

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Vedran Palfi

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se svim profesorima, asistentima i stručnom osoblju Fakulteta strojarstva i brodogradnje na prenesenom znanju i spoznajama tijekom studija. Posebno se zahvaljujem tehničkim suradnicima Ivanu Vovku i Romanu Divjaku te prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu, na stručnim savjetima, prijedlozima i komentarima koji su pridonijeli kvaliteti ovog rada.

Vedran Palfi

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:
Vedran Palfi

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Vedran Palfi

Mat. br.: 0035183339

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Karakterizacije strukture materijala kočionog diska

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Characterisation of brake disc microstructure

Opis zadatka:

Kočioni disk predstavlja jedan od najvažnijih dijelova automobila sa stajališta sigurnosti. Stoga se na sastav i strukturu materijala od kojih su diskovi izrađeni postavljaju strogi zahtjevi. U ovom radu potrebno je napraviti kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture materijala diska, te ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je nabaviti korišteni disk, izrezati dijelove diska za analizu, te napraviti i analizirati strukturu materijala diska na karakterističnim mjestima. Također je potrebno ispitati i osnovna mehanička svojstva analiziranog diska na unaprijed definiranim mjestima. Dobivene rezultate laboratorijskih ispitivanja potrebno je obraditi i na temelju njih donijeti određene zaključke. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

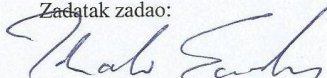
Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

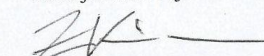
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sadržaj rada:

I Popis slika	
II Popis dijagrama	
III Popis oznaka	
IV Popis tablica	
1. Uvod	
1.1 O sustavu kočnja.....	1
1.2 Uloga disk kočnica	2
1.3 Fizikalna svojstva materijala disk kočnice	3
1.4 Mikrostruktura i kemijski sastav materijala disk kočnice	4
1.4.1 Kemijski sastav	4
1.4.2. Mikrostruktura.....	6
1.5 Trošenje	7
1.5.1 Toplinski umor	8
1.5.2. Proračun toplinsko-mehaničkih naprezanja	9
1.5.2 Procjena radnog vijeka disk kočnice	11
1.6 Razvoj materijala za disk kočnice	12
1.7 Alternativni materijali u projektiranju disk kočnice	15
1.7.1 Kompoziti s aluminijskom matricom	16
1.7.1.1 Ojačala.....	17
1.7.1.2 Aluminijska matrica	19
1.7.1.3 Trošenje kompozita s aluminijskom matricom	20
2. Eksperimentalni dio.....	23
2.1 Metalografska priprema uzorka.....	24
2.1.1. Uzimanje (izrezivanje) reprezentativnog uzorka	24
2.1.2. Brušenje uzorka.....	24
2.1.3. Poliranje uzorka.....	26
2.1.4 Nagrizanje uzorka	28
2.2 Analiza mikrostrukture u poliranom stanju.....	29
2.2.1 Tip grafitnih listića	30
2.2.2 Veličina grafitnih listića	30
2.2.3. Karakterizacija strukture u poliranom stanju	31
2.3 Metoda mjerenja tvrdoće.....	38
2.4 Analiza mikrostrukture u nagriženom stanju	40
3. Zaključak	41
4. Literatura	42

I Popis slika:

- Slika 1 – Shematski prikaz kočionog sustava [2].
- Slika 2 – Temperatura raspodjela na površini diska [4].
- Slika 3 – Shematski prikaz parametara koji definiraju morfologiju grafitnih listića [6].
- Slika 4 – Tipovi listića grafita prema ASTM normi [7].
- Slika 5 – Sippov i Klingensteinov strukturni dijagram [7].
- Slika 6 – Disk kočnica s naznačenim vitalnim dijelovima [10].
- Slika 7 – Shematski prikaz cijelog diska, unutrašnjeg pritiska i vanjskog pritiska glavčine [9].
- Slika 8 – Prvi poznati automobil [11].
- Slika 9 – Disk kočnica izrađena od kompozita s aluminijskom matricom [12].
- Slika 10 – Mogući oblici ojačala [13].
- Slika 11 – Tijek pripreme uzorka za metalografsku analizu
- Slika 12 – Uzorak nakon izrezivanja
- Slika 13 – Uređaj za brušenje i poliranje Buehler Phoenix Alpha
- Slika 14 - Uređaj Struers Dap-V
- Slika 15 – Svjetlosni mikroskop GX51
- Slika 16 – Naznačena mjesta uzimanja snimaka
- Slika 17 – Mikrostruktura polirane površine snimke 1 pri povećanju od 100x
- Slika 18 – Mikrostruktura polirane površine snimke 1 pri povećanju od 200x
- Slika 19 – Mikrostruktura polirane površine snimke 2 pri povećanju od 100x
- Slika 20 – Mikrostruktura polirane površine snimke 2 pri povećanju od 200x
- Slika 21 – Mikrostrukutra polirane površine snimke 3 pri povećanju od 100x
- Slika 22 – Mikrostruktura polirane površine snimke 3 pri povećanju od 200x
- Slika 23 – Mikrostruktura polirane površine snimke 4 pri povećanju od 100x
- Slika 24 – Mikrostruktura polirane površine snimke 4 pri povećanju od 200x
- Slika 25 – Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Brinellu [17].
- Slika 26 - Mikrostruktura nakon nagrizanja pri povećanju od 50x

II Popis dijagrama:

Dijagram 1 – Ovisnost toplinske provodljivosti o sadržaju grafita [5]

Dijagram 2 – Rezultati eksperimenta F.Galtona koji je koristio poseban simulator kotača željezničkih vozila [6]

Dijagram 3 – Pad koeficijenta trenja s povećanjem sadržaja titana u disk kočnici [6]

Dijagram 4 – Ovisnost brzine trošenja o opterećenju kod kompozita s Al matricom različitih sadržaja SiC [15]

Dijagram 5 – Utjecaj sadržaja SiC na duktilnost [16]

Dijagram 6 – Utjecaj sadržaja SiC na vlačnu čvrstoću [16]

III Popis oznaka:

A	površina grafitnog listića, [μm^2]
CE	ekvivalent ugljika
d	veličina disperziranih čestica, [μm]
d_1, d_2	promjer dijagonala otiska, [mm]
D	promjer kuglice, [mm]
D_p	razmak između disperziranih čestica, [μm]
E	modul elastičnosti, [N/mm^2]
F	sila, [N]
h_B	dubina utisnuća, [mm]
HB	Brinellova tvrdoća
L	stvarna duljina grafitnog listića, [μm]
N_f	broj ciklusa do kvara
P	opseg grafitnog listića, [μm]
P	granični pritisak, [N/mm^2]
S	površina kuglice kalote, [mm^2]
S_z	stupanj zasićenja
t_{hlad}	vrijeme hlađenja
T	temperatura, [K]
V_p	volumni udio, [%]
X	primarna os grafitnog listića
Y	sekundarna os grafitnog listića
α	toplinska rastreznjivost, [K^{-1}]
ε_a	primjenjena amplituda istezanja
ε'_f	koeficijent amplitude istezanja
σ'_f	koeficijent amplitude naprezanja
σ_1	tangencijalno naprezanje, [N/mm^2]
σ_2	radijalno naprezanje, [N/mm^2]

IV Popis tablica:

Tablica 1 – Kronološki slijed najčešće korištenih materijala u procesu kočenja [6]

Tablica 2 – Primjeri i primjena odabranih kompozita s disperzijom [7]

Tablica 3 – Prikaz svakog stupnja brušenja te njihovih parametara

Tablica 4 – Parametri postupka poliranja

Tablica 5 – Tipovi struktura listićavog grafita

Tablica 6 – Klasifikacija grafitnih listića prema veličini

Tablica 7 – Veličina grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u poprečnom smjeru

Tablica 8 – Veličina grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u uzdužnom smjeru

Tablica 9 – Udjel grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u uzdužnom smjeru

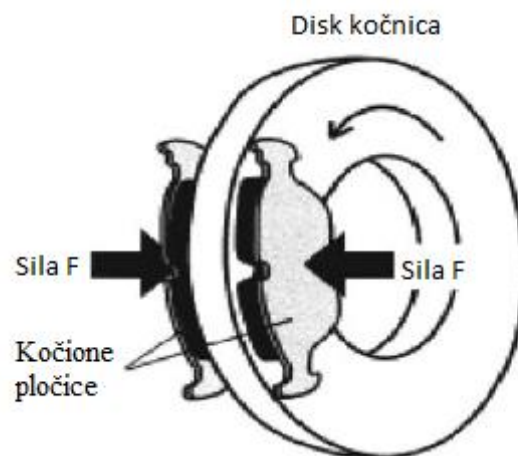
Tablica 10 – Udjel grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u poprečnom smjeru

Tablica 11 – Rezultati mjerenja tvrdoće

1. Uvod

1.1 O sustavu kočenja

Sklop za kočenje je u osnovi korišten kao naprava u gotovo svakom stroju te izvršava naredbe kao što su: usporavanje, zaustavljanje te odmaranje. Proces kočenja je zapravo stvar energetske ravnoteže. Tijekom procesa dolazi do pretvorbe mehaničke energije kretajućeg vozila u nekakav drugi oblik te je rezultat toga smanjenje brzine vozila. Kinetička energija je pretvorena u toplinsku energiju efektom suhog trenja te je ona u konačnici raspršena u okoliš. Ukoliko energija topline postane previsoka, dijelovi kočionog sustava će postati manje učinkoviti jer se toplina neće moći dovoljno brzo raspršiti. Takva pojava uzrokuje istrošenje kočnica. Na slici 1 prikazan je shematski prikaz kočionog sustava. [1].



Slika 1: Shematski prikaz kočionog sustava [2].

Idealno, materijal korišten unutar sustava kočenja mora zadovoljiti slijedeće kriterije:

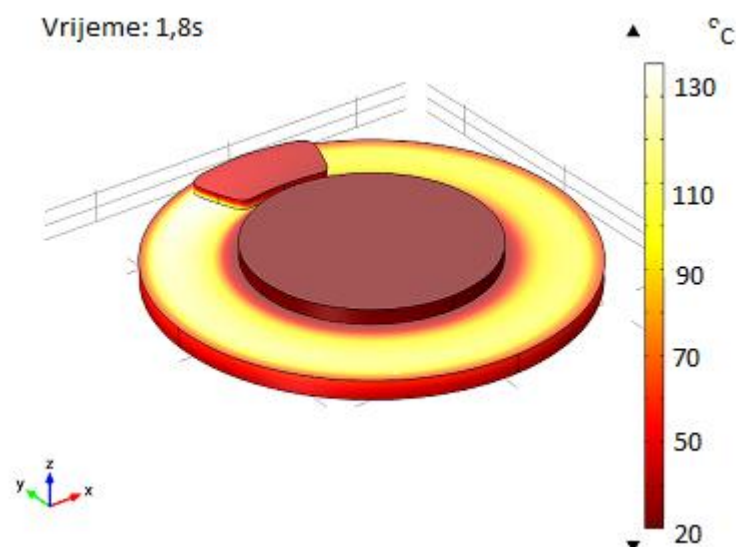
- dobra toplinska provodljivost
- korozijska postojanost
- niska razina buke
- niska gustoća
- dugotrajnost
- ravnomjerno raspoređeno trenje
- niska stopa trošenja
- niska cijena

Kombiniranjem različitih materijala raznih dimenzija i oblika postižu se zadovoljavajuća svojstva. Danas se koriste više od 2000 različitih materijala u komercijalnoj proizvodnji komponenata pri kočenju. Geometrije, dimenzije i kemijski sastav kočnica utječu na toplinski protok, dugotrajnost, proizvodnju buke, mogućnost održavanja te u konačnici na učinak dvaju glavnih komponenata kočionog sustava, bubnja i disk kočnice. U usporedbi s bubnjom, disk kočnice (rotori) imaju višu otpornost na trošenje te lakše održavanje, posebice zbog svoje geometrije.

1.2 Uloga disk kočnica

Sustav kočenja većinu današnjih automobila zasnovana je na disk kočnicama te se kao materijal najčešće koristi sivi lijev. Metalurška svojstva sivog lijeva određuju snagu kočenja, proizvedenu buku, njihovo trošenje te karakteristike ponašanja pri kočenju. Ukoliko je disk kočnica premekana, ubrzano će se trošiti. Nasuprot tome, ako je pretvrda, lakše će doći do loma.

Dvije najvažnije uloge disk kočnica su prijenos mehaničkih sila te raspršavanje topline nastale tijekom rada. Temperatura rada kod vozila, ovisno o snazi motora, varira između sobne temperature pa do čak 700 °C. Temperaturna raspodjela na površini diska prikazana je na slici 2. Ovako široki opseg stvara visoke temperaturne gradijente koji uzrokuju toplinski umor. Međutim, disk je također izložen radnjama cikličkog mehaničkog opterećenja koje mu zadaju kočione pločice tijekom zaustavljanja što pridonosi trošenju komponente. Stoga je disk u stvarnim uvjetima rada izložen relativno visokom termomehaničkom opterećenju. [3].



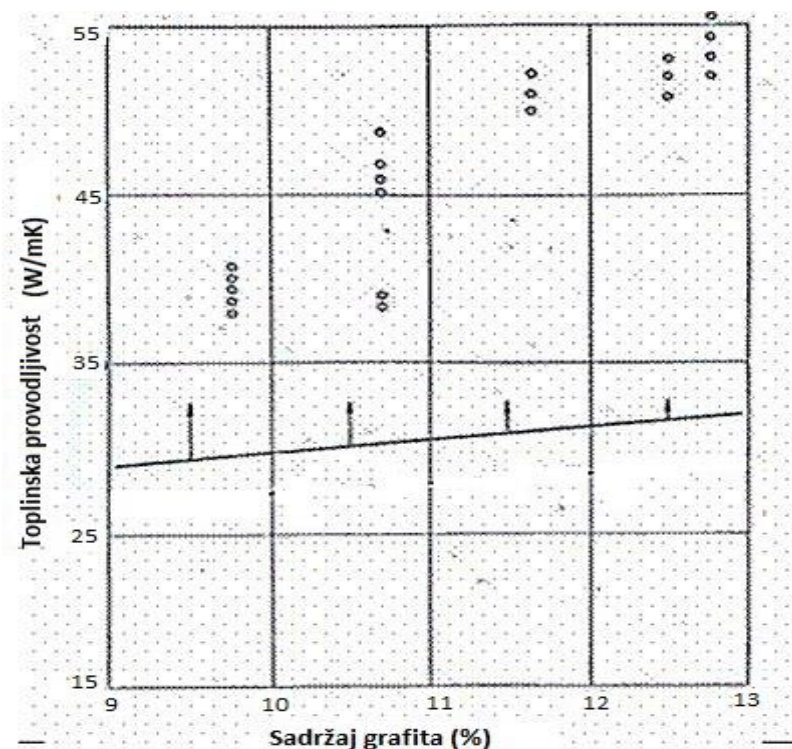
Slika 2: Temperaturna raspodjela na površini diska [4].

1.3 Fizikalna svojstva materijala disk kočnice

Osim niskih troškova proizvodnje, Fe-C lijeveve karakterizira odlična toplinska provodljivost što doprinosi raspršivanju toplinske energije proizvedene uslijed trenja nastalog tijekom dodira s kočionim pločicama. Sposobnost prigušenja vibracija također predstavlja jedno od primarnih karakteristika kočionih diskova.

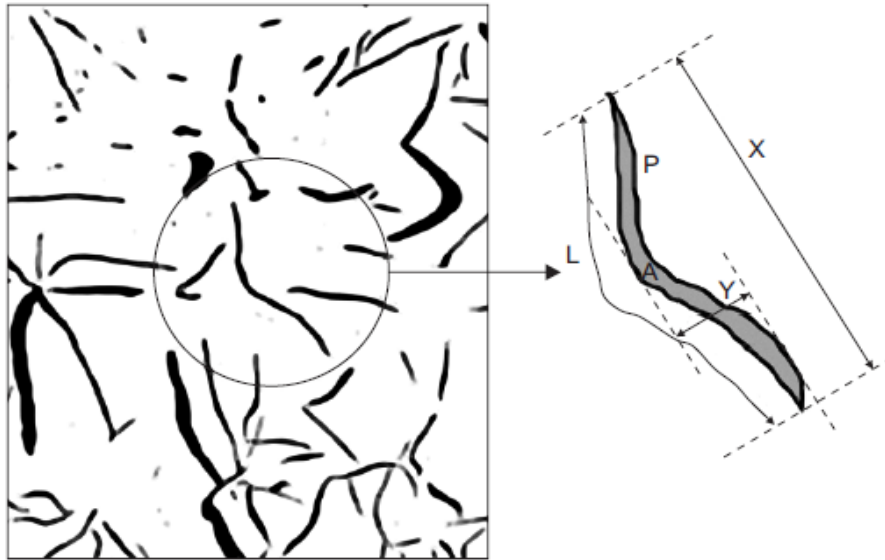
Jedan od načina kako poboljšati sposobnost prijenosa topline je da se poveća toplinska difuzija. Toplinska difuzija se koristi kako bi se procjenila toplinska provodljivost te se pomoću nje također može izmjeriti koliko dobro materijal izmjenjuje toplinu.

Disk kočnice sa poboljšanom toplinskom provodljivošću imaju i visoku dinamičku izdržljivost što im produkuje radni vijek. Prema tome, ukoliko se svojstva toplinskog provođenja mogu poboljšati bez da se ostali zahtjevi pri tome ne naruše, učinak disk kočnice se može povećati. Glavni čimbenici koji utječu na prijenos topline u željeznim lijevovima su raspodjela, veličina i morfologija grafita jer imaju puno veću toplinsku provodljivost nego matrica. Njihova toplinska provodljivost je proporcionalna omjeru između površine i volumena. Stoga će željezni lijevovi sa kugličastim grafitom lošije provoditi toplinu nego listićasti grafiti. Također je poznato da što je listić dulji, veći će biti stupanj difuzije i provodljivosti. U dijagramu 1 se može vidjeti ovisnost toplinske provodljivosti o sadržaju grafita.



Dijagram 1: Ovisnost toplinske provodljivosti o sadržaju grafita [5].

Znajući kako morfologija grafitu utječe na prijenos topline, moguće je analizirati kako promjene tijekom procesa lijevanja disk kočnica mogu promijeniti njihove performanse. Iz slike 3 se mogu vidjeti definirani parametri koji opisuju morfologiju grafitnih listića. Danas postoje kompjuterski programi koji su u stanju izmjeriti morfološke parametre grafitnih listića tako da se analiziraju dvodimenzionalni prikazi. [6].



Slika 3: Shematski prikaz parametra koji definiraju morfologiju grafitnih listića [6].

- P – Opseg grafitnog listića
- A – Površina grafitnog listića
- L – Stvarna duljina grafitnog listića
- X – Primarna os grafitnog listića
- Y – Sekundarna os grafitnog listića

1.4 Mikrostruktura i kemijski sastav materijala disk kočnice

1.4.1 Kemijski sastav

Sivi lijev je Fe-C legura s $> 2\%C$ koja je stabilno kristalizirana. Ukoliko je kemijski sastav modificiran tako da su dodani legirni elementi, mehanička svojstva će se izmijeniti. Drugim riječima, kako bi se odredila mehanička svojstva dvije su stvari vrlo bitne: brzina hlađenja i kemijski sastav.

Kako je kod čistih Fe-C legura stabilna kristalizacija moguća samo uz vrlo sporo hlađenje ($t_{\text{hlad}} \sim \infty$), to je za tehničke svrhe nužno da se leguri doda neki element koji forsira grafitizaciju, tako da se grafit postigne i uz konačnu brzinu hlađenja. To je kod sivog lijeva silicij.[7].

Kemijski sastav nije propisan normama i uobičajeno iznosi:

$$2,5 \% - 4,5 \% \text{C}$$

$$0,3 \% - 1,2 \% \text{Mn}$$

$$1 \% - 4 \% \text{Si}$$

$$0,4 \% - 1,5 \% \text{P}$$

$$< 0,1 \% \text{S}$$

Sivi lijev ovog sastava nije legiran, a Si, Mn, P i S se smatraju primjesama. Iako se mogu proizvesti i vrlo kvalitetni sivi lijevovi bez dodavanja legiranih elemenata uz reguliranje udjela ugljika, silicija i mangana te odgovarajućih parametara proizvodnje, uobičajeno se dodaju legirni elementi kako bi se postigla visoka čvrstoća sa visokim ekvivalentom ugljika te je time također i mikrostruktura manje osjetljiva na razlike u gustoći. Gotovo su svi legirni elementi skloni povećanju vlačne čvrstoće i žilavosti dok su kod sivih lijevova najučinkovitiji mangan, vanadij, molidben, krom i bakar. Mangan pouspješuje oblikovanje perlitne faze i povisuje čvrstoću i žilavost. Vanadij također poboljšava proces oblikovanja perlitne faze i prerađivanja grafitu. Molidben povisuje čvrstoću u uvjetima puzanja, korozije te visoke temperature. Krom povećava otpornost na koroziju i abraziju, a bakar predstavlja snažnog stabilizatora perlitne faze. [6].

Kemijski sastav se može izraziti preko:

a) Ekivalentna ugljika $CE = C + 1/3 \cdot (Si + P)$ čime se ostvaruje veza s Fe-C dijagramom

b) Stupnja zasićenja S_z koji se izračunava pomoću izraza:

$$S_z = \frac{\%C}{\%C^e} = \frac{\%C}{4,26 - \frac{1}{3}(\%Si + \%P)}$$

, vrijednost C^e pokazuje pomak eutektičke koncentracije ugljika i područje nižih vrijednosti.

Prema vrijednostima S_z razlikuju se:

Podeutektičke vrste sivog lijeva: $S_z < 1$,

Eutektičke vrste sivog lijeva: $S_z = 1$,

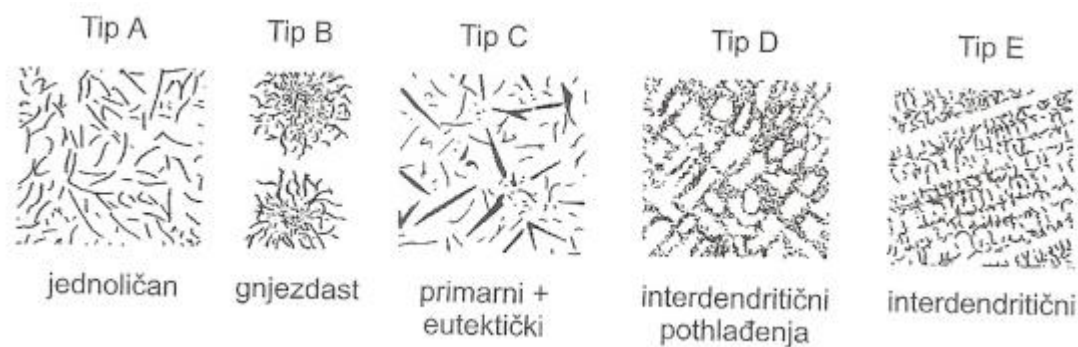
Nadeutektičke vrste sivog lijeva: $S_z > 1$.

1.4.2. Mikrostruktura

Mikrostruktura sivog lijeva je dvojna i sastoji se od

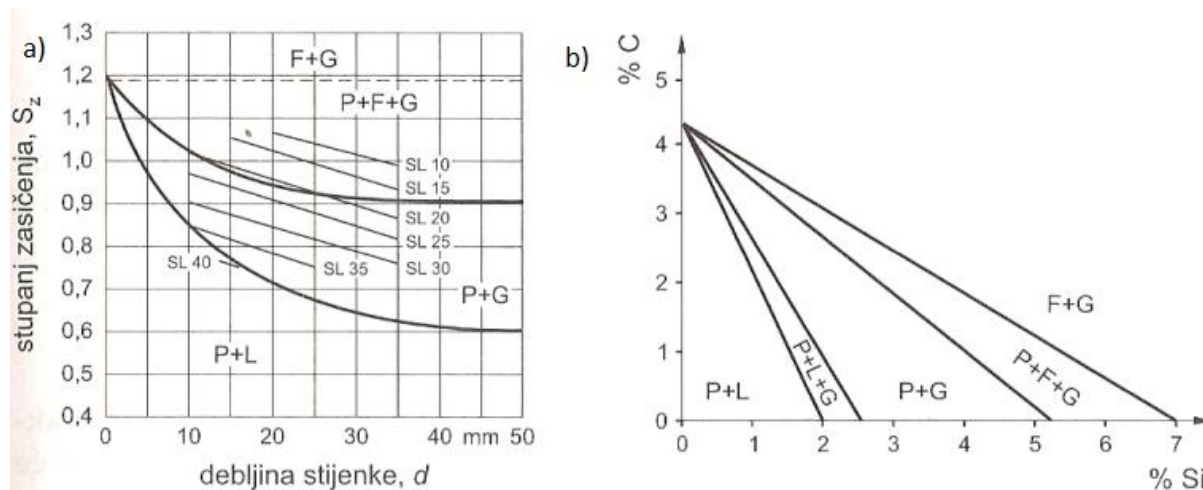
- Nakupina listića grafita – primarna mikrostruktura. Na slici 4 se mogu vidjeti tipovi listića grafita prema ASTM normi.
- Željezne osnove koja je feritna, perlitna ili feritno-perlitna, a uz to se može pojaviti i slobodni cementit

Stupanj difuzije je viši kod feritne faze nego kod perlitne. Stoga bi se moglo zaključiti kako su u proizvodnji disk kočnice najbolji sivi lijevovi sa duljim grafitnim listićima te feritnom fazom. Međutim, to nije točno jer vrsta matrice u maloj mjeri utječe na stupanj difuzije te disk mora postići i dovoljnu otpornost na trošenje pogotovo u smislu abrazijske otpornosti. Upravo radi toga većinu disk kočnica korištenih kod osobnih automobila čine sivi lijevovi sa mikrostrukturom grafitnih listića i perlitne matrice. [6].



Slika 4: Tipovi listića grafita prema ASTM normi [7].

Maseni udjeli C, Si i P kao i debljina stijenke (brzina hlađenja) pomažu u određivanju moguće mikrostrukture odljevka. Uz pomoć strukturnih dijagrama (Maurer, Klingenstein, Sipp) može se odrediti mikrostruktura lijeva ili, pak uz poznatu debljinu stijenke i željenu mikrostrukturu odrediti približni sastav lijeva.



Slika 5: Sippov (a) i Klingensteinov strukturni dijagram (b) [7].

Kako bi izbjegli stvaranje komponenta iz sivog lijeva sa jednakim rasporedom kemijskog sastava, ali različitih svojstava potrebno je da proces skrućivanja bude jednolik tako da se mikrostruktura ne mijenja. Kao posljedica toga, procesi ulijevanja u kalup, stapanja te parametri lijevanja moraju biti strogo kontrolirani u svakoj proizvodnji.

1.5 Trošenje

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama.

Postoji neizbrojno veliki broj slučajeva trošenja, ali samo su četiri osnovna mehanizma trošenja:

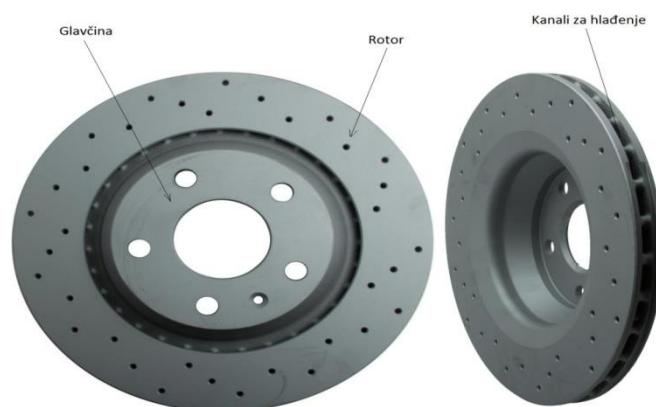
- abrazija,
- adhezija,
- umor površine,
- tribokorozija.

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina. [8].

1.5.1 Toplinski umor

Disk kočnice su izložene visokim temperaturnim napreznjima tijekom kočenja normalnog intenziteta te ultravisokim napreznjima tijekom kočenja žestokog intenziteta jer se u samo nekoliko sekundi stvaraju temperature od oko 800°C. Ovako brze temperaturne digresije mogu imati dva ishoda: toplinski šok koji stvara površinske pukotine i/ili velike plastične deformacije u disku. U slučaju izostanka toplinskog šoka, relativno mali broj nadolazećih ciklusa mogu uzrokovati makroskopske pukotine koje se protežu kroz cijelu debljinu diska te se šire po polumjeru rotora.

Disk kočnice su proizvedene od sivog lijeva sa tipičnom geometrijom prikazanom na slici 6. Sivi lijev je korišten zbog svoje relativno visoke toplinske provodljivosti, visoke toplinske difuznosti i niske cijene. Disk kočnice se sastoje iz glavčine koja je spojena za kotač i osovinu te unutrašnje i vanjske površine za kočenje. Vanjska površina za kočenje je direktno vezana za glavčinu dok se na spoju unutrašnje i vanjske površine nalaze brojni kanalići za hlađenje. Na području spoja glavčine i rotora je konstrukcijski riješen žlijeb kako bi se koncentrirana naprezanja mogla osloboditi. Važno je napomenuti kako unutrašnji dio diska nije direktno povezan za glavčinu nego putem kanalića za hlađenje. Tijekom kočenja, kočione pločice pritišću unutrašnji i vanjski dio rotora te se na njima generira toplina uslijed trenja dok na glavčini ostaje temperatura približna sobnoj. Lomovi uslijed toplinskih napreznja su vrlo rijetka kod osobnih automobila, ali su relativno česta kod teretnih i izvanrednih vozila (vozila koja su izložena ekstremnim uvjetima).



Slika 6: Disk kočnica sa naznačenim vitalnim dijelovima [10].

Postoje tri načina kako eliminirati pucanje rotora uslijed toplinskih naprezanja:

- 1) Povećanjem granice razvlačenja i dinamičke čvrstoće materijala rotora
- 2) Smanjenjem temperature nastale pri kočenju
- 3) Projektiranjem spoja glavčine i rotora u kojem će se eliminirati granična naprezanja

Novo razvijeni materijali bi mogli funkcionirati pri iznimno visokim temperaturama. Međutim, to može dovesti do potrebe za toplinskom zaštitom ostalih dijelova kočionog sustava te radikalnim promjenama u projektiranju kompletnog sklopa kočenja. [9].

1.5.2. Proračun toplinsko-mehaničkih naprezanja

Kočenje izaziva intenzivno zagrijavanje površine rotora što može uzrokovati toplinski šok. Kako bi se proračunala naprezanja u površini diska može se iskoristiti metoda suzbijanja naprezanja. Također, kočenjem se rapidno zagrijava rotor sa malom ili skoro nikakvom promjenom temperature glavčine koja čini granicu sa vanjskom površinom diska. Također se ignoriraju toplinski šokovi na površini rotora nego se analiziraju toplinska naprezanja koja se stvaraju između rotora i glavčine. Pod prvo aproksimaciju se ignorira efekt unutrašnjeg dijela rotora i njene veze kanalićima s vanjskim dijelom.

Granica oko glavčine sprječava slobodno širenje rotora te je modelirana kao skraćena dvodimenzionalna varijanta (vidljivo na slici 7). Kada granica ne bi postojala, vanjski dio rotora bi se slobodno širio za:

$$\Delta b = b \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Međutim, ovakvo toplinsko širenje je ograničeno glavčinom pa se ukupno zaustavljanje tog širenja dijeli između elastične vanjske izmjene kod glavčine i unutrašnjeg zaustavljanja rotora diska. Unutrašnje sprječavanje stlačenog tijela (u ovom slučaju rotora) je dano izrazom:

$$\Delta b = \left(\frac{P}{E}\right) \cdot b \cdot \left\{ \left(\frac{a^2+b^2}{a^2-b^2}\right) + \nu \right\}$$

gdje su oznake definirane na slici 7. Isto tako, je vanjsko spriječavanje glavčine dato izrazom:

$$\Delta c = \frac{P}{E} \cdot c \cdot (1 - \nu)$$

Zbroj im je jednak slobodnoj toplinskoj refleksiji rotora:

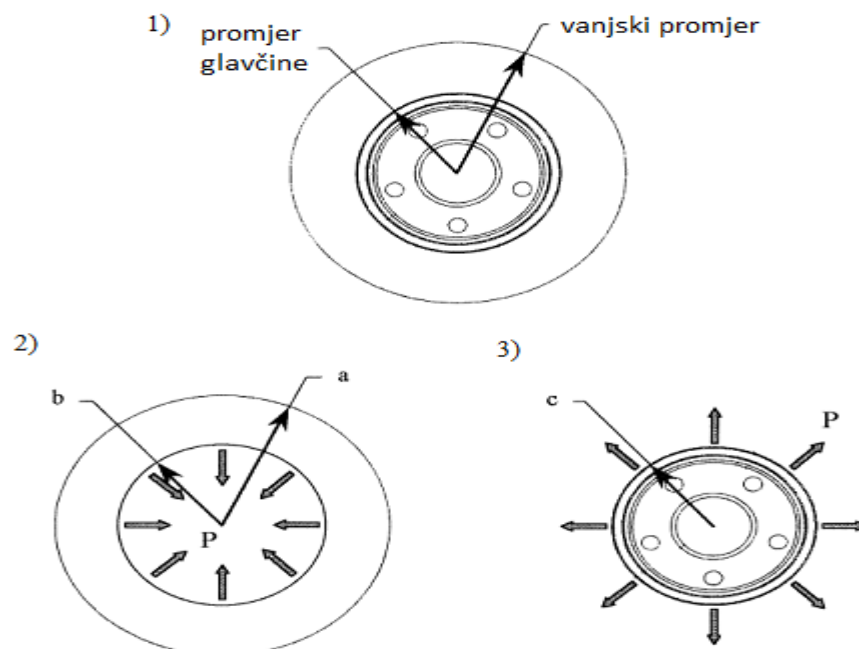
$$\alpha \cdot \Delta T \cdot b = \Delta c + \Delta b$$

Na dodiru glave i rotora, $c = b$ pa je:

$$\alpha \cdot \Delta T \cdot b = \frac{P}{E} \cdot b \cdot (1 - \nu) + \frac{P}{E} \cdot b \cdot \left[\left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2} \right) + \nu \right]$$

Iz čega se može dobiti granični pritisak:

$$P = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot \left[\left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2} \right) + 1 \right]^{-1}$$



Slika 7: Shematski prikaz cijelog diska 1), unutrašnjeg pritiska 2), te vanjskog pritiska glavčine 3) [9].

Kako bi se došlo do aproksimacije graničnog pritiska koju stvara glavčina, iskorištava se prosječna temperatura na presjeku rotora nakon 2,5 sekunde od početka kočenja. Prosječno temperaturno povećanje unutar rotora iznosi 220°C. Dobiveni granični pritisak stvara naprezanja u tangencijalnom i radijalnom smjeru prema izrazima:

$$\sigma_1 = \frac{-P \cdot b^2 \cdot (a^2 + r^2)}{r^2 \cdot (a^2 - b^2)}$$

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot b^2 \cdot (a^2 - r^2)}{r^2 \cdot (a^2 - b^2)}$$

Gdje je σ_1 tangencijalno naprezanje, a σ_2 radijalno naprezanje.

Ovim proračunom je ustanovljeno kako kočenjem nastaje toplina koja stvara toplinska naprezanja koja mogu prekoračiti granicu razvlačenja oko glave te izazvati produljenje dimenzija. Nadalje, rotor doprinosi kompresiji tijekom kočenja, dok se zaostala vlačna tangencijalna naprezanja uspostavljaju za vrijeme hlađenja. Ovakva ciklična izmjena između tlaka i vlaka je moguć razlog toplinsko-mehaničkog kvara disk kočnice. [9].

1.5.2 Procjena radnog vijeka disk kočnice

Kako bi se procjenio radni vijek rotora koristi se Coffin-Mansonov zakon u kojem:

$$\epsilon_a = \sigma_f' \cdot N_f^b + \epsilon_f' \cdot N_f^c$$

Empiričke konstante se definiraju kao:

ϵ_a – primjenjena amplituda istezanja

σ_f' - koeficijent amplitude naprezanja

ϵ_f' - koeficijent amplitude istezanja

N_f - broj ciklusa do kvara

1.6 Razvoj materijala za disk kočnice

Pri kraju 19. stoljeća se razvojem željezničke i automobilske industrije razvila potreba za mehanizmom kočenja. Početak razvoja automobila započeo je 1700. godine kada je Nicholas Cugnot uvjerio kralja Francuske da financira njegov izum vozila od 10 tona koji će dovući teške topove (slika 8). Vozilo je bilo u stanju dosegnuti brzinu od 10 km/h. Međutim, izumitelj je otkrio na svom prvom putovanju kako nije razmišljao o tome kako zaustaviti svoj izum. Tako je ovih pothvatom izazvana prva automobilska prometna nesreća u kojoj se vozilo sudarilo sa zidom. Cugnotovo vozilo je izloženo danas u muzeju automobila u Italiji u gradu Turin.

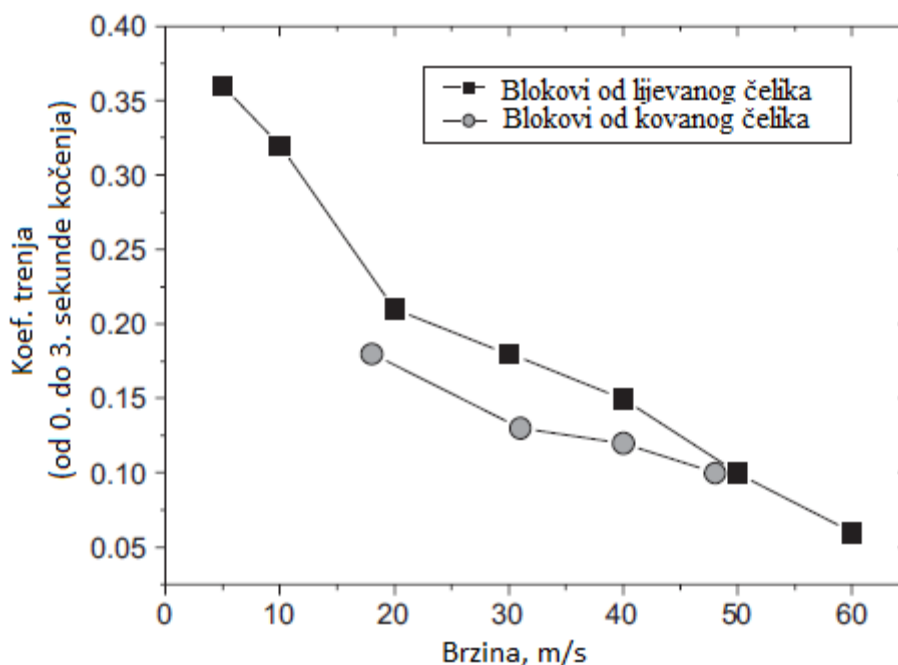


Slika 8: Prvi poznati automobil [11].

Gotlieb Daimler i Carl Benz su 1886. godine u Njemačkoj promijenili povijest prvim prototipom automobila na unutarnje izgaranje. Oni su se počeli učinkovito proizvoditi tek deset godina kasnije. Ovaj izum je također inicirao razvoj brojnih automobilskih komponenata, između ostalog i sustava za kočenje. U SAD-u je 1890. izumitelj Elmer Ambrose Sperry stvorio kočnice slične današnjim elektromagnetnim diskovima. Disk (poznatiji kao magnetska kočnica) je smješten u dodiru sa drugim diskom (disk kočnica) kako bi se ostvario kočioni moment. Prvi praktični materijal korišten u kočenju bio je čvrsta tkanina od pamuka impregnirana prirodnom smolom asfalta, a njezin izumitelj Herbert Froad otkrio ju je 1897. godine.

Njegovo rješenje kočionog sustava se koristilo kod kotača na željezničkim vozilima i prvih automobila. Ovo otkriće prethodilo je nastanku kompanije koja i danas proizvodi materijale za kočione sustave. U povijesti je zabilježeno mnogo različitih materijala korištenih u procesu kočenja (npr. u željezničkom prometu su se koristili drvo i koža). Sve do danas, mnogi su materijali bili zasnovani na elementima organskog podrijetla kao što su polimeri te vlakna iz povrća.

Kao posljedica razvoja željezničkog prometa, materijali pri kočenju su postali napredniji u primjenama koje su zahtjevali visoke brzine i opterećenja. U to vrijeme, krajem 19. stoljeća, su se započela bilježiti prva ispitivanja procesa kočenja. U dijagramu 2 možemo vidjeti rezultate eksperimenta F.Galtona iz 1878.



Dijagram 2: Rezultati eksperimenta F.Galtona koji je koristio poseban simulator kotača željezničkih vozila [6].

Prva poznatija oprema korištena pri kočenju s disk kočnicama pripisuje se inženjeru iz Engleske Fredericku Williamu Lanchesteru koji je uveo sustav kočenja sličan današnjem. Međutim, zbog ograničenog izbora u materijalima bio je prisiljen koristiti bakar koji se zbog tadašnjeg lošeg stanja na cestama, vrlo brzo istrošio. U svom je patentu opisao disk kočnicu kao metalni disk u obliku lista, kruto povezanog sa stražnje strane svakog kotača vozila. Na njenim krajevima su se nalazile polukružne čeljusti za kočenje. Kronološki slijed najčešće korištenih materijala u procesu kočenja može se vidjeti u tablici 1.

Tablica 1: Kronološki slijed najčešće korištenih materijala u procesu kočnja [6].

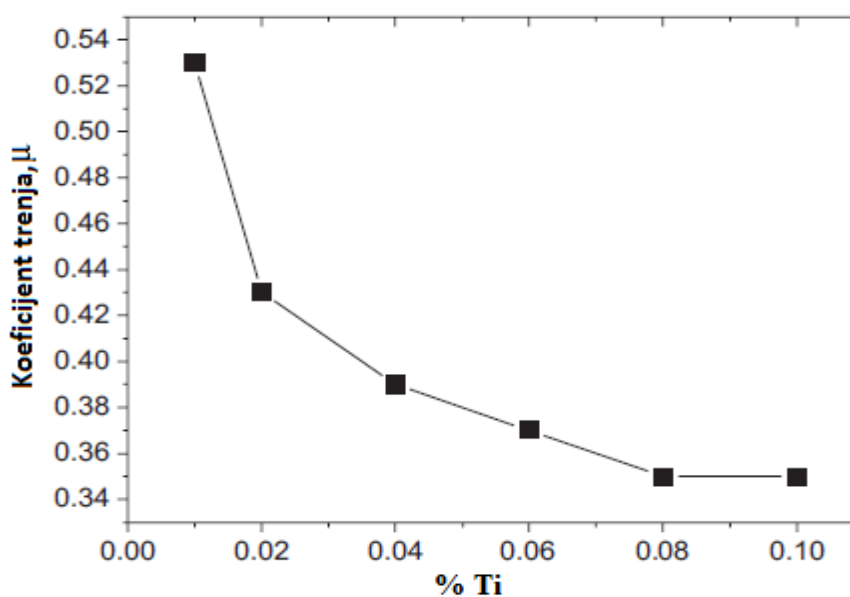
Opis materijala:	Primjena:	Približna godina:
Fe-C lijev	Korišteni kod blokova i ostalih komponentata kočnica željezničkih vozila	1870
Pamuk i remenje	Teretna kola i prvi automobili	1897
Azbestne trake za povećanje snage i učinka	Kamioni i automobili	1908
Brončane čestice sa niskim sadržajem praha asfalta	Kamioni i automobili	1926
Elastična smola s razvijenim sljepljujućim dodacima	Pojačanje kod bubnja kočnice	1930
Metal legiran sa smolom	Primjena u zrakoplovnoj industriji	1950
Staklena, mineralna, metalna, ugljična i sintetička vlakna umjesto vlakana iz azbesta za bolji učinak	Automobili i kamioni	1960
Smjese bez azbestnih vlakana	Bubanj kočnice	1980
Prijedlog korištenja karbonskih vlakana	Automobilske kočnice	1991

Prethodnih desetljeća, velika pozornost se obraćala poboljšanju učinkovitosti disk kočnica tijekom eksploatacije s prisutnim trenjem između samog diska i kočionih pločica. To je uzrokovalo razvoj materijala kao što su: nehrđajuće bakrene legure, kompozitne materijale s aluminijskom matricom te na kraju i kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima. Međutim, sivi lijev je i dalje najčešći u primjeni zbog zadovoljavajućih mehaničkih i fizikalnih svojstava, cijene te jednostavnosti u procesu proizvodnje. Međutim, potrebna je još detaljnija karakterizacija ovih legura, poglavito u smislu zadovoljavanja zahtjeva visoke otpornosti na trošenje koji su se razvojem performansa osobnih vozila i kamiona dodatno povisili.

1.7 Alternativni materijali u projektiranju disk kočnice

Kod procesa automobilske kočnice se uobičajeno koriste disk kočnice od čelika ili sivog lijeva koji su prikladni kod srednje opterećenih sustava. Međutim, proizvođači teže projektiranju vozila koji postižu veću snagu kočenja. Teoretski se više materijala može primjeniti u proizvodnji disk kočnice koji bi zadovoljili sve potrebne zahtjeve, ali je sivi lijev zbog bolje metalurške stabilnosti i niže cijene puno češći u uporabi. Potaknuti visokim radnim troškovima koje snose automobili i zrakoplovi, počeo se razvijati noviji dizajn kočionih sustava sa smanjenom masom te duljim trajanjem. Redizajn kočionog sustava zamjenom materijala manje gustoće kao što su aluminij ili ugljični kompoziti je danas primarna odgovornost kod zrakoplovne industrije te kod bolida formula 1. Također, zahtjevi koje materijali manje gustoće trebaju ispuniti su velika otpornost na abraziju te visoka korozivna otpornost. Kompozitni materijali pružaju takvu jedinstvenu kombinaciju svojstava.

Primjerice, kompozitni materijali s ugljičnom matricom se koriste u proizvodnji disk kočnice za trkače automobile te je u primjeni kod raznih letjelica. Njih karakteriziraju odlična toplinska svojstva, međutim troškovi proizvodnje i način njihova korištenja nisu praktična kod automobila. Također je u primjeni disk kočnice od Fe-C legure legirane s titanom koji povisuje čvrstoću, ali smanjuje koeficijent trenja što može predstavljati veliki problem kod kočenja na kraćim udaljenostima. Dijagram 3 prikazuje pad koeficijenta trenja s povećanjem titana u disk kočnici.



Dijagram 3: Pad koeficijenta trenja s povećanjem sadržaja titana u disk kočnici [6].

Legure aluminija koje sadrže silicijev karbid se također mogu koristiti zbog niže gustoće. Ipak, iako imaju nisku gustoću, ovakve legure aluminija ne raspršuju pravilno toplinu kao što je to slučaj kod sivih lijevova. [13].

1.7.1 Kompoziti s aluminijskom matricom

Pojam kompozitnih materijala naznačava postojanje dvaju ili više konstituenata koja se kombinirana na mikroskopskoj razini kako bi zajedno pridonijeli u stvaranju novog i korisnijeg materijala. Za razliku od legura, prednost takvog materijala je u zadržavanju karakteristika njegovih konstituenata. U konačnici se razne kombinacije korisnih svojstava mogu pridobiti odgovarajućim prilagođavanjem matrice i ojačanja.

Svojstva diska izrađenog iz aluminijskog MMC (kompoziti s metalnom matricom, prikazan na slici 9) se već naširoko ispituju te se sa sigurnošću mogu potvrditi njihove glavne prednosti:

- Koficijent trenja im je 20-30% niži nego od klasičnog sivog lijeva te imaju bolju otpornost na trošenje
- Toplinska provodljivost aluminijskih MMC može biti dva do tri puta viša nego kod sivog lijeva
- Gustoća MMC diska iznosi 60% ekvivalentne komponente napravljene iz sivog lijeva
- Toplinska difuznost je četiri puta viša nego kod sivog lijeva



Slika 9: Disk kočnica izrađena od kompozita s aluminijskom matricom [12].

1.7.1.1 Ojačala

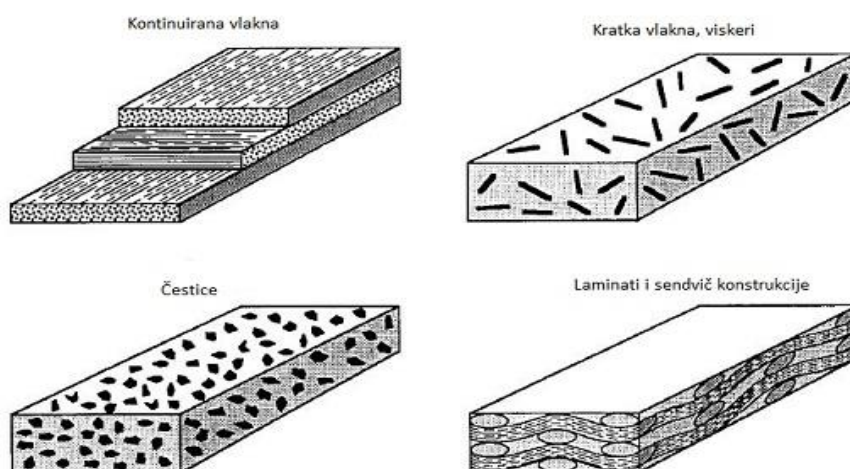
U ovoj skupini se nalazi velik broj materijala kojima je cilj postizanje pogodnije kombinacije svojstava, a to je moguće ostvariti odabirom raznih vrsta matrica i ojačala. Ojačalo kao dodatak matrici također upravlja svojstvima koje postignu MMC. Raznolikost ojačala prikazana je na slici 10.

Postoje dvije vrste ojačanja kod kompozita s aluminijskom matricom:

- 1) Diskontinuirano ojačani kompoziti (ojačani kratkim vlaknima, viskerima i česticama)
- 2) Kontinuirano ojačani kompoziti (ojačani duljim kontinuiranim vlaknima)

Ranija istraživanja su pokazala kako su kompoziti ojačani kontinuiranim vlaknima vrlo skupa te ih karakterizira složenost izrade pa je stoga i njihova primjena bila ograničena. To je dovelo do razvoja diskontinuirano ojačanih kompozita, točnije kompozita ojačanih vlaknima Al_2O_3 te SiC viskera.

Diskontinuirana vlakna su svoju komercijalnu primjenu pronašli kao selektivna ojačanja kod prstena klipa dizel motora dok se ojačanja viskerima trenutno razvijaju za primjenu u svemirskoj tehnici. Laki metali ojačani česticama tek stižu u komercijalnu proizvodnju zbog potencijalno niske cijene, visoke čvrstoće, otpornosti na trošenje te jednostavnosti proizvodnje.



Slika 10: Mogući oblici ojačala [13].

Kompoziti ojačani s kratkim vlaknima, viskerima ili česticama imaju povećanu čvrstoću, krutost te ih karakterizira izotropnost svojstava. Ovakvu raznovrsnost kompozita je više isplativo proizvoditi. Mehanička svojstva kompozita koji su ojačani kontinuiranim vlaknima te viskerima visokog omjera duljine i promjera su ovisna o učinkovitosti matrice u prijenosu opterećenja na vlakna te su stoga zavisna o kvaliteti sučelja između vlakana i matrice. Ovakva vrsta kompozita može biti izložena značajnim naprezanjima no međutim, ne pokazuju izotropnost svojstava te su skuplji.

Disperzijske čestice mogu biti tvrđe ili mekše nego što je sama matrica te prema tome mogu utjecati na konačna svojstva kompozita. Primjerice, mekanije disperzijske čestice kao što su grafit, talk ili liskun dodjeljuju mazivna svojstva te se time povećava ukupna otpornost na trošenje. U ovom slučaju, svojstva kao čvrstoća i tvrdoća postaju niža nego što su od same matrice. Ojačanja u obliku tvrdih keramičkih čestica kao što su silicijev karbid, aluminijev oksid, silicijev dioksid ili cirkon utječu na povećanje otpornosti na trošenje kao i na povećanje otpornosti pri povećanim temperaturama. [14].

Veličina čestica kod disperzijom ojačanih kompozita vrlo je mala (promjeri iznose od 10 do 250 nm). Budući da male čestice sprječavaju gibanje dislokacija, one vode do spomenutog efekta ojačavanja. U tablici 2 mogu se vidjeti primjeri i mjesta uporabe pojedinih kompozita s disperzijom.

Glavne varijable u određivanju učinkovitosti disperzije su:

- veličina čestica, d
- volumni udio, V_p
- razmak između disperziranih čestica, D_p

Odnos između tih varijabli je sljedeći:

$$D = \frac{(1-V_p)2d^2}{V_p}$$

Tablica 2: Primjeri i primjena odabranih kompozita s disperzijom [7].

Sustav:	Primjena:
Ag-Cdo	Električni kontakti
Al-Al ₂ O ₃	Nuklearni reaktori
Be-BeO	Svemirska tehnika i nuklearni reaktori
Co-ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Magnetski materijali postojani puzanju
Ni-20 %Cr-ThO ₂	Dijelovi turbina
Pb-PbO	Ploče akumulatora
Pt-ThO ₂	Električne komponente
W-ThO ₂ , ZrO ₂	Grijači

1.7.1.2 Aluminijska matrica

Općenito, metali se rabe kao materijali matrice zbog toga što se zahtijeva odgovarajuća duktilnost; dok se kod kompozita s keramičkom matricom komponenta koja se ojačava dodaje u cilju osiguranja lomne žilavosti.

Kod vlaknima ojačanih kompozita matrica ima nekoliko zadaća. Najprije, ona povezuje vlakna te služi kao medij kojim se izvana nametnuto naprezanje prenosi i raspoređuje na vlakna; samo vrlo mali dio nametnutog opterećenja nosi matrica. Osim toga materijal matrice treba biti duktilan. To znači da modul elastičnosti vlakna treba biti mnogo viši od modula elastičnosti matrice.

Sljedeća funkcija matrice je u tome da pojedinačna vlakna zaštiti od površinskog oštećivanja do kojih može doći mehaničkom abrazijom ili kemijskim reakcijama od strane okolnog medija. Takve interakcije mogu izazvati tečenje na površini koje može voditi do pukotina, a one mogu voditi do oštećivanja pri nižim vlačnim naprezanjima. Kao posljedica tog procesa matrica se odvaja od vlakna, te zbog svojstva svoje relativne mekoće i plastičnosti omogućuje propagiranje krhkog loma od vlakna do vlakna što može rezultirati lomom; drugim riječima, matrica služi kao prepreka napredovanju pukotina. Iako neka pojedinačna vlakna puknu, do loma kompletnog kompozita neće doći dok god veći broj okolnih vlakana, koja su jednom pukla, oblikuje skupinu kritične veličine.

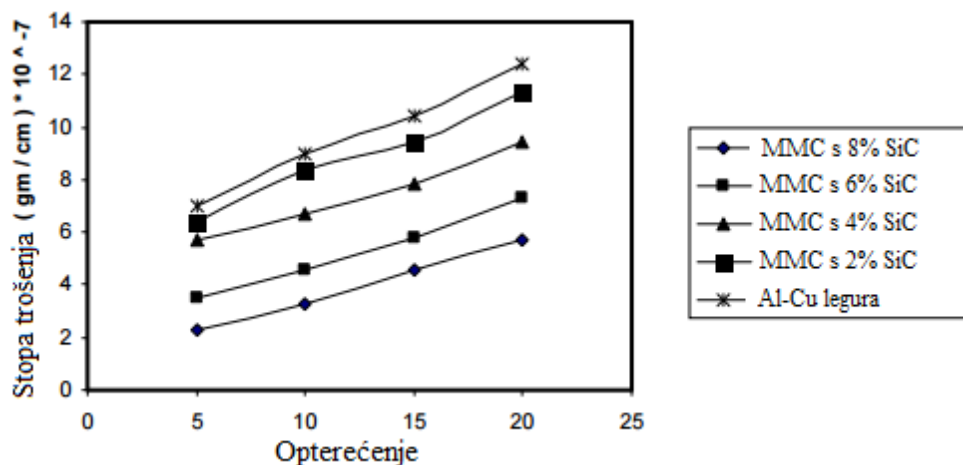
Aluminij i njene legure pripadaju među najpopularnijim matricama u primjeni kod kompozita s metalnom matricom. Razlog raširenosti Al legura kao materijala matrice leži u njenoj niskoj cijeni u usporedbi s ostalim materijalima niske gustoće (Mg, Ti, itd.).

Međutim, loša mehanička i tribološka svojstva aluminija (granica elastičnosti iznosi 30 MPa, a vlačna čvrstoća 70 MPa) mu graniči širinu uporabe. Uvidjevši koliki potencijal te dostupnost ima aluminij, znati napori se ulažu kako bi se otkrile mogućnosti mehaničke čvrstoće te otpornosti na trošenje. Danas se aluminij koristi više nego ostali obojeni metali i legure uključujući bakar i njene legure. [7]

1.7.1.3 Trošenje kompozita s aluminijском matricom

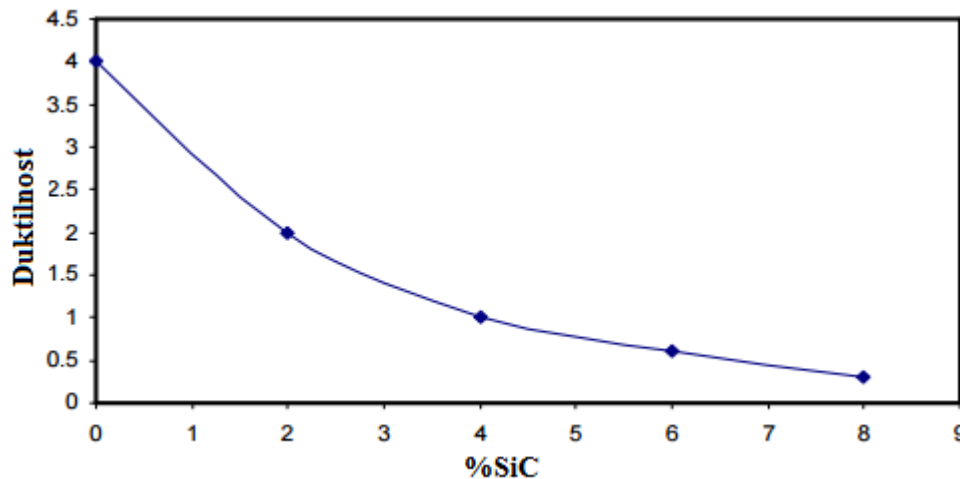
Kompoziti s aluminijском matricom ojačani česticama se posljednjeg desetljeća koriste u kočionim te hidrauličkim komponentama u automobilskoj te zrakoplovnoj industriji zahvaljujući atraktivnim svojstvima trenja i trošenja koje pružaju. Otkriveno je kako otpornost trošenju MMC materijala ovisi o velikom broju faktora kao što su morfologija, veličina i volumni udio čestica te jakosti veze između ojačala i matrice. Dijagram 4 prikazuje ovisnost brzine trošenja o opterećenju kod kompozita s Al matricom sa različitim sadržajem SiC čestica.

Primjerice, što su čestice SiC veće, u konačnici će i svojstva trenja i otpornosti na trošenje biti bolja nego kod onih kompozitnih materijala koji sadrže čestice SiC manje veličine.

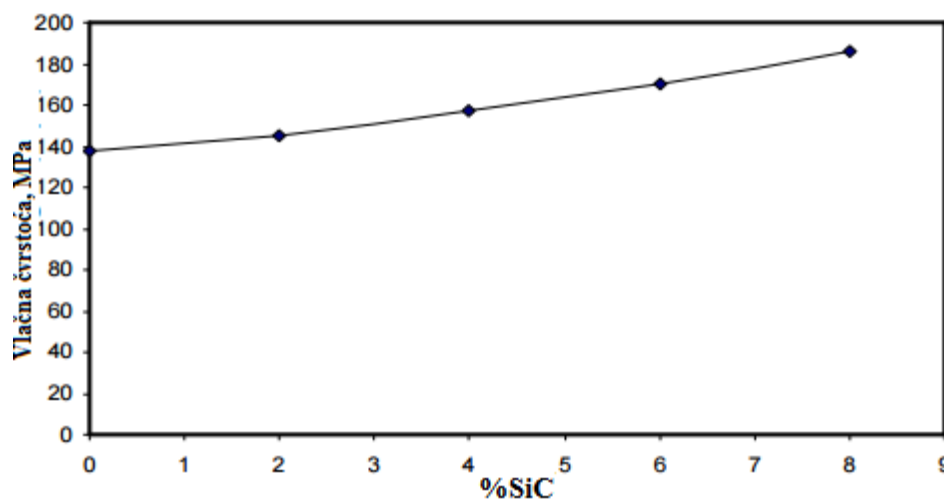


Dijagram 4: Ovisnost brzine trošenja o opterećenju kod kompozita s Al matricom različitih sadržaja SiC [15].

Također, povećanjem sadržaja SiC povećavaju se i svojstva kao što su tvrdoća, savojna čvrstoća te otpornost na umor. Iz dijagrama 5 i 6 se mogu vidjeti utjecaji sadržaja SiC na vlačnu čvrstoću i duktilnost



Dijagram 5: Utjecaj sadržaja SiC na duktilnost [16].



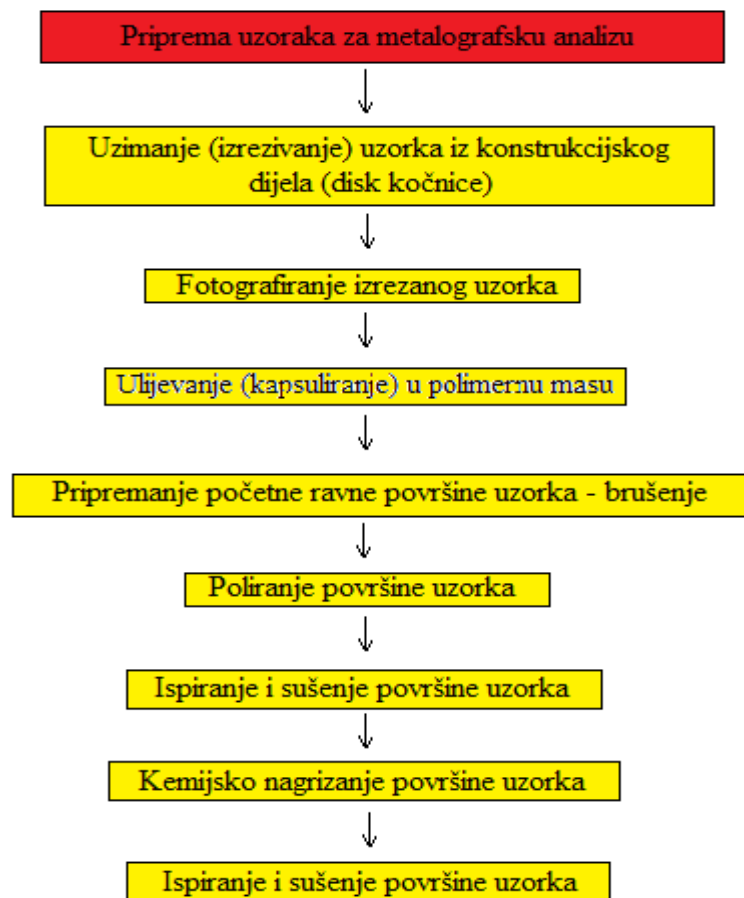
Dijagram 6: Utjecaj sadržaja SiC na vlačnu čvrstoću [16].

U jednom ispitivanju, provedene su analize kliznog trenja i trošenja sa četiri različite kombinacije materijala. Pri ispitivanju je korištena simulirana geometrija ravnih kočionih pločica te disk kočnica. Komercijalne kočione pločice kombinirale su se sa sivim lijevom, keramičkim kompozitom (C/SiC), aluminijskim MMC kompozitom te legurom aluminija. Utvrdilo se kako su prosječni koeficijenti trenja slični kod trljajućih parova s sivim lijevom i keramičkim kompozitom, ali je kod trljajućeg para s MMC kompozitom faktor trenja bio najniži. Hrapavost površine kod diskova od lijevanog željeza i keramičkog kompozita je bila manja nakon procesa klizanja, dok je kod diska iz MMC ostala pretežito jednaka.

Nedavne analize su također otkrile da na otpornost trošenju uz volumni udio i prostornu raspodjelu sekundarnih čestica uvelike utječe jačina veze između čestica i matrice te mehanička svojstva same matrice. Stoga u uvjetima rada čestice mogu izgubiti mogućnost podupiranja primjenjenog opterećenja te sekundarne čestice ojačanja mogu postati bezefektne ili čak uzrokovati pogoršanja u svojstvima trošenja. Kako bi mogli predvidjeti ponašanje kompozita i postaviti smjernice u proizvodnji materijala s optimalnim tribološkim svojstvima potrebno je detaljno shvaćanje mehanizma trošenja na mikro razini. [13].

2. Eksperimentalni dio

Korišteni disk pripadao je automobilu njemačkog proizvođača Volkswagen modela Golf IV te je broj prijedjenih kilometara iznosio 110 000 km prije nego što je uklonjen iz uporabe. Iz njega je izrezan uzorak te je proveden klasični tijek pripreme uzorka za metalografsku analizu. Na slici 11 je prikazan tijek pripreme uzorka za metalografsku analizu. Kvalitetna priprema uzorka je osnovni uvjet da bi analiza strukture metala bila uspješna. Ukoliko je uzorak loše pripremljen, vrlo je teško napraviti kvalitetna mjerenja te u konačnici dobiti valjane rezultate.



Slika 11: Tijek pripreme uzorka za metalografsku analizu

U eksperimentalnom dijelu rada napravljena je kvalitativna i kvantitativna analiza strukture materijale te je provedeno mjerenje tvrdoće na unaprijed definiranim mjestima. U narednom tekstu, detaljno je opisana svaka faza pripreme uzorka. Na temelju dobivenih rezultata i njihove analize donjeti su određeni zaključci.

2.1 Metalografska priprema uzorka

2.1.1. Uzimanje (izrezivanje) reprezentativnog uzorka

Cilj izrezivanja je izdvajanje reprezentativnog uzorka iz konstrukcijskog komada koji će biti prikladan za brušenje, poliranje te i promatranje pod mikroskopom. Prilikom rezanje potrebno je izbjeći oštećenja uzrokovana pregrijavanjem ili stvaranjem pukotina u blizini površine reza te se stoga tijekom postupka izrezivanja provodilo hlađenje vodenim mlazom. Ukoliko je potrebno uzorak će biti zalijevan u polimernu masu kako bi ga se zaštitilo od vanjskih doticaja te kako bi se praktičnije moglo rukovati s njime u ostalim koracima pripreme uzorka. Na slici 12 je prikazan uzorak nakon što je izrezan iz konstrukcijskog dijela.



Slika 12: Uzorak nakon izrezivanja

2.1.2. Brušenje uzorka

Brušenje je najzastupljeniji postupak završne obrade odvajanjem čestica. Njime se otklanjaju tragovi rezanja i prethodnih brušenja. Može se izvoditi kao ručno, strojno ili automatsko, te kao grubo ili fino brušenje. Grubim brušenjem se otklanjaju tragovi rezanja, a finim brušenjem se skida deformirani površinski sloj i tragovi grubog brušenja. Izbor brusnog papira ovisi o materijalu koji se brusi. To je važno zbog prednjeg reznog kuta oštrice alata. Ovisno koji materijal će se obrađivati, izabire se odgovarajući brusni papir sa odgovarajućim prednjim kutom rezne oštrice alata.

Parametri koji utječu na konačni rezultat brušenja:

- Podloga
- Abraziv i veličina abraziva
- Lubrikant
- Sila
- Vrijeme
- Brzina okretaja

U ovom radu se brušenje provelo u pet koraka s različitim granulacijama abraziva. Najprije su se koristili brusni papiri manje granulacije abraziva po jedinici površine (grublje brušenje), a zatim brusni papiri veće granulacije abraziva (finije brušenje). U procesu brušenja potrebno je paziti da se površina uzorka ravnomjerno brusi. Nakon svakog brušenja uzorak se ispiru pod mlazom vode kako na površini ne bi ostale odvojene čestice od brušenja te se uzorak zakreće za 90° i brusi dok se ne otklone tragovi prethodnog koraka. Brušenje je provedeno na uređaju Buehler Phoenix Alpha koji je prikazan na slici 13, a u tablici 3 je prikazan slijed te opis svakog stupnja brušenja.



Slika 13: Uređaj za brušenje i poliranje Buehler Phoenix Alpha

Tablica 3: Prikaz svakog stupnja brušenja te njihovih parametara

Stupanj	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	P500	P1000	P2000	P4000
Hlađenje i podmazivanje	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda
Brzina vrtnje (/min)	300	300	300	300	300
Sila pritiska (N)	Ručno	Ručno	Ručno	Ručno	Ručno
Vrijeme (min)	Do poravnjanja	*	*	*	*

*dok se ne uklone tragovi prethodne obrade

2.1.3. Poliranje uzorka

Poliranje daje finije obrađenu površinu nego postupak brušenja. Može se izvoditi ručno ili automatski. Kod poliranja se koriste abrazivne čestice na platnu suspendirane u lubrikantu te se mogu kotrljati i/ili klizati između platna i površine uzorka. Svrha poliranja je skidanje svih tragova brušenja i preostalog deformiranog površinskog sloja.

Općenito se primjenjuju nekoliko vrsta poliranja:

- Klasično poliranje
- Vibracijsko poliranje
- Elektrolitičko poliranje

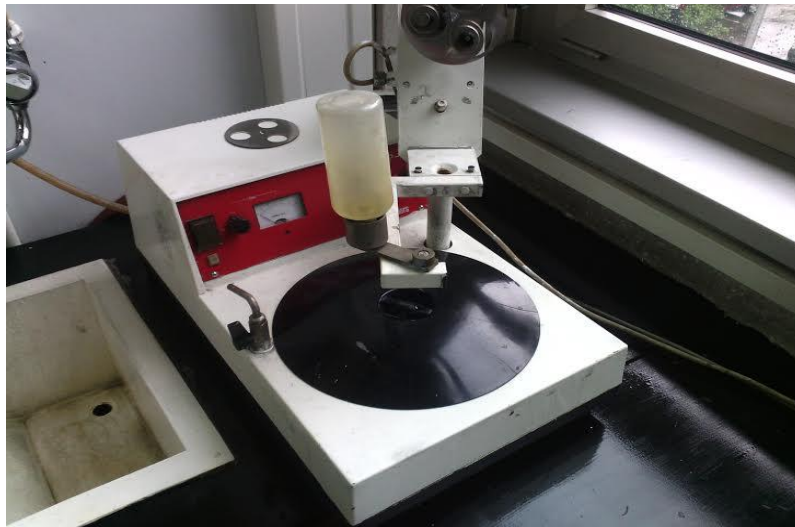
Na poliranom uzorku određuje se da li uzorak sadrži:

- Pore
- Pukotine
- Nemetalne uključine

Također, nakon poliranja slijedi mjerenje mikrotvrdoće.

Ukoliko se kroz mikroskop uoče nepoželjne ili neočekivane nepravilnosti , njihov udio se može odrediti pomoću nekoliko metoda. Metode se mogu provoditi ručno (metoda točke, metoda crte, metoda kruga) ili se pomoću računalnih programa koji sam računa traženi podatak. Iste se metode koriste i za određivanje udjela pojedinih faza ili jednostavno kod određivanja veličina zrna.

U ovom radu uzorak je poliran klasičnim poliranjem sa tkaninom i dijamantnom pastom te su parametri postupka prikazani u tablici 4. Postupak poliranja proveden je na uređaju Struers Dap-V koji je prikazan na slici 14.



Slika 14: Uređaj Struers Dap-V

Tablica 4: Parametri postupka poliranja

Stupanj	1	2
Podloga	Tkanina MD-DAC	Tkanina OP-Chem
Abraziv	Dijamantna pasta	Dijamantna pasta
Veličina abraziva (μm)	3	1
Hlađenje i podmazivanje	Lubrikant	Lubrikant
Brzina vrtnje ($^{\circ}/\text{min}$)	150	150
Sila pritiska (N)	25	25
Vrijeme (min)	7	5

Nakon poliranja uzorak se ispiru u alkoholu i vodi te je spreman za promatranje pod mikroskopom.

2.1.4 Nagrizanje uzorka

Nagrizanje je postupak selektivnog korodiranja površine materijala s ciljem dobivanja mikrostrukture uzorka. Postupak se vrši nakon mjerenja mikrotvrdoće i poroznosti metala.

Parametri nagrizanja:

- Sredstvo za nagrizanje
- Vrijeme
- Temperatura
- Struja

Postupak nagrizanja se pojavljuje u nekoliko oblika:

- Kemijsko (kod ugljičnih čelika te obojenih i lakih metala)
- Elektrolitičko (kod nehrđajućih čelika)
- Obojeno (radi postizanje estetskog dojma)
- Termičko (keramika)

2.2 Analiza mikrostrukture u poliranom stanju

Nakon poliranja uzorak je spreman za mikroanalizu, tj. fotografiranje svjetlosnim mikroskopom kako bi se mogli odrediti neki od važnih parametara: tip, veličina te udio grafitnih listića. Analiza mikrostrukture provedena je na uređaju OLYMPUS GX51, prikazanom na slici 15. Ukupno je snimljeno 10 fotografija u uzdužnom i 5 fotografija u poprečnom smjeru pod povećanjima od 50x, 100x i 200x. Pomoću kompjutorskog programa ImageJ utvđene su veličine te udjeli grafita u mikrostrukturama.

Klasifikacija mikrostrukture grafita u sivom lijevu provedena je prema standardu A 247-47 američkog društva za ispitivanje materijala ASTM čija je namjena grupiranje raznih mikrostrukture pomoću dvaju usporednih nizova, jedan za tip odnosno raspored listićavog grafita, a drugi za veličinu odnosno dužinu listića grafita. [17].



Slika 15: Svjetlosni mikroskop GX51

2.2.1 Tip grafitnih listića

Usporedni niz za tip odnosno raspored listićavog grafita prikazuje pet tipova strukture s obzirom na raspored i usmjerenost, kao što je navedeno u slijedećoj tablici 5:

Tablica 5: Tipovi struktura listićavog grafita [17].

Tip	Raspored	Usmjerenost
A	Jednoličan	Proizvoljna
B	Cvjetast	Proizvoljna
C	Jednoličan	Proizvoljna
D	Interdendritičan	Proizvoljna
E	Interdendritičan	U jednom ili manjem broju pravaca

Usporedni niz za tip odnosno raspored listića grafita prema ASTM normi se također mogu vidjeti na slici 4.

2.2.2 Veličina grafitnih listića

Usporedni se niz za veličinu odnosno dužinu listića grafita sastoji od osam shematiziranih mikrosnimaka označenih rednim brojem od 1 do 8 uz povećanje 100x, od kojih svaki predstavlja grafitne listiće čija se dužina nalazi u granicama naznačenim kod svake mikrosnimke. Tablični prikaz klasifikacije prema veličini prikazan je u tablici 6.

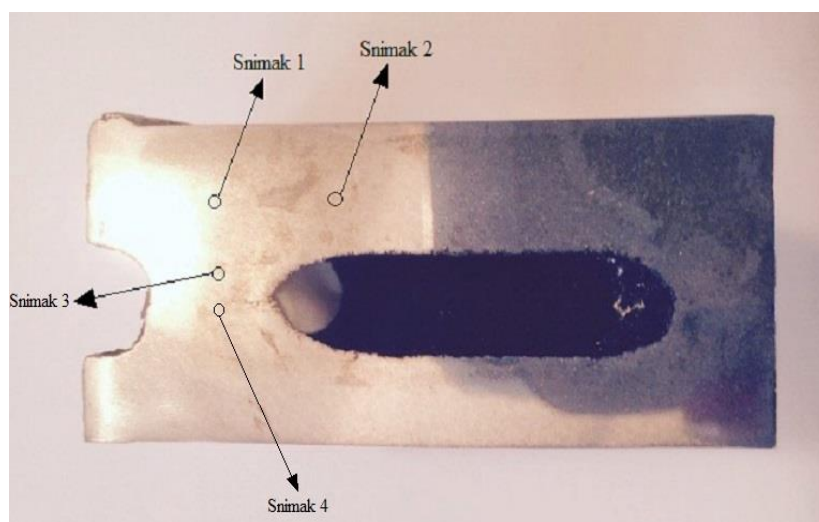
Grafitne su čestice u sivom lijevu ustvari prostorne tvorevine, a listići predstavljaju presjecišta tih prostornih tvorevina i ravnine površine izbruska. Uslijed toga dužina listića je prividna dužina grafitne čestice. Prividna dužina može varirati od nule do stvarne dužine u ravnini najduže osi čestice. U skladu s tim, veličina najdužeg listića na mikrosnimci odabrana je kao kriterij za procjenu mikrosnimke. [17].

Tablica 6: Klasifikacija grafitnih listića prema veličini [17].

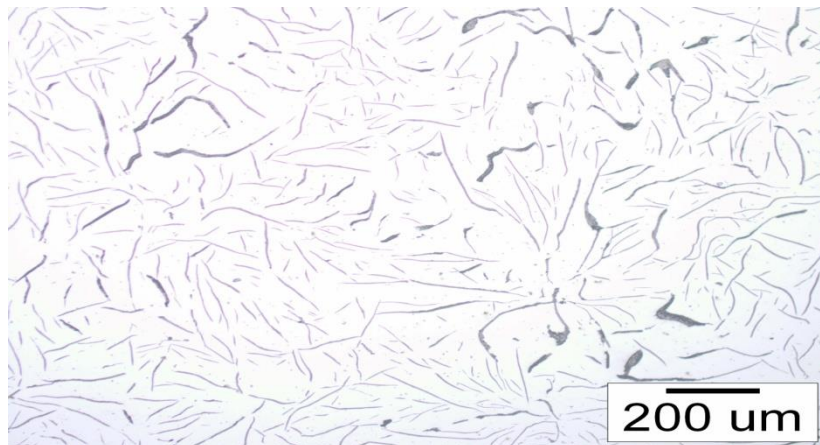
Oznaka veličine	Dužina listića grafita na mikrosnimci 100x mm
1	>100
2	50-100
3	25-50
4	12-25
5	6-12
6	3-6
7	1,5-3
8	<1,5

2.2.3. Karakterizacija strukture u poliranom stanju

U ovom radu su prikazani samo neke od dobivenih mikrosnimaka polirane površine (od slike 17 do slike 24) i njihovih izmjerenih parametara te su mjesta uzimanja snimaka naznačena na slici 16. Konačna tablica svih rezultata mjerenja pri povećanju od 100x se nalazi na kraju.

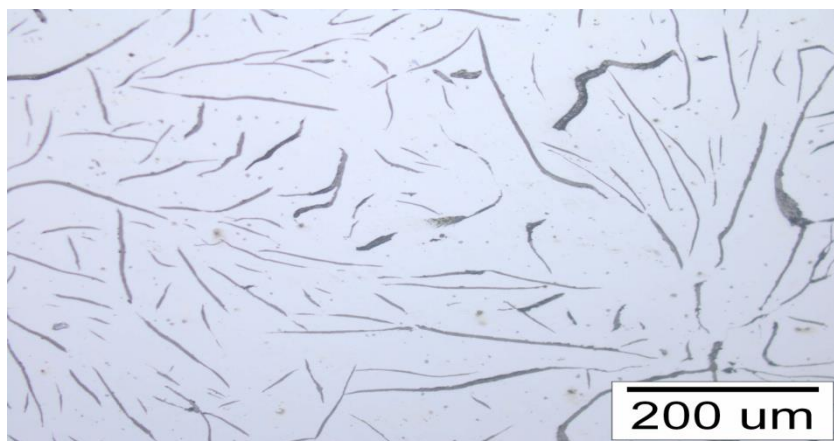


Slika 16: Naznačena mjesta uzimanja snimaka

Snimak 1 (pri manjem povećanju):

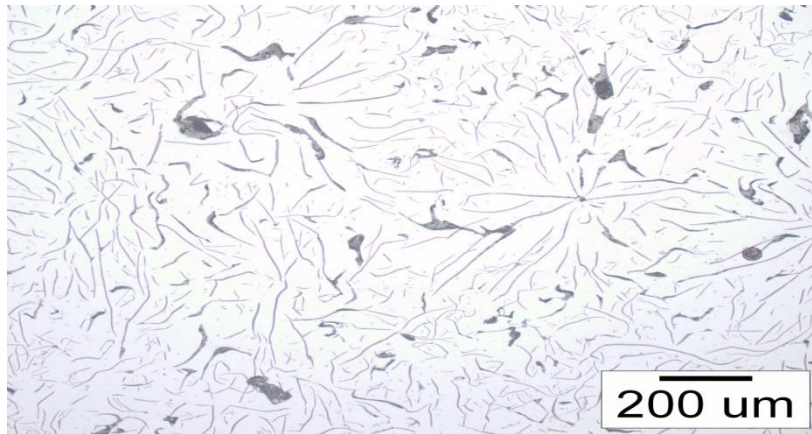
Slika 17: Mikrostruktura polirane površine snimke 1 pri povećanju od 100x

- ▶ U uzdužnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 208,6 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 8,9 \%$

Snimak 1 (pri većem povećanju):

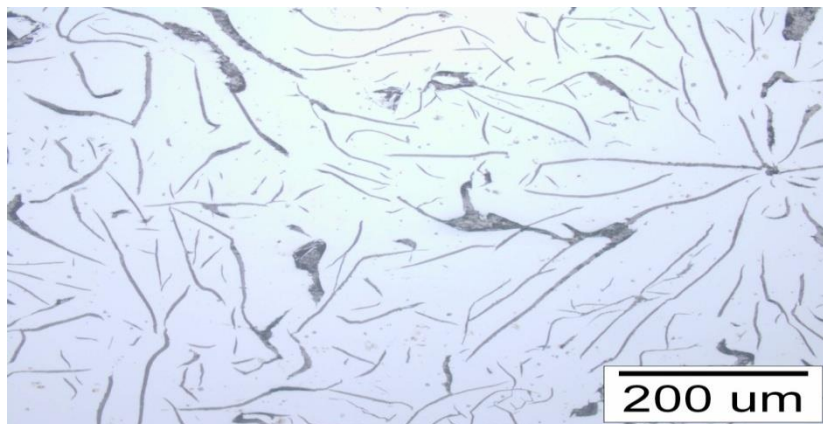
Slika 18: Mikrostruktura polirane površine snimke 1 pri povećanju od 200x

- ▶ U uzdužnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 216 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 9,2 \%$

Snimak 2 (pri manjem povećanju):

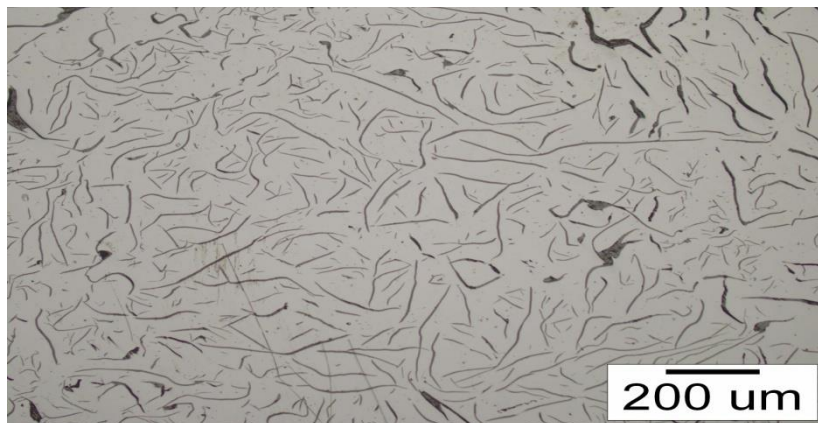
Slika 19: Mikrostruktura polirane površine snimke 2 pri povećanju od 100x

- ▶ U uzdužnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 196,5 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 9,6 \%$

Snimak 2 (pri većem povećanju):

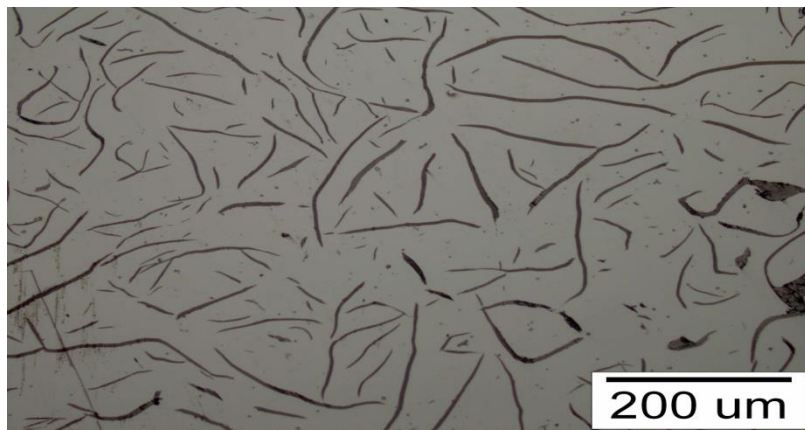
Slika 20: Mikrostruktura polirane površine snimke 2 pri povećanju od 200x

- ▶ U uzdužnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 209,34 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 9,5 \%$

Snimak 3 (pri manjem povećanju):

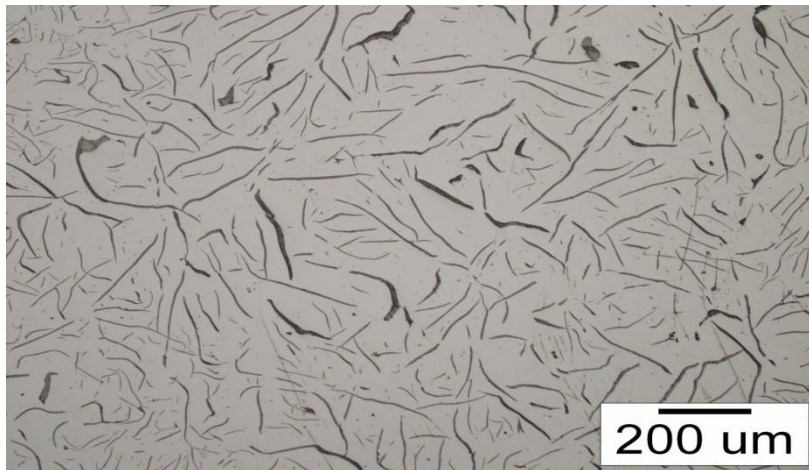
Slika 21: Mikrostruktura polirane površine snimke 3 pri povećanju od 100x

- ▶ U poprečnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 186,32 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 9,2 \%$

Snimak 3 (pri većem povećanju):

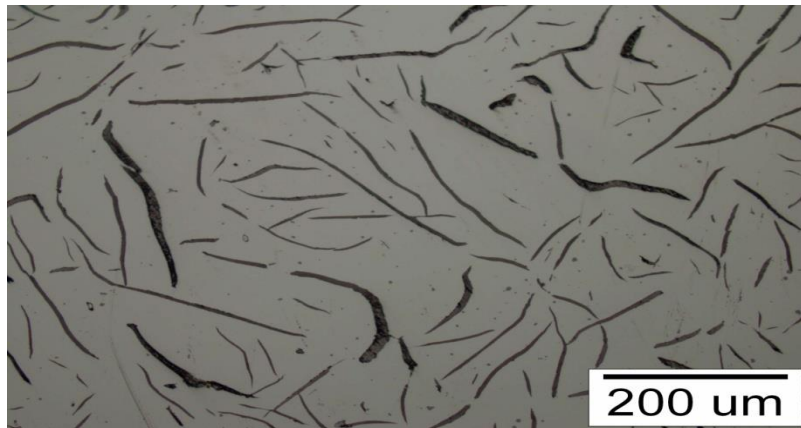
Slika 22: Mikrostruktura polirane površine snimke 3 pri povećanju od 200x

- ▶ U poprečnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 201,71 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 9,3 \%$

Snimak 4 (pri manjem povećanju):

Slika 23: Mikrostruktura polirane površine snimke 4 pri povećanju od 100x

- ▶ U poprečnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 204,76 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 9 \%$

Snimak 4 (pri većem povećanju):

Slika 24: Mikrostruktura polirane površine snimke 4 pri povećanju od 200x

- ▶ U poprečnom smjeru
- ▶ Tip grafitnog listića: Tip A – jednoličan raspored, proizvoljne usmjerenosti
- ▶ Veličina grafitnog listića: $\approx 220,45 \mu\text{m}$, prema ASTM oznaka veličine 1
- ▶ Udio grafita: $\approx 8,7 \%$

Tablični prikaz veličine grafita kod svih mjerenja u uzdužnom i poprečnom smjeru pri povećanju od 100x se može vidjeti u sljedećim tablicama:

Tablica 7: Veličina grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u poprečnom smjeru

Redni broj mikrosnimke	Dužina grafita (μm)
1	184
2	204
3	186
4	204
5	182

Tablica 8: Veličina grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u uzdužnom smjeru

Redni broj mikrosnimke	Dužina grafita (μm)
1	209
2	185
3	204
4	185
5	186
6	208
7	197
8	216
9	209
10	196

Tablični prikaz udjela grafita kod svih mjerenja u uzdužnom i poprečnom smjeru pri povećanju od 100x mogu se vidjeti u sljedećim tablicama:

Tablica 9: Udjel grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u uzdužnom smjeru

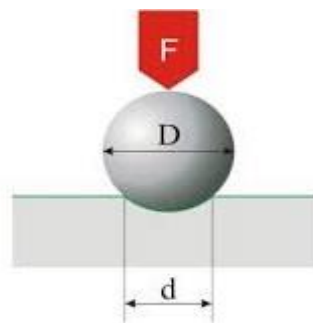
Redni broj mikrosnimke	Udjel grafita pri povećanju od 100x
1	8,4
2	8,3
3	8,9
4	8,2
5	8,9
6	8,8
7	9,6
8	10,3
9	9,8
10	10,6

Tablica 10: Udjel grafita kod snimaka mikrostruktura uzetih u poprečnom smjeru

Redni broj mikrosnimke	Udjel grafita pri povećanju od 100x
1	10,4
2	9
3	10,5
4	9,2
5	9,1

2.3 Metoda mjerenja tvrdoće

Nakon analize polirane površine, provodi se mjerenje mikrotvrdoće po Brinellovoj metodi gdje je indentor kuglica od tvrdog metala. Tvrdoća po Brinellu je omjer primjenjene sile i površine otiska. Standardni promjeri kuglice od tvrdog metala su 10, 5, 2.5, i 1 mm. Sila utiskivanja može iznositi od 9,807 N pa do 29,42 kN. Promjer dobivanog otiska u ispitivanom materijalu mjeri se pomoću mjernog mikroskopa ili mjernog povećala. Uzorak koji se ispituje mora biti očišćen i odmašćen, a površina glatka kako bi se moglo što točnije odrediti promjer kugline kalote. Slika 24 shematski prikazuje postupak mjerenja tvrdoće po Brinellu.



Slika 25: Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Brinellu [18].

Veličina tvrdoće po Brinellu dobiva se iz omjera primjenjene sile i površine otiska:

$$HB = \frac{F \cdot 0,102}{S}$$

gdje su:

- F [N] – Sila
- S [mm²] – Površina kugline kalote koja se računa prema izrazu:

$$S = \pi \cdot D \cdot h_B \quad [mm^2]$$

gdje su:

- D [mm] – promjer kuglice
- h_B [mm] – dubina utisnuća

Dubinu utisnuća možemo dobiti na temelju promjera kuglice i otiska. Stoga vrijedi:

$$h_B = \frac{D - \sqrt{D^2 - d_B^2}}{2} \quad [mm]$$

No budući da se ovom metodom ne mjeri dubina prodiranja kuglice, nego promjer otiska d_B , dobiva se sljedeći izraz za tvrdoću po Brinellu:

$$HBW = \frac{F \cdot 0,204}{\pi \cdot D \left[D - \sqrt{D^2 - d_B^2} \right]}$$

Brinellova tvrdoća je bezdimenzijska veličina, a uz iznos izmjerene tvrdoće navodi se oznaka HBW iza koje slijedi promjer kuglice, primjenjena sila, te trajanje utiskivanja.

Dva osnovna nedostatka Brinellove metode su ograničenost područja mjerenja do 700 HBW, te ovisnost iznosa tvrdoće o primjenjenoj sili utiskivanja kuglice. U usporedbi s ostalim metodama ispitivanja tvrdoće, Brinellova kuglica ostavlja najdublji i najveći otisak, pa estetski nagrđuje površinu (ukoliko tvrdoću mjerimo na proizvodu, a ne na uzorku). No time se postižu točniji rezultati kod materijala višefazne i mikrostrukture anizotropnih svojstava.

Pri mjerenju tvrdoće u ovom radu koristila se kuglica indentora promjera 2,5 mm uz opterećenje od 187,5 N. Otisnuta su tri mjerenja te su u svakom mjerenju očitane vrijednosti promjera d_1 i d_2 . Vrijeme trajanja utiskivanja iznosilo je otprilike desetak sekundi. Sljedeća tablica prikazuje nam rezultate mjerenja.

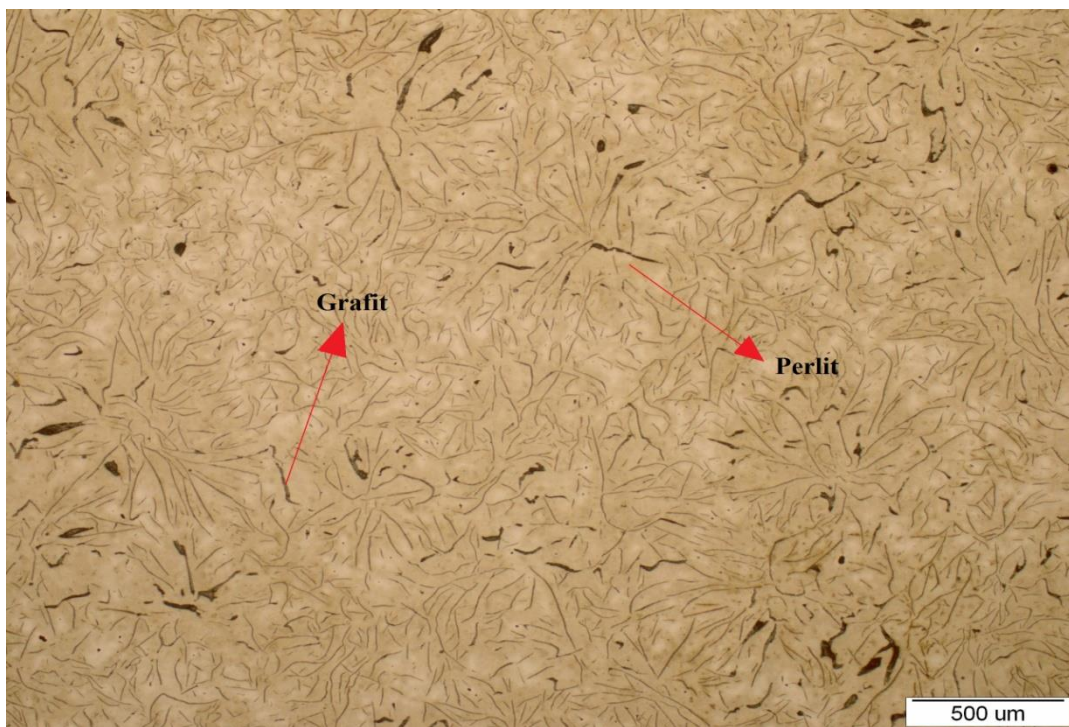
Tablica 11: Rezultati mjerenja tvrdoće

	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{sr} (mm)	HB
Otisak 1	1,116	1,1	1,108	185
Otisak 2	1,1	1,1076	1,088	192
Otisak 3	1,1	1,1	1,1	187

2.4 Analiza mikrostrukture u nagriženom stanju

Nagrizanjem površine uzorka moguće je otkriti i ocrtati granice zrna i ostale mikrostrukturne značajke koje se ne mogu vidjeti na poliranoj površini. Kemijskim se nagrivanjem postiže da se glatka, zrcalno sjajna površina uzorka učini vidljivom za mikroskopiranje.

Kao sredstvo za nagrivanje se u ovom radu koristio 3% nital. Nital je rastvor dušične kiseline u alkoholu i to u omjeru 3 cm³ dušične kiseline i 100 cm³ etil-alkohola. Uzorak je uronjen u nital na nekoliko sekundi te je zatim uronjen u vodu kako bi se prekinula kemijska reakcija. Dobivena mikrostruktura je prikazana na slici 25. Utvrđeno je kako se radi o perlitnoj mikrostrukтури uz nakupinu listićavog grafita.



Slika 26: Mikrostruktura nakon nagrivanja pri povećanju od 50x

3. Zaključak

U ovom radu potrebno je bilo analizirati strukturu materijala kočionog diska te na temelju dobivenih rezultata utvrditi postojanje nepravilnosti ili neujednačenosti u strukturi. Također je bilo potrebno provesti mjerenje mikrotvrdoće te provjeriti ujednačenost rezultata na mjerenim mjestima. Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- ▶ Tip grafitnog listića pripada strukturi tipa A prema ASTM normi, tj. raspored mu je jednoličan.

- ▶ Mikroanalizom uzoraka u poliranom stanju uočene su sitne nakupine nemetalnih uključaka u obliku grafita. Pomoću kompjutorskog programa ImageJ nisu utvrđena značajnija odstupanja u veličini i udjelu grafita na mjerenim snimkama.

- ▶ Mjerenjem Brinellove tvrdoće utvrđena je ujednačenost rezultata na mjerenim mjestima te da se izmjereni rezultati u iznosu od 185 HB, 187 HB i 192 HB nalaze u uobičajenim granicama koje se mogu pronaći u literaturi.

- ▶ Nakon nagrizanja je utvrđeno kako je željezna osnova mikrostrukture ispitanog materijala perlit uz nakupinu listićavog grafita.

4. Literatura

- [1]. Ali Belhocine, Mostafa Bouchetara; Thermo-mechanical Analysis of a Disc Breaking System; lipanj 2013
- [2]. M.A. Maleque, S.Dyuti, M.M. Rahman; Material Selection Method in Design of Automotive Brake Disc; London, srpanj 2010
- [3]. I.M. Masoud, J.A. Al Jarrah, T. Abu Mansour; Manufacturing of Gray Cast Iron Automotive Disc Brake; Indija, ožujak 2014
- [4]. Temperaturna raspodjela na površini diska;
<http://www.comsol.com/blogs/simulating-heating-of-brake-discs-in-a-car/>
- [5]. Ovisnost toplinske provodljivosti o sadržaju grafita;
http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10660/10660_arquivos/image006.gif
- [6]. Omar Maluf, Mauricio Angeloni, Marcelo Tadeu Milan, Dirceu Spinelli, Waldek Wladimir Bose Filho; Development of materials for automotive disc brakes; Sao Paolo
- [7]. Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof; Svojstva i primjena materijala; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [8]. K. Grilec, V. Ivušić; Tribologija; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb 2011
- [9]. Grupa autora; Thermal cracking in disc brakes; Department of Mechanical and Industrial Engineering The University of Illinois, USA 2000
- [10]. Disk kočnica sa naznačenim vitalnim dijelovima
<http://dict.space.4goo.net/city/108759?q=Brake>
- [11]. Prvi poznati automobil
<https://kingsleyp.wordpress.com/2011/12/21/cugnot-the-first-automobile/>
- [12]. Disk kočnica izrađena iz kompozita s aluminijskom matricom
http://www.designnews.com/author.asp?doc_id=239090&dfpPPParams=ind_183,industry_auto_industry_gov,bid_27,aid_239090&dfpLayout=blog
- [13]. Mogući oblici ojačala
<http://materialsworld.utep.edu/Modules/Composite/Composite%20Materials/Activity%201/activity%201.htm>
- [14]. A. K. Telang, A. Rehman, G. Dixit, S. Das; Alternate materials in automobile brake disc applications with emphasis on Al composites – a technical review, India 2010
- [15]. Ghosg Shouvik, Sahoo Prasanta, Sutradhar Goutam; Study of Tribological Characteristics of Al-SiC Metal Matrix Composite, India 2015

[16]. A.K. Israa, Studying the effect of reinforcing by SiC on the dry sliding wear behavior and mechanical properties of Al-4% CU matrix alloy, Pakistan 2012

[17]. Niko Malešević, Mladen Banovac, Luciano Karbić, Zoran Bonačić-Mandinić; Metalografski atlas; Katedra za nauku o metalima i ljevarstvo Strojarsko-Brodograđevnog fakulteta; Zagreb 1964.

[18]. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Brinellu

<http://glossary.periodni.com/glossary.php?en=Brinell+hardness>