjera, može se zaključiti da se najveća naprezanja javljaju na obodima provrta osovine klipa, na obodima prstenova klipa te na prikazanom detalju na (Slika 7).



**Slika 7. Detalj opterećenja [4]**

## 2. TEORIJSKI OKVIR

### 2.1. Detaljan opis motora 2.0 TSI EA888/3 CHHA

#### 2.1.1. Povijest i specifičnosti modela u odnosu na prethodne generacije

Volkswagen Grupa je 2006. godine razvila prvu generaciju linije motora EA888 (EA888/1) kao svojevrsnu zamjenu za stariju generaciju motora EA113, a početak njihove implementacije u motorna vozila proizvođača unutar VW Grupe (Audi, Škoda, Volkswagen i Seat) ostvario se godinu kasnije, 2007. godine. Motivirani praćenjem tehnološkog napretka i postrožavanjem legislativa za smanjenje emisija, Volkswagen Grupa je do danas razvila četiri generacije EA888 motora, gdje je svaka nova iteracija donosila značajan napredak u učinkovitosti i ekološkoj prihvatljivosti motora.

Prva generacija EA888 motora bila je u proizvodnji od 2006. do 2008. godine, a uključivala je proizvodnju deset različitih pogonskih jedinica (BYT, BZB, CABD...). U odnosu na prethodnika (EA113), ostvarene su mnoge značajne promjene, a neke od njih su [5]:

- smanjenje kompresijskog omjera s 10,5 na 9,6
- implementacija turbopunjača KKK K03
- novi sustav ubrizgavanja goriva FSI (eng. *Fuel Stratified Injection*)
- nova konstrukcije glave cilindra od aluminijske legure
- poboljšanje sustava prijenosa zamjenom kombinacije lančano-remenskog prijenosa između bregastih osovina s isključivo lančanim prijenosom.

Druga generacija motora EA888 bila je u proizvodnji od 2008. do 2011. godine, a predstavljala je proizvodnju dvanaest novih modela pogonskih jedinica (CDHA, CDHB, CAEA...). U ovoj iteraciji motora nije bilo značajnih strukturnih promjena, već su odrađene preinake u svrhu sukladnosti sa zahtjevima ekološkog standarda EURO 5. Jedna od modifikacija koju je bitno spomenuti za drugu generaciju motora je zamjena klipnjača i klipova od lijevanog željeza čeličnim klipnjačama i klipovima od aluminijske legure [5].

Treća generacija je bila u proizvodnji od 2011. do 2022. godine, a obuhvaćala je najdrastičnije preinake u odnosu na ranije generacije motora u svrhu poboljšanja performansi i smanjenja emisija. Model CHHA, koji se analizira u ovom diplomskom radu, jedan je od ukupno dvadeset

i sedam različitih modela pogonskih jedinica razvijenih u trećoj generaciji motora EA888. Neke od najznačajnijih uvedenih promjena su [6]:

- smanjenje mase motora (tanje stijenke cilindara, lakše koljenasto vratilo, upotreba aluminijskih vijaka te laganih polimera za posudu za ulje)
- implementacija novog turbopunjača IHI IS20 kao zamjena za KKK K03
- novi sustav ubrizgavanja goriva FSI + MPI (eng. *Multi Point Injection*)
- uvođenje funkcije Start/Stop (gašenje vozila u mirovanju).

Najnovija generacija naziva se EA888 Evo4, a u proizvodnji je od 2022. godine do danas. Preinake u odnosu na prethodnu generaciju se zasnivaju na poboljšanju učinkovitosti motora, te su dodane zaklopke u usisnom razvodniku i povećan je tlak u sustavu ubrizgavanja goriva. Značajna izmjena je uvedena i u klipovima, gdje su ugrađene posebne mlaznice ulja u svrhu hlađenja klipova pri visokim opterećenjima, a ta izmjena upućuje na nedostatan hlađenje klipova u prethodnim generacijama motora [7].

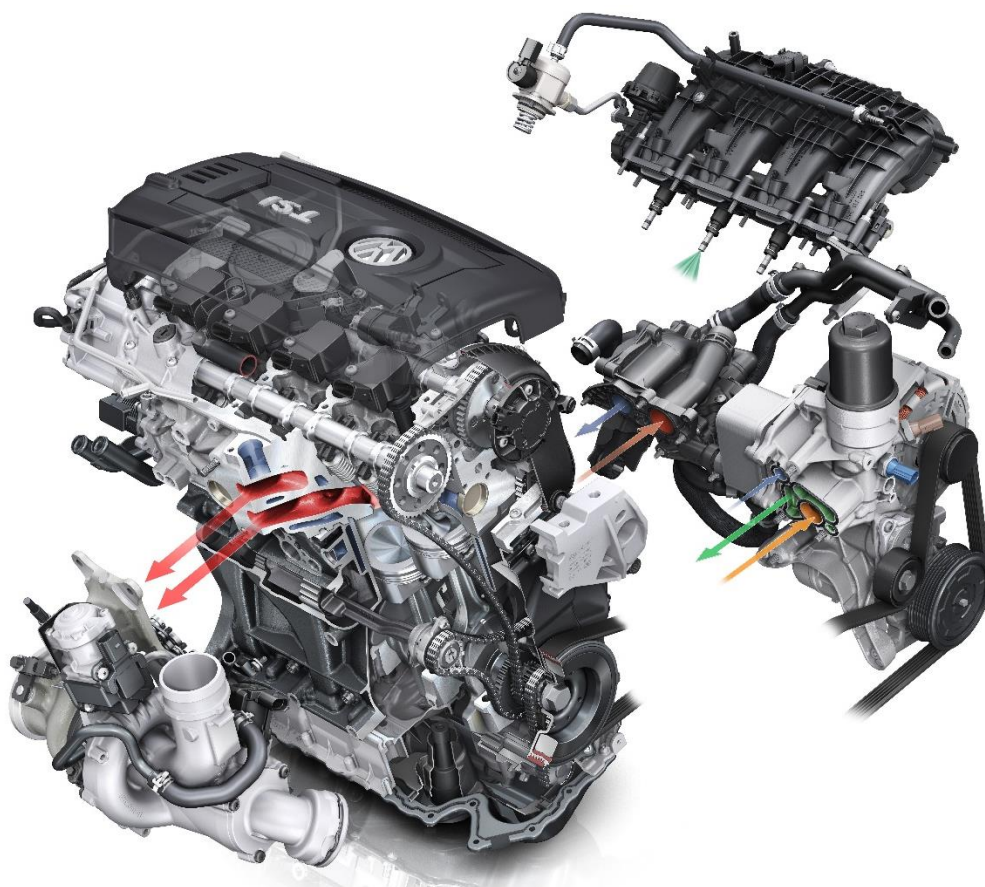


**2.1.2. Tehnički podaci****Tablica 1. Tehnički podaci EA888/3 CHHA [5, 7]**

Tehnički podatak	Vrijednost	Mjerna jedinica
Godine proizvodnje	2013. - 2018.	/
Vrsta goriva	benzin	/
Masa	140	kg
Zapremnina	1984	cm <sup>3</sup>
Sustav ubrizgavanja goriva	FSI + MPI	/
Izlazna snaga	169	kW
Izlazni zakretni moment	350	Nm
Materijal izrade bloka motora	Lijeivano željezo	/
Materijal izrade glave motora	AlSi10Mg	/
Provrt cilindra	82,5	mm
Hod klipa	92,8	mm
Kompresijski omjer	9,6:1	/
Kapacitet motornog ulja	5,7	l

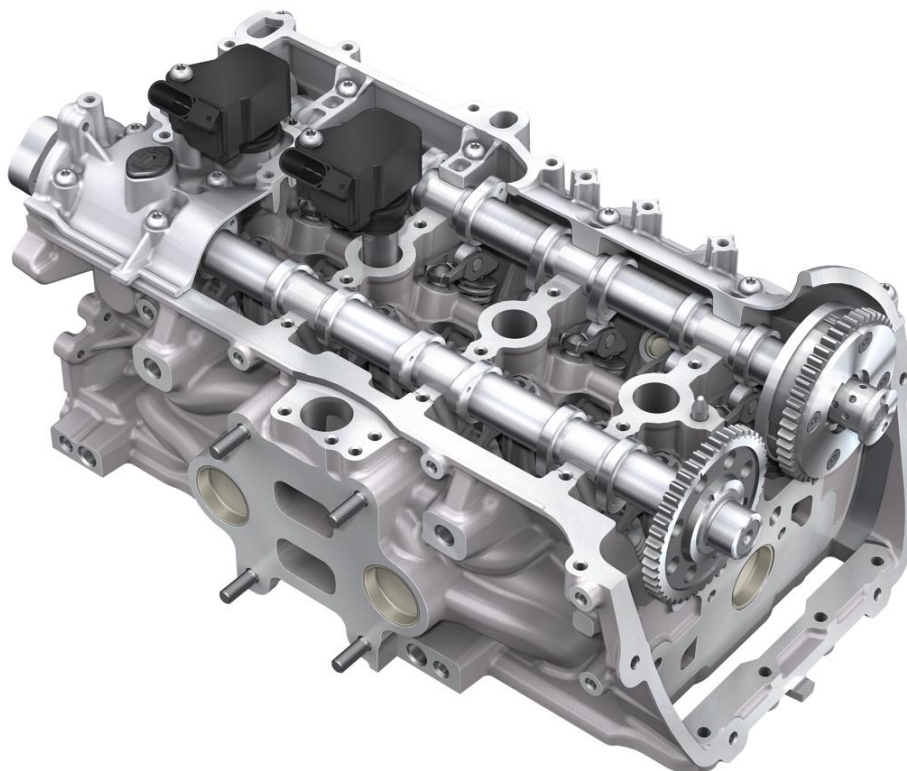
### 2.1.3. Konstrukcija motora

EA888 motori (Slika 8) su četverocilindrični motori s linijski poredanim cilindrima. Za osnovu je korišten stari blok motora od lijevanog željeza iz modela EA113, dok je za izradu glave motora (eng. *Cylinder head*) (Slika 9), korištena legura aluminija AlSi10Mg, čime se postigla značajna redukcija u masi motora i poboljšana učinkovitost hlađenja. Unutar bloka motora se nalaze dvije horizontalno pozicionirane balansne osovine za suzbijanje sila inercije drugog stupnja, a funkcioniraju na način da se rotiraju dvostrukom brzinom vrtnje u odnosu na brzinu vrtnje motora i to u suprotnom smjeru jedna od druge. [6, 7]



Slika 8. Konstrukcija motora EA888 [7]

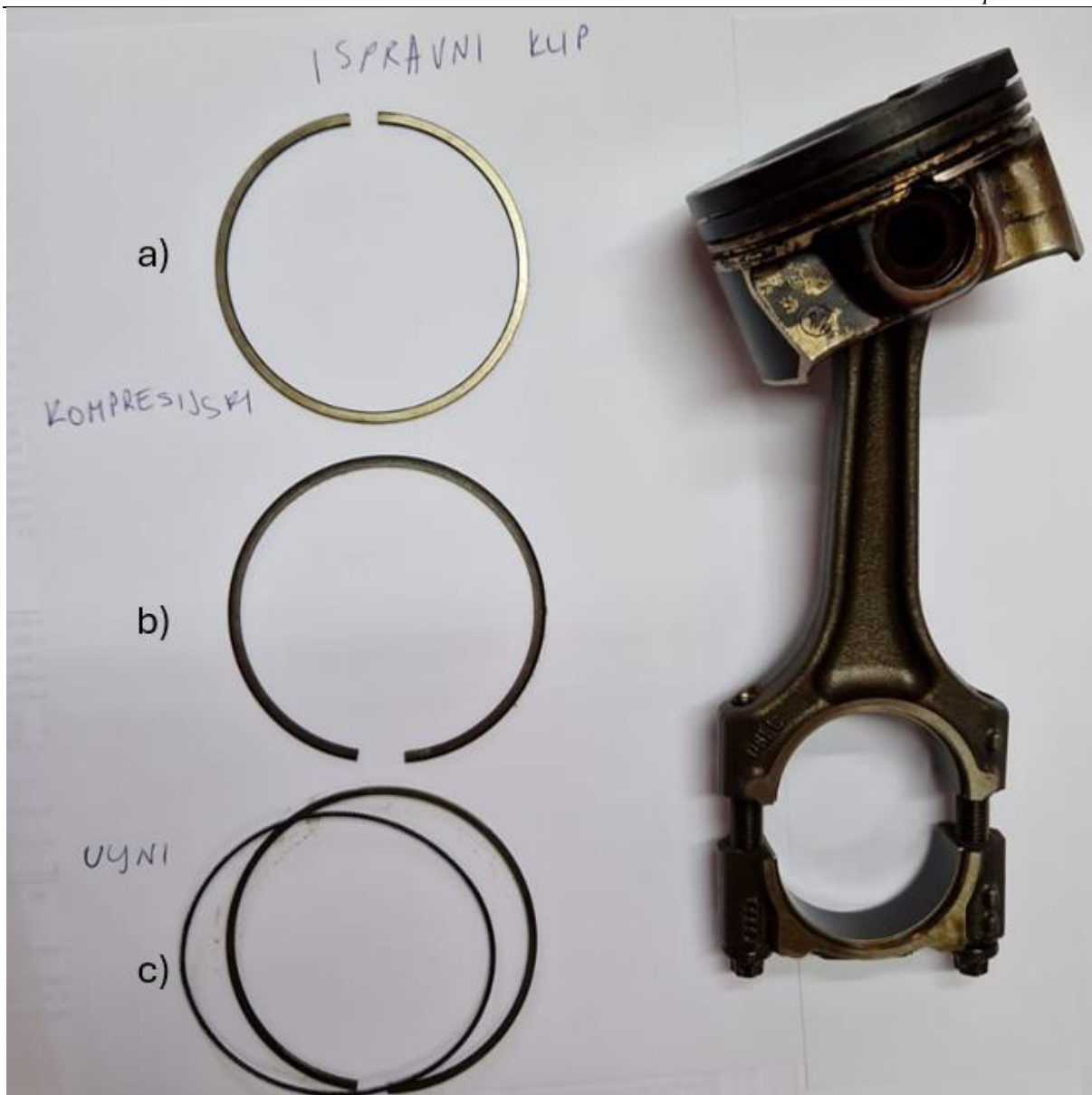
Koljenasto vratilo prve generacije motora EA888 bilo je izrađeno od lijevanog željeza i sadržavalo je 8 protuutega, no u međuvremenu je za treću generaciju motora zamijenjeno lakšim koljenastim vratilom od induksijski očvrnutog kovanog čelika s četiri protuutega. Koljenasto vratilo radi na pet glavnih ležajeva promjera 48mm te je zupčastim lancem povezano s dvije bregaste osovine u glavi motora. CHHA modeli motora EA888 koriste IHI IS20 turbopunjače (Slika 8, dolje lijevo) te sustav ubrizgavanja goriva FSI+MPI (Slika 8, gore desno). [6, 7]



Slika 9. Glava motora EA888 [7]

#### 2.1.3.1. Konstrukcija klipa

Klipnjače motora EA888/3 CHHA su izrađene od čelika 36MnVS6, a klipovi od aluminijske legure. Po površini plašta klipa nalazi se prevlaka za zaštitu od trenja, a po čeonj površini prevlaka za zaštitu od toplinskog opterećenja. Na klip se montiraju dva kompresijska (Slika 10, a, b) te jedan uljni prsten (Slika 10, c). Kompresijski prsteni su jednoslojni, a služe za održavanje odgovarajućeg tlaka u cilindrima i onemogućavaju protok ulja u komoru za izgaranje. Uljni prsten je konstruiran kao šuplji obruč unutar kojeg se nalazi kružna opruga. Konstrukcija uljnog prstena treba omogućavati ravnomjerno podmazivanje stijenki cilindra i plašta klipa pri radu motora. Ležaj prvog kompresijskog prstena je zbog veće koncentracije opterećenja ojačan slojem lijevanog željeza. Ležaj uljnog prstena je konstruiran s provrtima za slobodan prolazak ulja iz unutarnje površine klipa, na koju se ulje nanosi mlaznicama prilikom rada motora. Potpuni sklop klipa se postiže montiranjem glave klipa na klipnjaču uz pomoć osovine i graničnika. [8]

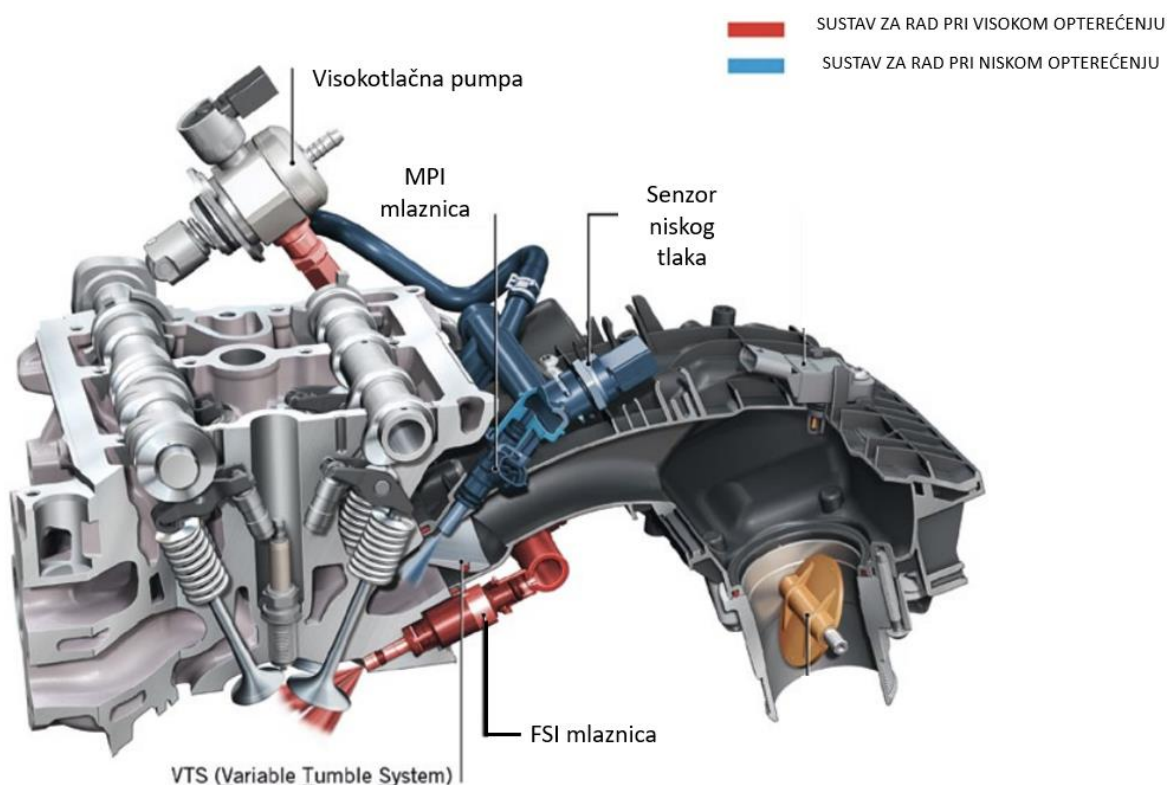


Slika 10. Sklop klipa

#### 2.1.4. Ključni sustavi i komponente EA888/3 CHHA motora

- 1) Sustav ubrizgavanja goriva u EA888 CHHA motoru se sastoji od kombinacije FSI i MPI sustava. FSI sustav, prikazan na (Slika 11, crveno), predstavlja tehnologiju ubrizgavanja goriva direktno u cilindre motora prilikom kompresijskog takta, a to omogućava bolju kontrolu procesa sagorijevanja goriva. Ovim se postupkom postiže bolje miješanje goriva i zraka u cilindru, što rezultira poboljšanjem učinkovitosti motora. MPI sustav, prikazan na (Slika 11, plavo) , predstavlja tehnologiju istovremenog ubrizgavanja goriva u više točaka usisa zraka, a izveden je tako da se gorivo ubrizgava u zračni tok prije nego uđe u cilindre. Kombinacijom ovih dvaju

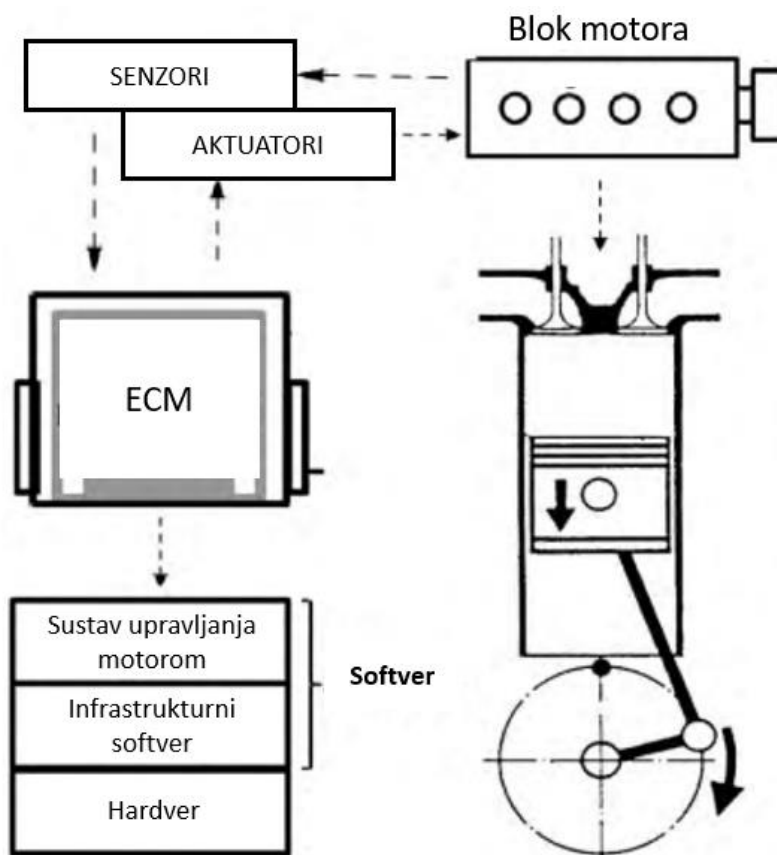
sustava se postiže optimizirani rad motora u svim uvjetima, gdje se pri visokim opterećenjima i performansama upotrebljava sustav FSI, dok se pri nižim brzinama prebacuje na MPI sustav radi manje potrošnje goriva i smanjenja emisija ispušnih plinova. Optimizacija procesa izgaranja goriva se postiže uz pomoć VTS sustava (eng. *Variable Tumble System*) (Slika 11), i to na način da se regulira stupanj turbulencije zraka u ovisnosti o stupnju rada motora. Oblik i geometrija ventila i usisnog sustava utječu na smjer i brzinu ulaska zraka u cilindre, pa se odgovarajućim postavljanjem ventila postiže optimalna učinkovitost miješanja i sagorijevanja goriva. [9, 10]



Slika 11. Sustavi ubrizgavanja goriva FSI i MPI [10]

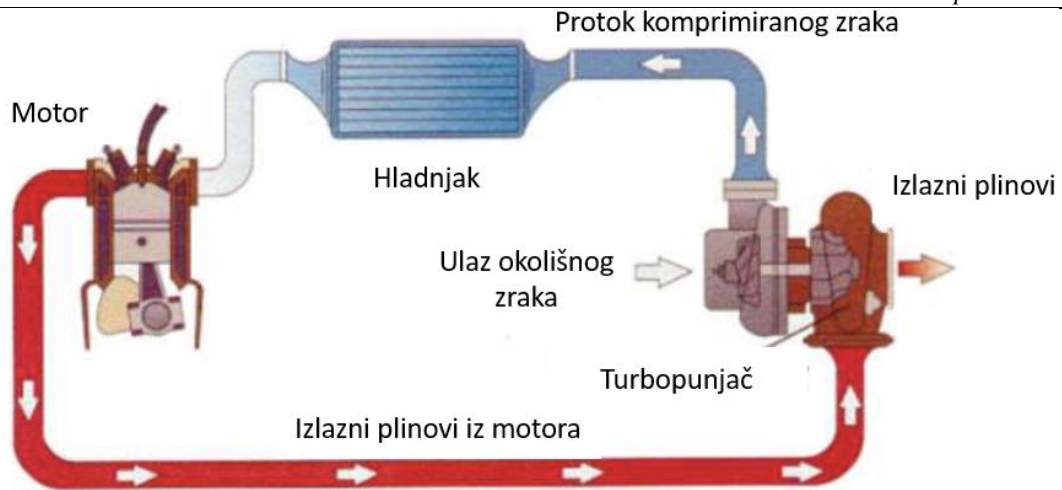
- 2) Modul za upravljanje motorom ECM (eng. *Engine control module*) (Slika 12) je ključna komponenta elektroničkog sustava za upravljanje motorom, a njegova uloga je kontrola i nadzor rada motora u raznim uvjetima u svrhu postizanja optimalnih performansi, potrošnje goriva i emisija ispušnih plinova. ECM prikuplja podatke o trenutnom radnom stanju motora uz pomoć brojnih senzora raspoređenih po vozilu, i zatim ih algoritamski obrađuje i na temelju rezultata izdaje naredbe o radu ostalim sustavima u vozilu. Neke od funkcija modula su: prilagodba smjese zraka i goriva, otvaranje određenih ventila u odgovarajućim trenucima, prilagodba vremena paljenja u cilindrima i slično. Iznimno je bitno prilagoditi ovaj sustav u slučaju izvršavanja drugih motornih modifikacija jer u

protivnom može doći do značajnih problema u radu motora, a prvenstveno pojave tzv. prijevremene detonacije (eng. *Knock*). [11]



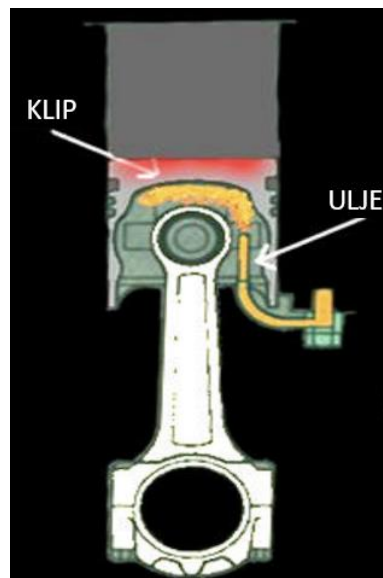
Slika 12. Shematski prikaz rada modula za upravljanje motorom [11]

- 3) Turbopunjač IHI IS20 funkcionira na principu iskorištavanja izlaznih plinova iz motora u svrhu povećanja snage. Turbopunjač se sastoji od dvije glavne komponente spojene osovinom: turbine i kompresora. Prolaskom izlaznih plinova se potiče vrtnja turbine i prijenos snage na kompresor. U kompresoru se zrak stlači i prosljeđuje u usisni kolektor, a potom i u komoru za izgaranje. Povećavanjem tlaka zraka pri ulasku u komoru za izgaranje se ostvaruje ubrizgavanje veće količine i gustoće zraka, a samim time se ostvaruje bolje miješanje s gorivom i efikasnije izgaranje u cilindrima, što naposljetku rezultira povećanjem snage i okretnog momenta motora. IHI IS20 turbopunjač spada u turbopunjače s promjenjivom geometrijom lopatica (eng. *Variable geometry turbocharger*), a što znači da se geometrija lopatica turbine prilagođava različitim uvjetima rada motora u svrhu optimizacije protoka plinova. [12]



Slika 13. Shematski prikaz rada turbopunjača [12]

- 4) Sustav hlađenja klipa uljnim mlazom je dio sustava hlađenja motora, a njegova uloga je održavanje strukturnog integriteta klipova u radnim uvjetima. Rashladno ulje cirkulira rashladnim sustavom motora i dovodi se do mlaznica koje su usmjerene prema donjoj strani klipova. Mlaznice tada prskaju ulje po donjoj strani klipa, a ulje prodirući kroz provrte u uljnom prstenu klipa hladi klip i osigurava da ne dođe do deformacije uslijed visokih radnih opterećenja, ali i smanjuje trenje između klipa i stijenki cilindra. Prilikom takta ekspanzije se višak ulja sastruže sa stijenki cilindra i vraća natrag u rezervoar ulja [13].

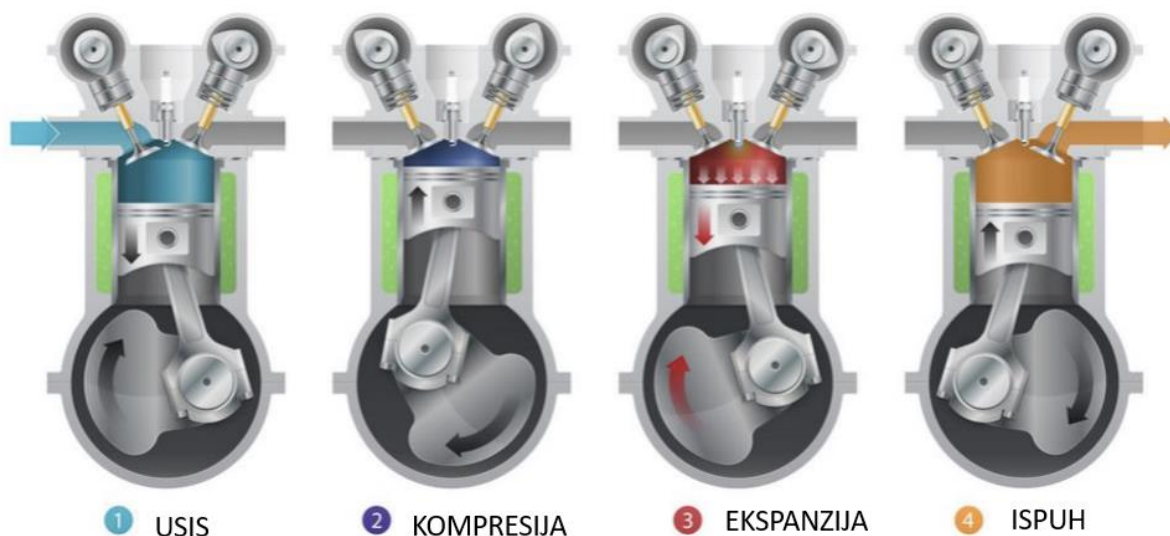


Slika 14. Sustav hlađenja klipa uljnim mlazom [14]

### 2.1.5. Radni ciklus

Motor EA888/3 CHHA radi na principu četverotaktnog Otto ciklusa [15]:

1. Usis gorive smjese – klip se kreće prema dolje, stvara se podtlak u cilindru i kroz usisne ventile se ubrizgava goriva smjesa zraka i benzina u cilindar.
2. Kompresija i paljenje – usisni i ispušni ventili se zatvaraju, a nakon što dosegne donju mrtvu točku, klip se kreće gibati prema gore i komprimira gorivu smjesu u cilindru.
3. Izgaranje i ekspanzija – u trenutku najveće kompresije, svjećica ispušta iskrinu i pali gorivu smjesu. To dovodi do brzog porasta tlaka i potiskivanja klipa prema dolje.
4. Ispuh – nakon prethodnog takta dolazi do ispusta plinova koji su nastali kao produkti izgaranja kroz ispušne ventile.



Slika 15. Prikaz četverotaktnog ciklusa [15]

U CHHA modelu EA888 motora se nalaze četiri induksijska svitka s po jednom svjećicom, a pale se u redosljedu paljenja po cilindrima: 1-3-4-2. Takav redosljed paljenja svjećica u cilindrima se postavlja u svrhu povećanja učinkovitosti izgaranja te balansiranja vibracija motora i poboljšanja ukupne udobnosti vožnje.



## 2.2. Informacije o primijenjenoj motornoj modifikaciji

U ovom diplomskom radu analiziran je kvar motora EA888/3 CHHA osobnog vozila modela Volkswagen Golf Mk.7. Do kvara motora je došlo uslijed brojnih modifikacija u svrhu poboljšanja svojstava motora, a provedene preinake na motoru su:

- Reprogramiranje softvera motora na Revo stage 3 Map postavke. Ovim se postupkom ostvaruje efektivno otključavanje prethodno zaključanih postavki motora iz sigurnosnih razloga. Neke od njih su: uklanjanje granice maksimalne brzine kretanja vozila, povećavanje limita broja okretaja motora, poboljšano praćenje i upravljanje temperaturom ulja, poboljšano hlađenje motora, zaštita pri hladnom paljenju (eng. *Cold start*) motora – puna funkcija turbopunjača se aktivira tek nakon što ulje dosegne odgovarajuću temperaturu.
- Nova donja ispušna cijev (eng. *Downpipe*) promjera 76mm i ostale cijevi ispušnog sustava promjera 70mm umjesto izvornog ispušnog sustava promjera 63,5mm. Ova preinaka poboljšava performanse jer omogućava bolji protok ispušnih plinova.
- IHI IS38 turbopunjač umjesto izvornog IHI IS20 turbopunjača. IS38 omogućava vršni tlak prednabijanja zraka od 1,85 bar, u odnosu na IS20 koji ostvaruje 1,3 bar. To rezultira većim volumenom zraka koji se ubrizgava u cilindre uslijed procesa izgaranja goriva, odnosno povećanjem performansi motora.
- Turbosmart ventili za rasterećenje tlaka zraka koji služe za poboljšavanje učinkovitosti turbopunjača. Oni osiguravaju brtvljenje usisnog sustava i reguliraju tlak unutar motora.
- Racingline r600 sustav za usis hladnog zraka umjesto tvornički postavljenog usisa zraka. Razlikuju se po mjestu postavljanja filtera zraka, što rezultira mogućnošću ubrizgavanja hladnijeg zraka u cilindre. Hladan zrak je gušći od toploga, te je stoga i bogatiji kisikom, a to omogućava bolje sagorijevanje goriva.
- Wagner međuhladnjak (eng. *Intercooler*) s gotovo 3 puta većom površinom hlađenja u odnosu na tvornički međuhladnjak omogućava poboljšano hlađenje zraka u usisnom sustavu.
- Turbo ulazna cijev (eng. *Turbo inlet pipe*), turbo izlazna cijev (eng. *Turbo outlet pipe*) i set za uklanjanje prigušenja (eng. *Muffler delete kit*) su poboljšanja u cijevnim sustavima motora. Turbo ulazna cijev omogućava bolji protok zraka do turbopunjača, turbo izlazna cijev omogućava bolji protok zraka iz turbopunjača do međuhladnjaka, a

set za uklanjanje prigušenja predstavlja uklanjanje pregrada ispušnim plinovima u ispušnom sustavu i postavljanje ravnih cijevi.

- Racingline sustav za separaciju ulja (eng. *Oil catch can*) koji se sastoji od separatora i filtera uljnih para motora. Ovaj sustav se postavlja prije međuhladnjaka i uklanja većinu čestica ulja iz zračnog toka koji se ubrizgava u cilindar za paljenje. Ukoliko se čestice ulja pojave u mješavini zraka i goriva, dolazi do njihovog izgaranja i javlja se crni sloj ugljika na površinama unutar cilindra, uključujući i površine usisnih i ispušnih ventila.
- Ngk racing svjećice i indukcijski svici prilagođeni izdržavanju ekstremnih radnih uvjeta (povišenih temperatura i tlakova u cilindrima).

### **2.3. Problem prijevremene detonacije u motorima s direktnim ubrizgavanjem goriva**

Prijevremena detonacija (eng. *Low-speed pre ignition - LSPI*) je pojava koja se javlja kada se sitne kapljice ulja pomiješaju s gorivom i prerano zapale u cilindru zbog trenja između kompresijskih prstenova i stijenki cilindra, prije nego se aktivira svjećica s ciljem regularnog izgaranja mješavine zraka i goriva. To rezultira nekontroliranim izgaranjem i uzrokuje ogromne skokove tlaka u cilindru koji djeluju na klip, a događa se prilikom naglog ubrzavanja vozila. Posljedice prijevremene detonacije mogu biti blage, poput turbulentnog i glasnijeg rada motora, no u slučaju ponavljanja moguća je pojava i značajnijih oštećenja svjećice i klipova [16].

Ova pojava se isključivo javlja kod motora s direktnim ubrizgavanjem goriva (FSI), pa je iz istog razloga pri modifikacijama motora ključno ugraditi i ranije navedene sustave za separaciju ulja. Međutim, postoji i drugi dovod ulja za hlađenje klipova kojem je bitno spriječiti ulazak u gorivu komoru, a to se ostvaruje uz pomoć kompresijskih prstenova na klipu. [16, 17]

### 3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

#### 3.1. Hipoteze o mogućim uzrocima loma glave klipa

Prema istraženom teoretskom aspektu rada modificiranih motora te uzimajući u obzir iskustveni osvrt automehaničara koji je proveo preinake na motoru, postavlja se nekoliko hipoteza o mogućim uzrocima kvara klipa motora [8, 16, 17]:

- Do loma je došlo zbog pojave nekontroliranih detonacija u cilindru.
- Do loma je došlo zbog upotrebe klipa neadekvatnog materijala za novonastale temperature i tlakove u cilindru. Je li uslijed svih odrađenih promjena bilo potrebno ugraditi i klipove veće čvrstoće?
- Do loma je došlo zbog konstrukcijskog nedostatka klipa.
- Do loma je došlo zbog strukturnih oštećenja prilikom strojne obrade klipa prije njegove ugradnje u sklop motora.

#### 3.2. Procedura analize kvara

Kroz proceduru analize kvara sagledani su svi ključni podaci o oštećenom klipu, te su provedena laboratorijska ispitivanja u svrhu utvrđivanja uzroka kvara. Zbog usporedbe rezultata ispitivanja određena laboratorijska ispitivanja su provedena na jednom od tri preostala funkcionalna klipa iz oštećenog motora i na jednom novom nekorištenom klipu motora EA888/3 CHHA (Slika 16).



Slika 16. Novi klip

**Tablica 2. Oznake ispitnih uzoraka**

Oznaka	Uzorak
Uzorak A	Oštećeni klip
Uzorak B	Korišteni, neoštećeni klip
Uzorak C	Novi, nekorišteni klip

### 3.2.1. Sakupljanje osnovnih podataka o kvaru – opis kvara

Prema iskazima vlasnika vozila i izvođača svih preinaka na motoru, utvrđeni su sljedeći podaci o kvaru:

- vozilo je prešlo 105 000 km bez preinaka na motoru, odnosno na tvorničkim postavkama: 169 kW, 350 Nm
- nakon prijeđenih 105 000 km na vozilu su istovremeno provedene sve ranije navedene preinake, a snaga motora je tada iznosila: 313 kW, 550 Nm
- do kvara dolazi nakon prijeđenih 120 000 km, i to pri naglom ubrzavanju vozila sa 60 km/h na 200 km/h. Začuo se neobičan zvuk (poput glasnog udarca), ali vozač je uspješno usporio i doveo vozilo na željeno odredište. Motor je potom ugašen, a nakon ponovnog pokretanja (20 minuta kasnije) računalo vozila je pokazalo na gubitak tlaka u jednom od cilindara motora i nemogućnost pravilnog rada.

### 3.2.2. Preliminarno ispitivanje dijelova

Za preliminarno ispitivanje dijelova proveden je vizualni pregled oštećenog klipa, a potom je isti i fotografiran u stanju u kojem je bio demontiran iz motora. Kao što je vidljivo na slikama 17-19, došlo je do katastrofalnog loma klipa i jasno je da uslijed takvog kvara motor nije mogao nastaviti s radom bez zamjene oštećenih dijelova. Lom se proteže na više razina klipa, gdje je gornji dio loma u obliku isječka iz kružnog vijenca (Slika 17, a) koji predstavlja površinu između ležajeva kompresijskih prstenova, a duljine je od otprilike 1/3 ukupne duljine kružnog vijenca. Donji dio loma (Slika 17, b) se nalazi na području ležaja uljnog prstena i obuhvaća manju površinu od gornjeg dijela loma. Također se vidi da je prilikom loma došlo i do spontanog zavarivanja uljnog prstena s ležajem (Slika 17, označeno crvenom strelicom), pa su se od osnovnog materijala mehanički odlomili kao cjelina, a ne kao dva zasebna elementa klipa. Očigledna je i deformacija uljnog prstena (Slika 18, označeno žutom strelicom), dok su

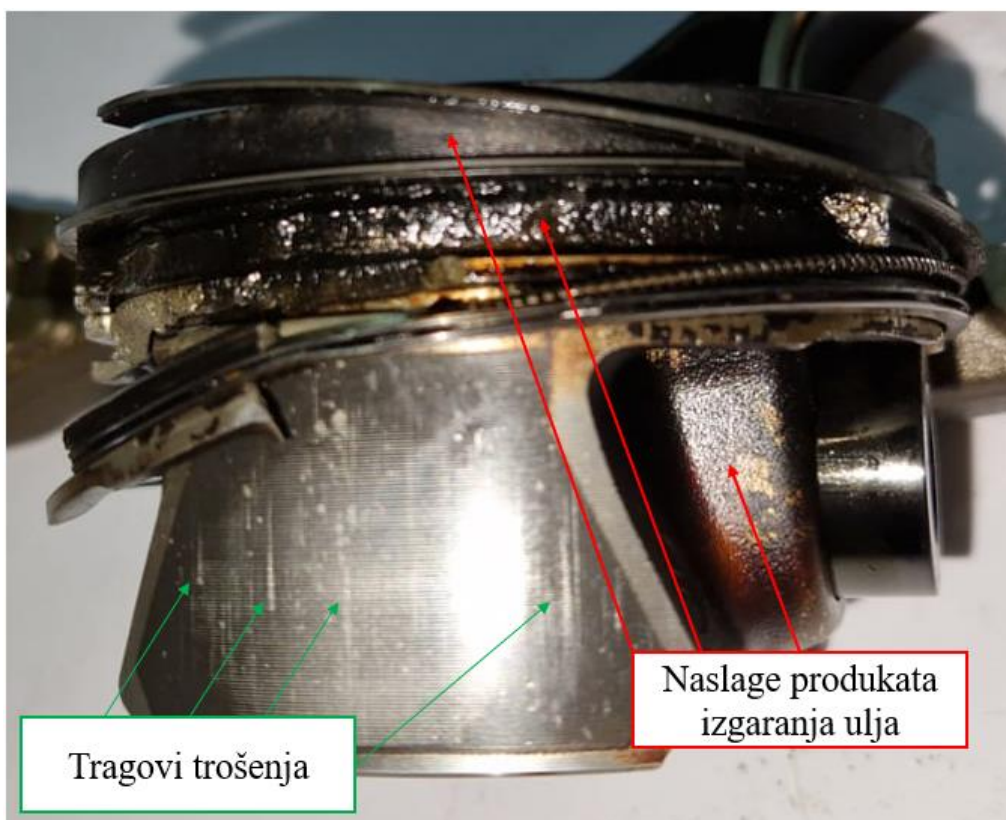
kompresijski prsteni pri lomu ostali neoštećeni. Čeona površina klipa, donja površina klipa te utorka za osovinu klipa su zamašćene površine prekrivene crnim slojem produkata izgaranja ulja (Slika 19, označeno crvenom strelicom), ali na njima nema naznaka o strukturnom oštećenju. Na površini prevlake plašta klipa (Slika 19, označeno zelenim strelicama) su vidljivi tragovi trošenja.



Slika 17. Neodmašćeni oštećeni klip, prednja perspektiva



Slika 18. Neodmašćeni oštećeni klip, donja perspektiva



Slika 19. Neodmašćeni oštećeni klip, bočna perspektiva

### 3.2.3. Izbor, čuvanje i čišćenje prijelomnih površina

Na (Slika 20) prikazani su svi dijelovi klipa na kojim je provedena procedura analize kvara i nakon preliminarnog vizualnog pregleda su očišćeni odgovarajućim kemijskim sredstvom za odmašćivanje. Sukladno uputama za korištenje, sredstvo za odmašćivanje je ostavljeno da 10 minuta kemijski djeluje na naslage produkata izgaranja. Klip je potom ispran vodom, a površine loma su detaljno očišćene četkicom. Isti postupak za odmašćivanje je proveden 3 puta te su naslage u velikoj mjeri uklonjene. Svi odmašćeni dijelovi su potom osušeni, fotografirani i prikladno spremljeni kako bi se zaštitili od okolišnih utjecaja. Na (Slika 21) prikazan je sklop oštećenog klipa nakon odmašćivanja, dok je na (Slika 22) prikazan odmašćeni oštećeni klip bez odvojenih oštećenih dijelova.



**Slika 20. Odmašćeni oštećeni klip s kompresijskim i uljnim prstenovima i odlomljenim dijelovima klipa**



Slika 21. Prikaz loma na odmašćenom klipu s odlomljenim dijelovima klipa



Slika 22. Odmašćeni oštećeni klip



**3.2.4. Priprema metalografskih uzoraka**

Nakon odmaščivanja, klipovi koji su analizirani u diplomskom radu (Tablica 2, A,B,C) su odneseni u laboratorij na pripremu metalografskih uzoraka za provedbu laboratorijskih ispitivanja. Klipovi su prerezani po sredini na stroju za rezanje proizvođača Presi, model Mecatome T260, a zatim su iz dobivenih polovica dodatno izrezani manji uzorci koji su adekvatniji za daljnja ispitivanja. Svi dobiveni uzorci su potom podvrgnuti postupcima strojne obrade skidanjem čestica, brušenjem i poliranjem na uređaju Presi, model Mecatech 250 SPI. Brušenje započinje najgrubljim brusnim papirom granulacije P80, u trajanju od nekoliko minuta, kako bi se postigao ujednačen izgled brušene površine. Postupak se zatim ponavlja na brusnim papirima veće granulacije. Na sličan način se provodi i postupak poliranja, ali s drugačijim parametrima koji su prikazani na (Tablica 3). Nakon strojne obrade, uzorci su utisnuti u plastelinsku masu kako bi se osigurala paralelnost dvaju izrezanih ploha i kako ne bi došlo do proklizavanja indentora prilikom ispitivanja tvrdoće.

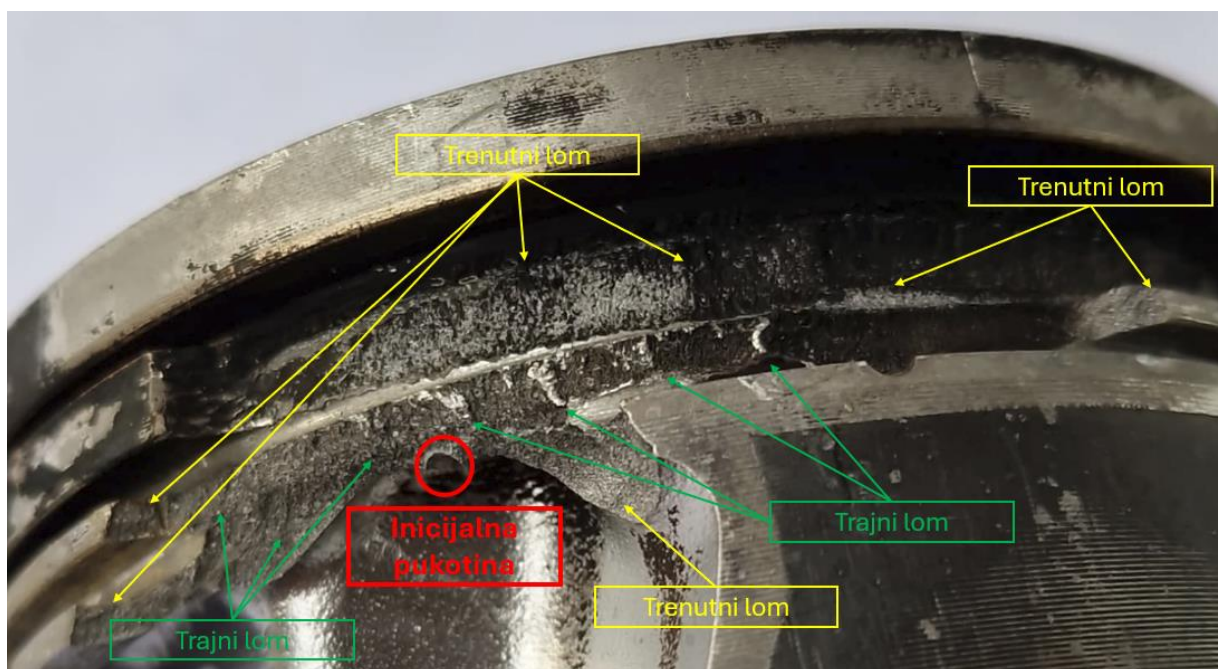
Tablica 3. Priprema metalografskih uzoraka

Faza strojne obrade	Vrsta strojne obrade	Abraziv	Oznaka brusnog papira / vrsta tkanine	Broj okretaja u minuti	Lubrikant
1.	Brušenje	SiC	P80	300	Voda
2.	Brušenje	SiC	P320	300	Voda
3.	Brušenje	SiC	P600	300	Voda
4.	Brušenje	SiC	P1200	300	Voda
5.	Brušenje	SiC	P2400	300	Voda
6.	Brušenje	SiC	P4000	300	Voda
6.	Poliranje	Dijamantna pasta za poliranje (veličina abrazivnih čestica 3 $\mu\text{m}$ )	Platnena tkanina	1500	Bidon (voda + alkohol)
7.	Poliranje	Mliječna tekućina za poliranje	Svilena tkanina	1500	Bidon (voda + alkohol)

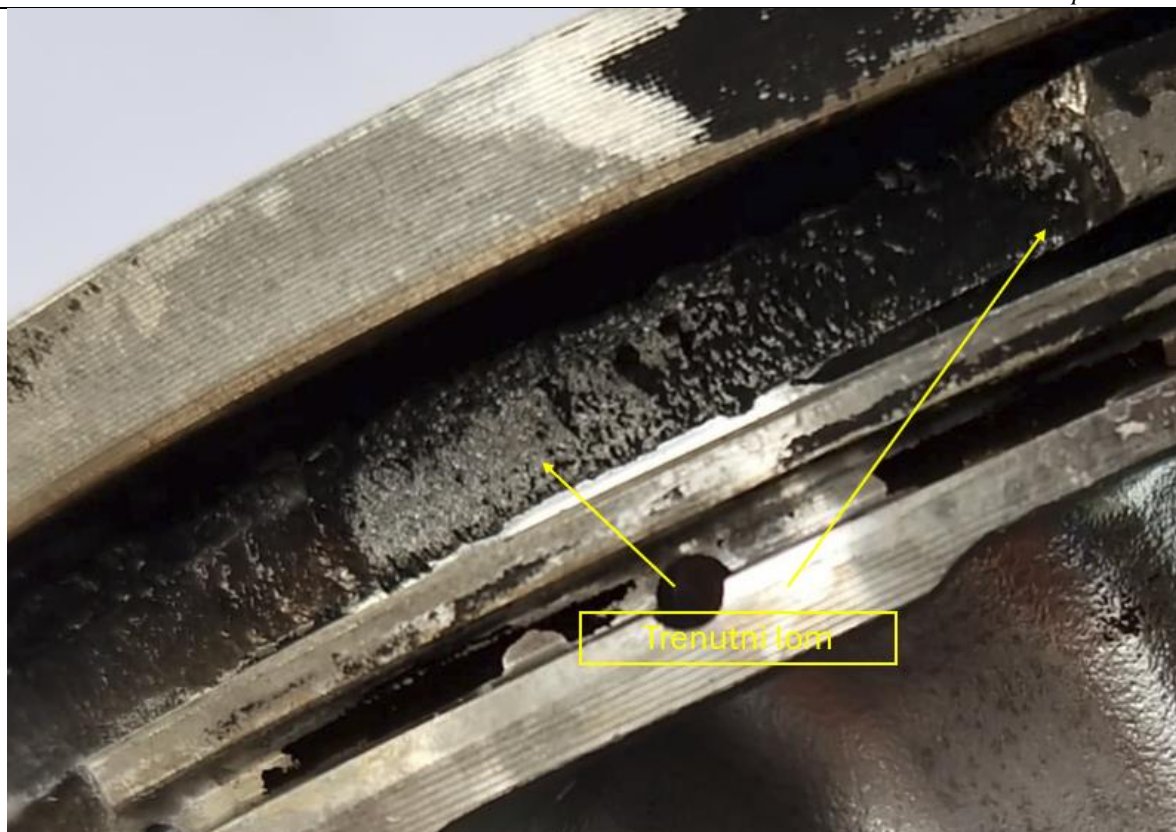
## 4. REZULTATI

### 4.1. Makroskopska ispitivanja

Analizom oštećene površine loma golim okom i fotografijama utvrđene su karakteristike umora materijala, kao što se vidi na (Slika 23, Slika 24). Određena su moguća područja pojave inicijalne pukotine, trajnog i trenutnog loma na temelju izgleda prijelomnih površina kod umora materijala, koje će biti potkrijepljene objašnjenjima kasnije u poglavlju analize rezultata ispitivanja. Osim prijelomnih površina, bitno je primijetiti kako na ostatku klipa nije došlo do deformacije materijala zbog utjecaja radnih uvjeta.



Slika 23. Prednja strana loma na klipu



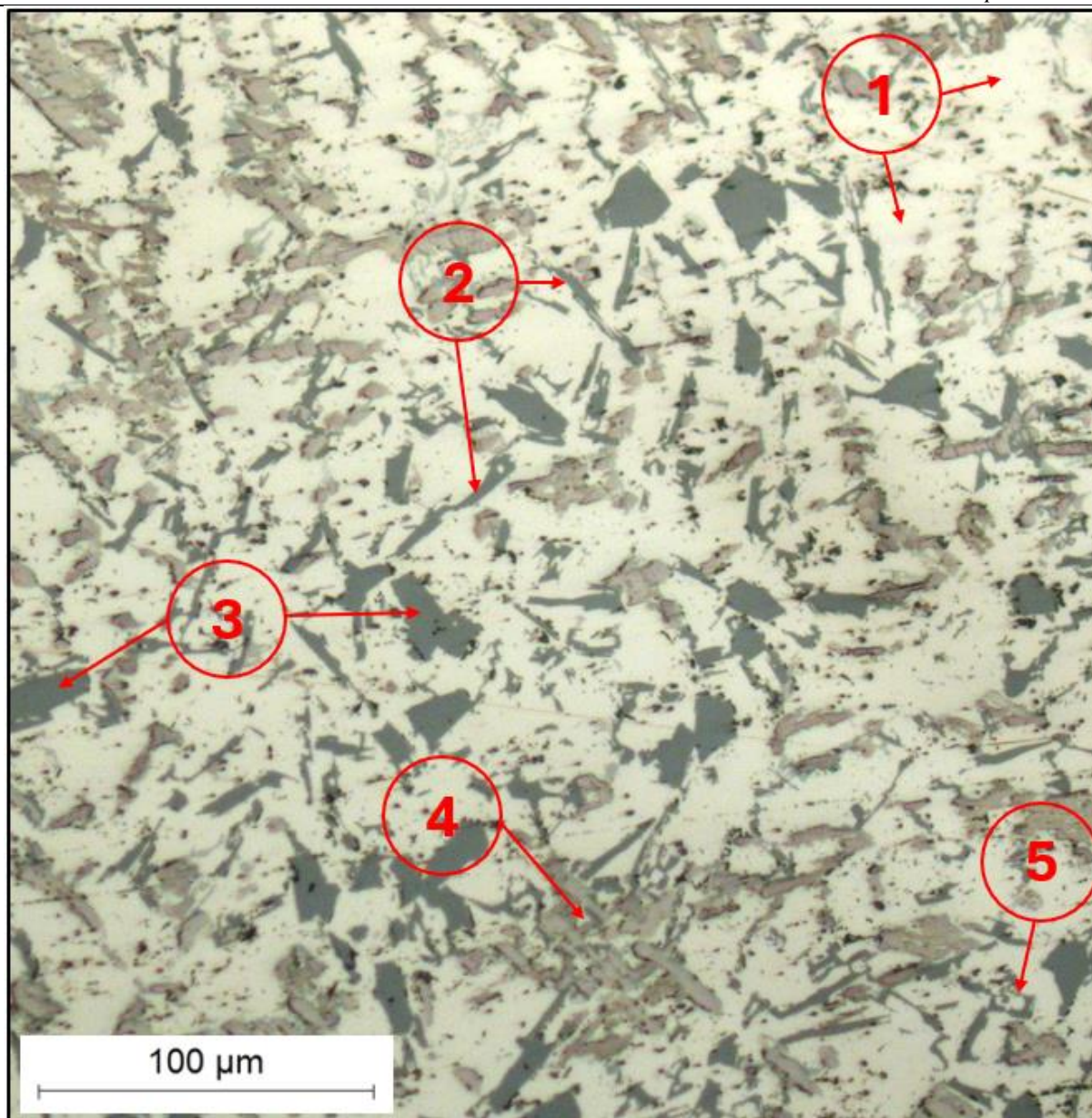
Slika 24. Stražnja strana loma na klipu

## 4.2. Mikroskopska ispitivanja – metalografska analiza

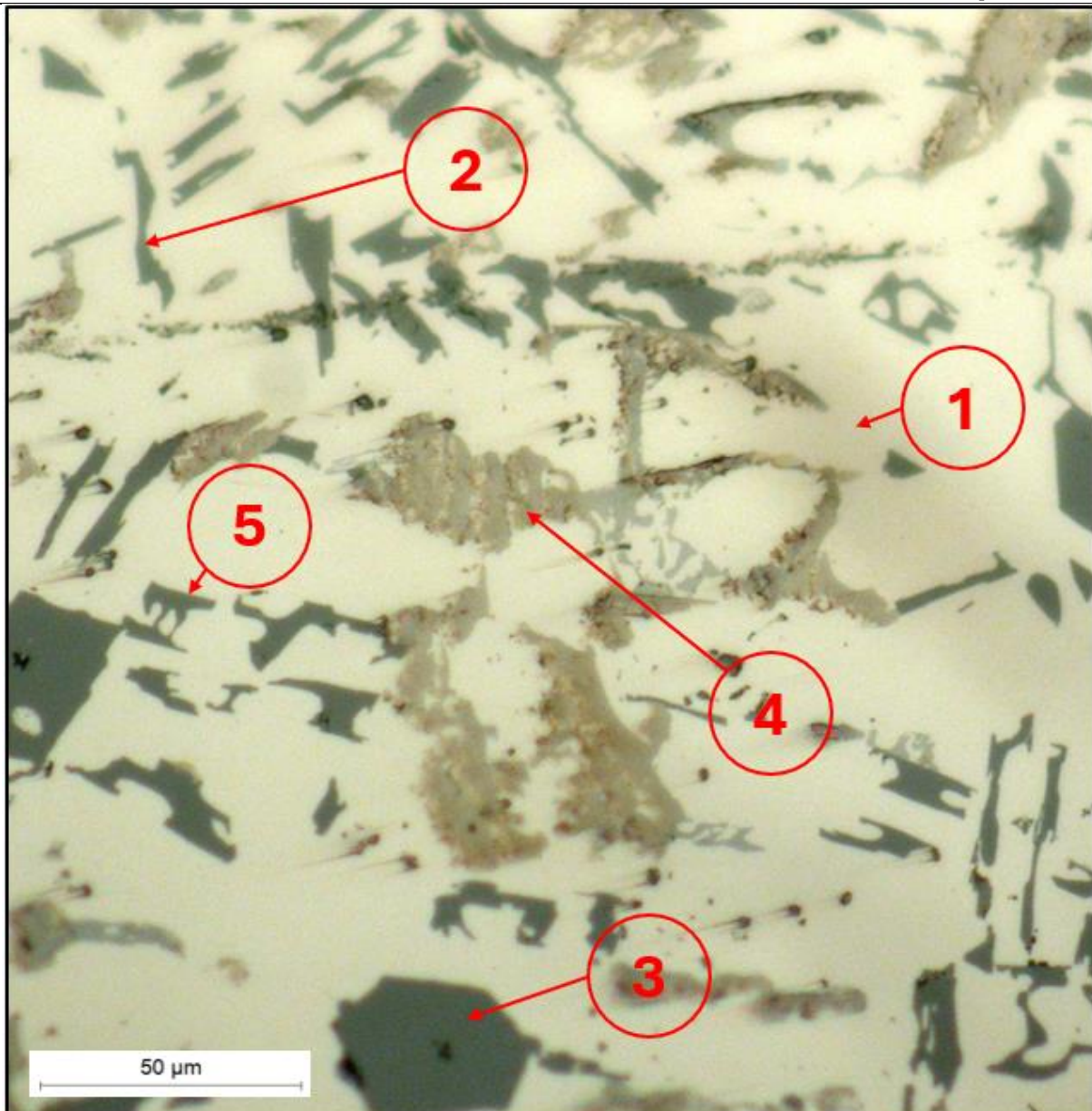
### 4.2.1. Oštećeni klip – uzorak A

Mikrostruktura oštećenog klipa je analizirana na površini unutarnjeg presjeka, i to na dovoljnoj udaljenosti od oštećene površine kako bi se eliminirala mogućnost netočnih rezultata (mikrostruktura u blizini oštećenja može biti deformirana zbog utjecaja topline, opterećenja, prisutnosti mikropukotina i slično). Svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 analizirana je površina pri povećanjima 200x (Slika 25) i 500x (Slika 26). Prikazana mikrostruktura na (Slika 25, Slika 26) uspoređena je s literaturnim izvorom [18], i sastoji se od:

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

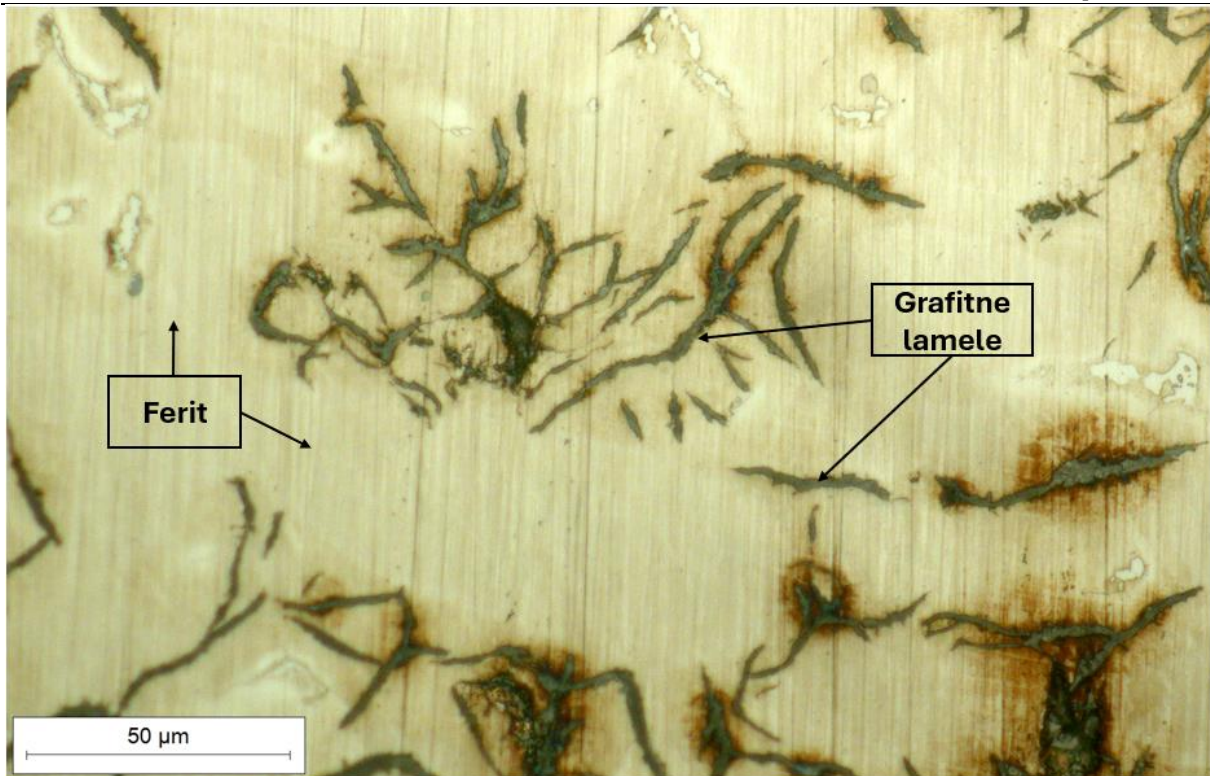


Slika 25. Mikrostruktura klipa i pripadajuće faze u području unutrašnjosti klipa, 200x

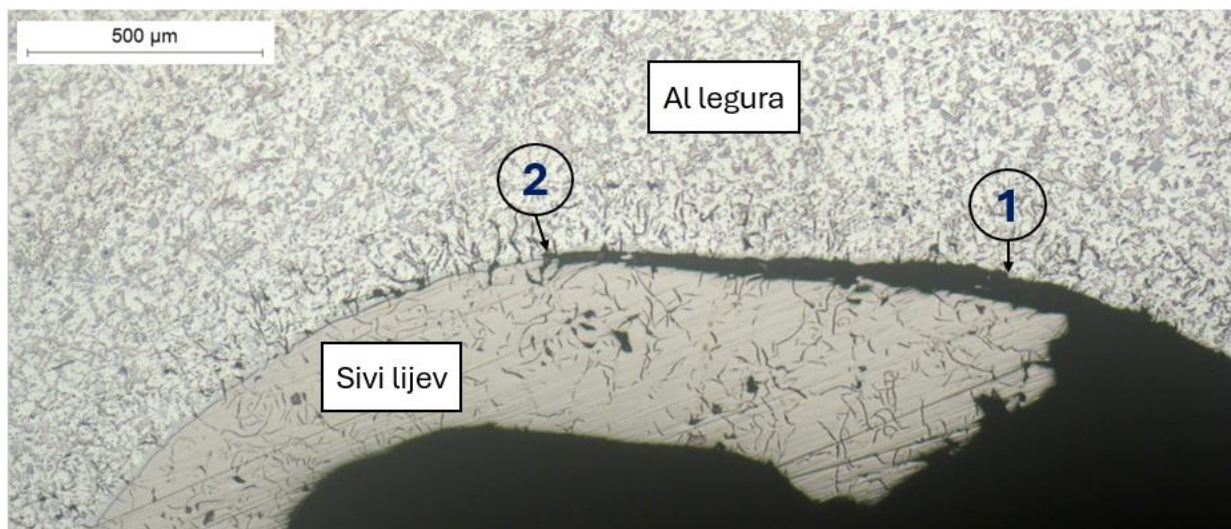


**Slika 26. Mikrostruktura klipa i pripadajuće faze u području unutrašnjosti klipa, 500x**

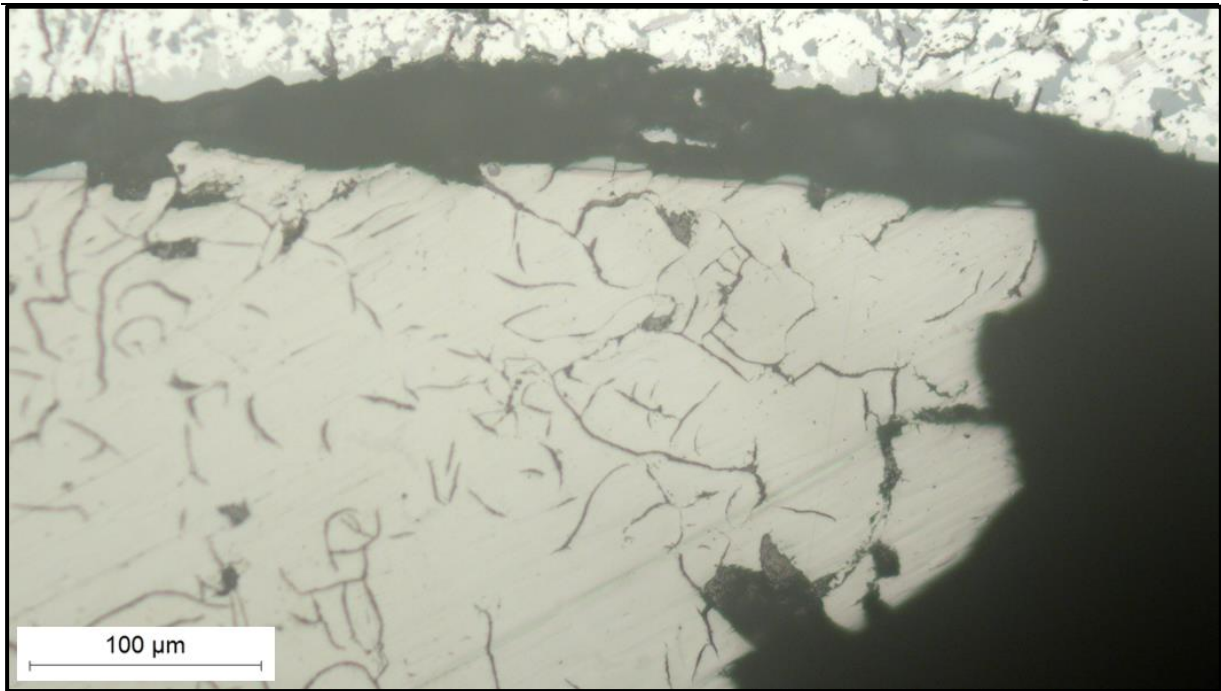
Pregledano je kritično područje utora prvog kompresijskog klipa (Slika 28) kod kojeg se prema literaturi [8] nalazi sloj sivog lijeva. Uzorak (Slika 27) je nagrižen uranjanjem u 3 postotnu otopinu Nitala (3%  $\text{HNO}_3$  u etilnom alkoholu) u trajanju od 20 sekundi, a potom je izvađen i osušen te mikroskopski analiziran. Usporedbom dobivenih rezultata s literaturnim izvorom [18] se pretpostavlja da se radi o sivom lijevu, s karakterističnim prisustvom grafitnih lamela u feritnoj matrici kao što je označeno na (Slika 27). S obzirom na značajnu razliku u mehaničkim svojstvima sivog lijeva i aluminijskih legura, područje njihovog spoja se također može pretpostaviti koncentradorom naprezanja, pa je bitno provjeriti ispravnost spoja (da nije došlo do greške u proizvodnji klipa).



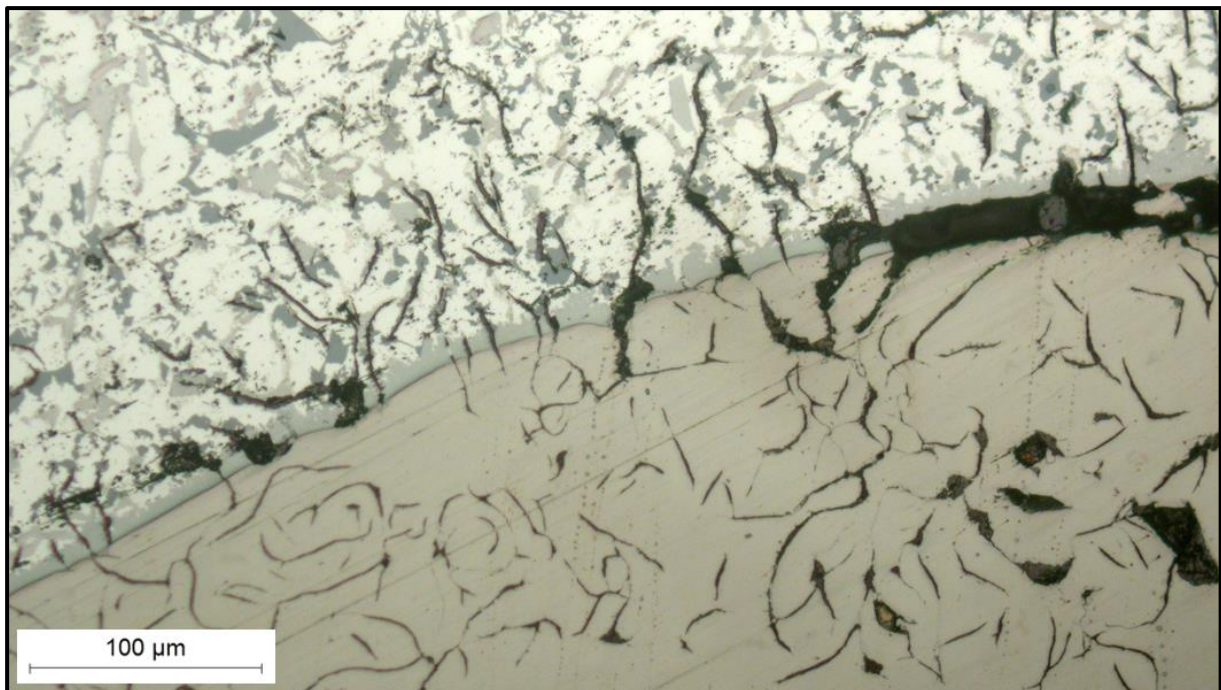
Slika 27. Kemijski nagrižena mikrostruktura klipa u području prvog kompresijskog prstena, 500x



Slika 28. Utor prvog kompresijskog prstena s detaljima 1 i 2, povećanje 50x



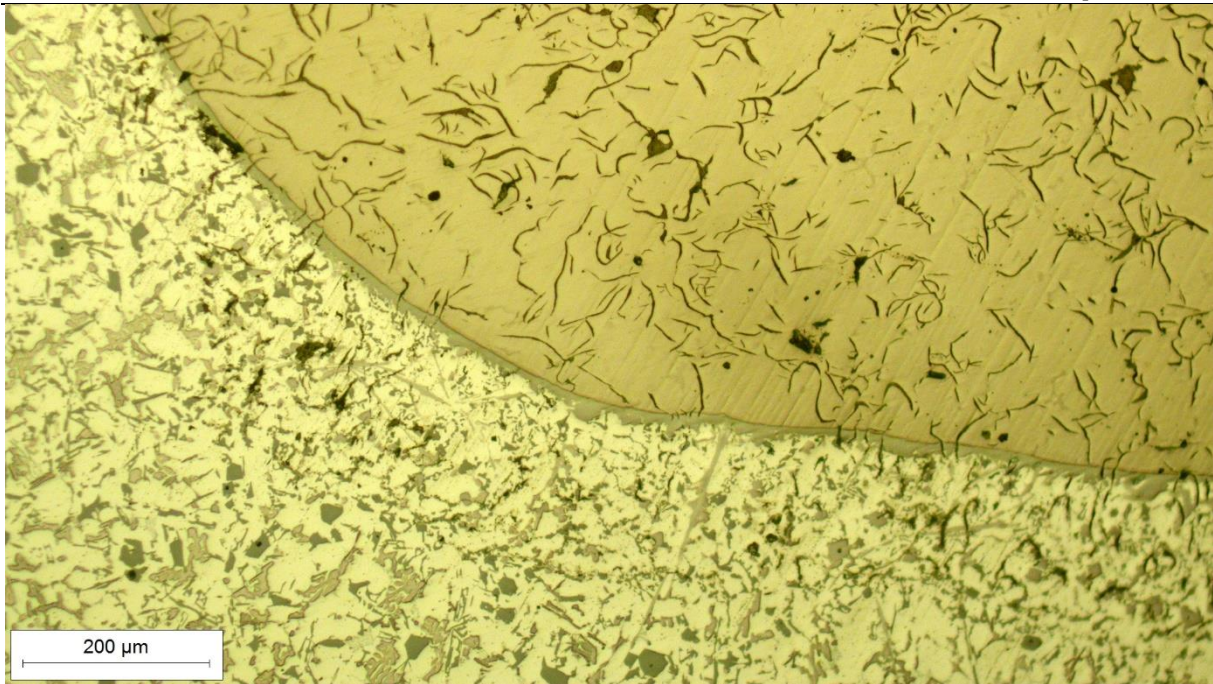
**Slika 29. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, detalj 1 sa slike 29**



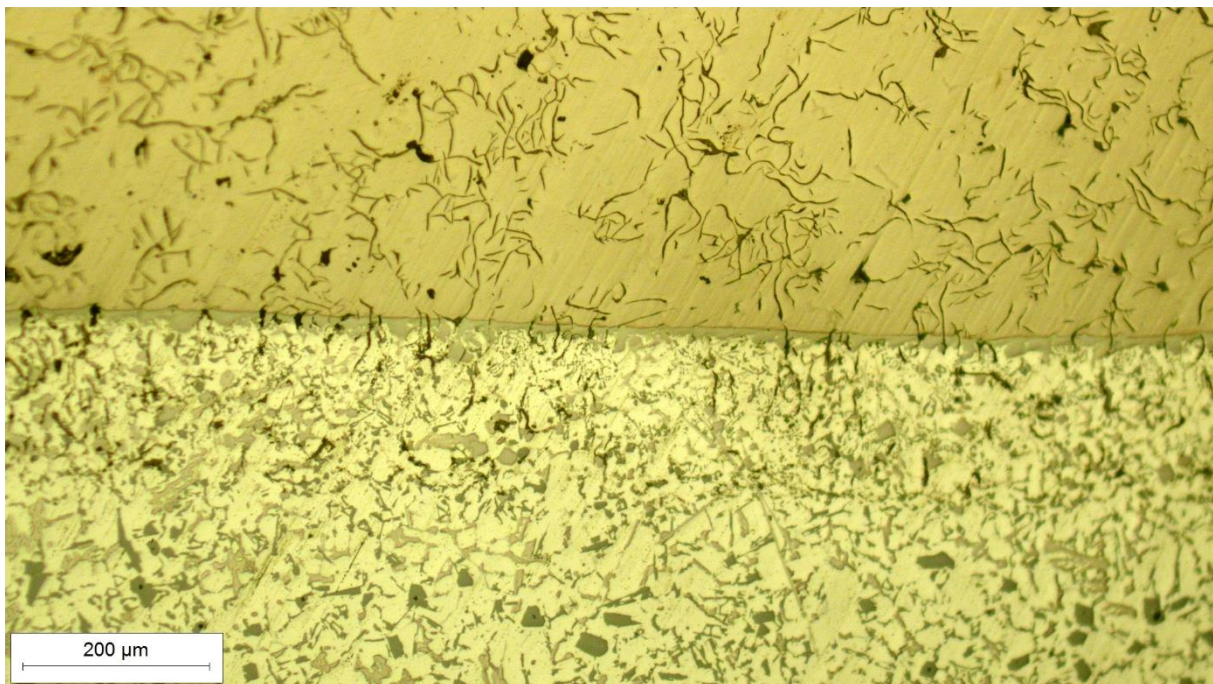
**Slika 30. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, detalj 2 sa slike 29**

Uvećanom analizom detalja 1 i 2 na (Slika 29, Slika 30) utvrđuje se prisutnost brojnih, gusto poredanih poprečnih pukotina i uzdužna pukotina na području spoja aluminijske legure i sivog lijeva. Donji kutni spoj (Slika 31) i donji dio spoja (Slika 32) aluminijske legure i sivog lijeva ostali su neoštećeni.



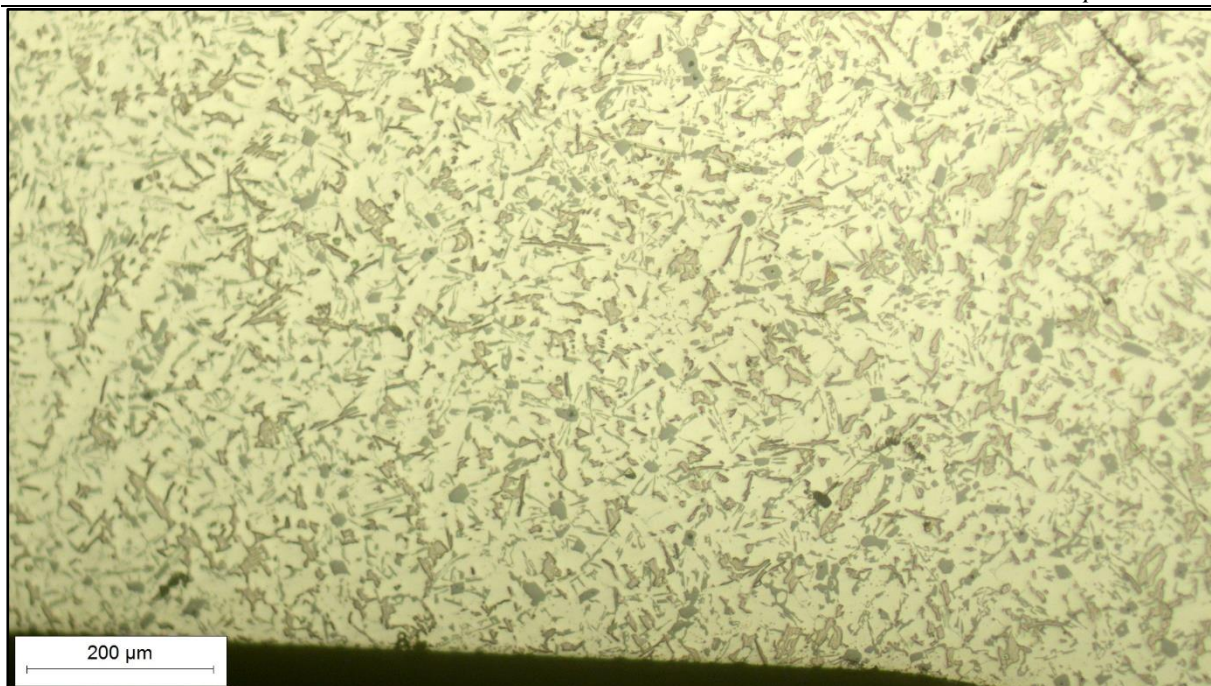


**Slika 31. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, donji kutni spoj**

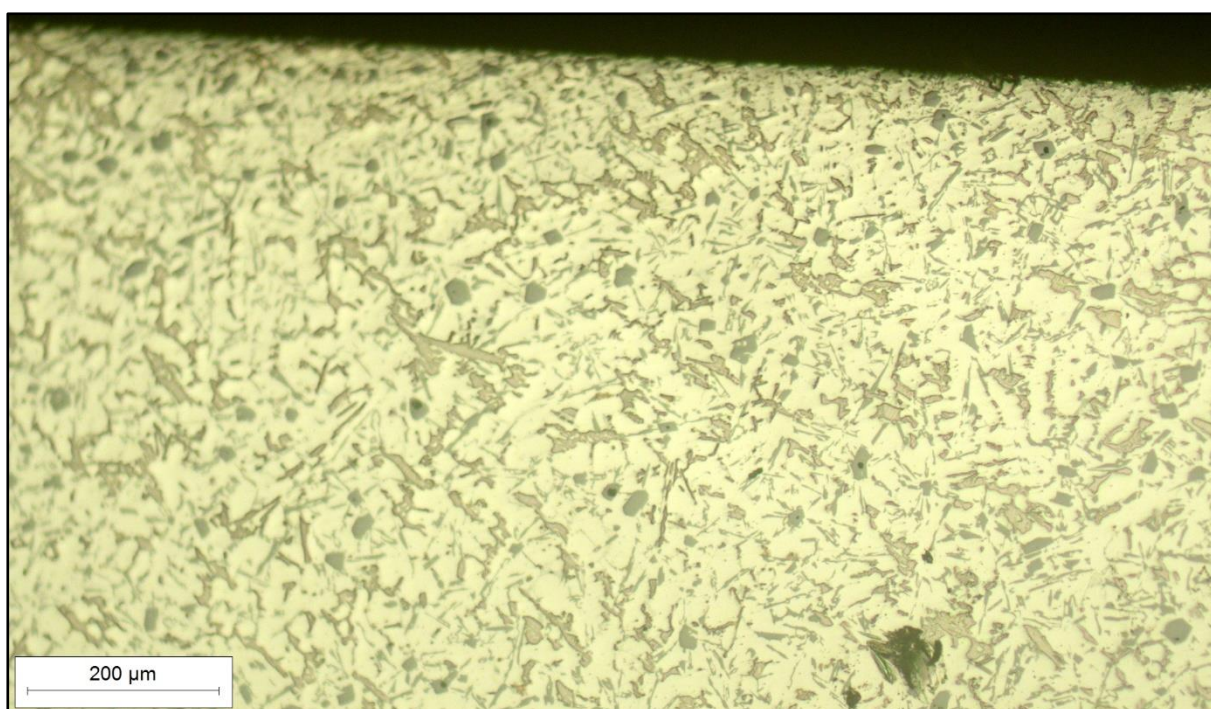


**Slika 32. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak A, donji dio spoja**

Mikroskopski je analizirano i neoštećeno područje utora drugog kompresijskog prstena oštećenog klipa kako bi se utvrdile moguće deformacije mikrostrukture, i praćenjem ruba uzorka objektivom mikroskopa te fotografiranjem u različitim točkama. Prema (Slika 33, Slika 34) je utvrđeno kako nije vidljiva deformacija mikrostrukture uslijed utjecaja topline i opterećenja.



**Slika 33. Neoštećena površina utora drugog kompresijskog prstena, uzorak A**

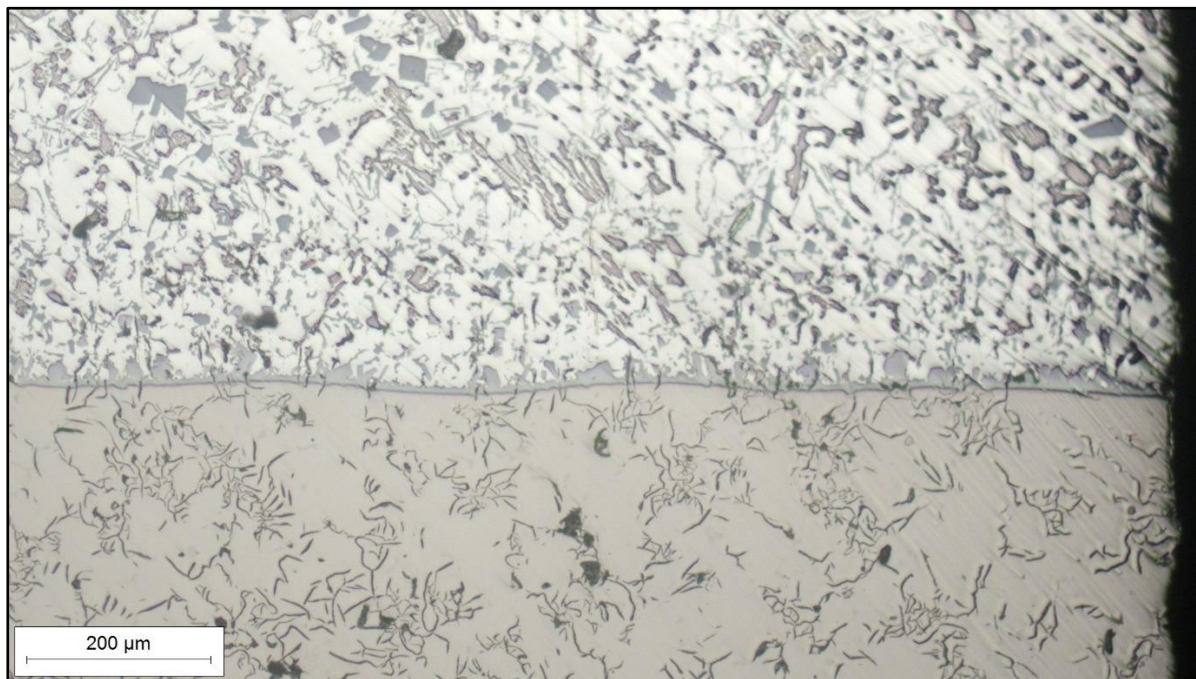


**Slika 34. Neoštećena površina utora drugog kompresijskog prstena, uzorak A**

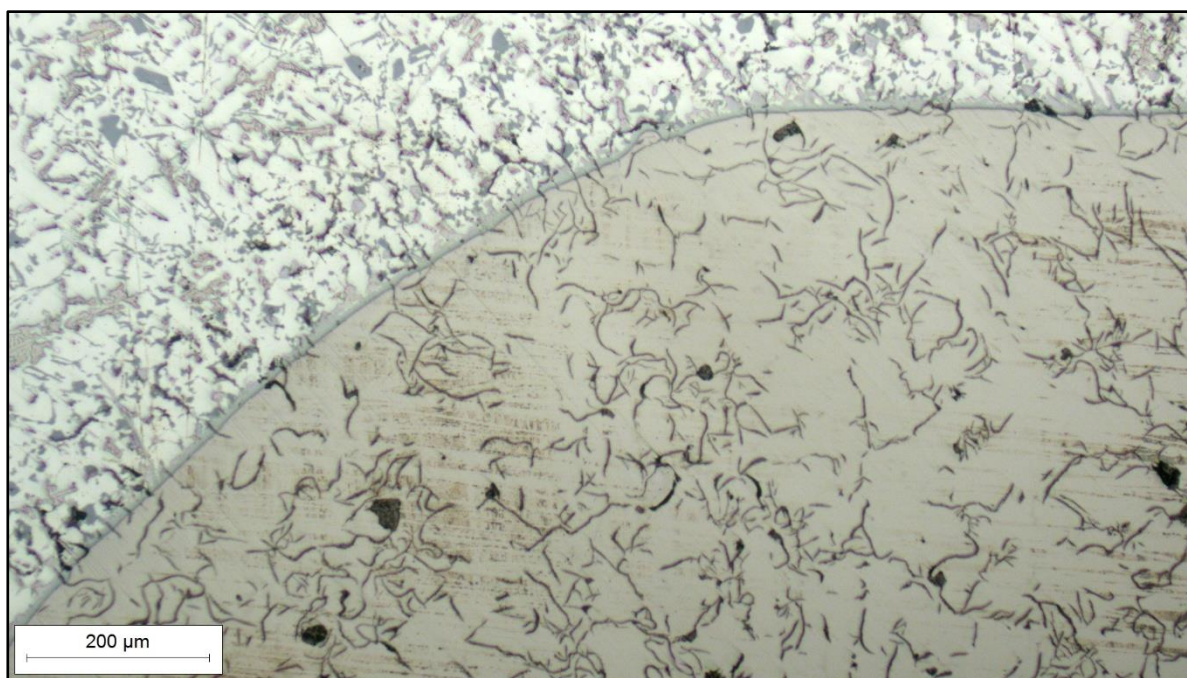
#### **4.2.2. Korišteni, neoštećeni klip – uzorak B**

U radu je analizirana i mikrostruktura uzorka B s jednakim brojem radnih sati u odnosu na oštećeni klip A. Na sljedećim slikama prikazana je analiza spoja aluminijske matrice sa sivim lijevom u području utora prvog kompresijskog prstena. Analiza je izvršena po principu praćenja

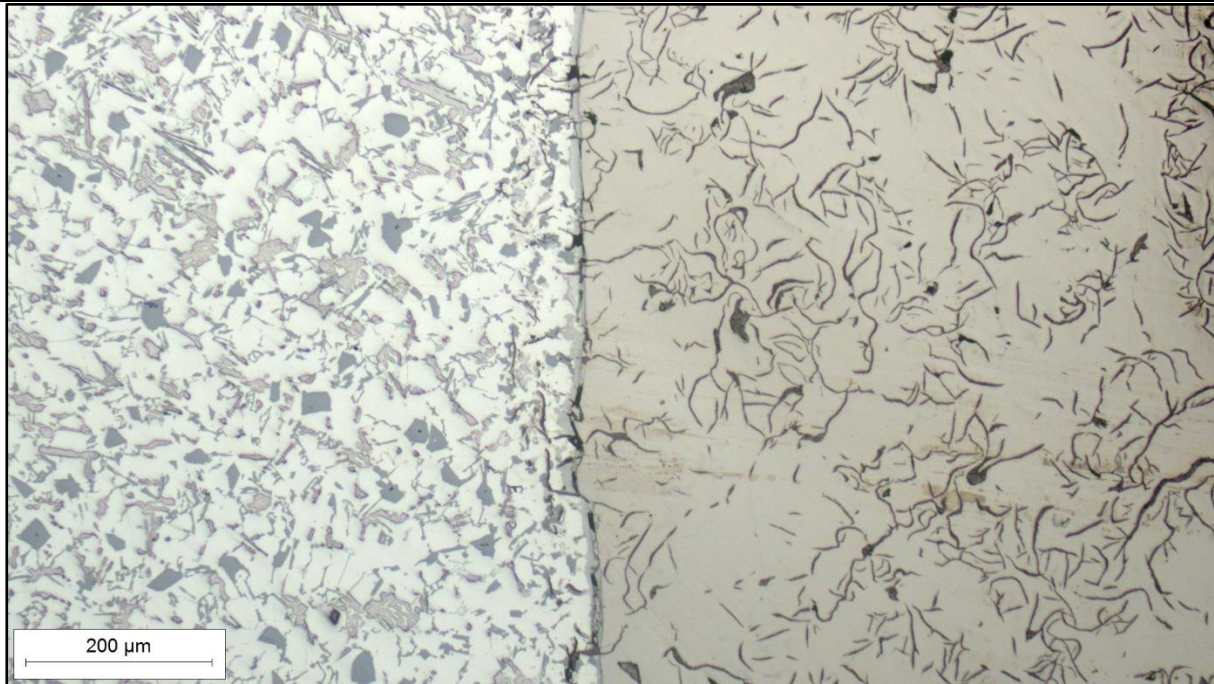
spoja počevši od rubne točke spajanja (Slika 35) te daljnjeg pregleda u području gornjeg kutnog spoja (Slika 36), u području nastavnom na kutni spoj (Slika 37), i na području donje površine utora (Slika 38). Bitno je napomenuti da u niti jednom prikazu nisu vidljiva oštećenja ili deformacije klipa uzrokovane utjecajem topline.



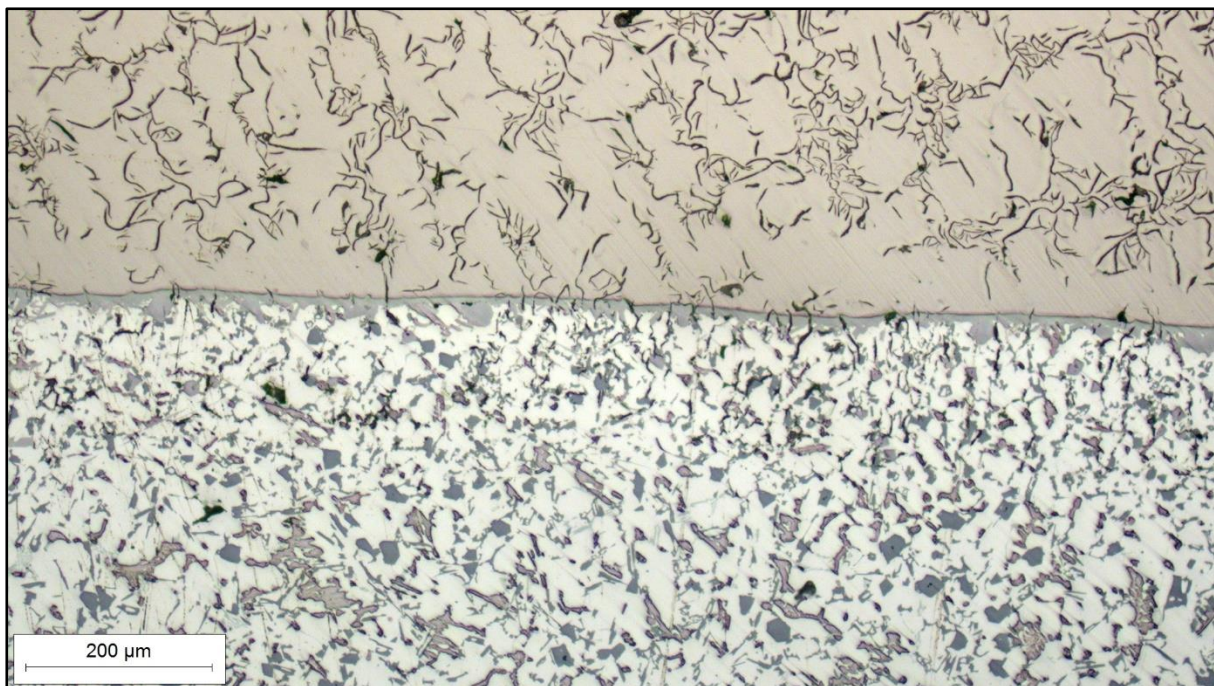
**Slika 35. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, gornji dio spoja**



**Slika 36. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, gornji kutni spoj**



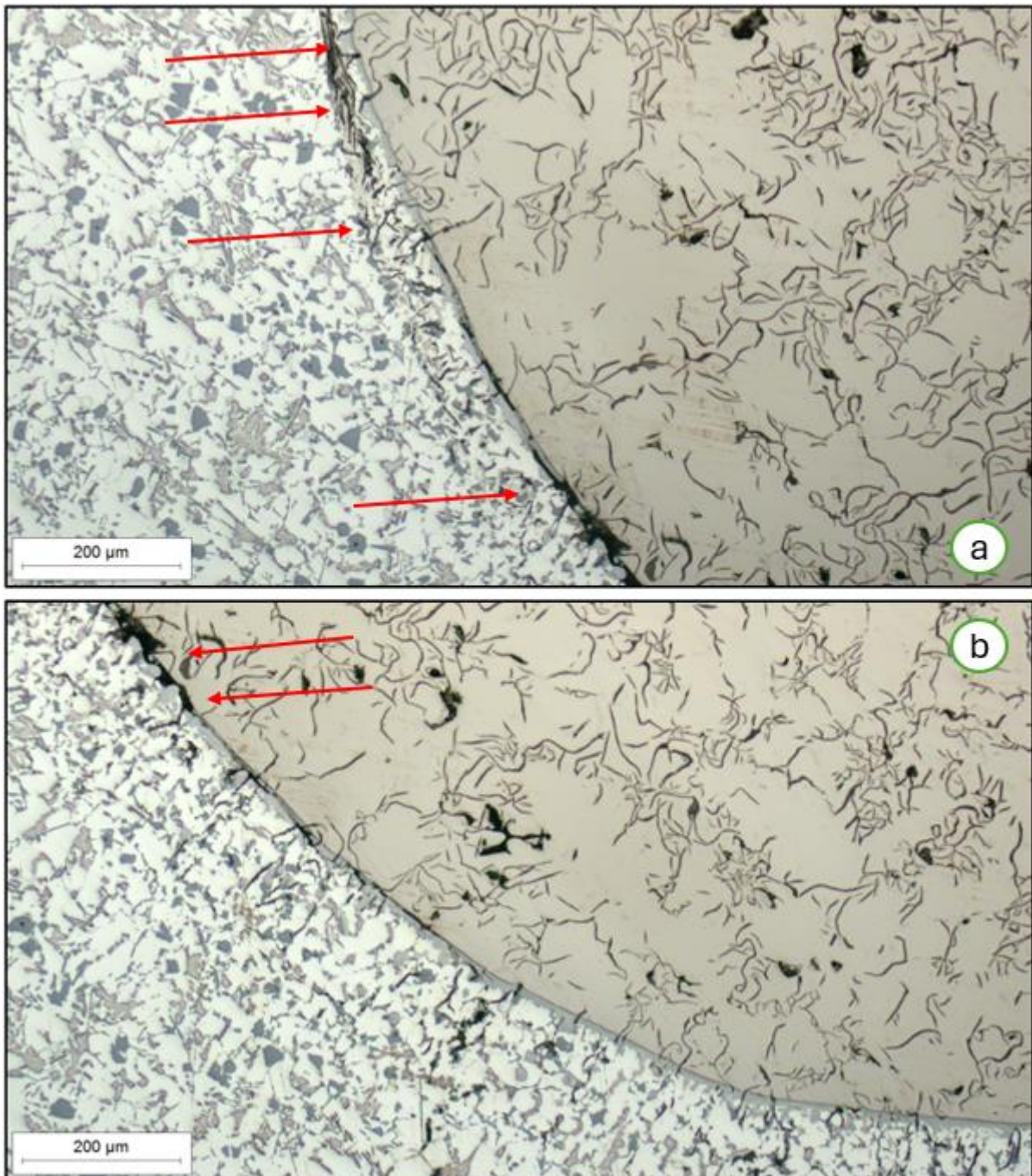
**Slika 37. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, nastavak na kutni spoj**



**Slika 38. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B , donji dio spoja**

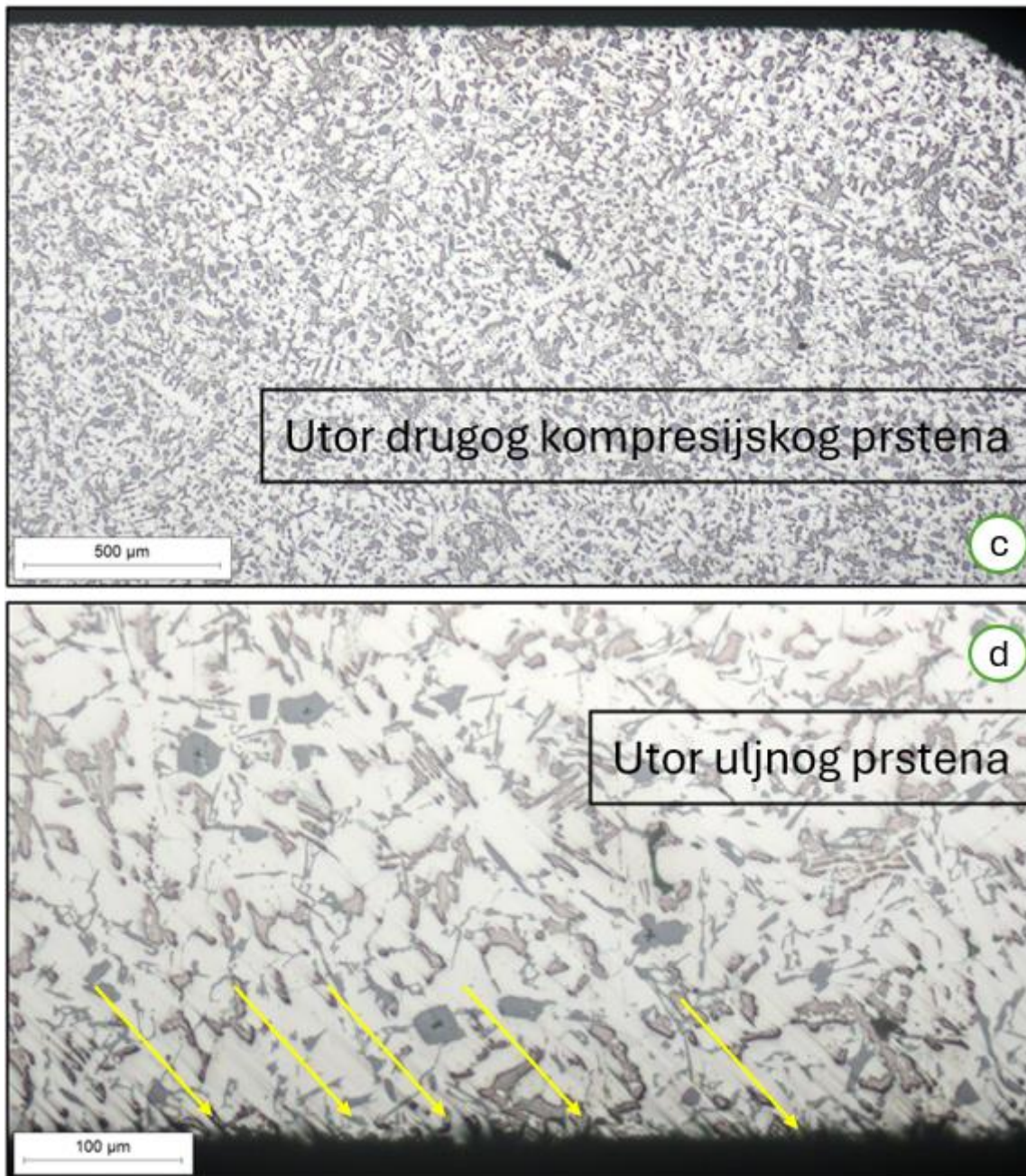
Analizirajući slike 35-38 može se zaključiti kako je spoj sivog lijeva i aluminijske legure izveden ispravno jer nisu vidljive značajne deformacije mikrostrukture u tim područjima. Međutim, na području donjeg kutnog spoja utora prvog kompresijskog prstena (Slika 39, a, b) jasno se vidi promjena mikrostrukture u području aluminijske legure i propagacija mikropukotina u zoni spajanja dva materijala (Slika 39, označeno crvenim strelicama). Iako kod ovog klipa nije došlo do loma, ova pojava mikropukotina koja se proteže uzduž zone

spajanja potvrđuje pretpostavku da se u ovom području nalazi kritična točka naprezanja, te je za pretpostaviti da bi i na ovom klipu moglo doći do kvara.



**Slika 39. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak B, detalji a, b**

Pregledom preostalih odabranih područja primjećuju se očekivani znakovi površinskog trošenja ispitanih područja klipa (Slika 40, detalj d, označeno žutim strelicama), no nisu utvrđena značajnija oštećenja ni deformacije mikrostrukture koje bi ukazale na potencijalne probleme s klipom.

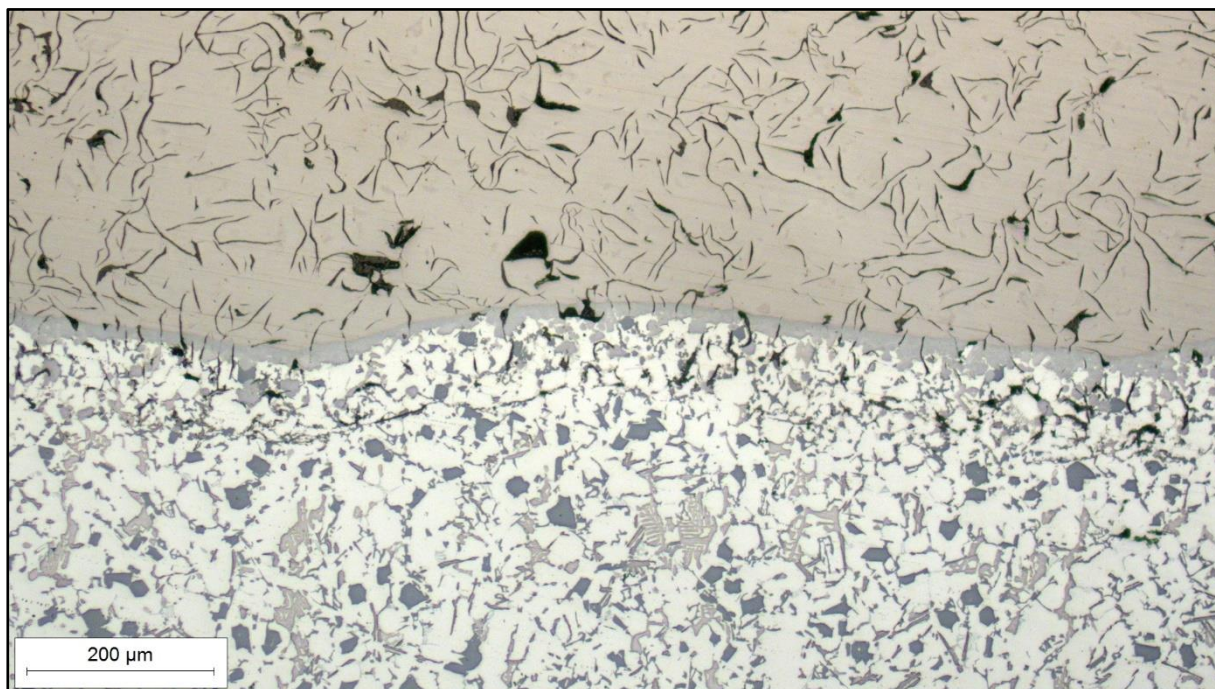


Slika 40. Preostale ispitne točke uzorka B , detalji c, d

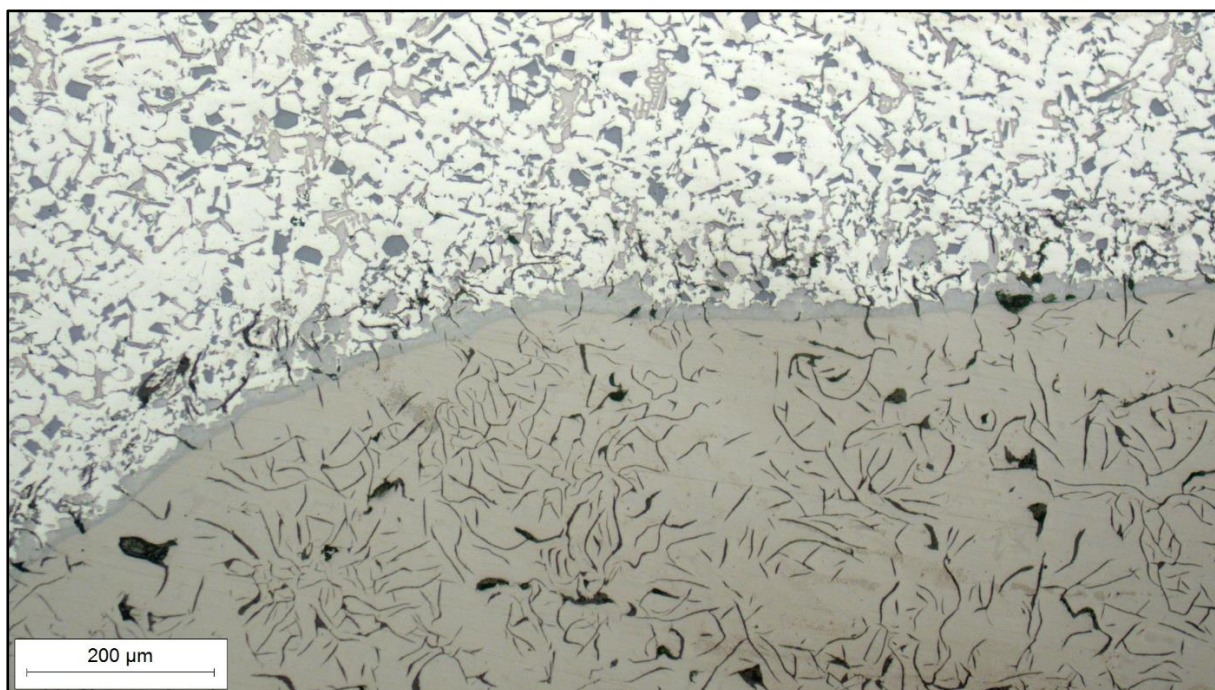
#### 4.2.3. Novi, nekoristeni klip - uzorak C

U radu je pregledana i mikrostruktura uzorka C na istim odabranim područjima u odnosu na analizu uzorka B. Analiza je provedena u svrhu usporedbe izvedbe ranije navedenih kritičnih područja klipa uzorka C u odnosu na izvedbe uzoraka A i B. Zanimljivo je na (Slika 41, Slika 41) primijetiti valovitu izvedbu spoja sivog lijeva i aluminijske legure. Iako je nepoznat razlog takve izvedbe, moguće je pretpostaviti da se radi o korektivnoj mjeri proizvođača u odnosu na prijašnje izvedbe klipa, u svrhu savladavanja problema pojave uzdužnih mikropukotina pored

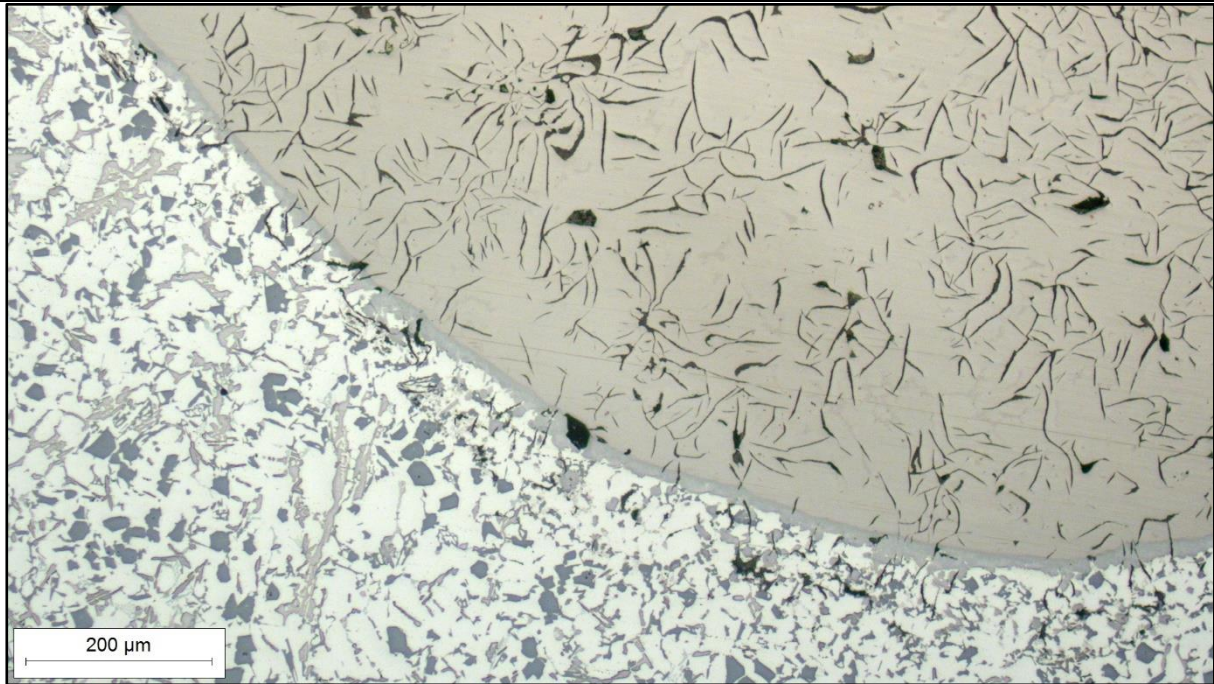
spoja prikazanih na (Slika 39). Na (Slika 42, Slika 43) prisutne su mikropukotine u zoni spoja gornjeg i donjeg kutnog spoja utora prvog kompresijskog prstena, međutim u slučaju uzorka C te mikropukotine su poprečnog oblika i ne protežu se duboko u aluminijsku jezgru kao što je bio slučaj kod uzorka B. To upućuje na nastanak mikropukotina uslijed toplinske dilatacije materijala prilikom proizvodnih postupaka.



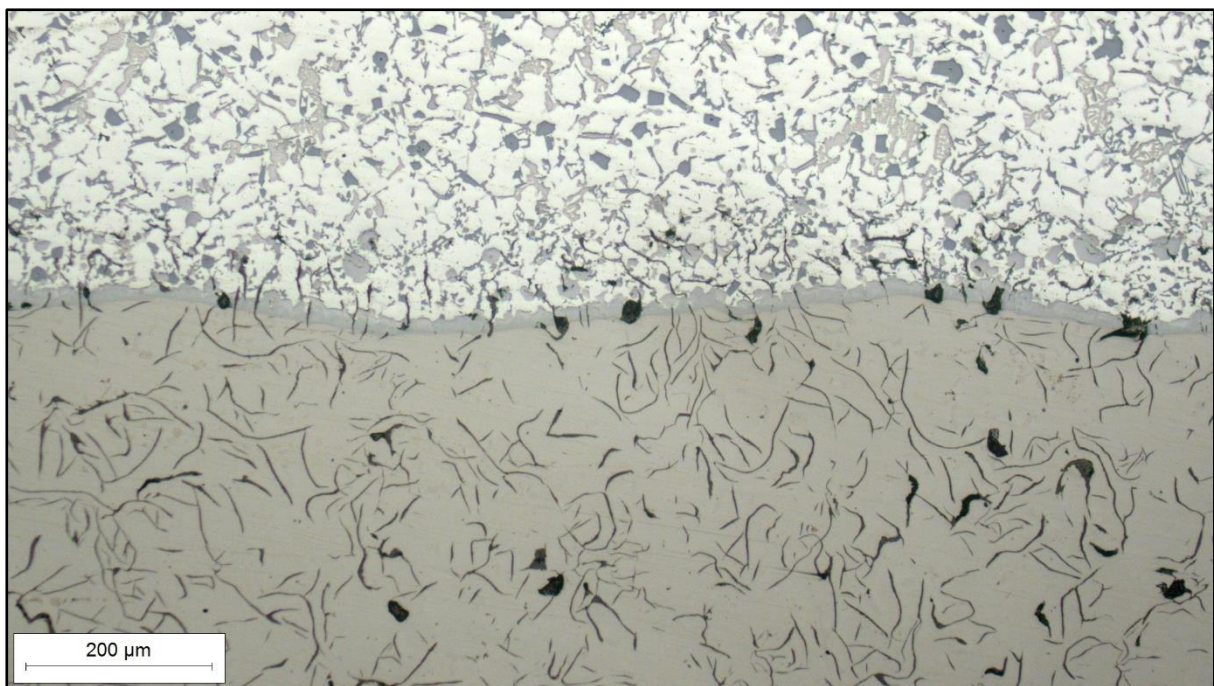
**Slika 41. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C , gornja površina utora**



**Slika 42. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C, gornji kutni spoj**



**Slika 43. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C, donji kutni spoj**



**Slika 44. Utor prvog kompresijskog prstena, uzorak C, donja površina utora**



### 4.3. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickers metodom na uzorcima oštećenog klipa, kako bi se utvrdilo da li je u upotrebi bio materijal s karakteristikama koje su deklarirane od strane proizvođača. Na ispitnom uzorku provedena su po 3 otiska tvrdomjera opterećenjem s utezima mase 200 g (HV0,2) u području unutrašnjosti klipa i u području utora prvog kompresijskog prstena.

Vickersovu tvrdoću opisuje sljedeća jednadžba [19]:

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

Gdje je:

$F$  [N] – sila utiskivanja

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

Za slučaj ispitivanja HV0,2 ispitna sila je  $F = 1,961\text{N}$  [19], a  $d_v$  se izračunava po sljedećem izrazu:

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

**Tablica 4. Tvrdoća aluminijske legure**

Broj mjerenja	$D$ , mm	$L$ , mm	$d_v$ , mm	HV0,2	Srednja vrijednost tvrdoće HV0,2
1	0,483	0,306	0,0535	130	126
2	0,483	0,300	0,0553	121	
3	0,485	0,306	0,0541	127	

**Tablica 5. Tvrdoća sivog lijeva**

Broj mjerenja	$D$ , mm	$L$ , mm	$d_v$ , mm	HV0,2	Srednja vrijednost tvrdoće HV0,2
1	0,487	0,316	0,0516	139	131
2	0,483	0,307	0,0532	131	
3	0,484	0,303	0,0547	124	

Dobiveni su sljedeći rezultati tvrdoće materijala klipa (Tablica 4, Tablica 5):

- aluminijska legura: 126 HV0,2
- sivi lijev: 131 HV0,2.

Rezultati ispitivanja odgovaraju očekivanim tvrdoćama aluminijske legure i sivog lijeva s feritnom matricom i grafitnim lamelama. Izmjereni podaci odgovaraju podacima koji se mogu pronaći u literaturi [20].

#### 4.4. XRF analiza

Kemijska analiza je provedena nerazornim ispitivanjem kemijskog sastava rendgenskom spektrometrijom. XRF (eng. *X-ray fluorescence*) detektorom proizvođača Olympus su analizirane dvije ispitne točke – jedna u području unutrašnjosti klipa te jedna u području utora prvog kompresijskog prstena. Nedostatak ove metode je u nemogućnosti ispitivanja malih površina na uzorcima zbog veće ispitne površine laserskog detektora. Prilikom analize detektor u svom ispitnom području zahvaća i neželjeni dio osnovnog materijala klipa. Zbog toga se rezultati dobiveni ispitivanjem područja utora prvog kompresijskog prstena koriste isključivo kao indikativni pokazatelji prisutnosti većeg udjela željeza, kao što je navedeno u literaturnom izvoru [8]. Prema kemijskom sastavu prikazanom u (Tablica 6), klip je izrađen od aluminijske legure AlSi17Cu4Ni, koji pripada EN1706: 2010 aluminijskih legura za ljevove [21].

**Tablica 6. Kemijski sastav matrice klipa, XRF ispitivanje**

Element	Maseni udio, %	Odstupanje, +/-
Al	75,79	0,28
Si	16,40	0,09
Cu	3,36	0,03
Ni	2,20	0,03
Mg	1,50	0,43
Fe	0,44	0,02
Zr	0,121	0,002
Ti	0,08	0,03
V	0,05	0,02
Mn	0,049	0,008

**Tablica 7. Kemijski sastav prvog kompresijskog utora, XRF ispitivanje**

Element	Maseni udio, %	Odstupanje, +/-
Al	47,40	0,46
Fe	30,23	0,15
Si	5,60	0,08
Ni	5,53	0,07
Mg	5,32	1,25
Cu	4,25	0,05
Cr	0,80	0,03
Mn	0,59	0,03
P	0,007	0,001

## 5. ANALIZA REZULTATA

### 5.1. Utvrđivanje tipa i uzroka loma

Analizom rezultata utvrđuje se kako je uzrok loma ispitivanog klipa umor materijala, i to zbog prisutnosti brojnih karakteristika takve pojave koje su potkrijepljene vizualnim i mikroskopskim prikazima na (Slika 23, Slika 24). Jasno su vidljiva i definirana područja trajnog i trenutnog loma. Karakteristike trajnog loma su vidljive u području utora uljnog prstena, pa je zaključak da je prilikom loma utora uljnog prstena došlo i do trenutnog odvajanja gornjeg dijela utora kompresijskih prstenova. Trenutni lom (označen žutim strelicama na Slika 23, Slika 24) je karakterističan po zrnatoj, hrapavoj površini, bez nabora u obliku godova na stablu koji su karakteristika trajnog loma.

### 5.2. Utvrđivanje mjesta inicijalne pukotine

Inicijalna pukotina kod umora materijala nastaje na mjestima koncentracije naprezanja (promjene presjeka, utori, oštećenja uslijed strojne obrade i sl.). S obzirom da je ranije utvrđeno kako se, pri provođenju ispitivanja (vidi poglavlje 1.3), toplinska i tlačna naprezanja u radu klipa motora koncentriraju (Slika 7) na obodnoj površini klipa u području promjene presjeka između donje prednje površine klipa i ležaja uljnog prstena, može se zaključiti da su provrti za protok ulja u tom području koncentraciji naprezanja. Kao drugo potencijalno područje pojave inicijalne pukotine pretpostavlja se područje utora prvog kompresijskog prstena (Slika 29) zbog spoja dvaju materijala različitih fizikalnih i mehaničkih svojstava, što ga također čini koncentраторom naprezanja. Treća potencijalna kritična točka se može postaviti na temelju simulacijskih ispitivanja sagledanih u teoretskom dijelu rada, i to na obodu provrta osovine klipa (Slika 5, Slika 6).

Budući da su simulacijska ispitivanja obavljena uzevši u obzir samo glavu klipa, ne uključujući radne uvjete u kojima je klip spojen u sklop s osovinom klipa, prstenima i klipnjačom, područje oboda provrta osovine klipa vjerojatno se može zanemariti kao kritično područje strukture klipa jer u stvarnim uvjetima osovina klipa u navedenom području djeluje kao strukturna potpora. Navedena tvrdnja je potkrijepljena činjenicom da je provrt osovine klipa ostao neoštećen pri lomu klipa.

U području utora prvog kompresijskog prstena važno je provjeriti je li spoj dvaju materijala (aluminijske legure i sivog lijeva) proizveden ispravno. Ukoliko bi se mikroskopskom analizom

pokazalo da na tom spoju postoje dugačke uzdužne pukotine koje prate zonu spoja dvaju materijala u oštećenom te korištenom, ali neoštećenom klipu, to bi upućivalo na grešku uzrokovanu strojnom obradom prije implementacije klipa u motor, kao što se navodi u literaturi [8]. Međutim, pregledom rezultata ispitivanja utvrđeno je nekoliko činjenica koje opovrgavaju slučaj greške uzrokovane strojnom obradom. Prvenstveno se analizom (Slika 29) utvrđuje prisutnost poprečnih mikropukotina (u području koje nije zahvatio trenutni lom), koje sežu iz unutrašnjosti jednog materijala u drugi, što upućuje na oštećenja izazvana vlačnim naprezanjem uslijed „potezanja“ ostatka odlomljene konstrukcije klipa. Nadalje, ako se vizualno usporedi izvedba tog spoja kod sva tri pregledana klipa, utvrđuje se kako u izvedbama nema značajne razlike. U konačnici se i makroskopskim pregledom odmašćenog oštećenog klipa (Slika 22) može ustanoviti da je uslijed loma gornja površina utora prvog kompresijskog prstena ostala neoštećena.

U području provrta za protok ulja vizualnim pregledom se utvrđuju brojni pokazatelji pojave inicijalne pukotine. Zelenim strelicama na (Slika 23) označeni su nabori uslijed dugotrajne propagacije loma, a također je vidljiva i promjena nagiba nabora (s lijeve strane uljnog utora nabori naginju udesno, dok s desne strane naginju ulijevo), što upućuje da je pukotina propagirala u obliku transverzalnih valova s epicentrom u uljnom utoru. Ključna stavka koja ukazuje na problem s uljem proizlazi iz spontano zavarenog uljnog prstena unutar utora prilikom pucanja, kao što se vidi na (Slika 17). Iako s porastom temperature viskoznost motornog ulja opada, omogućujući bolji protok ulja, izlaganje ulja povišenim temperaturama (150-250°C) uzrokuje njegovo izgaranje. Izgaranjem ulja dolazi do taloženja nusprodukata izgaranja na okolnim površinama u obliku tankog crnog filma [22]. Naslage izgaranja se obično javljaju na čeonim površinama klipa jer se s vremenom svi klipni prstenovi potroše i ulje u malim količinama dospijeva u komoru izgaranja goriva. U analiziranom slučaju, pretpostavlja se da modifikacija motora uzrokuje značajno veće temperature od predviđenih unutar gorive komore, te uzrokuje i izgaranje motornog ulja na nepredviđenim površinama, kao što su provrti za protok ulja unutar utora uljnog prstena, a što je i vidljivo na (Slika 18) [16, 17]. Taloženjem naslaga izgaranja ulja na površinama uljnog prstena onemogućava se njegova funkcija i stvaraju se potrebni preduvjeti (prodiranje kapljica ulja u komoru za izgaranje) za pojavu prijevremenih detonacija. Dinamičko opterećenje uzrokovano nekontroliranim detonacijama uzrokuje oštećenje u kritičnoj točki na klipnu, a to je upravo provrt za protok ulja na prijelazu debljine poprečnog presjeka klipa. Nakon pojave inicijalnog oštećenja, pukotina raste tijekom rada motora i daljnjih prijevremenih detonacija, sve do trenutka kada struktura više ne može izdržati.

Zaključno, brojni dokazi ukazuju na stvaranje inicijalne pukotine u području provrta za protok ulja, prikazanog na (Slika 23).

### 5.3. Analiza pretpostavljenih hipoteza

- Do loma je došlo zbog pojave nekontroliranih detonacija u cilindru.

Hipoteza je potvrđena. Iako je uzrok loma umor materijala, razlog propagacije pukotine je dinamičko opterećenje uzrokovano ponavljanjem pojave prijevremene detonacije. „Godovi“ trajnog loma, vidljivi na (Slika 23), upućuju na višestruko ponavljanje pojave prijevremene detonacije, sve do trenutka kada struktura klipa više nije mogla izdržati opterećenje. Nadalje, s obzirom da je motor radio 105 000km na tvorničkim, a zatim dodatnih 15 000km na modificiranim postavkama bez mijenjanja komponenti klipova, zaključuje se da je trošenje kompresijskih prstenova uzrokovalo je propuštanje sitnih kapljica ulja u gorivu komoru, što je omogućilo pojavu prijevremenih detonacija, kao što je objašnjeno u potpoglavlju 2.3 i literaturnom izvoru [17].

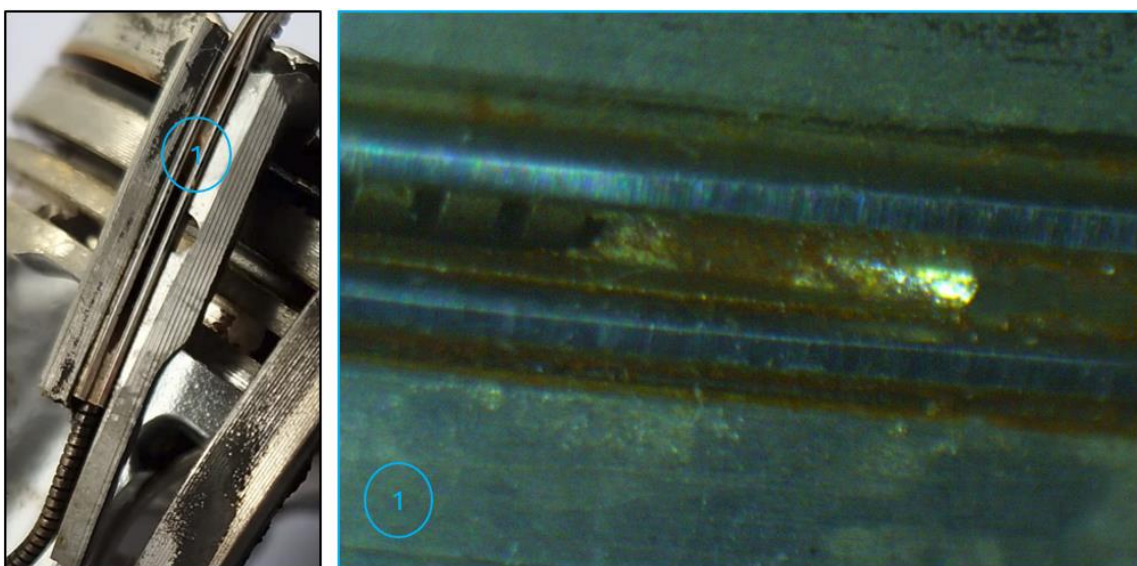
- Do loma je došlo zbog upotrebe klipa neadekvatnog materijala za novonastale temperature i tlakove u cilindru. Da li je uslijed svih odrađenih promjena bilo potrebno ugraditi i klipove veće čvrstoće?

Hipoteza nije potvrđena. Iako je moguće ugraditi klipove i klipnjače od lijevanog željeza ili kovanog čelika s boljim mehaničkim svojstvima pri ekstremnim uvjetima temperature i tlaka, aluminijski klipovi su ipak bolji izbor iz više razloga. Ugradnja klipova od lijevanog željeza u sportski modificirana vozila nije primjerena zbog veće gustoće materijala u odnosu na aluminijske klipove, a samim time se i masa motora povećava. Povećanjem mase klipova se narušavaju i inercijske sile unutar motora, pa se moraju prilagođavati i ostale komponente kako bi se ostvarila odgovarajuća protuteža. Nadalje, kao što je ranije navedeno u potpoglavlju 4.2.1, prilikom analize oštećenog klipa nije utvrđena deformacija uzoraka zbog utjecaja topline, a to znači da nije došlo do otapanja ili degradacije fizikalnih svojstava aluminijske konstrukcije zbog ekstremnih uvjeta topline, već zbog ponavljane pojave prijevremene detonacije.

- Do loma je došlo zbog konstrukcijskog nedostatka klipa.

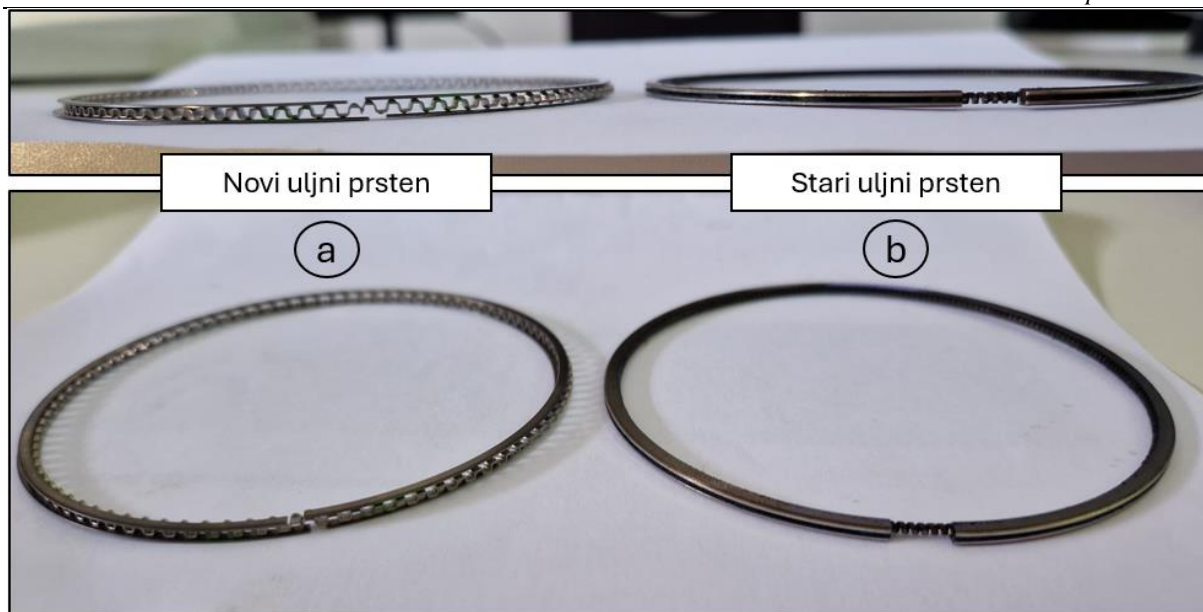
Hipoteza je potvrđena. Uljni prsten klipa treba biti konstruiran na način da omogućava podmazivanje stijenki cilindra prilikom takta kompresije i ispuha, te struganje viška ulja sa stijenki prilikom takta ekspanzije i usisa. Ukoliko nakon dugotrajnog rada uljni prsten izgubi svoja svojstva (zbog taloženja nečistoća može izgubiti elastičnost i time se značajno udaljiti od stijenke cilindra), može doći do brojnih problema u radu motora, a jedan od njih je i pojava

prijevremene detonacije jer ulje tada može dospijevati u komoru izgaranja. Uljni prsten oštećenog klipa je izveden u obliku šupljeg jednodijelnog kružnog vijenca s kružnom oprugom koja ispunjava njegovu šupljinu. Glavni nedostatak ovog prstena je u tome što su njegove stijenke na zadanoj, nepomičnoj međusobnoj udaljenosti, pa je taloženje nečistoća između njih i vanjskih stijenki utora nakon dugotrajnog rada neizbježno. Taloženje nečistoća rezultira zapaženim „zavarivanjem“ uljnog prstena (Slika 45) za površine utora, a samim time se stvara ranije objašnjeni problem jer se prstenu onemogućava gibanje do površine stijenki cilindra.



**Slika 45. Mikroskopski prikaz "zavarenog" uljnog prstena**

Rješenje ovog problema je u dvodijelnoj izvedbi uljnog prstena, kao što je to izvedeno u konstrukciji novog klipa (Slika 46, a). Time se ostvaruje veća zračnost između obruča uljnog prstena, ali i veća sloboda gibanja uljnog prstena koja je nužna za funkcije podmazivanja i struganja viška ulja. Usporedbom dvaju uljnih prstena očigledna je i drugačija izvedba unutarnje opruge koja također omogućava bolji protok ulja.



**Slika 46. Usporedba izvedbi uljnih prstenova**

- Do loma je došlo zbog strukturnih oštećenja prilikom strojne obrade klipa prije njegove ugradnje u sklop motora.

Hipoteza nije potvrđena. Usporedbom mikroskopske analize uzoraka A, B i C iz (Tablica 2) nije utvrđena značajna razlika u izvedbama spoja aluminijske legure i sivog lijeva. U sva tri slučaja očigledna je prisutnost poprečnih mikropukotina kao što se vidi na (Slika 32, Slika 38, Slika 41). Prema [23], koeficijent toplinskog istezanja aluminijske legure (silumina) iznosi  $22 \text{ K}^{-1}$ , a sivog lijeva iznosi  $10 \text{ K}^{-1}$ , pa se pretpostavlja da poprečne pukotine na spoju tih dvaju materijala nastaju zbog toplinske dilatacije materijala. Uzdužne mikropukotine koje prate liniju spoja aluminijske legure i sivog lijeva se javljaju kod uzoraka A i B (Slika 29, Slika 39) i stoga se zaključuje da su se pukotine takvog oblika pojavile kao rezultat naprezanja uslijed dugotrajnog rada klipa. Vizualnom usporedbom neoštećenih dijelova 3 analizirana uzorka također nisu utvrđene razlike koje bi upućivale na strukturna oštećenja uzrokovana strojnom obradom klipa prije njegove ugradnje u sklop motora.



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu analiziran je lom glave klipa modificiranog motora vozila Volkswagen Mk.7. Nakon vizualnog pregleda klipa motora i provedenih laboratorijskih ispitivanja, može se zaključiti sljedeće:

- Do loma je došlo uslijed umora materijala uzrokovanog periodičnim ponavljanjem intenzivnog dinamičkog opterećenja prilikom pojava prijevremene detonacije.
- Kombinacija neprikladne konstrukcijske izvedbe uljnog prstena klipa i trošenja dvaju kompresijskih prstena doveli su do problema prodiranja sitnih kapljica motornog ulja u komoru izgaranja, što je dovelo do ponavljanja pojave prijevremenih detonacija u cilindru.
- Klip je izrađen od aluminijske legure AlSi17Cu4Ni tvrdoće 126 HV<sub>0,2</sub>, a utor prvog kompresijskog prstena klipa je izrađen od sivog lijeva s feritnom matricom tvrdoće 131 HV<sub>0,2</sub>.
- Vizualnom i mikroskopskom usporedbom analize uzoraka A, B i C iz (Tablica 2) nije utvrđena značajna razlika u proizvodnim izvedbama klipova koja bi upućivala na strukturna oštećenja klipova prije njihove ugradnje u sklop motora.
- Prema rezultatima ispitivanja utvrđuje se da uslijed provedenih modifikacija motora nije došlo do kvara zbog neodgovarajućeg materijala izrade klipova.

Proizvođač je problem klipa riješio redizajniranjem uljnog prstena. Međutim, ključ rješavanja ovog problema ne dolazi samo u obliku konstrukcijskog rješenja, već i u temeljitom održavanju i pravovremenoj zamjeni trošnih komponenti vozila te motornog ulja.

**LITERATURA**

- [1] Smith, W.: „EA888 Tuning Mods For The 1.8TSi 1.8TFSi 2.0TSI 2.0TFSI Engines“, TorqueCars, 2020.
- [2] Campbell, C.: The Sports Car Engine. Boston, MA: Springer US, 1963. doi: 10.1007/978-1-4899-7204-0.
- [3] Sathishkumar, S., Kannan, M.: „STRUCTURAL, THERMAL AND THERMO-MECHANICAL ANALYSIS OF FOUR STROKE PETROL ENGINE PISTON USING CAE TOOLS“, Acta Mechanica Malaysia, 2020., str. 5–10, doi: 10.26480/amm.01.2020.05.10.
- [4] Carvalheira, P., Goncalves, P.: „FEA OF TWO ENGINE PISTONS MADE OF ALUMINIUM CAST ALLOY A390 AND DUCTILE IRON 65-45-12 UNDER SERVICE CONDITIONS“, u 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Porto: Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Coimbra, 2006.
- [5] Mymotorlist.com, „EA888 or VW TSI turbo engines“. <https://mymotorlist.com/engines/volkswagen/ea888/> (20.11.2023)
- [6] Lithgow, I.: „VW Mk.7 Golf GTi: CHHA/CHHB (EA888 gen 3)“, Australian Car Reviews, 2023.
- [7] VW US: „Volkswagen US Media Site“. <https://media.vw.com/en-us/releases/1615> (20.11.2023.)
- [8] Uthayakumar, M., Prabhakaran, G., Aravindan, S., Sivaprasad, J. V.: „Study on Aluminum alloy piston reinforced with cast iron insert“, International Journal on Material Science, 2008., str. 1–10.
- [9] Lohfink, C., Baecker, H., Tichy, M.: „Experimental Investigation on Catalyst-Heating Strategies and Potential of GDI Combustion Systems“, 2008., doi: 10.4271/2008-01-2517.
- [10] Heiduk, T., Kuhn, M., Stichelmeir, M., Unselt, F.: „The new 1.8 l TFSI Engine from Audi part 2: Mixture Formation, Combustion Method and Turbocharging“, MTZ worldwide, 2011., str. 58–64, doi: 10.1365/s38313-011-0078-1.
- [11] De Alcantara Dias, B. M., Lagana, A. A. M., Justo, J. F., Yoshioka, L. R., Santos, M. M. D., Gu, Z.: „Model-Based Development of an Engine Control Module for a Spark Ignition Engine“, 2018., doi: 10.1109/ACCESS.2018.2870061.
- [12] Fores, J. F. C.: „Effect of inlet configuration and pulsation on turbocharger performance for enhanced energy recovery“, Imperial College London, London, 2018.
- [13] Reyes Belmonte, M. A.: „Improving Heat Transfer and Reducing Mass in a Gasoline Piston Using Additive Manufacturing“, 2015., doi: 10.4271/2015-01-0505.

- 
- [14] Varghese, M. B., Agarwal, A. K.: „Numerical Investigations of Piston Cooling Using Oil Jet“, Indian Institute of Technology, Kanpur, 2004.
- [15] Shahid, S. M., Ko, S., Kwon, S.: „Real-Time Classification of Diesel Marine Engine Loads Using Machine Learning“, Sensors, 2019., str. 1-15, doi: 10.3390/s19143172.
- [16] Jatana, G. S., Splitter, D. A., Kaul, B., Szybist, J. P.: „Fuel property effects on low-speed pre-ignition“, Fuel, 2018., str. 474–482, doi: 10.1016/j.fuel.2018.05.060.
- [17] Zahdeh, A.: „Fundamental Approach to Investigate Pre-Ignition in Boosted SI Engines“, SAE Int J Engines, 2011., doi: 10.4271/2011-01-0340.
- [18] Lyman, T.: Metals handbook, atlas of microstructures of industrial alloys, American Society for Metals, Akron, Ohio, 1972.
- [19] Državni zavod za mjeriteljstvo, „Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu, provjeravanje ispitnih uređaja“, Narodne novine, 1999.
- [20] Schweitzer, P. A.: Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [21] Breslavsky, I., Breslavskaya, O.: „Steel Number: European Steel and Alloy Grades“, National Technical University Kharkov Polytechnic Institute, 2011.
- [22] Ostrikov, V. V., Tupotilov, N. N., Yu Kornev, A.: „Effect of carbon contaminants on the lubricity of motor oils“, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2006., str. 412–414, doi: 10.1007/s10553-006-0098-8.
- [23] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1997.