

Fraktografska analiza kočionog diska

Omrčen, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:452704>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Omrčen

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Josip Omrčen

Zagreb, 2022. godina

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na pruženoj pomoći tijekom izrade završnog rada. Također se zahvaljujem i asistentu Daliboru Viderščaku te tehničkim suradnicima Ivanu Vovku i Ivanu Martinku na pomoći tijekom pripreme i ispitivanja uzoraka te na korisnim savjetima.

Posebno se zahvaljujem obitelji i prijateljima na velikoj pomoći i podršci tijekom studiranja.

Josip Omrčen



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Omrčen**

JMBAG: **0035219355**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Fraktografska analiza kočionog diska**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Fractographic analysis of the brake disc**

Opis zadatka:

Kočioni diskovi predstavljaju vrlo važan dio svakog motornog vozila. Ovisno o namjeni vozila u izradi tih diskova koriste se različite vrste materijala. Kočioni diskovi za Formulu student izrađeni su od kompozita s metalnom matricom kako bi se dobila zadovoljavajuća svojstva uz što manju masu. Nakon 180 sati vožnje došlo je do loma jednog takvog diska.

U teoretskom dijelu rada potrebno je navesti zahtjeve koji se postavljaju na kočione diskove te materijale koji se koriste u njihovoj izradi. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je analizirati makrostrukturu oštećenog diska na mjestu prijeloma te provesti analizu mikrostrukture oštećenog i neoštećenog diska. Na tim uzorcima potrebno je ispitati i osnovna mehanička svojstva koja mogu dati uvid u uzrok loma diska.

Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o strukturi oštećenog kočionog diska i o potencijalnim uzrocima loma.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2021.

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KOČNICE.....	2
3. DISK KOČNICE	3
3.1. Kočioni disk	4
3.2. Kočione pločice.....	5
3.3. Podsloj disk pločice.....	6
3.4. Stražnja ploča	7
3.5. Podloška	7
3.6. Kočiona kliješta.....	8
4. MATERIJALI DISK KOČNICA	10
4.1. Materijali kočionih diskova.....	10
4.2. Frikcijski materijali	10
4.3. Materijali stražnje ploče	11
5. Operativni problem.....	12
5.1. <i>Fading</i> – potpuno otkazivanje kočnica	12
6. KOMPOZITNI MATERIJALI	13
6.1. Kompoziti s metalnom matricom.....	13
6.1.1. <i>Kompoziti s aluminijskom matricom</i>	14
6.2. Kompoziti s česticama	14
6.2.1. <i>Kompoziti s disperzijom</i>	15
6.2.2. <i>Kompoziti s velikim česticama</i>	15

7. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH KOČIONIH DISKOVA	16
8. EKSPERIMENTALNI DIO	17
8.1. Metalografska analiza.....	17
8.1.1. Analiza makrostrukture kočionih diskova	17
8.1.2. Metalografska priprema uzorka	24
8.1.2.1. Brušenje uzoraka	24
8.1.2.2. Poliranje uzoraka	26
8.1.2.3. Nagrizanje uzoraka	27
8.1.3. Analiza mikrostrukture kočionih diskova	29
8.1.3.1. Analiza mikrostrukture uzoraka u poliranom stanju.....	29
8.1.3.1. Analiza mikrostrukture uzoraka u nagriženom stanju	31
8.2. Mjerenje tvrdoće.....	31
9. ZAKLJUČAK.....	35
10. LITERATURA	36

POPIS SLIKA

Slika 1. Disk kočnica [1]	3
Slika 2. Izvedbe različitih disk kočnica, (a) ventilirajući disk bez zvona, (b) ventilirajući disk sa zvonom, (c) kruti disk bez zvona, (d) kruti disk sa zvonom [1]	4
Slika 3. Različite izvedbe koje se koriste za ventilirajuće diskove, (a) ravne lopatice, (b) zakrivljene lopatice, (c) stupovi [1]	5
Slika 4. Sklop pločice, stražnje ploče i podloška [1]	6
Slika 5. Prikaz različitih izvedbi pločica, (a) osnovna pločica, (b) pločica s radijalnim kosinama, (c) pločica s vertikalnim kosinama, (d) pločica s dijamantnim kosinama [1]	6
Slika 6. Prikaz različitih dijelova koji čine sklop pločice [1]	7
Slika 7. Tipične izvedbe podloška [1]	8
Slika 8. Fiksna kliješta [1]	8
Slika 9. Plivajuća kliješta [1]	9
Slika 10. Promjena koeficijenta trenja pri kočenju [3]	12
Slika 11. Kompoziti s obzirom na oblik ojačala, (a) čestice, (b) vlakna [4]	13
Slika 12. Podjela kompozita s česticama, (a) s velikim česticama, (b) s disperzijom [6]	15
Slika 13. Kočioni disk 1 (oštećeni)	17
Slika 14. Uzorak 1-1	18
Slika 15. Uzorak 1-2	18
Slika 16. Stereo mikroskop Mantis Elite-Cam HD	19
Slika 17. Prijelomna površina diska 1-1	19
Slika 18. Prijelomna površina diska 1-2	20
Slika 19. Prijelomna površina diska 2-1	20
Slika 20. Prijelomna površina diska 2-2	21
Slika 21. Prijelomna površina diska 3-1	21
Slika 22. Prijelomna površina diska 3-2	22
Slika 23. Kočioni disk 2 (čitavi)	22
Slika 24. Uzorak 2-1	23
Slika 25. Kočioni disk 3 (čitavi)	23
Slika 26. Uzorak 3-1	24

Slika 27. Uređaj za brušenje Presi Minitex 233	25
Slika 28. Uređaj za poliranje Struers DAP-V.....	26
Slika 29. Uzorci kočionih diskova u poliranom stanju	27
Slika 30. Digestor.....	28
Slika 31. Uzorci kočionih diskova u nagriženom stanju	28
Slika 32. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	29
Slika 33. Mikrostruktura polirane površine uzorka 1-1 pri povećanju 200x.....	29
Slika 34. Mikrostruktura polirane površine uzorka 1-2 pri povećanju 200x.....	30
Slika 35. Mikrostruktura polirane površine uzorka 2-1 pri povećanju 200x.....	30
Slika 36. Mikrostruktura polirane površine uzorka 3-1 pri povećanju 200x.....	31
Slika 37. Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode [8].....	32
Slika 38. Tvrdomjer PMT 3	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri brušenja	25
Tablica 2. Parametri poliranja	27
Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2	33
Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće HV2 na dijelu diska koji se trošio	33
Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV2 na dijelu diska koji se nije trošio	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
V _p	-	Volumni udio čestica u kompozitu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu

SAŽETAK

U ovom završnom radu je provedena metalografska analiza kočionog diska bolida Formula student kako bi se pokušao otkriti uzrok puknuća. U prvom dijelu je teorijski opisan kočioni sustav i način funkcioniranja, a posebno su detaljnije opisane disk kočnice i kočioni disk koji je jedan od najvažnijih dijelova disk kočnica u modernim vozilima. Naposljetku je u ovom radu opisana teorija kompozitnih materijala te proizvodnja kočionih diskova koji su izrađeni od kompozitnih materijala. U zadnjem dijelu se ispituju tri kočiona diska gdje je provedena metalografska analiza oštećenih i neoštećenih kočionih diskova te su rezultati međusobno uspoređeni kako bi se pokušalo otkriti uzrok loma.

Ključne riječi: disk kočnice, kliješta, kočioni disk, kompoziti, metalna matrica

SUMMARY

In this undergraduate thesis, a metallographic analysis of the brake disc of a Formula student race car was performed to try to discover the cause of the rupture. The first part theoretically describes the braking system and mode of operation, and in particular describes in more detail the disc brakes and the brake disc, which is one of the most important parts of disc brakes in modern vehicles. Finally, this undergraduate thesis describes the theory of composite materials and the production of brake discs made of composite materials. In the last part, three brake discs are tested, where a metallographic analysis of damaged and undamaged brake discs is performed, and the results are compared with each other in order to try to discover the cause of the fracture.

Key words: disc brake, caliper, brake disc, composites, metal matrix

1. UVOD

U prošlom stoljeću automobilska industrija doživjela je veliki procvat. Jedan od najvažnijih dijelova vozila je kočioni sustav. S vremenom kočioni sustavi su se poboljšavali, dodavali su se novi, bolji, kvalitetniji materijali kako bi došlo do povećanja učinkovitost kočenja. Kočioni sustav čine: jedinica za opskrbu energijom, pokretački i prijenosni slog, dodatni sklop za priključna vozila (automatska kočnica), parkirna kočnica, radna kočnica, sustav regulacije kočione sile i kočnice kotača (bubanj i disk). Kočioni diskovi su jedni od najvažnijih dijelova kočionog sustava koji služe kako bi se vozila zaustavila. Najčešće korišteni materijali za izradu kočionih diskova su ljevovi: sivi, temper ili čelični. S vremenom se shvatilo da će vozila imati bolju učinkovitost kočenja ako se smanji njihova masa, a jedan od načina smanjenja mase je bilo smanjenje mase kočionih diskova. Umjesto dotadašnjih materijala poput sivog, temper ili čeličnog lijeva počeli su se koristiti kompozitni materijali. Diskovi od kompozita su bili znatno skuplji, ali su zato imali ista, ako ne i bolja svojstva, uz znatno manju masu.

2. KOČNICE

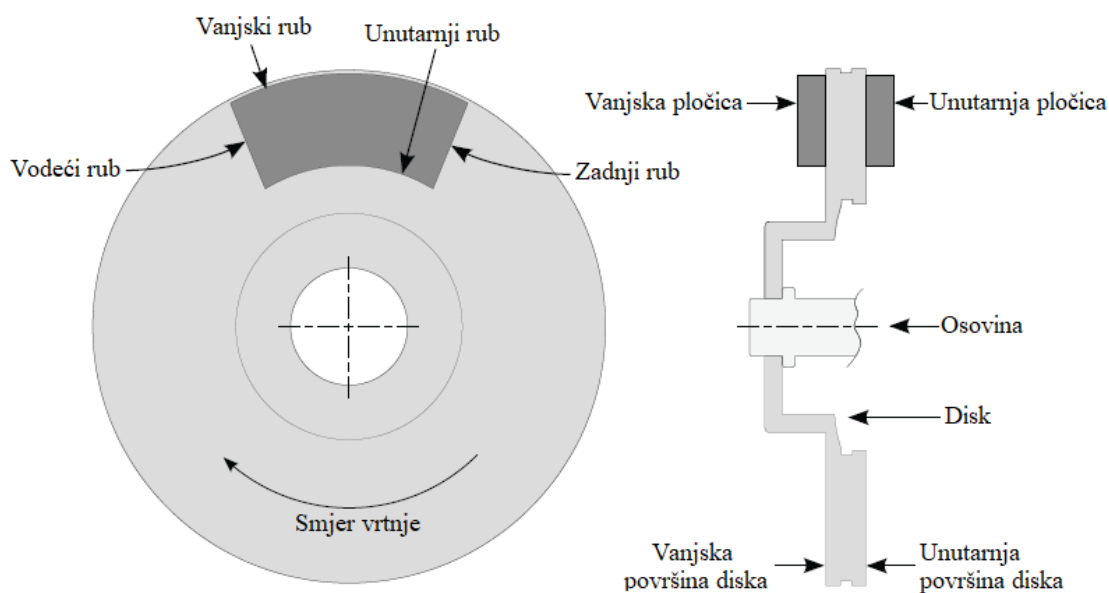
Automobilski kočioni sustavi pretvaraju kinetičku energiju vozila u toplinsku energiju uzrokovanu trenjem između kočione pločice i kočionog diska. Hidraulički aktivirane disk kočnice najčešće se koriste gdje klip pritišće kočione pločice na disk uzrokujući trenje i zagrijavanje, ali i male količine materijala kočione obloge koje se prenose na disk uslijed trenja što usporava automobil. Oko 90 % energije preuzima kočioni disk, koja se potom treba predati u okoliš. U ekstremnim uvjetima, disk može doseći temperaturu do 650 °C. Deformacija kočionih diskova nastaje uslijed zagrijavanja i toplinskog širenja koje mijenja oblik tarne površine diska iz ravnog u konusni. Zbog toga se kontakt kočione pločice i diska ne ostvaruje po cijeloj površini već kroz više točaka, što dovodi do nejednakog trošenja kočione pločice, a time i do pojave neželjene buke.

Na modernim vozilima kočnice mogu biti izvedene kao bubanj kočnice i disk kočnice.

Nastavak teksta će biti posvećen disk kočnicama u modernim vozilima.

3. DISK KOČNICE

U sustavu disk kočnica, skup pločica je pritisnut na rotirajući disk i zbog trenja se stvara toplina na sučelju disk-pločica. Ta se toplina u konačnici prenosi na vozilo i okolinu, a disk se hladi. Izgled disk kočnice s dijelovima je prikazan na slici 1. Pločica koja je bliža središtu vozila naziva se unutarnja pločica dok se ona koja je dalje naziva vanjska pločica. Slično, tarna površina diska koja je okrenuta prema vozilu naziva se unutarnja površina diska, a ona koja je okrenuta prema van zove se vanjska površina diska. Rub pločice koja najprije dolazi u dodir s točkom na površini diska naziva se vodeći rub, dok se rub koji zadnji dodiruje tu točku naziva zadnji rub. Rub pločice manjeg radijusa naziva se unutarnji rub, dok se onaj s većim radijusom naziva vanjski rub [1].



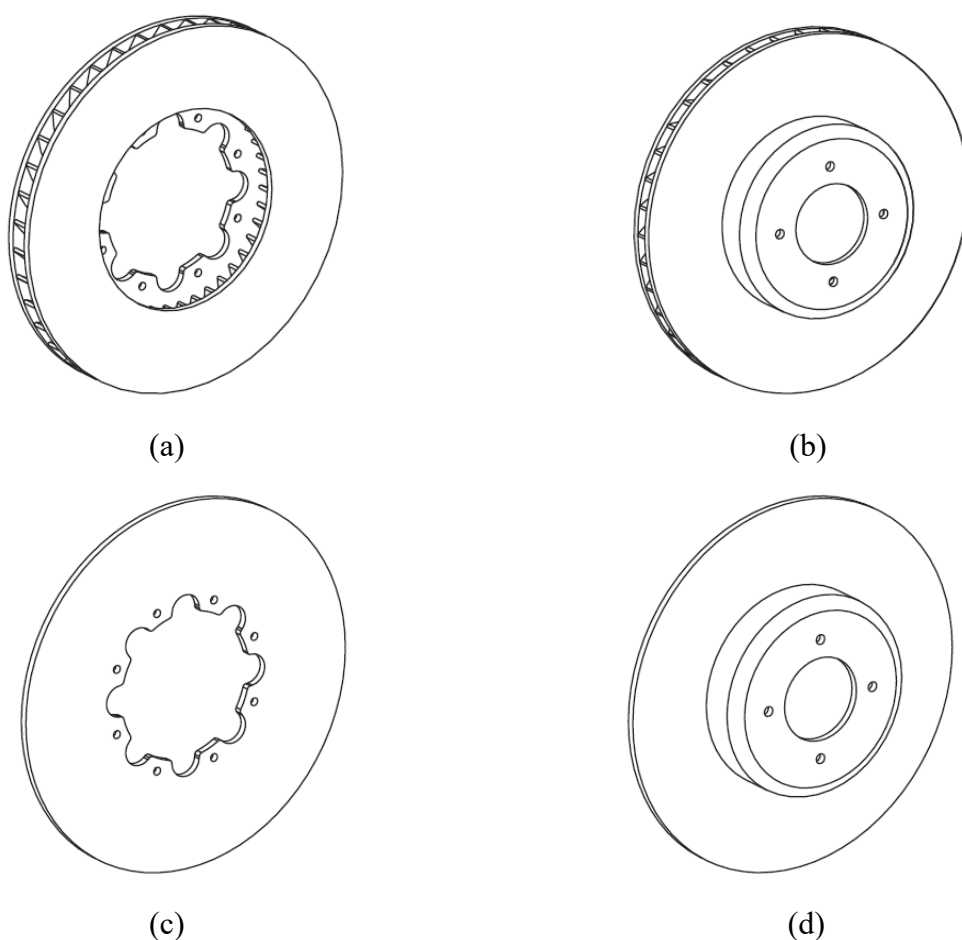
Slika 1. Disk kočnica [1]

Sklop disk kočnice sastoji se od sljedećih glavnih komponenti: kočioni disk, pločica, podsloj, stražnja ploča, podloška i kliješta [1].

3.1. Kočioni disk

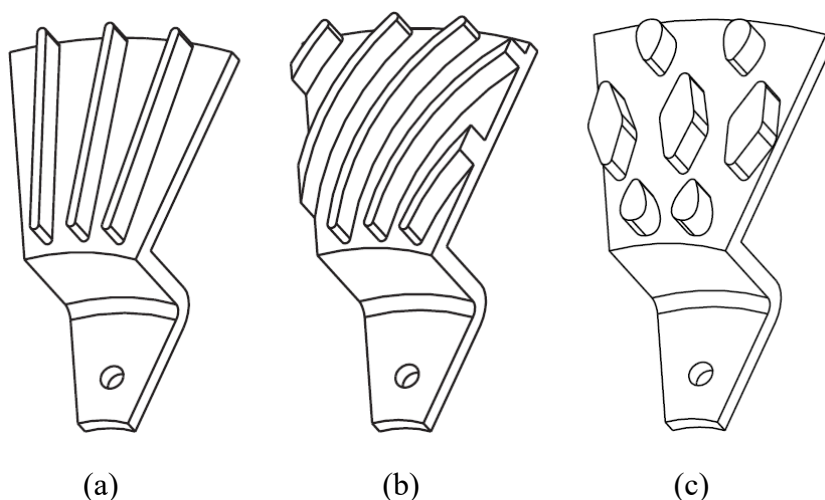
Kočioni disk pričvršćen je na osovinu pa se okreće istom brzinom kao i kotač. Efikasnost kočenja disk kočnice određena je brzinom kojom se kinetička energija pretvara u toplinu zbog sila trenja između pločice i diska. Za učinkovit dizajn kočnice također je važno da se toplina rasprši što je brže moguće inače bi temperatura diska mogla porasti i utjecati na performanse disk kočnice. Kako bi se postigle optimalne performanse u zahtjevnim primjenama u kočione diskove se uvodi ventilacija koja povećava brzinu hlađenja. Kočioni diskovi se mogu podijeliti u dvije kategorije: kruti kočioni diskovi i ventilirajući kočioni diskovi [1].

Kruti kočioni disk je najjednostavniji oblik i sastoji se od jednog krutog diska. U ventiliranom disku, lopatice ili stupovi ili oba odvajaju dva kružna diska i osiguravaju prolaz za strujanje zraka. Ventilirani kočni diskovi povećavaju brzinu hlađenja i rezultiraju nižom temperaturom površine. Niža temperatura smanjuje rizik od otkazivanja kočnica i također pomaže u smanjenju trošenja diska i pločice. Oba ova dizajna izrađena su s ili bez montažnog zvona. Izvedbe ove dvije vrste diskova prikaze su na slici 2 [1].



Slika 2. Izvedbe različitih disk kočnica, (a) ventilirajući disk bez zvona, (b) ventilirajući disk sa zvonom, (c) kruti disk bez zvona, (d) kruti disk sa zvonom [1]

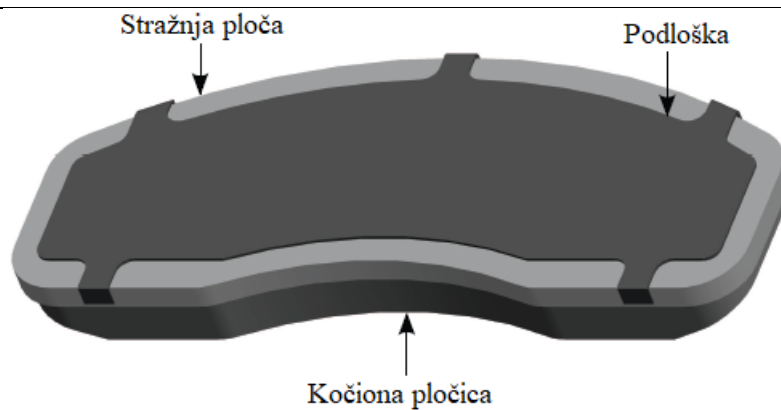
U ventiliranim kočionim diskovima koriste se različite izvedbe lopatica i stupova. Svaka izvedba daje jedinstveni uzorak strujanja zraka. Neke od izvedbi koje se koriste na ventiliranim diskovima su sljedeće: ravne radijalne lopatice, zakrivljene lopatice, dijamantni i kapljičasti stupovi (DTDP) i lučne lopatice. Na slici 3 su prikazane tri različite izvedbe koje se koriste za ventilaciju. Kod svih ovih rashladni zrak ulazi na unutarnju periferiju i napušta disk na vanjskoj periferiji. Jedan nedostatak ovih izvedbi je taj što se u blizini unutarnje periferije razvijaju visoka naprezanja prvenstveno zbog ulaza. To bi mogao biti problem kada se disk koristi u zahtjevnoj situaciji [1].



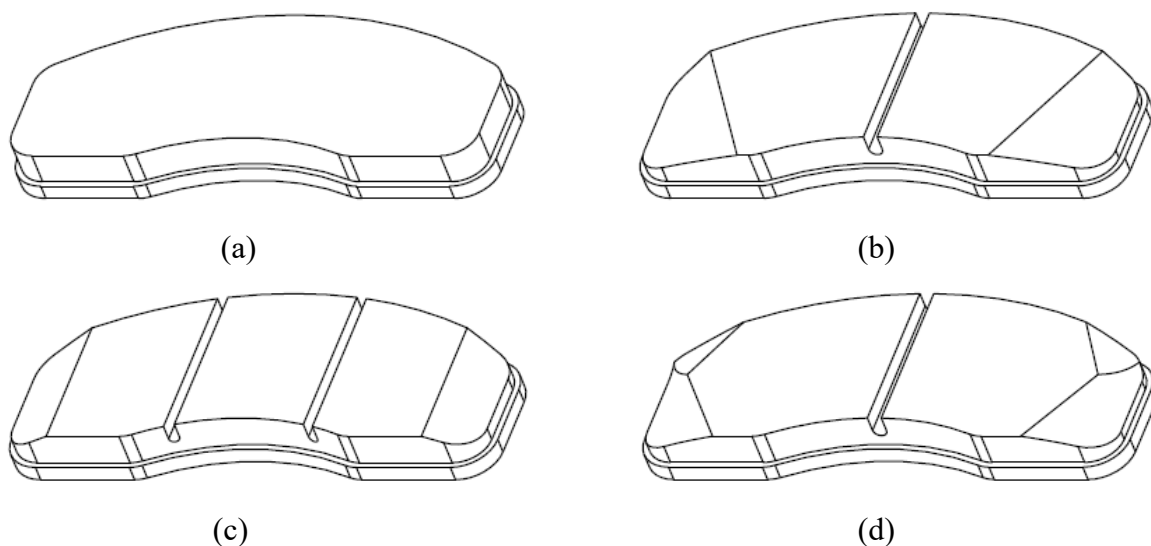
Slika 3. Različite izvedbe koje se koriste za ventilirajuće diskove, (a) ravne lopatice, (b) zakrivljene lopatice, (c) stupovi [1]

3.2. Kočione pločice

Kočiona pločica se sastoji od frikcijskog materijala koji je pričvršćen na krutu stražnju ploču. Na slici 4 je prikazan spoj kočione pločice i stražnje ploče. Kočiona pločica obično ima utore na prednjoj strani i skošenja na krajevima. Slika 5 prikazuje različite izvedbe pločica. Pločica može imati više od jednog utora. Jedna od svrha ugradnje kosina i utora je smanjenje buke cviljenja. Utor će omogućiti savijanje materijala i pomoći u izbjegavanju pukotina. Nadalje, olakšava čišćenje prašine skupljene između površina diska i pločice nudeći izlaz [1].



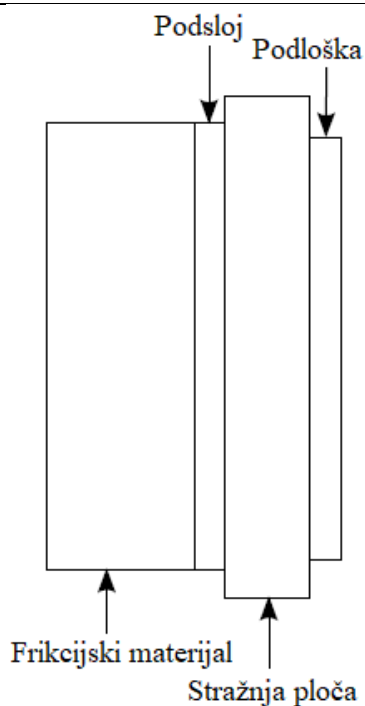
Slika 4. Sklop pločice, stražnje ploče i podloška [1]



Slika 5. Prikaz različitih izvedbi pločica, (a) osnovna pločica, (b) pločica s radijalnim kosinama, (c) pločica s vertikalnim kosinama, (d) pločica s dijamantnim kosinama [1]

3.3. Podsloj disk pločice

Ponekad se između frikcijskog materijala i stražnje ploče postavlja dodatni sloj materijala zvan podsloj, kao što je prikazano na slici 6. Njegova glavna svrha je prigušiti vibracije koje nastaju na sučelju diska i pločica [1].



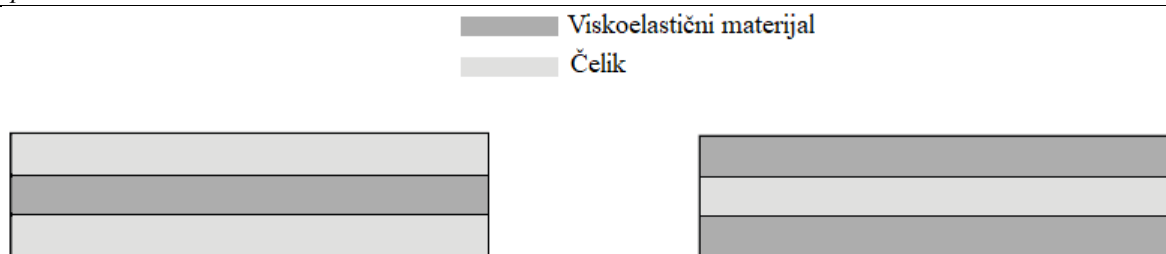
Slika 6. Prikaz različitih dijelova koji čine sklop pločice [1]

3.4. Stražnja ploča

Stražnja ploča se koristi za podupiranje frikcijskog materijala i prijenos sile pokretanja. Frikcijski materijal se uglavnom pričvršćuje na stražnju ploču na dva načina, lijepljenjem i mehaničkim pričvršćivanjem. Mehaničko pričvršćivanje se može postići na različite načine. Lijepljenje se može raslojiti tijekom rada pa se preferiraju mehanički sustavi pričvršćivanja [1].

3.5. Podloška

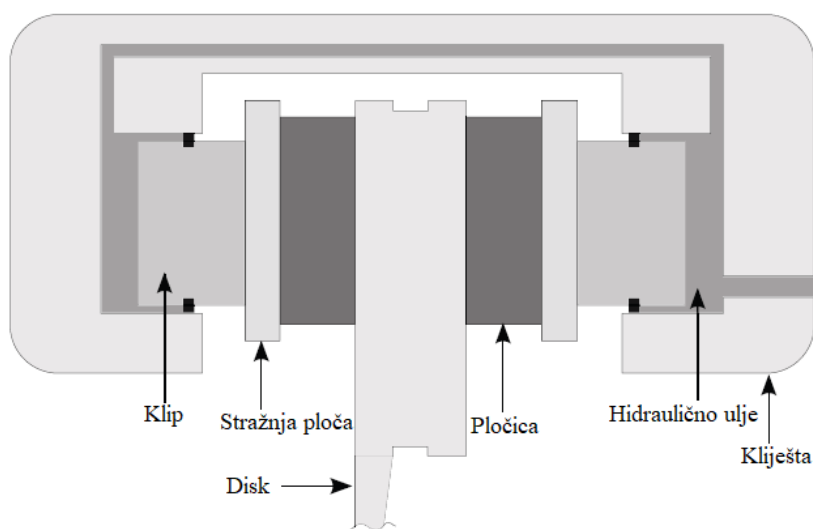
Podloške su laminati od metala i viskoelastičnih materijala. Postavljaju se između stražnje ploče i kućišta klipa ili kliješta (u slučaju plivajućih kliješta). Njihova je svrha prigušiti vibracije u sustavu diska i pločica. Obično se pričvršćuju na stražnju ploču ljepilom ili se sastavljaju mehanički. Podloške mogu biti izrađene na različite načine i materijale, npr. čelična jezgra s viskoelastičnim materijalom s obje strane ili jezgra od viskoelastičnog materijala s čelikom s obje strane, kao što je prikazano na slici 7 [1].



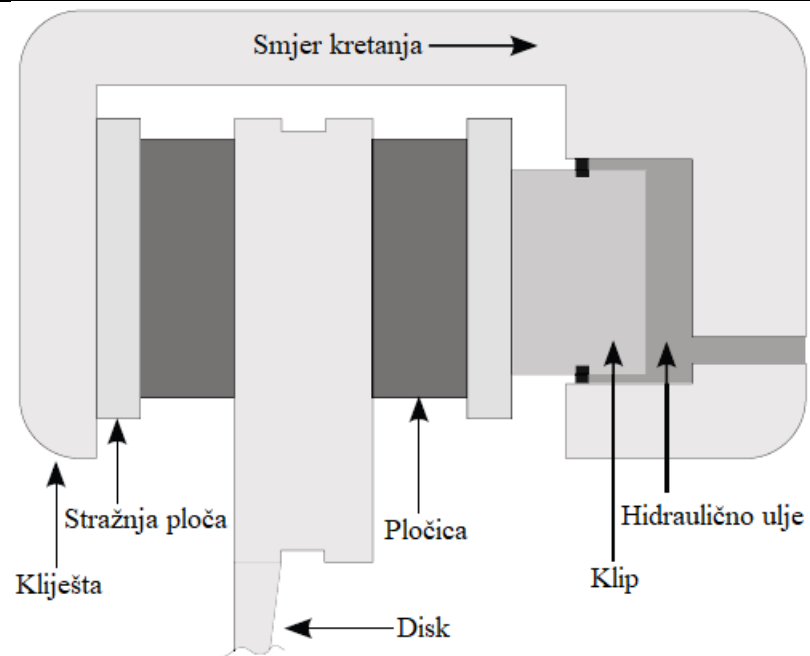
Slika 7. Tipične izvedbe podloška [1]

3.6. Kočiona kliješta

Kočiona kliješta su sklop u kojem se nalaze kočione pločice. Osim toga, u njemu se nalaze i klipovi i osiguravaju se kanali za kočionu tekućinu koja pokreće klipove. Postoje dvije vrste kliješta, fiksne i plivajuća. Fiksna kliješta se ne pomiču u odnosu na kočioni disk i sadrži klipove s obje strane diska kao što je prikazano na slici 8. Kada se vrši pritisak, oba se klipa pomiču i guraju kočione pločice. Plivajuća kliješta drži klip samo na jednoj strani diska kao što je prikazano na slici 9. Kada se izvrši pritisak, klip se pomiče i gura unutarnju kočionu pločicu. Kada pločica dođe u kontakt s površinom diska, kliješta se pomiče u suprotnom smjeru tako da vanjska pločica također dodiruje površinu diska [1].



Slika 8. Fiksna kliješta [1]



Slika 9. Plivajuća klješta [1]

4. MATERIJALI DISK KOČNICA

Za različite komponente disk kočionog sustava koriste se različiti materijali. Izbor materijala uglavnom ovisi o primjeni i željenim karakteristikama [1].

4.1. Materijali kočionih diskova

Sivi lijev s pretežno perlitnom matricom je široko korišten materijal za kočione diskove. Prednosti njegove uporabe kao materijala za disk su dobra sposobnost lijevanja i obradivosti, visoka toplinska vodljivost i toplinski kapacitet te niža cijena. U industriji postoji interes za korištenje materijala manje gustoće za disk tako da manje doprinosi ukupnoj težini vozila. Jedan od načina za smanjenje mase je korištenje aluminijskog montažnog zvona i kočionog prstena od sivog lijeva u hibridnom kočionom disku [1].

Kompozitni materijali s metalnom matricom na bazi aluminijske se također koriste kao materijal za izradu kočionog prstena. Nude dobru otpornost na trošenje i koroziju te značajnu uštedu na težini u usporedbi sa sivim lijevom. Jedan nedostatak je veći koeficijent toplinskog širenja u usporedbi sa sivim lijevom. Drugi veliki nedostatak je ograničena otpornost na temperaturu i iz tog razloga nisu stekli široku prihvaćenost [1].

Kompoziti s keramičkom matricom (CMC) s ojačalo od ugljičnih vlakana i matrica od silicij karbida su još jedan izbor za kočione diskove zbog svojih superiornih triboloških svojstava u usporedbi sa sivim lijevom. Njihove ključne karakteristike su niža gustoća i koeficijent toplinskog širenja u odnosu na sivi lijev, visoki i široko konstantni koeficijenti trenja. Koriste se u automobilima visokih performansi, ali su njihove cijene trenutno vrlo visoke u usporedbi s diskovima od sivog lijeva [1].

4.2. Frikcijski materijali

S funkcionalnog i sigurnosnog stajališta na ponašanje frikcijskih materijala postavljaju se sljedeći zahtjevi: visoki koeficijent trenja, stabilan koeficijent trenja neovisno o temperaturi, brzini, tlaku, vlažnosti, trošenju, koroziji, niski faktor trošenja frikcionog materijala i dug vijek trajanja, malo trošenja diska, glatko kočenje bez buke i vibracija, obnavljanje izvornih svojstava nakon jakog kočenja i starenja, ekološki prihvatljivih sirovina, niska cijena [1].

To postavlja ogromne zahtjeve za proces odabira materijala. Za ispunjavanje tolikih zahtjeva frikcionni materijali izrađuju se od mnogih sastojaka i stoga se nazivaju kompozitima. Može postojati do 25 različitih komponenti [1].

4.3. Materijali stražnje ploče

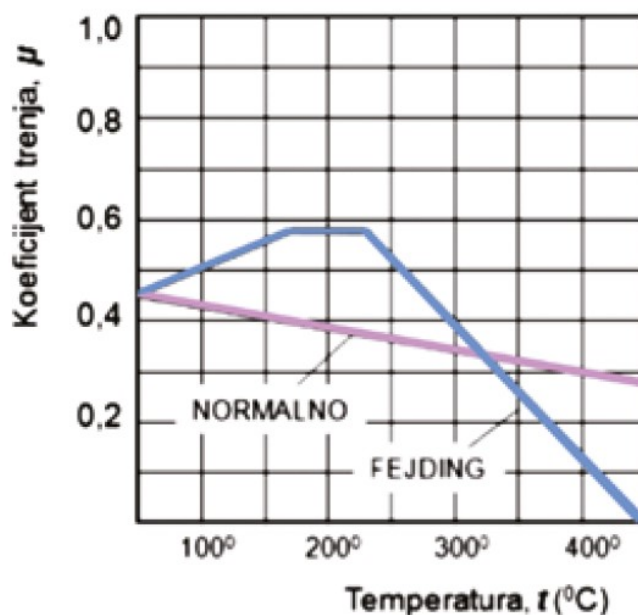
Za stražnju ploču obično se koristi čelik, ali se također koristi aluminij zbog svoje manje gustoće [1].

5. Operativni problem

Jedan od problema vezan uz disk kočnice koji se javlja tijekom primjene kočnica je potpuno otkazivanje kočnica ili *fading*.

5.1. *Fading* – potpuno otkazivanje kočnica

Tijekom dugotrajnog kočenja ili prečestog jačeg kočenja u kratkom vremenu dolazi do pregrijavanja kočnica odnosno do privremene promjene materijala na kočionim oblogama te do pada koeficijenta trenja, a ta promjena pada koeficijenta trenja pri povećanju temperature prikazana je na slici 10. To dovodi do postupka koji se naziva *fading*, odnosno potpunog otkazivanja kočnica. Kvalitetnim kočionim oblogama kočnice zbog pregrijavanja popuštaju postupno, dok kod kočionih obloga slabije kvalitete trenje se može smanjiti odjednom što može doprinijeti potpunom otkazivanju kočnica [2].

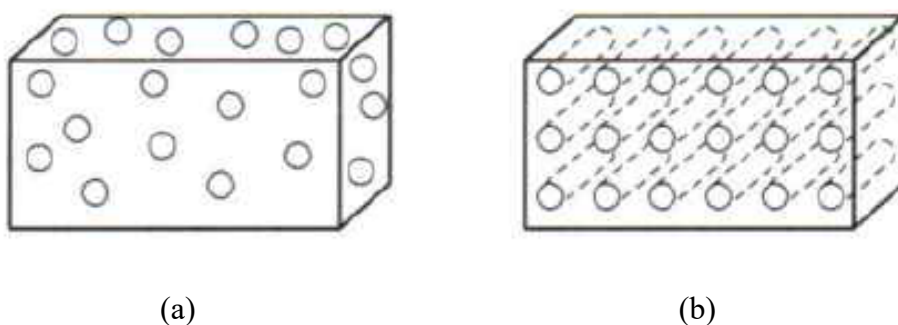


Slika 10. Promjena koeficijenta trenja pri kočenju [3]

6. KOMPOZITNI MATERIJALI

„Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.“ [4]

Kompoziti se sastoje od matrice i ojačala. S obzirom na materijal matrice kompoziti se dijele na metalne (MMC – *Metal Matrix Composite*), keramičke (CMC – *Ceramic Matrix Composite*) i polimerne (PMC – *Polymer Matrix Composite*) kompozite, a s obzirom na oblik ojačala kompoziti se dijele na kompozite s česticama i kompozite s vlaknima, a njihova usporedba je prikazana na slici 11.



Slika 11. Kompoziti s obzirom na oblik ojačala, (a) čestice, (b) vlakna [4]

6.1. Kompoziti s metalnom matricom

To su kompoziti kod kojih je materijal matrice metal. Zbog visoke cijene uporaba kompozita s metalnom matricom poprilično je ograničena. Za materijale matrice kod ovih vrsta kompozita se koriste legure aluminija, magnezija, titana, bakra i superlegure [4].

Ojačala mogu biti kontinuirana i diskontinuirana i čine 10 % – 60 % volumena kompozita. Kao materijali kontinuiranog vlakna ili vlaknastog ojačala koristi se ugljik (C), silicijev karbid (SiC), bor (B), aluminijev oksid (Al_2O_3) i metali visokog tališta. Za diskontinuirana ojačala koristi se materijali uglavnom od SiC u obliku viskera (w), čestica (p) SiC, Al_2O_3 ili titanova borida (TiB_2) i kratkih ili nasjeckanim vlakana Al_2O_3 ili ugljika (C) [5].

6.1.1. Kompoziti s aluminijskom matricom

„Najveći dio istraživanja i razvoja MMC-a usmjeren je na aluminij kao metal matrice. Aluminij je najatraktivniji neželjezni metal matrice, posebno za uporabu u zrakoplovnoj industriji, gdje je težina strukturnih komponenata bitan čimbenik.“ [6]

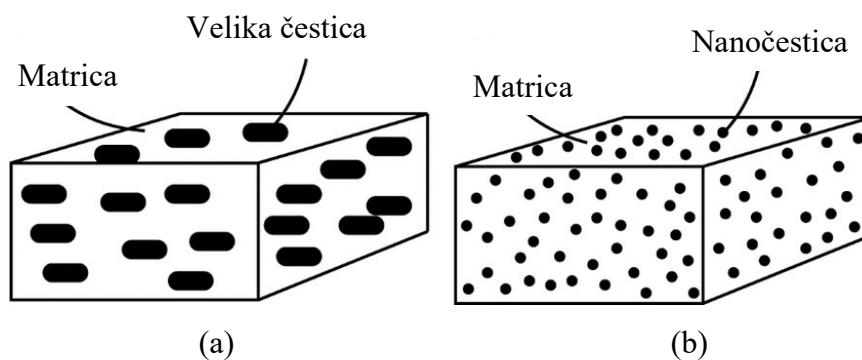
Toplinska svojstva aluminijskih kompozita su vrlo važna. Aluminijev koeficijent toplinskog rastezanja se može sniziti gotovo do nule. On može zadovoljiti mnoge zahtjeve u primjeni zbog svojeg dovoljno visokog tališta, a dovoljno nisko da proizvodnja ne bude preskupa. Kako bi se povećala čvrstoća, krutost ili otpornost na umor, aluminiju i aluminijskim legurama se dodaju ojačala, no nažalost dodavanjem ojačala dolazi do smanjenja nekih drugih svojstava, poput istezljivosti [6].

Ojačala su obično anorganski materijali (keramika) kao što su aluminijev oksid, silicijev karbid ili silicijev nitrid. Ako se silicijev karbid izabere kao ojačala u aluminijskim kompozitima to je zbog izvrsne kombinacije njegovih fizikalnih svojstava, raspoloživosti i cijene [5].

Diskontinuirani silicijev karbid/aluminij (SiC_d/Al) – kompoziti uključuju materijali sa SiC-česticama, viskerima ili kratkim vlaknima u aluminijskom matrici. Oni su dostupni u velikim količinama na tržištu po povoljnim cijenama za razliku od većine ostalih kompozita s metalnom matricom. SiC_d/Al – kompozit ima čak do 60 % veću čvrstoću i granicu razvlačenja, nego neočvrsnute aluminijske matrice [5].

6.2. Kompoziti s česticama

Kompoziti s česticama se s obzirom na veličinu čestica i način na koji čestice utječu na svojstva kompozita dijele u dvije velike skupine, a to su kompoziti s disperzijom i kompoziti s velikim česticama, njihova razlika je prikazana na slici 12. Za ovu podjelu potrebno je definirati kriterij, a to može biti promjer čestice. Čestice koje imaju promjer do 0,1 μm nazivaju se disperzijom, a čestice koje imaju promjer veći od 1 μm nazivaju se velikim česticama. Osim toga moguće je odrediti razliku između skupina i prema volumnim udjelima čestica. Kompoziti koji imaju volumni udio do $V_p = 0,15$ su kompoziti s disperzijom, a kompozitima s velikim česticama su oni kompoziti koji imaju volumni udio veći od 0,20 [4].



Slika 12. Podjela kompozita s česticama, (a) s velikim česticama, (b) s disperzijom [6]

6.2.1. Kompoziti s disperzijom

Budući da male čestice sprječavaju gibanje dislokacija, one vode do spomenutog efekta ojačavanja. Za postizanje tog efekta ojačavanja potrebna je samo mala količina disperzivnog materijala – do 15 % [4].

6.2.2. Kompoziti s velikim česticama

Kompoziti s velikim česticama se razlikuju od kompozita s disperzijom jer imaju više udjele velikih čestica koje ne djeluju izravno na sprječavanje gibanja dislokacija. Ovi se kompoziti proizvode zbog postizanja takvih svojstava kojima nije svrha osiguranje čvrstoće [4].

7. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH KOČIONIH DISKOVA

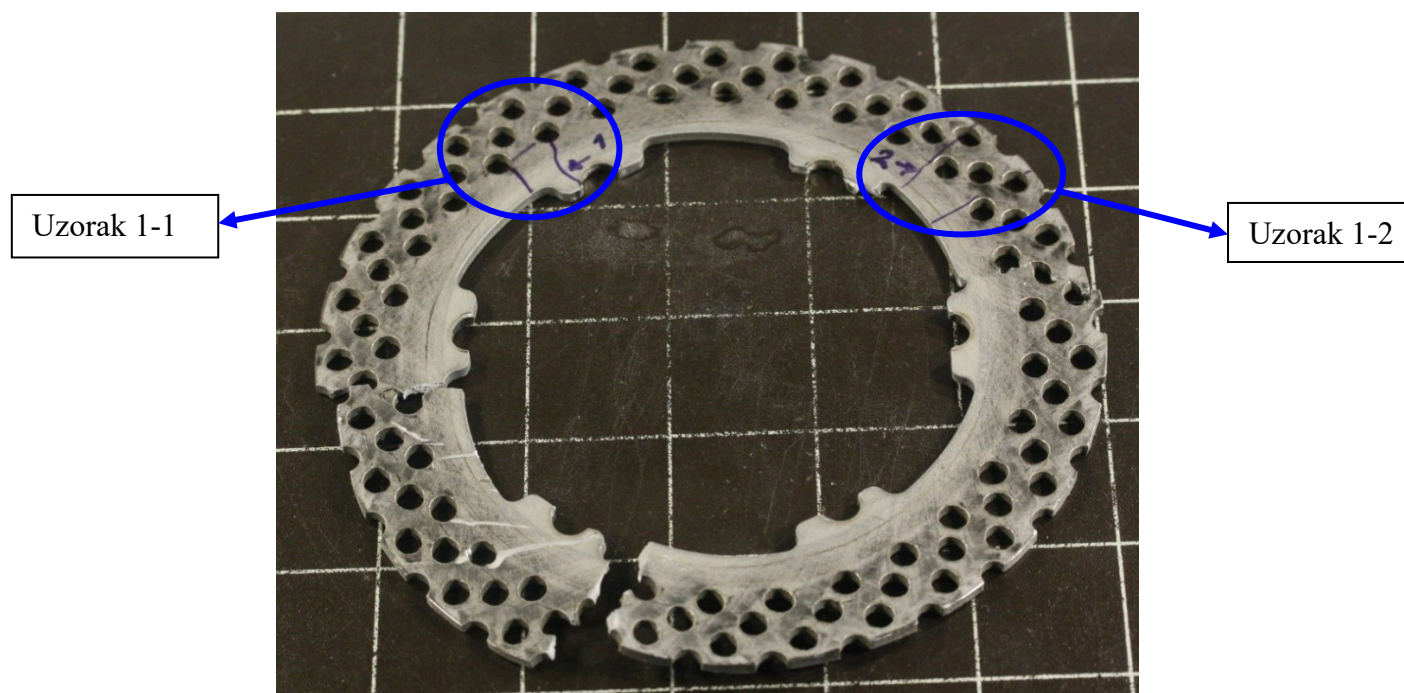
Aluminijska legura je zagrijana do 953 K u elektrootpornoj peći. Otopljeni metal je prebačen grafitnim lončićem u polukrutom stanju i dodane su čestice silicijevog karbida. Smjesa je zatim miješana kako bi se optimizirala i ujednačila raspodjela čestica u talini. Nakon miješanja, smjesa je ponovno zagrijana i razvijeni kompozit je izliven u kalup za skrućivanje. Dobiveni proizvod je kočioni disk izrađen od kompozita s aluminijskom matricom [7].

8. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom dijelu rada su ispitivana tri kočiona diska (dva stražnja i jedan prednji) koja su korištena na bolidu Formule Student. Sva tri kočiona diska su prikazani na slikama 13., 23. i 25. Kočioni diskovi su izrađeni od MMC kompozita s aluminijskom matricom i ojačalom od silicijevog karbida (SiC) u obliku čestica s 20 % - tim volumenskim udjelom. Jedan od stražnjih kočionih diskova je pukao tijekom testiranja formule. Uzeta su četiri uzorka, dva sa stražnjeg (oštećenog) kočiona diska, jedan sa stražnjeg (čitavog) kočionog diska te jedan s prednjeg kočionog diska. Na sva četiri uzorka je proveden postupak metalografske analize koji se sastoji od makrostrukturne i mikrostrukturne analize uzoraka. Makrostrukturna analiza se sastoji od fotografiranja kočionih diskova te pregleda oštećenog diska pod stereo mikroskopom, a mikrostrukturna analiza uzoraka se sastoji od ulijevanja uzoraka u polimernu masu, pripreme površine uzoraka procesom brušenja, poliranja površine uzoraka, nagrizanja površine uzoraka i mjerenja tvrdoća.

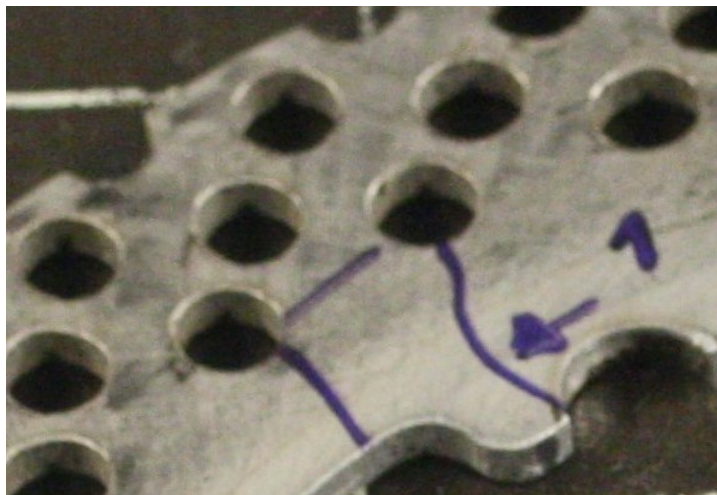
8.1. Metalografska analiza

8.1.1. Analiza makrostrukture kočionih diskova



Slika 13. Kočioni disk 1 (oštećeni)

Na slikama 14. i 15. su prikazane fotografije uzoraka 1-1 i 1-2 te su označene strane na kojima se provode ispitivanja. U ovom slučaju ispitane su poprečne strane uzoraka.



Slika 14. Uzorak 1-1

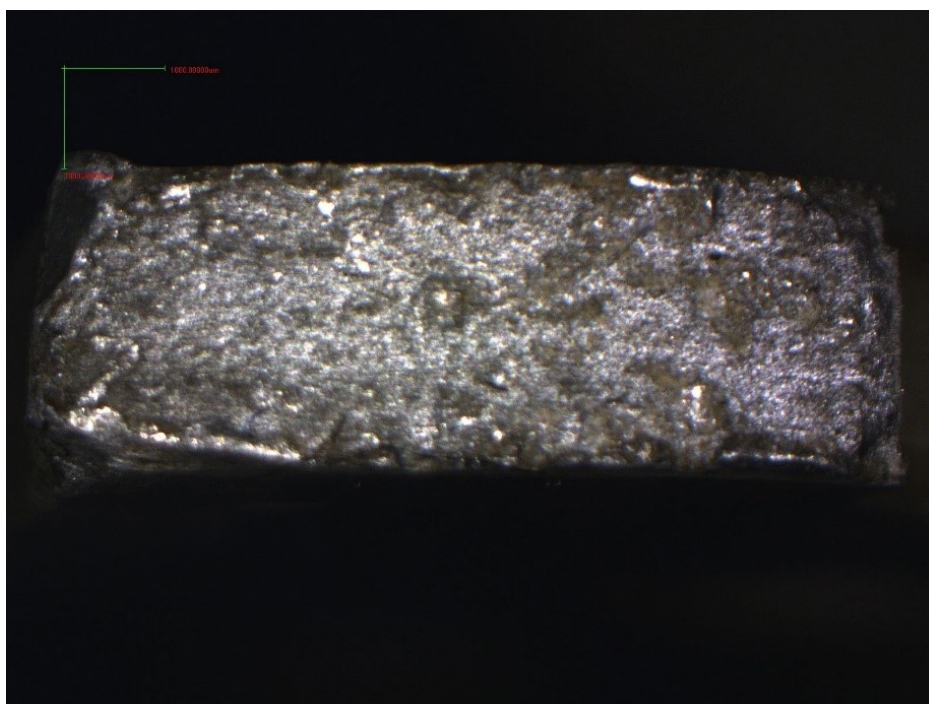


Slika 15. Uzorak 1-2

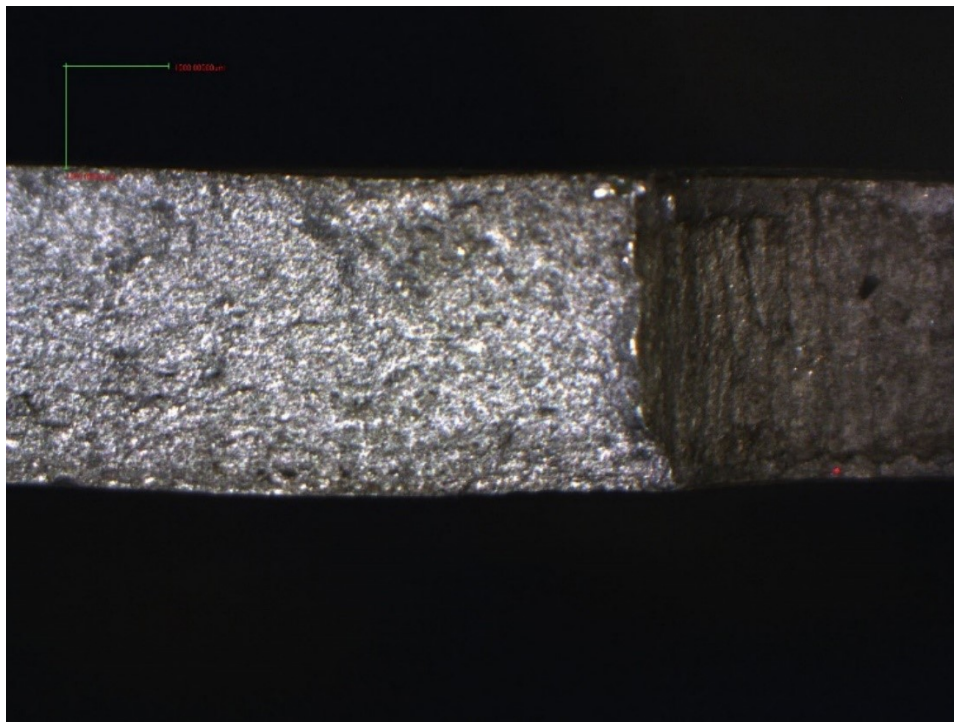
Kao što se vidi na slici 13. kočioni disk 1 je pukao na tri dijela te su se oni analizirali na stereo mikroskopom, koji je prikazan na slici 16., kako bi se vidjela makrostruktura oštećenog diska. Poprečne strane dijelova puknutog diska su prikazane na slikama 17. – 22.



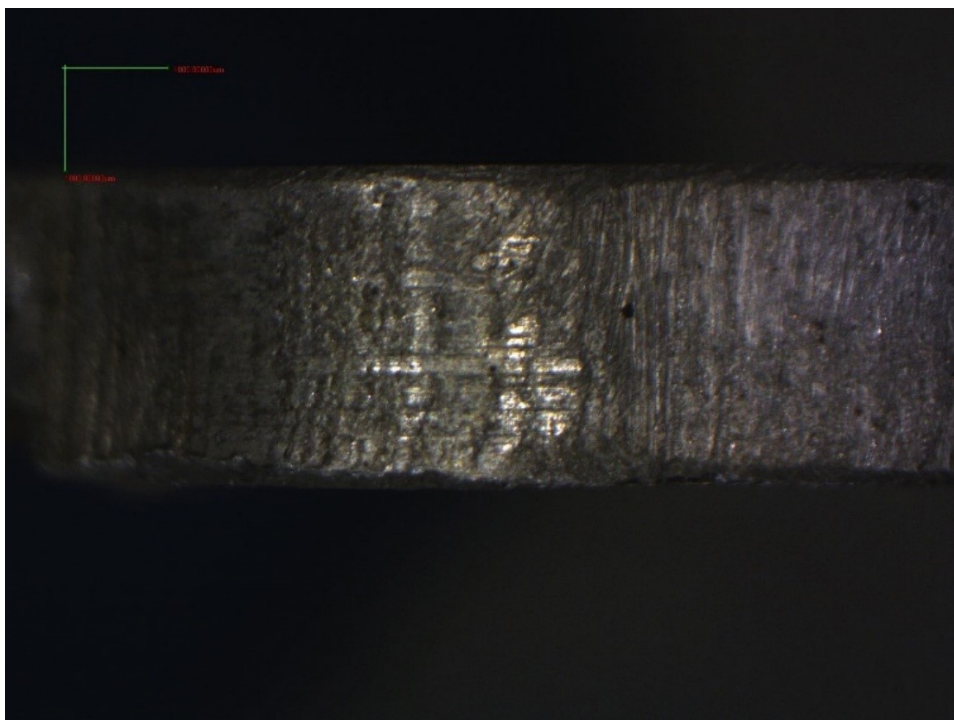
Slika 16. Stereo mikroskop Mantis Elite-Cam HD



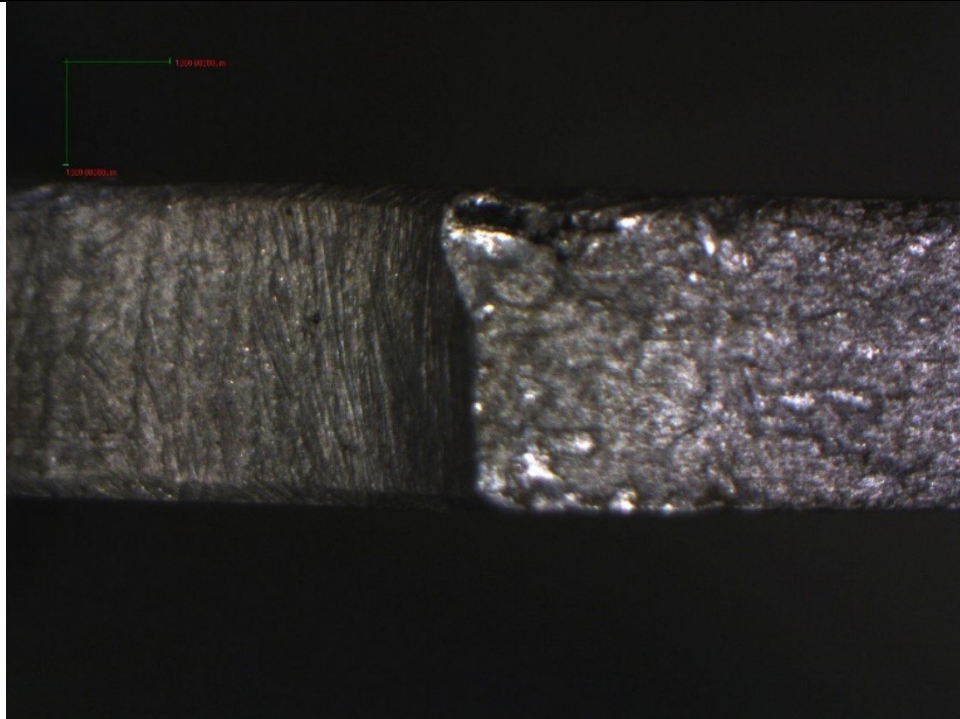
Slika 17. Prijelomna površina diska 1-1



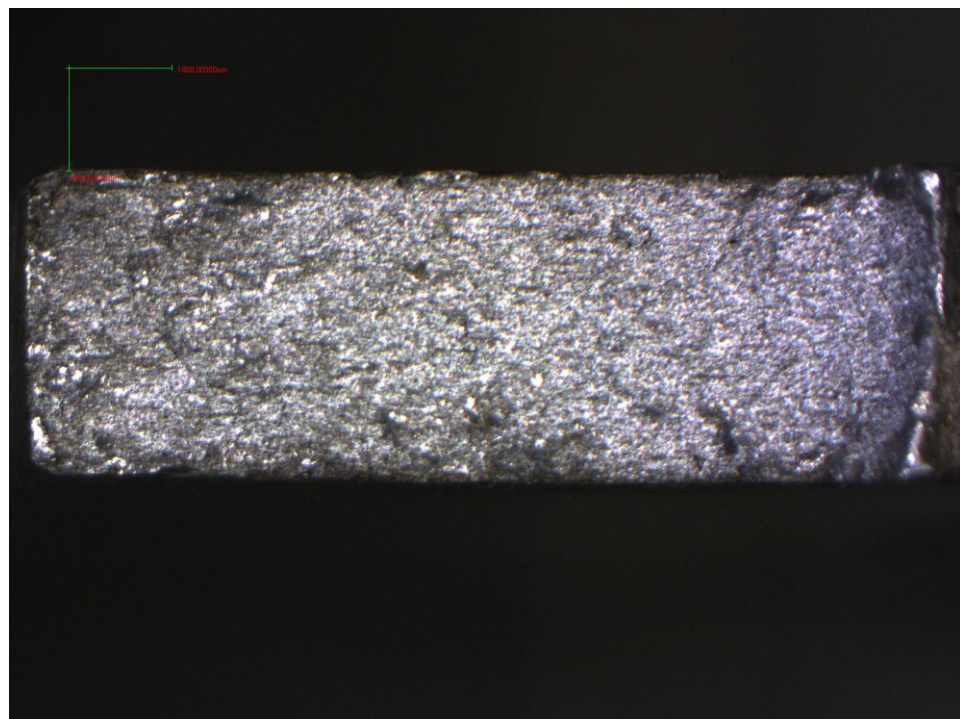
Slika 18. Prijelomna površina diska 1-2



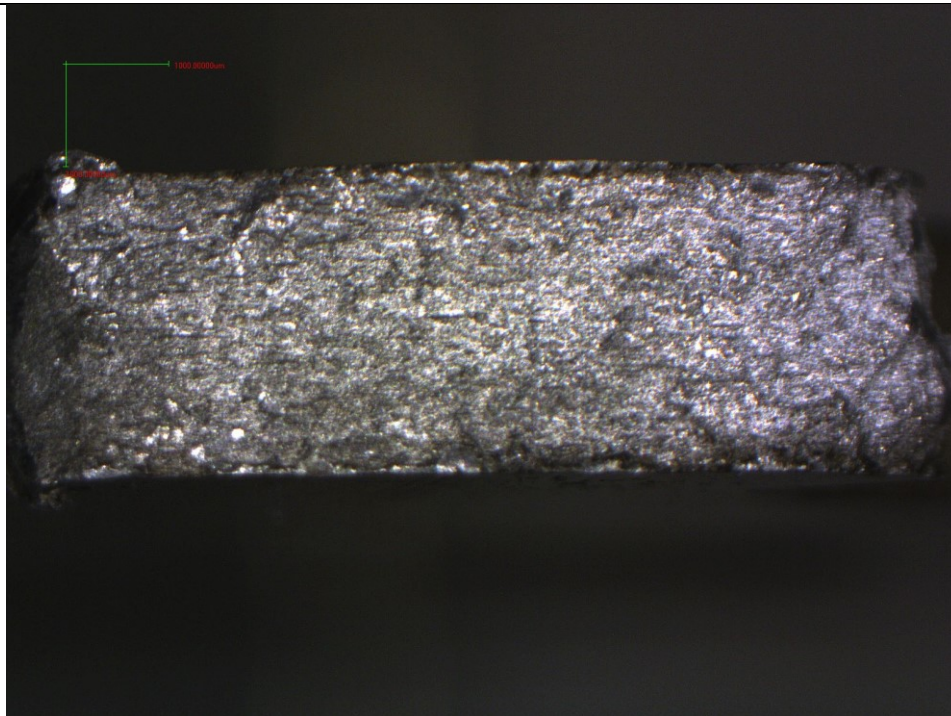
Slika 19. Prijelomna površina diska 2-1



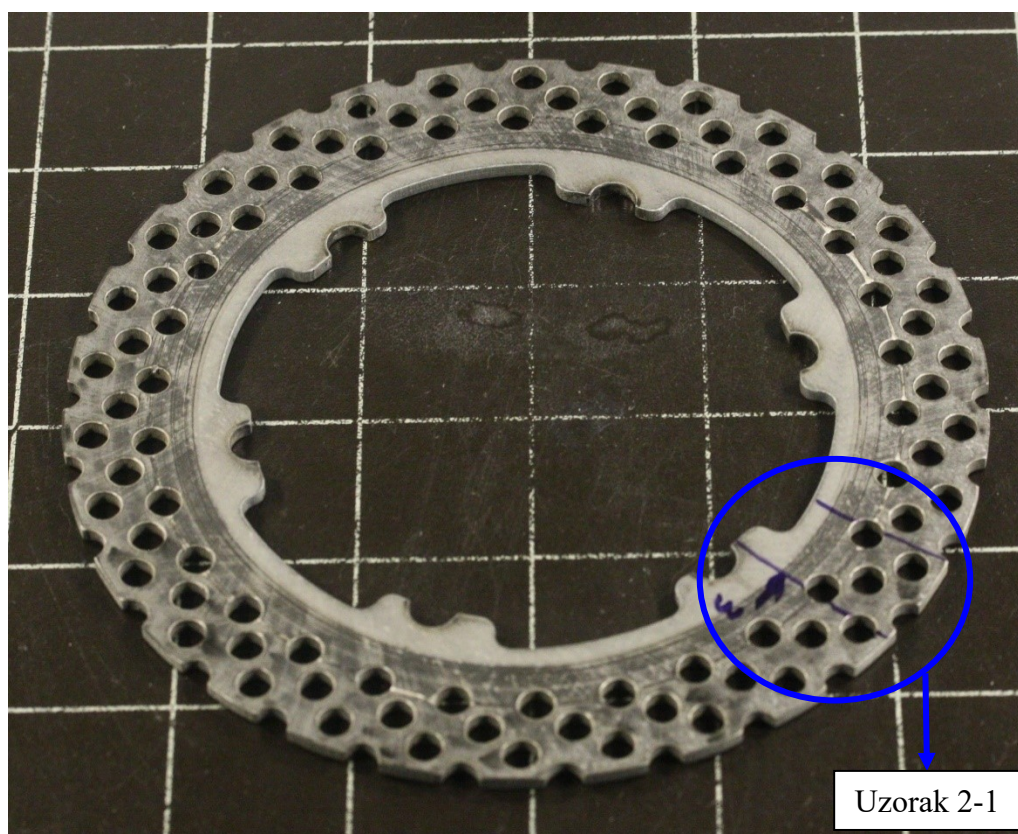
Slika 20. Prijelomna površina diska 2-2



Slika 21. Prijelomna površina diska 3-1



Slika 22. Prijelomna površina diska 3-2

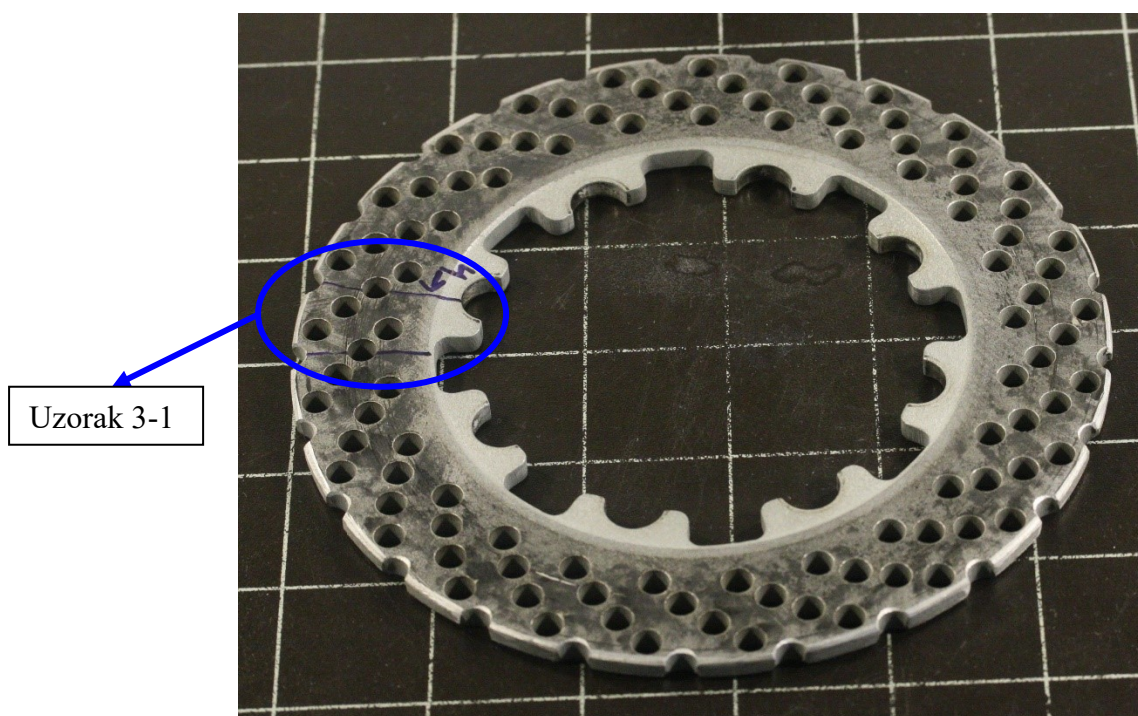


Slika 23. Kočioni disk 2 (čitavi)

Na slici 24. je prikazana fotografija uzorka 2-1 te je označena strana na kojoj se provodi ispitivanje. U ovom slučaju ispitana je poprečna strana uzorka.

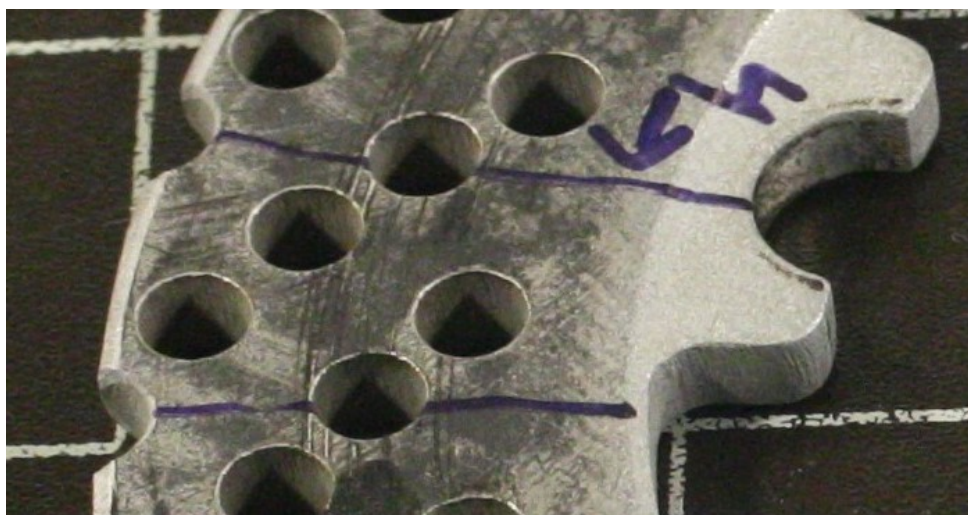


Slika 24. Uzorak 2-1



Slika 25. Koćioni disk 3 (čitavi)

Na slici 26. je prikazana fotografija uzorka 3-1 te je označena strana na kojoj se provodi ispitivanje. U ovom slučaju ispitana je poprečna strana uzorka.



Slika 26. Uzorak 3-1

8.1.2. Metalografska priprema uzorka

8.1.2.1. Brušenje uzoraka

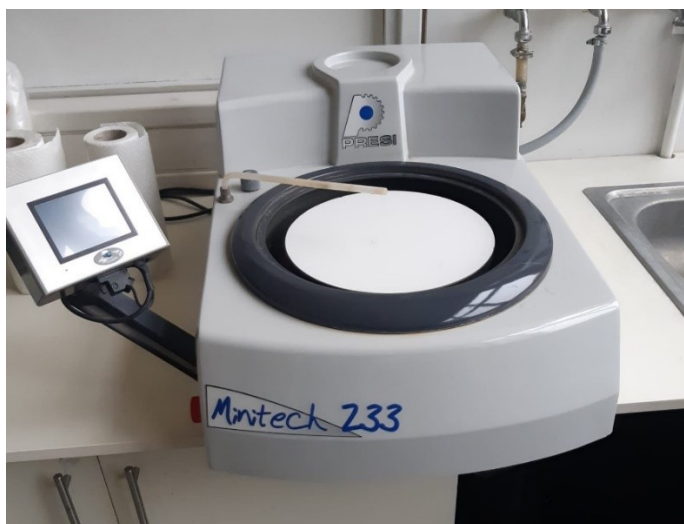
Brušenje je precizan postupak završne obrade odvajanjem čestica kojim se otklanjaju tragovi rezanja ravnog, cilindričnog ili složenog oblika. Postupak brušenja se može izvoditi ručno, strojno ili automatski, a postoji fino ili grubo brušenje. Brušenje se pretežito izvodi brusilicama, a odabir brusnog papira ovisi o materijalu koji je brusi.

Parametri brušenja:

- Podloga
- Abraziv (materijal)
- Veličina abraziva
- Lubrikant
- Sila
- Vrijeme
- Brzina okretanja

Postupak brušenja se izvodi u pet koraka s različitim granulacijama abraziva. Na početku se koristi brusni papir najveće granulacije, a kasnije se koriste brusni papiri sve manje i manje granulacije. Tijekom brušenja se mora paziti da se brušenje površine izvodi ravnomjerno. Za brušenje uzoraka koristi se uređaj proizvođača Presi modela Minittech 233.

Korišteni uređaj za brušenje prikazan je na slici 27., a parametri postupka brušenja su prikazani u tablici 1.



Slika 27. Uređaj za brušenje Presi Minitech 233

Tablica 1. Parametri brušenja

Broj brušenja	1.	2.	3.	4.	5.
Podloga	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir
Abraziv	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Veličina zrna	P320	P600	P1200	P2400	P4000
Hlađenje i podmazivanje	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda
Brzina vrtnje (okr/min)	300	300	300	300	300
Sila pritiska (N)	Ručna	Ručna	Ručna	Ručna	Ručna
Vrijeme	Do poravnanja	*	*	*	*

* dok se ne uklone tragovi prethodne obrade

8.1.2.2. Poliranje uzoraka

Poliranje uzoraka se provodi nakon postupka brušenja tijekom kojeg se skidaju tragovi brušenja. Tim postupkom se dobiva sjajna i glatko obrađena površina. Postupak poliranja se može izvoditi ručno ili automatski.

Poliranje se izvodi u dva koraka korištenjem dijamantne paste i tekućine za poliranje (koja ima funkciju paste) različitih veličina abraziva. Za poliranje uzoraka koristi se uređaj proizvođača Struers modela DAP-V.

Korišteni uređaj za poliranje prikazan je na slici 28., a parametri postupka poliranja su prikazani u tablici 2.

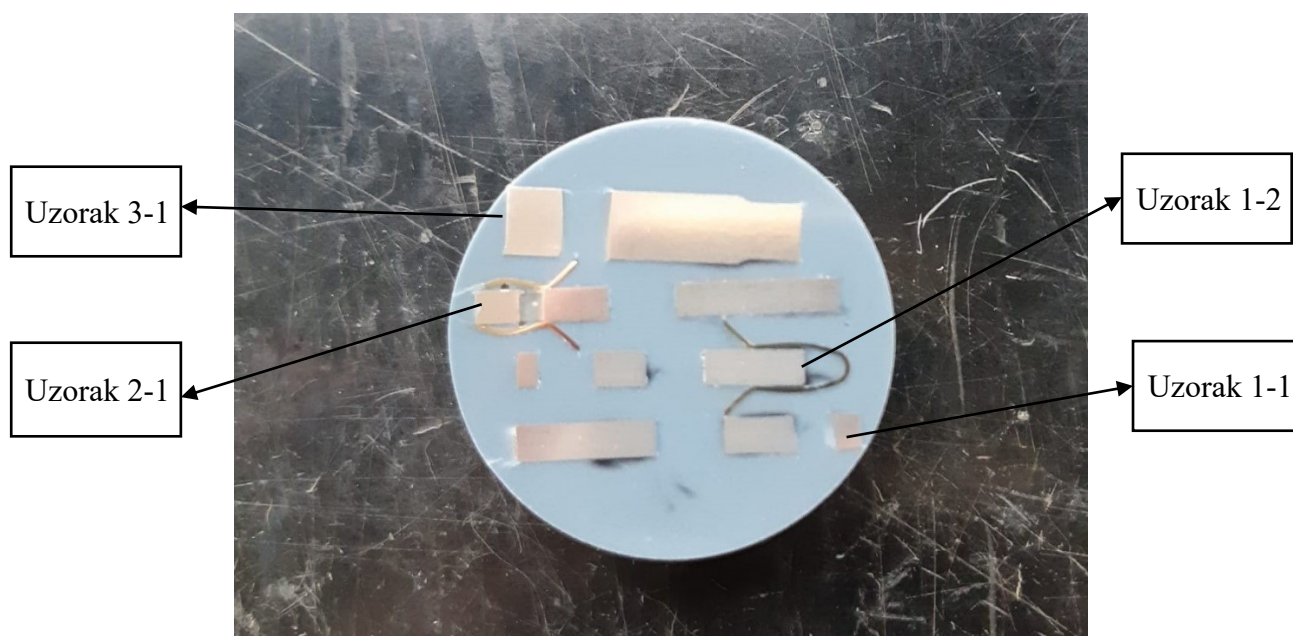


Slika 28. Uređaj za poliranje Struers DAP-V

Tablica 2. Parametri poliranja

Broj poliranja	1.	2.
Podloga	Tkanina	Tkanina
Abraziv	Dijamantna pasta	Tekućina za poliranje
Veličina abraziva (μm)	3	0,03
Hlađenje i podmazivanje	Lubrikant	Lubrikant
Brzina vrtnje (okr/min)	150	150
Sila pritiska (N)	20	20
Vrijeme (min)	2	1

Nakon poliranja uzorci se ispiru i spremni su za promatranja pod mikroskopom. Uzorci u poliranom stanju su prikazani na slici 29.



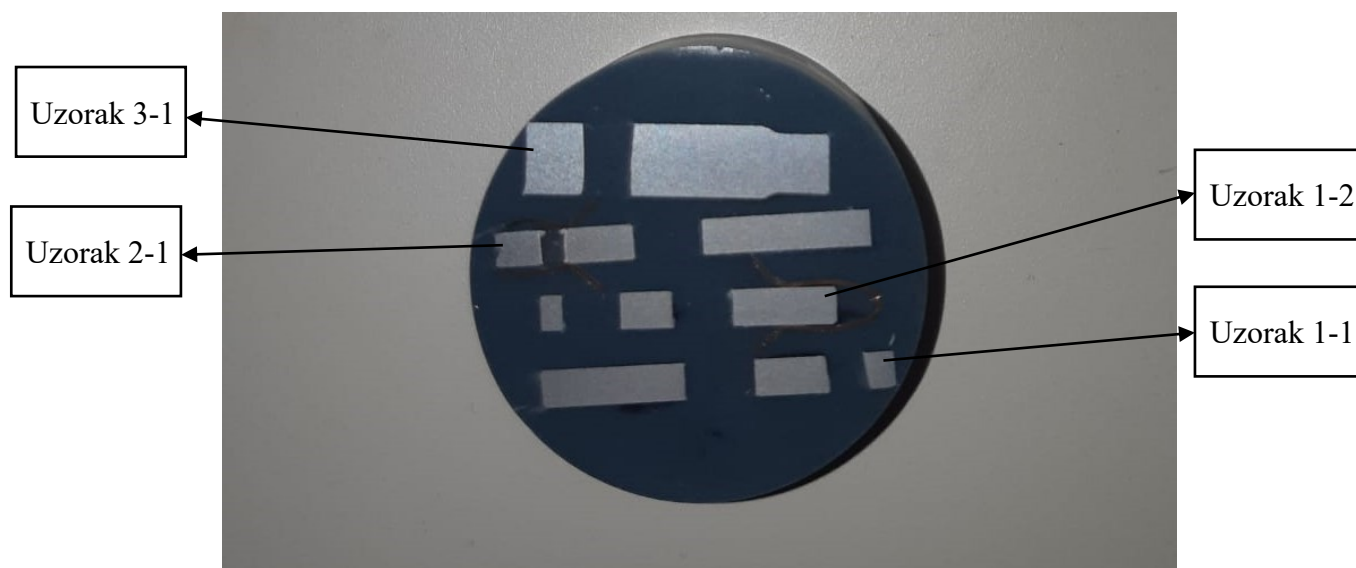
Slika 29. Uzorci kočionih diskova u poliranom stanju

8.1.2.3. Nagrizanje uzoraka

Nagrizanje je postupak selektivnog korodiranja površine uzorka s ciljem dobivanja mikrostrukture površine. Postupak nagrizanja se izvodi tako da se uzorci umoče u Kellerov reagens, otopina dušične, klorovodične i fluorovodične kiseline, a potom u vodu kako bi se zaustavila kemijska reakcija. Nagrizanje je provedeno u digestoru koji je prikazan na slici 30., a uzorci u nagriženom stanju su prikazani na slici 31.



Slika 30. Digestor



Slika 31. Uzorci kočionih diskova u nagriženom stanju

8.1.3. Analiza mikrostrukture kočionih diskova

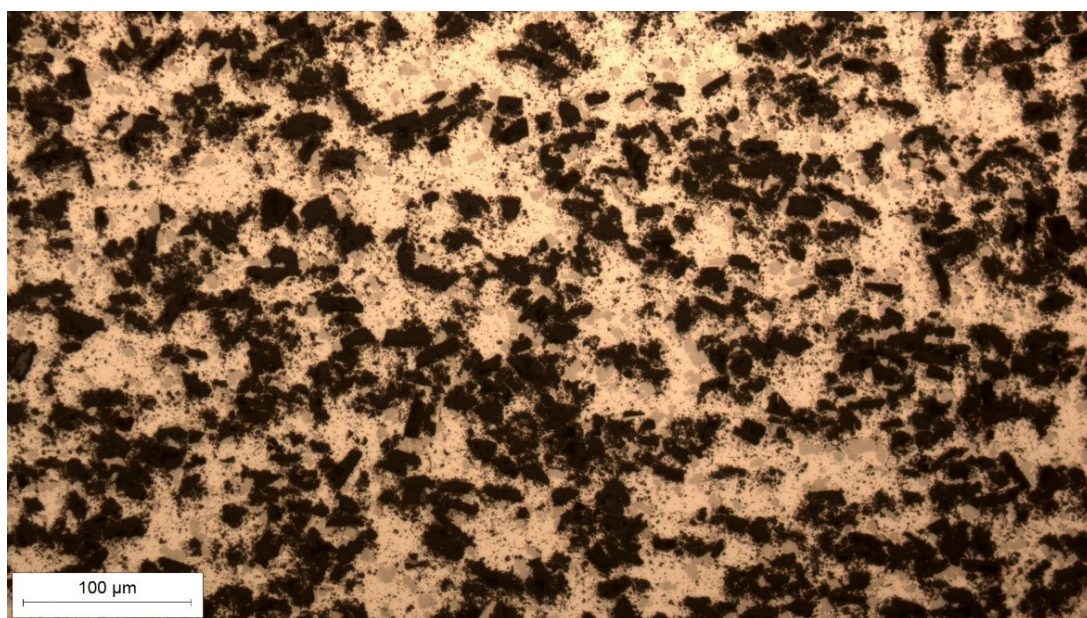
8.1.3.1. Analiza mikrostrukture uzoraka u poliranom stanju

Nakon poliranja uzorci su spremni za mikroanalizu, odnosno fotografiranje svjetlosnim mikroskopom. Fotografiranje mikroanalize provodi se uređajem Olympus GX51 koji je prikazan na slici 32. Za svaki uzorak fotografirano je po 5 fotografija s povećanjima 50x, 100x, 200x, 500x i 1000x. Na slikama 33. – 36. su prikazane samo fotografije s povećanjem 200x.



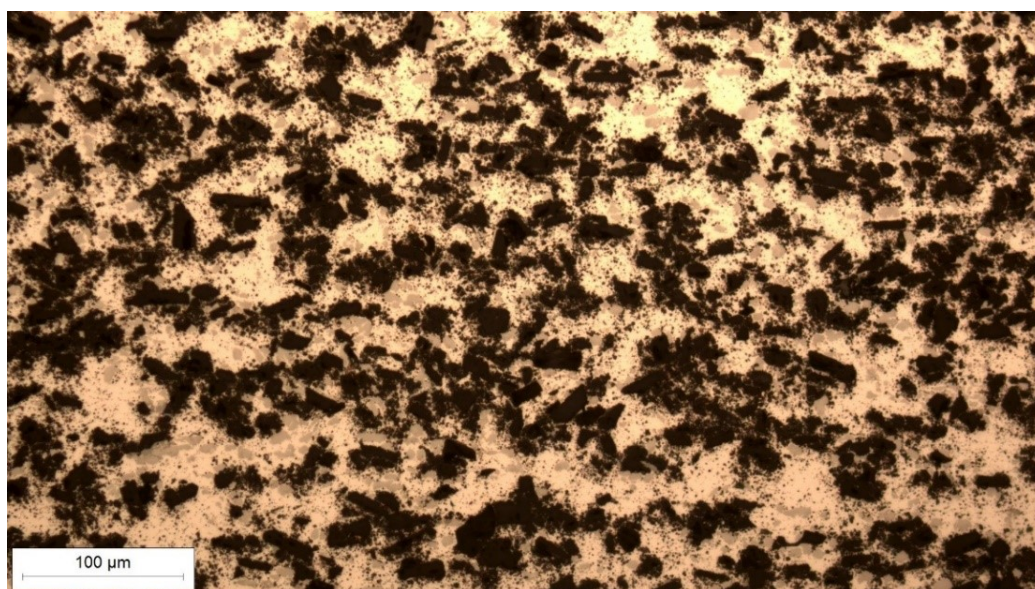
Slika 32. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Uzorak 1-1



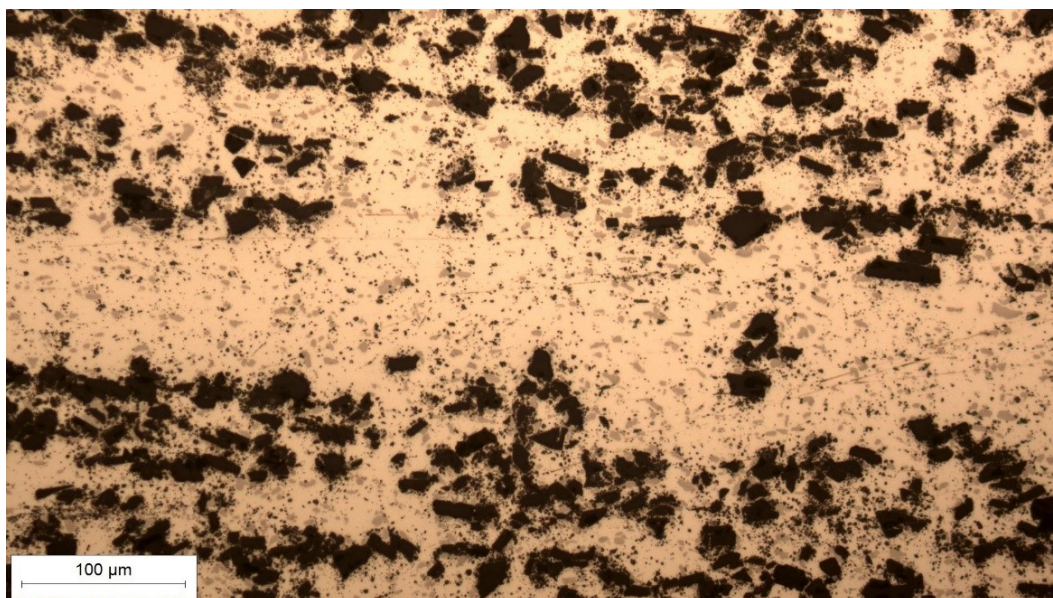
Slika 33. Mikrostruktura polirane površine uzorka 1-1 pri povećanju 200x

Uzorak 1-2



Slika 34. Mikrostruktura polirane površine uzorka 1-2 pri povećanju 200x

Uzorak 2-1



Slika 35. Mikrostruktura polirane površine uzorka 2-1 pri povećanju 200x



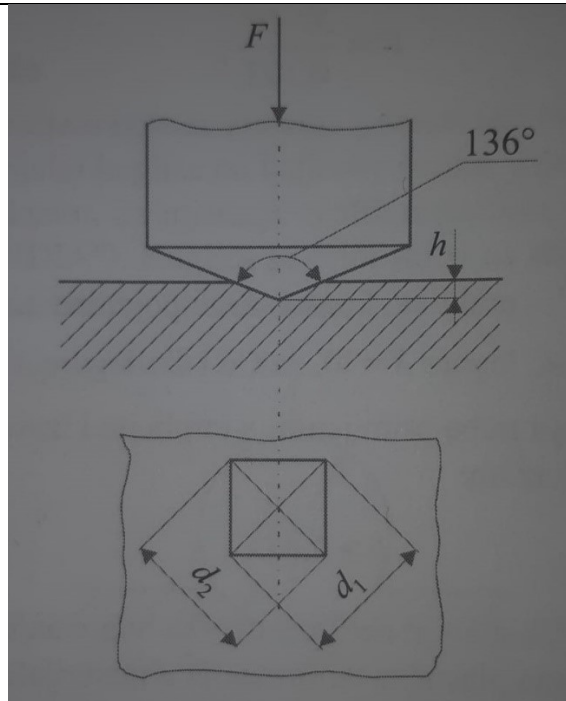
Slika 36. Mikrostruktura polirane površine uzorka 3-1 pri povećanju 200x

8.1.3.1. Analiza mikrostrukture uzoraka u nagriženom stanju

Nagrižanje površine se radi kako bi se vidjele granice zrna i ostale strukturne tvorevine koje se ne vide u poliranom stanju. U ovom dijelu nisu priložene fotografije nagriženih površina pod raznim povećanjima jer je razlika između nagriženih i poliranih površina neprimjetna.

8.2. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće uzoraka provedeno je metodom po Vickersu čiji je penetrator, koji je izrađen od dijamanta, istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od 136° . Naime ovakav kut nije nasumično odabran jer utiskivanjem penetratora s takvim kutem dobivena vrijednost tvrdoće ne ovisi o primijenjenoj sili. Stoga se primjenom iste sile mogu mjeriti tvrdoće i mekih i tvrdih materijali, a također se mjerenje tvrdoće istog materijala može mjeriti primjenjivanjem različitih opterećenja. Nakon utiskivanja ovakvog penetratora u materijalu ostaje otisak piramide koji je prikazan na slici 37 [8].



Slika 37. Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode [8]

Mjerenje tvrdoće se provodi dvjema metodama HV0,2 i HV2. Mjerenje tvrdoće HV0,2 provedeno je tvrdomjerom PMT 3 koji je prikazan na slici 38.



Slika 38. Tvrdomjer PMT 3

Za svaki uzorak se mjeri po pet različitih mjerenja tvrdoće i nakon toga se izračuna srednja vrijednost tvrdoće. Tvrdoća se za svaki pojedini uzorak mjeri na pet različitih lokacija koje su međusobno dovoljno udaljene. Mjerenje tvrdoće metodom HV2 se provodi na uzorcima dijelova diskova koji se troše i na dijelovima koji se ne troše, dok se takva mjerenja metodom HV0,2 ne rade. Rezultati mjerenja metodom HV0,2 su jako raznolika te onda nije potrebno mjeriti tvrdoću na uzorcima dijelova diskova koji se trošili i na dijelovima koji se ne troše. Sva mjerenja tvrdoća su prikazana u tablicama 3., 4. i 5.

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2

	Tvrdoća u otisku 1	Tvrdoća u otisku 2	Tvrdoća u otisku 3	Tvrdoća u otisku 4	Tvrdoća u otisku 5	Srednja vrijednost HV0,2
Uzorak 1-1	52	102	52	104	78	78
Uzorak 1-2	74	109	100	103	80	93
Uzorak 2-1	101	100	83	101	99	97
Uzorak 3-1	63	65	70	74	85	71

Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće HV2 na dijelu diska koji se trošio

	Tvrdoća u otisku 1	Tvrdoća u otisku 2	Tvrdoća u otisku 3	Tvrdoća u otisku 4	Tvrdoća u otisku 5	Srednja vrijednost HV2
Uzorak 1-1	101	96	105	108	107	103
Uzorak 1-2	103	105	104	108	110	106
Uzorak 2-1	108	114	121	107	114	113
Uzorak 3-1	91	95	89	95	96	93

Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV2 na dijelu diska koji se nije trošio

	Tvrdoća u otisku 1	Tvrdoća u otisku 2	Tvrdoća u otisku 3	Tvrdoća u otisku 4	Tvrdoća u otisku 5	Srednja vrijednost HV2
Uzorak 1-1	97	100	103	99	98	99
Uzorak 1-2	99	100	101	102	96	100
Uzorak 2-1	99	106	106	104	98	103
Uzorak 3-1	87	90	93	85	88	89

9. ZAKLJUČAK

Kočioni sustav je jedan od najvažnijih sustava kod vozila. Kočnicama se lako i sigurno može zaustaviti vozilo, a sama vožnja s ispravnim kočnicama je puno sigurnija. Postoje različite izvedbe kočnica, a jedna od najčešće korištenih izvedbi kočnica u modernim vozilima su i disk kočnice. Jako je bitno da su materijali za izradbu dijelova disk kočnica kvalitetni i izdržljivi. Tijekom ispitivanja bolida Formula student došlo je do puknuća jednog kočionog diska te je sproveden postupak karakterizacije materijala puknutog diska te dva čitava diska kako bi se došlo do zaključka zbog čega je došlo do puknuća.

Analizom mikrostruktura uzoraka kočionih diskova ustanovilo se da nema nepravilnosti u mikrostrukturama uzoraka kočionih diskova zbog kojih bi došlo do puknuća diska. Isto tako mjerenjem tvrdoće kočionih diskova (korištenih i novih) te njihovom usporedbom izmjerenih tvrdoća se ustanovilo da nema značajnih odstupanja koja bi dovela do puknuća.

Kako se provedenim metalografskim metodama ispitivanja nije ustanovio razlog puknuća, pretpostavlja se da je do puknuća kočionog diska došlo zbog lokalnog neravnomjernog preopterećenja prilikom procesa kočenja tijekom utrke. Također se predlaže da se provede laboratorijsko ispitivanje kočionih obloga kako bi se utvrdio i isključio eventualan njihov utjecaj na pojavu loma kočionog diska.

10. LITERATURA

- [1] Rashid, A. (2014) 'Overview of disc brakes and related phenomena – a review', Int. J. Vehicle Noise and Vibration, Vol. 10, No. 4, pp.257–301.
- [2] Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, preveo: Goran Popović, Tehnika motornih vozila, Hrvatska obrtnička komora, Pučko otvoreno učilište Zagreb, Zagreb, 2004.
- [3] Dinko Mikulić: Motorna vozila, Teorija kretanja i konstrukcija, Veleučilište Velika Gorica, Velika Gorica, 2020.
- [4] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [5] F. Kovačiček, I. Žmak: Proizvodni postupci za izradu metalnih kompozita, Zbornik radova savjetovanja MATRIB2004, Vela Luka, lipanj 2004., s. 349-356
- [6]
https://www.researchgate.net/publication/343128161_A_fundamental_review_on_composite_materials_and_some_of_their_applications_in_biomedical_engineering (13.2.2022.)
- [7]
https://www.researchgate.net/publication/221672305_Metal_Matrix_Composite_Brake_Rotor_Historical_Development_and_Product_Life_Cycle_Analysis (13.2.2022.)
- [8] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Ćurković: Materijali 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.