# Karakterizacija materijala obloga kočnica

**Ormuž, Pavao**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:949399

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Pavao Ormuž**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem prof. dr.sc. Zdravku Schauperlu, Daliboru Viderščaku, mag. ing, koelgama iz CVH, te mojoj djevojci na razumijevanju i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Pavao Ormuž

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: | |
| Ur. broj: | |

# DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **PAVAO ORMUŽ** Mat. br.: 0035194430

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija materijala obloga kočnica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of brake lining material**

Opis zadatka:

Danas se na tržištu za isti tip vozila može pronaći veliki broj obloga kočnica različitih proizvođača. Prema dostupnim deklaracijama postoje značajne razlike u trajnosti i funkcionalnosti tih obloga, a kao posljedica toga javlja se i značajna razlika u njihovoj cijeni.
U radu je potrebno navesti funkciju obloga kočnica za osobne automobile, vrste i najvažnija svojstva koja moraju zadovoljavati. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je karakterizirati materijal obloga kočnica koje se međusobno značajno razlikuju u cijeni. Karakerizacija treba uključivati analizu strukture, sastava, tvrdoće te faktora trenja materijala obloge. Postupak karakterizacije je potrebno ponoviti i nakon korištenja obloga kočnica, tj. nakon njihovog izlaganja intenzivnom trošenju. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o razlikama između analiziranih obloga kočnica.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ


**1. UVOD ..... 13**

**2. KOČIONI SUSTAV ..... 14**

2.1. BUBANJ KOČNICE ..... 15
2.2. DISK KOČNICE ..... 19

**3. PROCES KOČENJA ..... 22**

**4. MATERIJALI KOČIONOG SUSTAVA ..... 25**

4.1. KOČIONE ČELJUSTI ..... 25
4.2. KOČIONI DISKOVI ..... 29
4.3. KOČIONE OBLOGE ..... 31

**5. KOMPONENTE FRIKCIJSKOG MATERIJALA ..... 36**

5.1. ABRAZIVI ..... 37
*5.1.1. Karbidi, boridi i nitridi ..... 42*
*5.1.2. Metalni oksidi i silikati ..... 45*
5.2. LUBRIKANTI ..... 46
*5.2.1. Adhezija ..... 46*
*5.2.2. Lubrikanti na bazi ugljika ..... 49*
5.3. OJAČALA ..... 51
*5.3.1. Vlaknasta ojačala ..... 52*
*5.3.2. Ne-vlaknasta ojačanja ..... 53*
5.4. PUNILA I MODIFIKATORI ..... 54
*5.4.1. Punila ..... 54*
*5.4.2. Modulatori ..... 56*
5.5. VEZIVA ..... 58
*5.5.1. Organska veziva ..... 58*
*5.5.2. Anorganska veziva ..... 58*

**6. EKSPERIMENTALNI RAD ..... 59**

6.1. LABORATORIJSKA ANALIZA UZORAKA PRIJE UGRADNJE I ISPITIVANJA NA AUTOMOBILU ..... 59
*6.1.1. Mjerenje faktora trenja ..... 61*
*6.1.2. Mjerenje tvrdoće ..... 63*
*6.1.3. Test tlačne čvrstoće ..... 64*
*6.1.4. Analiza sastava i mikroskopski prikaz površine ..... 67*
*6.1.5. Mjerenje hrapavost površine ..... 69*
*6.1.6. Gustoća i poroznost ..... 73*
6.2. TERENSKO ISPITIVANJE UZORAKA ..... 75
*6.2.1. Priprema prije ispitivanje ..... 75*

*6.2.2. Ispitivanje kočionih obloga* ..... *80*
6.3. LABORATORIJSKA ANALIZA UZORAKA NAKON TERENSKOG ISPITIVANJA ..... 86
*6.3.1. XFR analiza uzoraka* ..... *86*
*6.3.2. Prikaz mikrostrukture nakon ispitivanja* ..... *87*
*6.3.3. Mjerenje faktora trenja* ..... *88*
*6.3.4. Analiza površinske hrapavosti* ..... *89*
6.4. ANALIZA REZULTATA ..... 91
**7. ZAKLJUČAK ..... 94**
**8. LITERATURA ..... 95**

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Presjek mehanizma bubanj kočnica [1] ..... 16
Slika 2.2 Simplex bubanj kočnica [1] ..... 17
Slika 2.3 Duplex bubanj kočnica [1] ..... 18
Slika 2.4 Duo-servo bubanj kočnica [1] ..... 18
Slika 2.5 Disk kočnice [1] ..... 19
Slika 2.6 Presjek disk kočnica [1] ..... 20
Slika 2.7 Brtveći prsteni kvadratnog presjeka [1] ..... 21
Slika 3.1 Ovisnost faktora kočenja C i faktora trenja [2] ..... 24
Slika 4.1. Prikaz mehanizma djelovanja disk kočnica s dva i četiri klipa [1] ..... 26
Slika 4.2. Mehanizam djelovanja kočione čeljusti [2] ..... 27
Slika 4.3. Prikaz brtvenog prstena za povrat kočionog klipa [2] ..... 28
Slika 4.4. Presjek kočione obloge [5] ..... 32
Slika 4.1. Učinak dva modela trošenja abrazivnog djelovanja [10] ..... 37
Slika 5.2. Četiri mehanizma abrazivnog trošenja [11] ..... 38
Slika 5.3. Usporedba tvrdoće površine materijala i tvrdoće abraziva [10] ..... 39
Slika 5.4. Generiranje, rast i degradacija mikro-čestica na površini kočnog obloge [10] ..... 40
Slika 5.5 Generiranje primarne i sekundarne kontaktne površine na plohi dodira obloge i diska [10] 41
Slika 5.6. Usporedba faktora razmjene energije i faktora kinetičke energije [12] ..... 47
Slika 5.7. Otvrdnuće zbog mehanizama uslijed trenja [12] ..... 48
Slika 5.8. Djelovanje mehanizama sustava za podmazivanje [12] ..... 49
Slika 5.9. Podjela ojačala [7] ..... 51
Slika 6.1 Dimenzije kočione obloge ..... 60
Slika 6.2 Uređaj za ispitivanje faktora trenja ..... 61
Slika 6.3 Uzorci korišteni u ispitivanju ..... 62
Slika 6.4 Otisci uređaja za ispitivanje tvrdoće na uzorcima ..... 63
Slika 6.5 Jedan od uzoraka tijekom ispitivanja na kidalici ..... 64
Slika 6.6 Dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 1 ..... 65
Slika 6.7 Dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 2 ..... 65
Slika 6.8 Dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 3 ..... 66
Slika 6.9 Uzorak tijekom ispitivanja na XRF uređaju ..... 67
Slika 6.10 Ispis elemenata i površina kočione obloge, UZORAK 1 ..... 68
Slika 6.11 Ispis elemenata i površina kočione obloge, UZORAK 2 ..... 68
Slika 6.12 Ispis elemenata i površina kočione obloge, UZORAK 3 ..... 69
Slika 6.13 Profil hrapavosti za uzorak UZORAK 1 ..... 70
Slika 6.14 Profil hrapavosti za uzorak UZORAK 2 ..... 71
Slika 6.15 Profil hrapavosti za uzorak UZORAK 3 ..... 72
Slika 6.16 Masa uzoraka tijekom mjerenja poroznosti ..... 74
Slika 6.17 Satelitski prikaz piste za mjerenje ..... 75
Slika 6.18 Vozilo korišteno za ispitivanje ..... 76
Slika 6.19 Dimenzije vozila korištenog za ispitivanje ..... 76
Slika 6.20 Način opterećenja automobila teretom i način učvršćenja tereta (*Q/g* = 1000kg) ..... 77
Slika 6.21 Prikaz kotača prije ispitivanja termo kamerom ..... 78

Slika 6.22 Pirometar ..... 79
Slika 6.23 RACE LOGIC DRIFT-BOX uređaj ..... 79
Slika 6.24 Slika dijagrama vremena ubrzanja i brzine vozila ..... 80
Slika 6.25 Slika dijagrama vremena ubrzanja i brzine vozila ..... 82
Slika 6.26 Plamen na kočionoj oblozi nakon 9. ispitivanja ..... 82
Slika 6.27 Slika dijagrama vremena ubrzanja i brzine vozila ..... 84
Slika 6.28 Prikaz površine za UZORAK 1 ..... 87
Slika 6.28 Prikaz površine za UZORAK 2 ..... 87
Slika 6.29 Prikaz površine za UZORAK 3 ..... 88

# POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Svojstva kočionog sustava ovisno o intenzitetu [2] ..... 22
Tablica 4.1 Povijest materijala kočionih obloga [5] ..... 31
Tablica 4.2 Dijelovi kočione obloge i njihovi zadaci [5] ..... 32
Tablica 4.3 Klasifikacija materijala kočionih obloga [6] ..... 33
Tablica 4.4 Funkcije materijala kočionih obloga [6] ..... 35
Tablica 5.1 Vrste karbida upotrebljavani kao abrazivi u kočionim oblogama [11] ..... 42
Tablica 5.2 Najčešće upotrebljavani karbidi [11] ..... 43
Tablica 5.3 Glavne karakteristike karbida u usporedbi s dijamantom i silicij-karbidom [10] ..... 44
Tablica 5.4 Svojstva minerala karbonatnih sulfata i fosfata [8] ..... 55
Tablica 6.1 Tvorničke specifikacije kočionih obloga korištenih u ispitivanju [9] ..... 60
Tablica 6.2 Cijene uzoraka korištenih u ispitivanju ..... 60
Tablica 6.3 Rezultati produljenja opruge uređaja za ispitivanje faktora trenja ..... 62
Tablica 6.4 Rezultati ispitivanja faktora trenja ..... 62
Tablica 6.5 Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorcima ..... 63
Tablica 6.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka ..... 66
Tablica 6.7 Srednje vrijednosti parametara hrapavosti površine za UZORAK 1 ..... 70
Tablica 6.8 Srednje vrijednosti parametara hrapavosti površine za UZORAK 2 ..... 71
Tablica 6.9 Srednje vrijednosti parametara hrapavosti površine za uzorak UZORAK 3 ..... 72
Tablica 6.10 Rezultati mjerenja gustoće ..... 73
Tablica 6.11 Rezultati poroznosti ..... 74
Tablica 6.12 Temperature lijevog i desnog uzorka kočione obloge tijekom kočenja ..... 81
Tablica 6.13 Prikaz usporenja, zaustavnog puta i vremena zaustavljanja tijekom ispitivanja ..... 81
Tablica 6.14 Temperature lijevog i desnog uzorka kočione obloge tijekom kočenja ..... 83
Tablica 6.15 Prikaz usporenja, zaustavnog puta i vremena zaustavljanja tijekom ispitivanja ..... 83
Tablica 6.16 Temperature lijevog i desnog uzorka kočione obloge tijekom kočenja ..... 84
Tablica 6.17 Prikaz usporenja, zaustavnog puta i vremena zaustavljanja tijekom ispitivanja ..... 85
Tablica 6.18 Ispis elemenata . očitanih XRF uređajem ..... 86
Tablica 6.19 Rezultati ispitivanja faktora trenja nakon terenskih ispitivanja ..... 88
Tablica 6.18 Parametri hrapavosti nakon terenskih ispitivanja ..... 89
Tablica 6.19 Parametri hrapavosti nakon terenskih ispitivanja ..... 89
Tablica 6.20 Parametri hrapavosti nakon terenskih ispitivanja ..... 90
Tablica 6.21 Konačni rezultati laboratorijskih ispitivanja ..... 91
Tablica 6.22 Prikaz rezultata dobivenih terenskim ispitivanjem ..... 91
Tablica 6.23 Usporedba sastava materijala za UZORAK 1, prije i poslije ispitivanja na automobilu 92
Tablica 6.24 Usporedba sastava materijala za UZORAK 2, prije i poslije ispitivanja na automobilu 92
Tablica 6.25 Usporedba sastava materijala za UZORAK 3, prije i poslije ispitivanja na automobilu 92
Tablica 6.26 Rezultati faktora trenja ..... 93

## POPIS OZNAKA

| OZNAKA | MJERNA JEDINICA | ZNAČENJE |
|---|---|---|
| $Cp$ | $Jkg^{-1}K^{-1}$ | specifični toplinski kapacitet |
| $E$ | GPa | modul elastičnosti |
| $F$ | N | sila |
| $F_n$ | N | normalna sila |
| $HB$ | - | tvrdoća prema Brinellu |
| $K_{IC}$ | $MPam^{1/2}$ | lomna žilavost |
| $l$ | mm | duljina |
| $M$ | Nm | moment sile |
| $T$ | °C | temperatura |
| $t$ | min | vrijeme |
| $\alpha$ | $10^{-6}K^{-1}$ | srednja toplinska rastezljivost |
| $\lambda$ | $Wm^{-1}K^{-1}$ | toplinska vodljivost |
| $\mu$ | - | faktor trenja |
| $\rho$ | $g/cm^3$ | gustoća |

# SAŽETAK

U radu su ispitane tri vrste kočionih obloga za isti tip automobila; njihova najvažnija svojstva i karakteristike u novom, nekorištenom stanju, te nakon intenzivnog korištenja u ekstremnim uvjetima vožnje. Također je praćeno ponašanje tih obloga tijekom korištenja te su mjerene najvažnije značajke kočenja. Rezultati laboratorijskih istraživanja tri vrste kočionih obloga prije i nakon testiranja pokazuju razlike u svojstvima, faktoru trenja, tlačnoj čvrstoći, tvrdoći, površinskoj hrapavosti i kemijskom sastavu. Laboratorijski pokusi rađeni su na principu usporedbe te su neki parametri pokusa promijenjeni radi lakšeg izvođenja ispitivanja. U svim laboratorijskim uvjetima dokazana je dominantnost jednog uzorka koji ujedno ima i najvišu, ali ne previsoku cijenu. Prilikom terenskog ispitivanja, kada su kočione obloge bile testirane u ekstremnim uvjetima na opterećenom gospodarskom vozilu, specijalnim uređajem utvrđene su vrhunske karakteristike i performanse najskupljih kočionih obloga, a zabrinjavajuće i opasno loše značajke jeftinih, koji se prodaje po najnižoj cijeni.

Ključne riječi: kočione obloge, kočnice, laboratorijska ispitivanja, faktor trenja, tlačna čvrstoća, tvrdoća, površinska hrapavost, kemijski sastav

## SUMMARY

Three types of brake pads for the same type of car were tested in this paper; their most important features and characteristics in a new, unused state, and after intensive use in extreme driving conditions. The behaviour of these breaking pads was also monitored during use and the most important braking characteristics were measured. The results of laboratory tests of these three types of brake pads before and after testing show differences in properties, friction factor, compressive strength, hardness, surface roughness and chemical composition. Laboratory experiments were performed on a comparison basis and some test parameters were modified to facilitate easier testing. In all laboratory conditions, the dominance of a sample that has the highest, but not too high, price is obvious. On field testing, when the brake pads were tested in extreme conditions on a loaded commercial van, the special equipment has shown the top performance of the most expensive brake pads and the problematic and dangerous features of the breaking pads that are sold at the lowest price.

Key words: brake pads, brakes, compressive strength, hardness, surface roughness, chemical composition, friction factor

# 1. Uvod

Tehnika motornih vozila je u proteklom stoljeću doživjela izuzetan razvoj. Bitan dio tehnike vozila odnosi se na kočenje. Kočioni sustavi sve su bolji, a trajnost i performanse su usavršene. To je omogućeno boljim poznavanjem procesa kočenja i najvažnije, upotrebom novih materijala. Bitan dio kočionog sustava su kočione obloge. Danas se na tržištu može pronaći više vrsta kočionih obloga različitih proizvođača za isti tip vozila. Postoje značajne razlike u trajnosti, funkcionalnosti, a kao posljedica toga i u cijeni tih kočionih obloga. U radu su obrađene tri vrste kočionih obloga različitih cjenovnih razreda za isti tip automobila, te su karakterizirana njihova svojstva i struktura, prije i nakon provedenih terenskih ispitivanja u realnim uvjetima na automobilu.

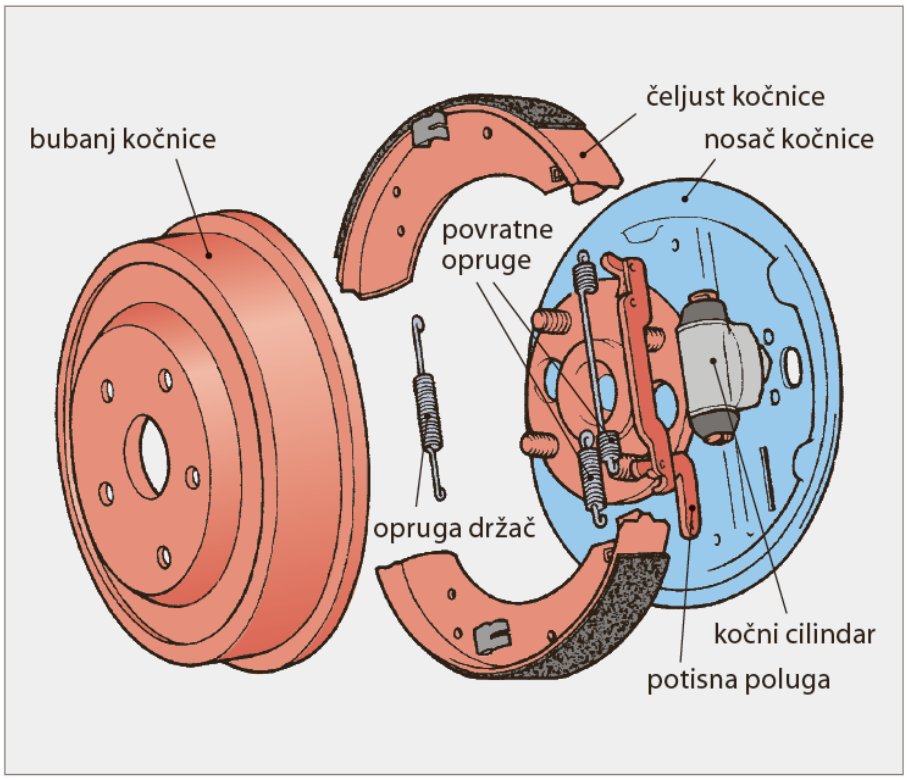
# 2. Kočioni sustav

U kočnicama se ostvaruje moment za usporavanje i zaustavljanje vozila, odnosno za pretvaranje kinetičke energije kretanja vozila u toplinsku energiju. Kočnice moraju osigurati potrebnu snagu za zaustavljanje vozila, ali i energetske kapacitete za preuzimanje i daljnji transfer toplinske energije koja se razvija tijekom kočenja. Propisi zahtijevaju da vozilo mora imati dva neovisna sustava kočenja. Ovisno o namjeni, kočioni sustavi se dijele na: radnu kočnicu (pokreće nožnom papučicom kod većine motornih vozila ili ručkom kod motocikala ili bicikala te se koristi za usporavanje i zaustavljanje vozila) i parkirnu kočnicu (sprječava pomicanje zaustavljenog vozila posebice na nizbrdici) [1].

Kočni sustavi nisu opremljeni elektroničkim dijelovima koji bi mogli ugroziti rad ključnih dijelova tog sustava iz sigurnosnih razloga. Sustav mora biti tako izveden da vozilo može usporiti pouzdano i ugodno za putnike te da osigura najkraći mogući put kočenja pri naglom kočenju uz zadržavanje dinamičke stabilnosti vozila. Snaga kočnica je mnogo veća od snage motora koji pogoni vozilo. Snaga koju kočnice preuzimaju pretvara se u toplinsku energija, ta toplina se mora što brže predati okolini jer učinkovitost kočnica u velikoj mjeri ovisi o njihovoj temperaturi. Kočnice moraju biti ugrađene u vozilo na takav način da se omogući jednostavno ispitivanje svih njegovih dijelova prije i tijekom upotrebe. Dijelovi podvrgnuti trošenju moraju biti dimenzionirani tako da se mogu zamijeniti nakon potrošenosti. Kočnica stvara moment kočenja koji kinetičku energiju vozila pretvara u toplinu. Na modernim vozilima tarne kočnice mogu biti izvedene kao disk kočnice ili bubanj kočnice [1].

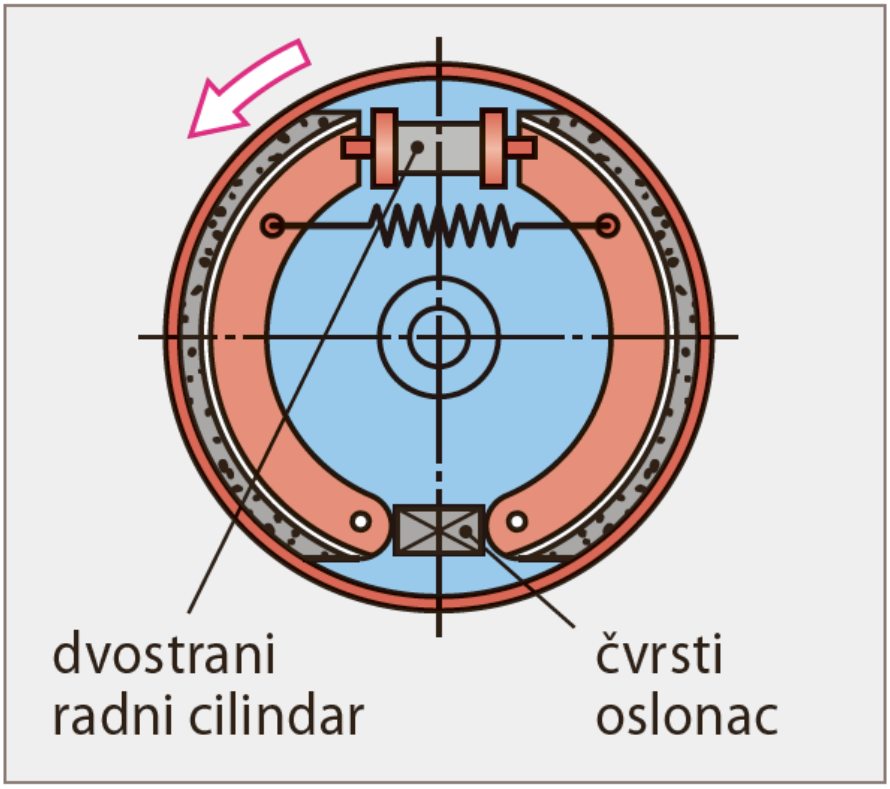
## 2.1. Bubanj kočnice

Bubanj kočnice su radijalne kočnice koje se sastoje od kočne papuče (pakne) i kočnog bubnja čvrsto povezanog s kotačem. Dvije kočne papuče se tijekom kočenja pomiču prema van u radijalnom smjeru i pritišću unutarnju tarnu površinu kočnog bubnja, takav je mehanizam prikazan na slici 2.1. Nakon prekida kočenja, opruga vrati kočne papuče u njihov početni položaj osiguravajući dovoljnu ali minimalnu zračnost između kočnih obloga i tarne površine bubnja. Kod tzv.simplex bubanj kočnica jedna kočna papuča se, s obzirom na smjer sile trenja između papuče i bubnja, naziva potiskivana papuča, a druga papuča je povlačna papuča. Kada se vozilo kreće prema naprijed, potiskivanu kočnu papuču sila trenja dodatno uvlači prema obodu bubnja čime se njena normalna sila dodatno povećava, a povlačnu kočnu papuču sila trenja odvaja od oboda bubnja, što smanjuje veličinu njenog trenja s bubnjem. Kada se vozilo kreće unazad, povlačna i potiskivana papuča promijene namjenu. Zbog toga ukupni iznos sile trenja ostaje nepromijenjen. Kod tzv. duplex bubanj kočnica obje su kočne papuče potiskivane kod kretanja vozila prema naprijed, no stupanj djelovanja značajno pada pri vožnji unazad jer su tada obje kočne papuče povlačne. Zbog toga se češće koriste tzv. duo-servo bubanj kočnice. Bubnjevi kočnica se najčešće izrađuju od sivog lijeva zbog niske cijene. Za posebne namjene koriste se dvodijelni kompozitni ljevovi (vanjski dio izrađen je od aluminijske slitine u koji je umetnut prsten od sivog lijeva zbog svojih tarnih svojstava) izrađeni od keramike ili aluminijskog oksida lijevana u aluminijskom bubnju [1].



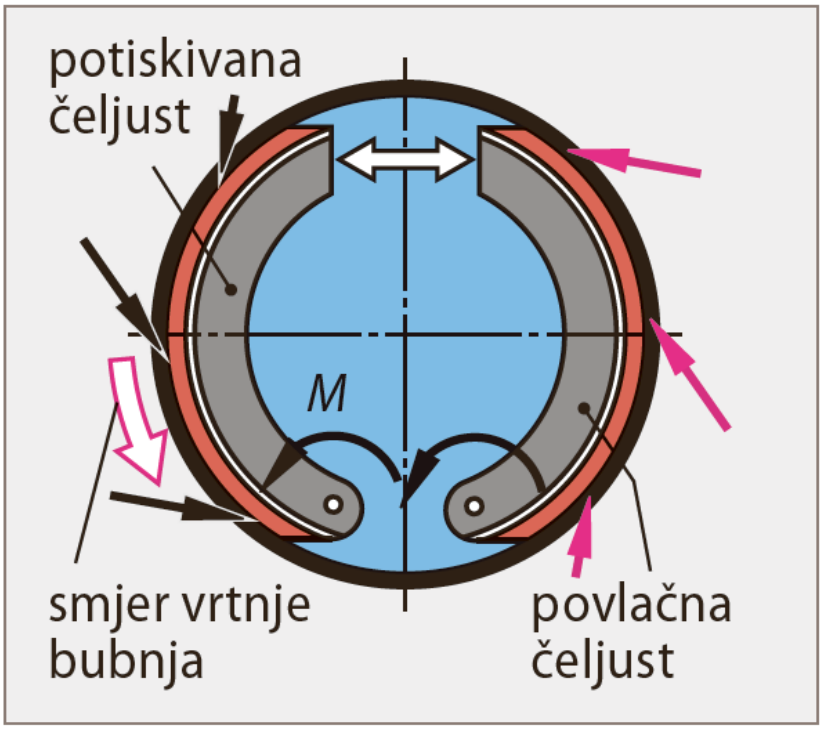

**Slika 2.1 Presjek mehanizma bubanj kočnica [1]**

Simplex bubanj kočnica (slika 2.2) se koristi kod putničkih automobila na stražnjoj osovini najčešće zbog male proizvodne cijene. Moment kočenja ne ovisi o promjenjivom koeficijentu kočenja što rezultira jednolikom raspodjelom kočne sile na lijevoj i desnoj strani. Kočna papuča koja se nalazi na prednjoj strani bubnja u smjeru kretanja vozila (potiskivana) stvara oko 65 % momenta kočenja dok stražnja (povlačna) stvara 35 % momenta kočenja. Zbog toga potiskivana papuča često ima deblju kočnu oblogu kako bi se kompenziralo jače trošenje.



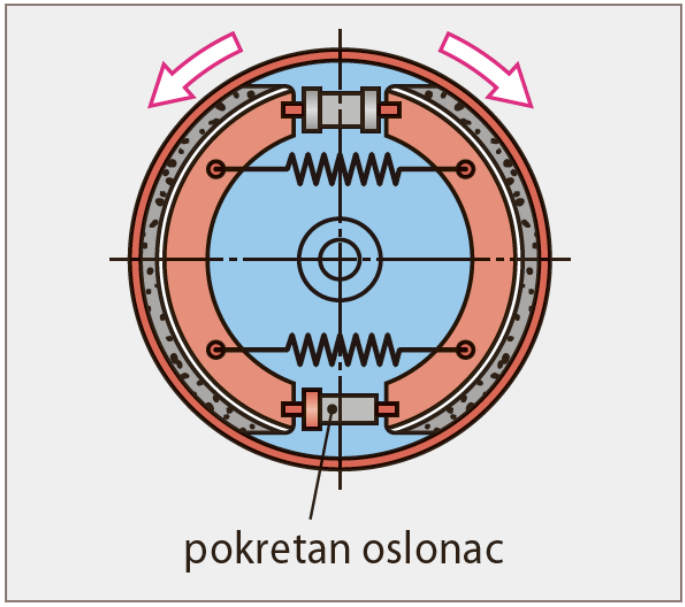

**Slika 2.2 Simplex bubanj kočnica [1]**

Duplex kočnice (slika 2.3) se mogu aktivirati mehanički, pneumatski ili hidraulički. Ove vrste kočnica se najčešće aktiviraju hidraulički. Primjenjuju se na putničkim vozilima ili vozilima s lakim teretom. Duplex bubanj kočnica ima dvije kočne papuče jednake konstrukcije. Svaka papuča ima svoje uležištenje i pritisnuta je na obod bubnja pomoću jednostrukog cilindra.




**Slika 2.3 Duplex bubanj kočnica [1]**

Duo servo bubanj kočnice (slika 2.4) proizvode velike momente kočenja jer razmještaj kočnih papuča stvara jaki samoojačavajući učinak. Zbog toga se ova vrsta kočnica najčešće postavlja na vozila velike nosivosti. Za razliku od duo servo bubanj kočnica, kod običnih servo kočnica samo je jedna kočna papuča nepokretno oslonjena dok se druga kočna papuča oslanja neposredno na nju [1].




**Slika 2.4 Duo-servo bubanj kočnica [1]**

## 2.2. Disk kočnice

Karakteristična veličina koja je pridružena tarnim kočnicama je omjer između stezne sile i tangencijalne sile stvorene na bubnju ili disku. Taj se omjer naziva koeficijentom kočenja te je određen konstrukcijom, geometrijom i koeficijentom trenja kočnih obloga. Bubanj kočnice može ostvariti veće sile kočenja pri istim steznim silama od disk kočnica pa je i koeficijent kočenja mnogo veći. Variranje koeficijenta trenja kočnih obloga mnogo je izraženije kod bubnja nego kod disk kočnica što ima velik utjecaj na moment kočenja pri čemu su disk kočnice u prednosti. Prednost disk kočnica nad bubnjevima je u manjoj osjetljivosti na promjene koeficijenta trenja i većoj toplinskoj stabilnosti. Disk kočnice su počele zamjenjivati bubanj kočnice iz 1960-ih godina, a i današnja motorna vozila najčešće koriste upravo disk kočnice [1].

**Slika 2.5 Disk kočnice [1]**

Diskovi kočnica su direktno povezani s kotačem, kliješta (stezači, čeljusti) su nepokretna, odnosno vezana za elemente strukture vozila i s djelom površine pritišću disk. U kliještama se nalazi mehanizam pomoću kojeg se ostvaruje pritisak na disk s obje strane. Mehanizam može biti mehanički ili hidraulični, a pritisak se ostvaruje preko kočionih obloga obloženim frikcijskim materijalima koje su aksijalno vođene. Disk kočnice mogu biti izvedene s nepomičnim i pomičnim kliještima. Visoki postotak primjene disk kočnica u odnosu na druge

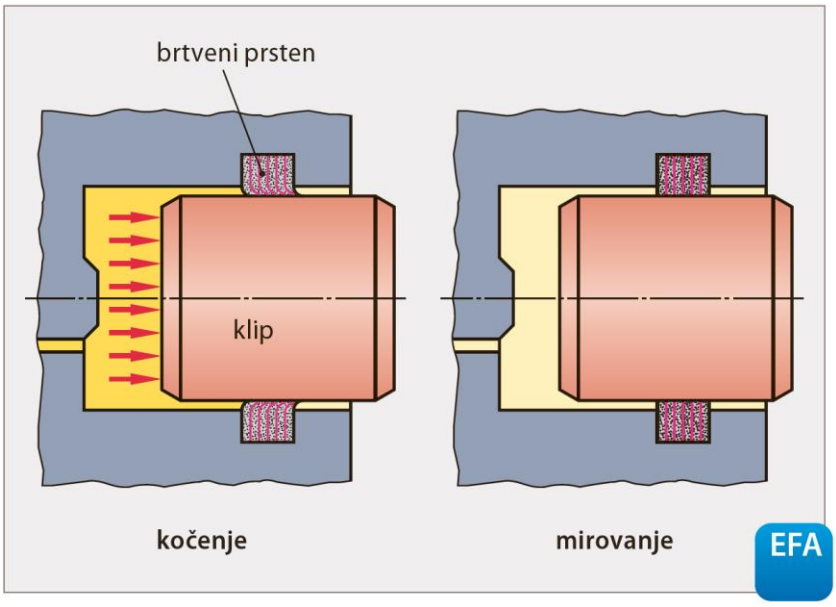
vrste kočionih sustava rezultat je određenih prednosti konstrukcijskih rješenja kao što su: velika stabilnosti trenja u širokom području promjene radnih temperatura (mala osjetljivost na toplinska opterećenja), mala osjetljivost na vodu i utjecaje iz atmosfere, mala neovješena masa (neelastično vezan element za vozilo), jednostavna konstrukcija s malo sastavnih dijelova i jednostavno održavanje (lak uvid u stanje potrošenosti i brza zamjena). Problemi se javljaju kod velikih opterećenja frikcijske površine, odnosno nemogućnost povećanja površine (kočionih obloga) iznad određene granice. Vrlo su visoke vrijednosti toplinskog tijeka koji se dovodi disku i izražena je njegova neravnomjernost po volumenu diska, a to finalno izaziva velika toplinska opterećenja odnosno velike deformacije što dovodi do pojave škripanja i neravnomjernog trošenja obloga i diska. Relativno je mali prijenosni omjer između sile aktiviranja i sile trenja koju razvija kočnica. Zbog toplinske stabilnosti i ujednačenog odziva, danas se koriste na prednjim osovinama svih vozila. Vrlo često se postavljaju i na stražnje osovine vozila. Sila stezanja kočne čeljusti prenosi se na kočne obloge (pločice) u aksijalnom smjeru pomoću hidrauličkih cilindara. Obloge djeluju na tarne površine kočnog diska. Kočni klipovi i obloge nalaze se u kućištu koje je namješteno preko vanjskog oboda diska. Površina kočnih obloga prekriva površinu glatkog i prstenasto oblikovanog kočnog diska (kočnice s djelomičnim nalijeganjem) [2].

**Slika 2.6 Presjek disk kočnica [1]**

Disk kočnice se dijele na:

1) kočnice s nepokretnim kliještima
2) okvirne kočnice s plivajućim kliještima
3) kočnice s plivajućim kliještima.

Kočnice s nepokretnim kliještima imaju kočne cilindre s obje strane kočnog diska, dok okvirne kočnice s plivajućim kliještima i kočnice s plivajućim kliještima imaju kočne cilindre samo s jedne strane kočnog diska. Postavljene su tako da se slobodno mogu pomicati u osnom smjeru. Osim disk kočnica s djelomičnim nalijeganjem obloge, naravno postoje i s potpunim nalijeganjem (prekrivanjem). Kod tih kočnica površina kočnih obloga jednaka je površini vijenca diska i ona cijelom tom površinom naliježe na disk s obje strane. Kočni klipovi zabrtvljeni su u čeljusti s brtvećim prstenima kvadratnog poprečnog presjeka koji su umetnuti u utor(slika 2.7.). Nakon procesa kočenja oni povlače klipove natrag i osiguravaju stvaranje potrebnog zazora između kočne obloge i diska. Brtveni prsteni osiguravaju povratak klipova na njihovo mjesto i u slučaju značajne osne deformacije i pomaka diska [2].




**Slika 2.7 Brtveći prsteni kvadratnog presjeka [1]**

# 3. Proces kočenja

Prilikom kočenja javljaju se različiti mehanizmi koji uzrokuju visoke temperature i trošenje materijali kočione obloge i diska. Trošenje je posljedica adhezije i abrazije uz veliko kontaktno opterećenje diska i kočione obloge. Na površini kočione obloge se nalazi frikcijski materijali koji je i osnova kočionog sustava, a je on sastavljen od dvije kontaktne plohe; primarne i sekundarne. Dodirom diska i obloge prilikom kočenja, najtvrđi dijelovi kočione obloge su u kontaktnu sa diskom te se stvaraju mikro utori na samom disku i abrazivne čestice (fragmenti). Kombinacija temperature, tlaka i tangencijalne sile drži čestice stisnutim i nagomilanim uz površinu. Fragmenti (čestice) su heterogene strukture te prilikom međusobnog dodira diska i obloge, oslobađaju se manji fragmenti koji se otpuštaju u atmosferu u obliku prašine. Trošenjem se inducira odvajanje čestica od frikcijskog materijala i to u blizinu velikih i tvrdih konstituanata te se na taj način formiraju primarne i sekundarne plohe koje su posljedica dinamičkog procesa. Komponente tih čestica su načelno veće od 100 μm i njihova tvrdoća je puno veća od tvrdoće diska. Najčešće su to čelična vlakna, ojačane čestice bakra i mjedi. Zbog intenzivne tangencijalne sile, kontaktne površine postaju oštećene i stvaraju prašinu (iz sekundarne plohe). Trošenje nastaje zbog gubitka potpore vlakana koja se odvajaju zbog nepravilnosti ili nečistoća diska. U kočionom sustavu trošenje je intenzivnije tijekom naglog kočenja (tablica 3.1) pri velikim brzinama zbog velikog prirasta topline u materijalu prilikom čega se i smanjuje koeficijent trenja što pak utječe na efikasnost cijelog sustava [3].

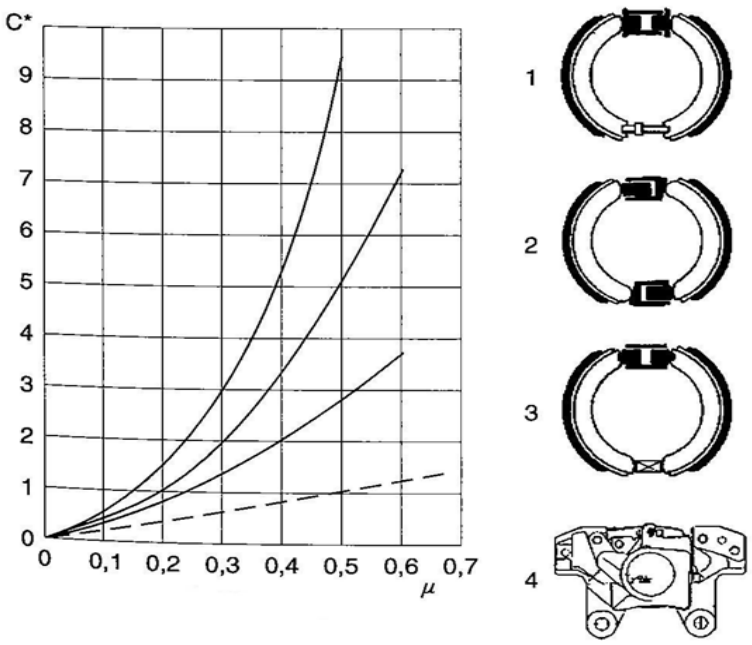
Tablica 3.1 Svojstva kočionog sustava ovisno o intenzitetu [2]

| **Način kočenja** | **Sila pritiska pedale [N/mm$^2$]** | **Usporenje [m/s$^2$]** | **Temperatura na kontaktu [°C]** | **Trošenje kočione obloge [m$^2$/N]** |
|---|---|---|---|---|
| Normalno kočenje | 0,2-1 | < 2 | < 300 | $5 \times 10^{-15} – 4 \times 10^{-14}$ |
| Intenzivno kočenje | 1,1-4 | > 5 | > 300 | $> 5 \times 10^{-15} – 4 \times 10^{-14}$ |

Visoke temperature utječu na koeficijent trenja između kočnih obloga i diskova. Pri normalnim radnim temperaturama, koje se javljaju kod usporavanja vozila, utjecaji su neznatni. Unatoč tome pri pretjeranom toplinskom naprezanju dijelova kočnog sustava

koeficijent trenja značajno pada i, da bi kočenje bilo efikasno, nužno je snažnije pritiskati papučicu kočnice. Jedan od uzroka gubitka trenja je isparavanje određenih komponenata kočne obloge koje stvaraju zračni zazor između obloge i diska. Ova se pojava može izbjeći dodatnom toplinskom obradom kočne obloge prilikom proizvodnog procesa. Postoje posebne kočne obloge za korištenje kod trkaćih vozila koje pokazuju najbolja svojstva pri visokim temperaturama. Prilikom upotrebe na visokim temperaturama javljaju se vruće točke. Vruće točke su mjesta gdje su promjene u materijalu uzrokovane toplinskim preopterećenjem (mikrostrukturalne promjene u disku) jednoliko raspoređene površinom diska i uzrokuju podrhtavanje. Problemi se javljaju kod povišenja temperature kočnog diska te izazivaju promjenu koeficijenta trenja između kočnog diska i kočne obloge, te promjenu temperature kočne tekućine. Tada dolazi do „fadinga“ tj. smanjenja djelovanja kočnica zbog povišenja njihove temperature. Da bi se poboljšalo hlađenje na prednjim kotačima, koji su obično više opterećeni, ugrađuju se samoventilirajuće kočnice. Zbog temperaturne ravnoteže kod kočnica vrlo je važan razmještaj dijelova kočnog sustava (kočne čeljusti, disk, vodovi, glavni kočni cilindar, itd.) jer je važan odgovarajući protok zraka oko njih. Potrebno je osigurati hlađenje kočne tekućine zbog pojave parnih čepova unutar kočnih vodova koja može dovesti do potpunog otkazivanja kočnog sustava. Zahtjev za dobrim hlađenjem disk kočnica oprečan je zahtjevu za zaštitu diska od atmosferskih prilika koje smanjuju koeficijent trenja (voda, sol protiv smrzavanja ceste). Zato se moraju poduzeti mjere za zaštitu diskova od takvih utjecaja koje neće utjecati na hlađenje kao što su štitovi protiv zapljuskivanja ili zračne pregrade i zračni kanalima. U usporedbi s kočnim diskovima, kočni bubnjevi su puno bolje zaštićeni od vanjskog utjecaja, ali im je mogućnost hlađenja mnogo lošija zbog nemogućnosti udvostručavanja površine za gubitak topline unutarnjim provjetravanjem. Također se može javiti širenje bubnja zbog zagrijavanja zbog čega hidraulički uređaj mora savladati dodatni zazor između kočne obloge i bubnja čime se smanjuje učinkovitost kočenja. Kočna tekućina je higroskopna, što znači da upija vlagu iz okoline. Ako se kočna tekućina ne mijenja dulje vrijeme, porasti će udio vode u njoj. Time se smanjuje vrelište kočne tekućine, što olakšava pojavu parnih čepova u vodovima. Pojavom parnih čepova produljuje se hod papučice kočnice, a često kočnice i potpuno otkažu. Karakteristična veličina koja je pridružena tarnim kočnicama je omjer tangencijalne sile stvorene na bubnju ili disku i stezne sile. Taj se omjer naziva koeficijentom kočenja BC ili (engl. C - star value (C * )). Taj je faktor određen konstrukcijom, geometrijom i koeficijentom trenja kočnih obloga. Bubanj kočnice mogu ostvariti veće sile kočenja pri istim steznim silama od disk kočnica, pa je i njihov koeficijent

kočenja mnogo veći. Variranje koeficijenta trenja kočnih obloga mnogo je izraženije kod bubanj nego kod disk kočnica što ima velik utjecaj na moment kočenja (slika 3.1) [3].



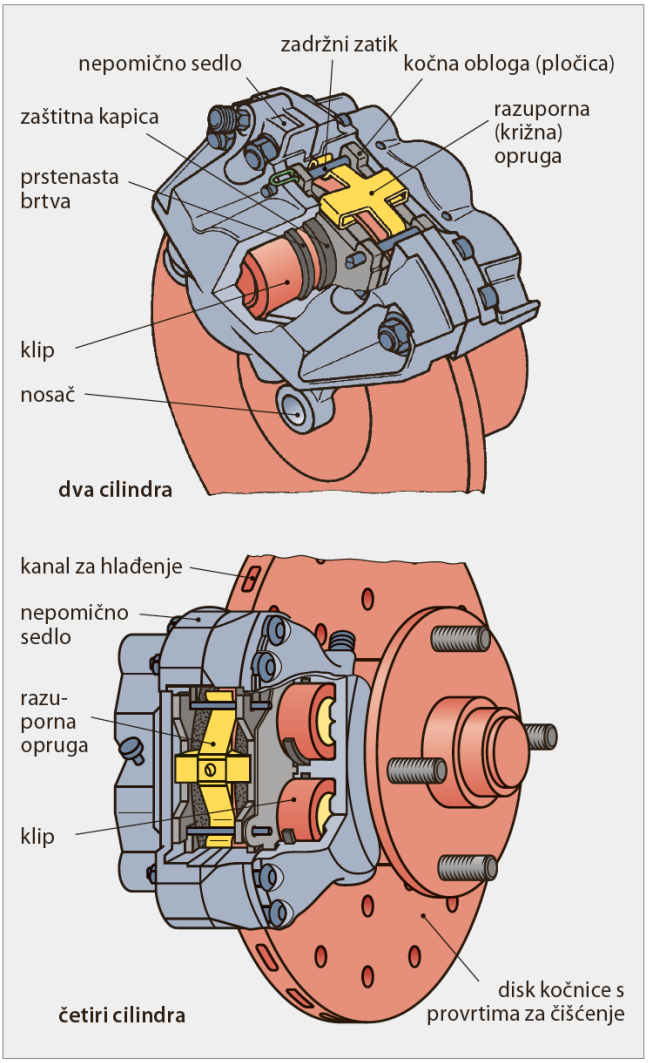

**Slika 3.1 Ovisnost faktora kočenja C i faktora trenja [2]**

1) Duo servo bubanj,
2) Duplex bubanj,
3) Simplex bubanj,
4) disk kočnica

# 4. Materijali kočionog sustava

## 4.1. Kočione čeljusti

Nepomične kočne čeljusti se koriste kod teških i/ili brzih putničkih vozila s pogonom na stražnje kotače zbog mogućnosti ugradnje i dovoljno prostora. Kočiona čeljust ne mora biti duboko unutar naplatka. Karakteristika nepokretnih kočnih čeljusti su kočni klipovi postavljeni s obje strane tarnih površina kočnog diska. Kućište ove vrste kočne čeljusti sastoji se od dva dijela koja su osno povezana vijcima. Kočni cilindri se nalaze s obje strane diska i povezani su s hidrauličkim vodovima koji se nalaze s obje strane kućišta. Ti vodovi su na dodirnim površinama zatvoreni brtvama. Mjesto na kojem hidraulički vodovi prelaze preko oboda kočnog diska toplinski je osjetljivo. Zbog toga se poduzimaju posebne mjere za dobavu zraka za hlađenje i odgovarajućeg dimenzioniranja kočnog diska. To se radi kako bi se spriječilo pojavljivanje parnih čepova unutar kočne tekućine koji bi onemogućili rad kočnog sustava [4].

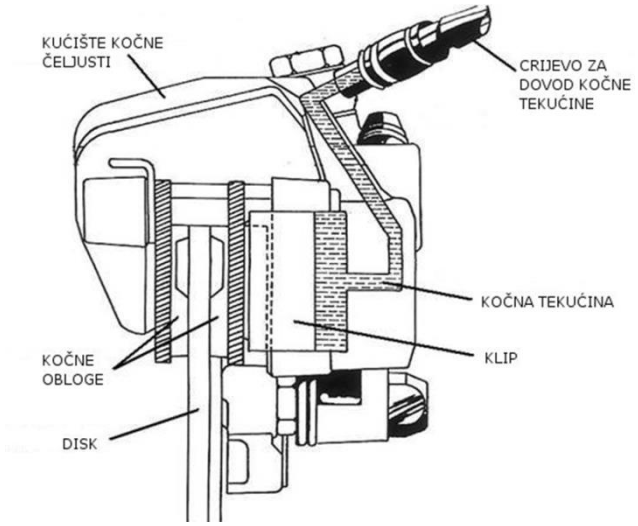



**Slika 4.1. Prikaz mehanizma djelovanja disk kočnica s dva i četiri klipa [1]**

Okvirne kočne čeljusti slične su plivajućim kočnim čeljustima. Koriste se kod vozila s negativnom nagibom kotača i moraju biti postavljene dublje unutar naplatka kotača. To znači da je prostor raspoloživ za montažu smanjen i tada se koristi okvirna kočna čeljust jer je kočni klip postavljen s jedne strane. Taj se klip nalazi s unutrašnje strane diska. Okvir koji je postavljen iznad diska prenosi silu na vanjsku kočnu papuču. Kućište kočnog cilindra umetnuto je u okvir. Tangencijalnu kočnu silu svake kočne papuče podupire nosač kočne čeljusti koji je spojen vijcima na glavčinu kotača. Veliki, otvoreni žljebovi u koje se umeću kočne papuče omogućuju dobar protok zraka za hlađenje te se dobro hladi kočiona tekućina [4].

Plivajuće kočne čeljusti (slika 4.2) imaju jedan kočni klip postavljen s unutarnje strane diska i zauzimaju malo prostora na vanjskoj strani, čime se omogućava lakša montaža. Male

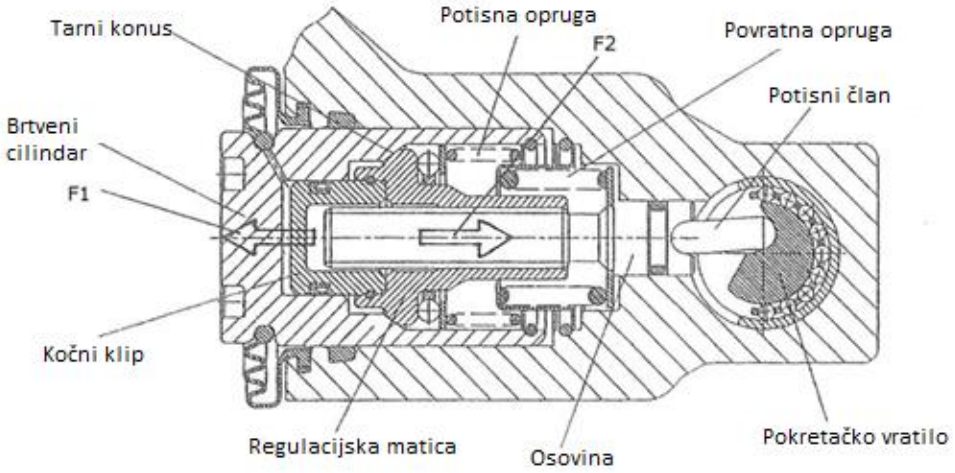
dimenzije omogućuju čak i kombinaciju negativnog nagiba osovinice kotača s prednjim pogonom vozila. Prednosti plivajuće kočne čeljusti u odnosu na ostale vrste su velike površine kočnih obloga, dobar oblik kočnih obloga, mala masa i kompaktna konstrukcija. Kućište je izrađeno iz jednog komada i kliže se dvije poluge koje su vezane na nosač ili na glavčinu kotača. Osne sile trenja u nosaču djeluju na tarnu površinu diska što doprinosi ujednačenom trošenju kočnih obloga, jer obloge dodiruju disk jednako po cijeloj svojoj površini, a cviljenje kočnica je smanjeno [4].




**Slika 4.2. Mehanizam djelovanja kočione čeljusti [2]**

Kombinirana plivajuća kočna čeljust omogućuje funkciju radne i parkirne kočnicu u jednoj kočnoj čeljusti. Koristi se isti tarni par, s tim da se radnom kočnicom upravlja hidraulički kao kod obične plivajuće kočne čeljusti. Parkirna se kočnica pokreće mehanički pomoću ručice i Bowdenovog čeličnog užeta koje okreće vratilo za pokretanje kočnice preko polužnog mehanizma. Parkirna se kočnica pokreće pomoću ručice ili pomoću elektroničkog pokretača. Podešavanje zazora uzrokovanog trošenjem kočnih obloga nešto je složenije kod parkirne nego kod radne kočnice gdje se kočni klip jednostavno pomiče ispod brtvenog prstena.

Kada se kočna obloga potroši do to mjere da brtveni prsten (slika 4.3) ne može osigurati dovoljni pomak za povratak kočnog klipa na njegovo mjesto i dođe do značajnog povećanja hoda papučice kočnice, mora se omogućiti dodatni način podešavanja novonastalog zazora između kočne obloge i diska [4].




**Slika 4.3. Prikaz brtvenog prstena za povrat kočionog klipa [2]**

Kućišta kočnih čeljusti najčešće su proizvedena od sivog lijeva. Sivi lijev je Fe-C legura s 2,03 % - 4,5 % ugljika. Najčešći kemijski sastav sivog lijeva je: 2,5 – 4,5 % C, 0,3 – 1,2 % Mn, 1 – 4 % Si, 0,4 – 1,5 P i < 0,1 % S. Karakterizira ga vrlo visoka tlačna čvrstoća, niska istezljivost i slaba žilavost. U nekim slučajevima kućišta se izrađuju od aluminija povišene čvrstoće kada su povezana vijčanim spojem, a sedlo kočione obloge je izrađeno od sivog lijeva visoke čvrstoće. Takva kućišta su pogodna kada se želi uštedjeti na masi. Kočni klipovi izrađuju se od sivog lijeva, aluminijskih slitina i polimernih materijala pogodnih za injekcijsko prešanjem. Čelični kočni klipovi su obično proizvedeni tehnologijom dubokog vučenja ili ekstrudiranja [4].

## 4.2. Kočioni diskovi

Kočenjem kinetička energija vozila se pretvara u toplinu nastalu trenjem između kočione obloge i kočionog diska. Čak devedeset posto energije preuzima disk koji je potom treba predati okolini. U ekstremnim uvjetima disk može doseći temperaturu do 650 $^{0}$C. Deformacija kočnih diskova se javlja zbog zagrijavanja, te, zbog toplinskog širenja, dolazi do promjene oblika tarne površine diska iz ravne u konusnu. Ta pojava nastaje zbog oblika kočnog diska gdje se prirubnica postavlja samo s jedne strane diska što omogućava njegovo sastavljanje s glavčinom kotača. Zbog toga se dodir između kočne obloge i diska ostvaruje u točkama, a ne po cijeloj površini, što dovodi do nejednolikog trošenja kočne obloge, a time i do pojave neželjene buke [4].

Prilikom termičkog trošenja dolazi do pojave nejednolikog momenta kočenja što dovodi do promjene sile pri samom procesu kočenja tj. dolazi do neujednačene sile kočenja na različitim dijelovima diska tijekom njegovog okretanja što za posljedicu ima pojavu vibracija. Uzroci mogu biti termički (tijekom usporavanja) i hladni (javljaju se pri svakoj brzini kretanja). Prilikom termičkog trošenja dolazi do pojave zvuka u frekventnom opsegu između 100 Hz i 250 Hz tijekom kočenja i pojave vibracija na upravljaču i dijelovima šasije automobila. Intenzitet ovih pojava zavisi od intenziteta samog kočenja. Termičko trošenje često se može identificirati pojavom okruglaste mrlje na površini samog diska. Ovakve mrlje nastale su u samom procesu kočenja uslijed lokalnog pregrijavanja koje rezultira transferom frikcijskog materijala s kočione pločice na kočioni disk ili trajnom promjenom u strukturi materijala samog diska. Naneseni frikcijski materijala na disk skida se prilikom normalnog kočenja. Promjene u strukturi diska (formirana područja od martenzita koji ima veću tvrdoću od materijala od kojeg je napravljen kočioni disk) mogu se ukloniti samo mehaničkom obradom. Pri mehaničkoj obradi diska na kojem se nalaze mjesta s martenzitom, neophodno je takva mjesta u potpunosti ukloniti.

Formiranje martenzitnih lokalnih mrlja nastaje lokalnim pregrijavanjem i uzrokovan je izobličenjem diska uslijed naglog kočenja, koje može dovesti do trajne deformacije diska, smanjenom debljinom diska (što utječe i na smanjenu sposobnost odvođenja topline), prevelikom potrošnjom kočionih obloga, tolerancijom diska koja nadilazi specifikacije proizvođača, te je naposljetku uzrokovan i nekvalitetnim materijalom. [4]

Fenomen hladnog trošenja (u vrijeme dok se kočnica još nije zagrijala na povišenu temperaturu) može se utvrditi tijekom normalnog kočenja na osnovi vibracija i titraja elemenata osovine. Karakteristična razlika u odnosu na termičko trošenje jest da se efekti hladnog trošenja mogu javiti kod svakog postupka kočenja i da se pri tome frekvencija kreće unutar znatno nižeg opsega (otprilike između 5 Hz i 50 Hz). Intenzitet može varirati ovisno o brzini kretanja vozila. Glavni uzrok je nejednaka debljina frikcijskog prstena diska.

Svaki kočioni disk ima nepravilnosti u koncentričnosti koje nastaju tijekom proizvodnje, a ta nepravilnost je unutar dopuštenih odstupanja. Kočione pločice tijekom vožnje se nalaze u kontaktu s kočionim diskom, čak i kada se kočnica ne koristi. Svakim okretajem kotača dolazi do lokalnog kontakta između kočione obloge i diska. Premda su sile dodirivanja pri tome relativno slabe , na mjestu kontakta na kočionom disku dolazi do trošenja. To lokalno trošenje diska može izazvati lokalnu varijaciju u debljini kočionih površina diska koje potom mogu izazvati trošenje. Ova razlika u debljini može se smanjiti prilikom normalnog kočenja. Faktori koji utječu na razlike u debljini su nepravilnosti u koncentričnosti (horizontalna nekoncentričnost) kočionih diskova u montiranom stanju, dodirivanje kočionih pločica s diskom u trenucima kada se kočnica ne koristi, mogućnost kočionih obloga da tijekom normalnih kočenja smanje, odnosno otklone postojeće razlike u debljini kočionih diskova, ispravnost kočionih čeljusti u smislu konstantnog odvajanja kočionih pločica od diska u fazi ne korištenja kočnice i način vožnje [4].

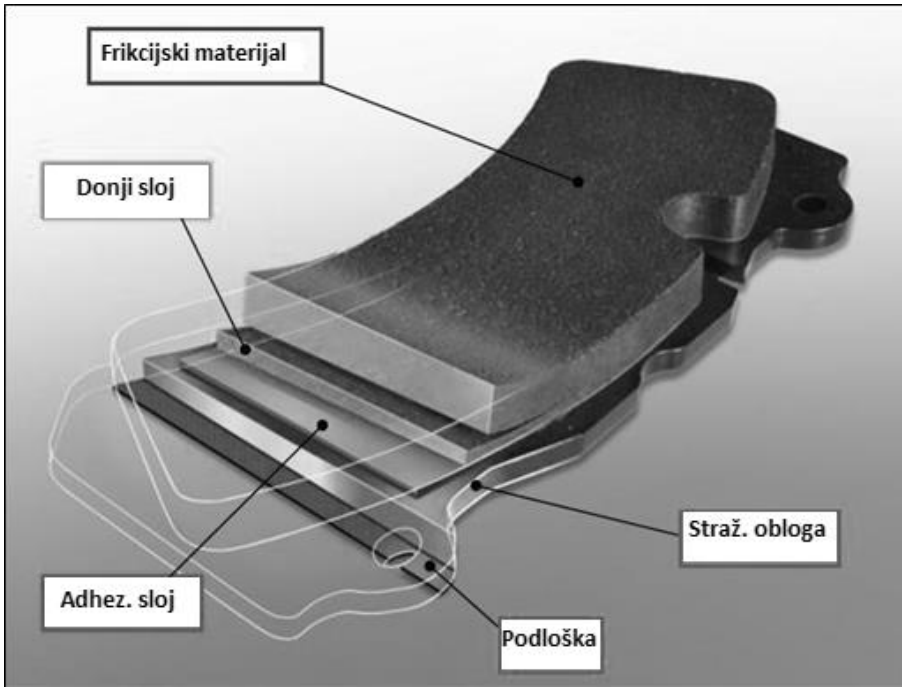
Opterećenja koja se javljaju uslijed iznenadnih i velikih promjena temperatura u materijalu mogu na površini frikcijskog prstena kočionog diska izazvati nastanak pukotina u strukturi lijeva. Pukotine utječu na čvrstoću i zavisno od veličine i opterećenja mogu biti polazište za lom materijala. Današnji kočni diskovi izrađuju se od perlitnog sivog lijeva uz dodatke kroma i molibdena za povećanje otpornosti na trošenje i smanjenje opasnosti od pojave pukotina kod visokih temperatura. Dodatak ugljika povećava brzinu prijenosa topline. Diskovi za primjenu u ekstremnim uvjetima su izrađeni od kompozitnog materijala s matricom od keramičkog materijala SiC pojačanog ugljičnim vlaknima.

## 4.3. Kočione obloge

Kočiona obloga s diskom čini tarni par koji služi pretvaranju sile stezanja u moment kočenja. Njihove fizikalne, kemijske i mehaničke karakteristike osnova su za učinkovitost kočionog sustava. Obloge trebaju zadovoljiti točno određen faktor trenja, postojanost tog faktora trenja na različitim temperaturama, pod utjecajem vode i onečišćenja, slabo trošenje same obloge kao i tarnog para, smanjenje buke i vibracija te malu kompresibilnosti. U tablici 4.1 su prikazani kronološki materijali koji su se koristili za kočione obloge [5].

Tablica 4.1 Povijest materijala kočionih obloga [5]

| **Materijal** | **Upotreba** | **Vremensko razdoblje** |
|---|---|---|
| Lijevano željezo i čelik | Željeznica i pružna vozila | do 1870-ih |
| Kosa ili pamučni pojas (ograničena upotreba do 145°C) | Pružna vozila i prvi automobili | 1897. |
| Tkani azbest s mesingom povezan žicama za povećanje čvrstoće | Automobili i teretna vozila | 1908. |
| Obloge oblikovane kratkim vlaknima, česticama mjedi i bitumenskim ugljenom s malo pepela | Automobili i kamioni | 1926. |
| Suho miješani materijal od lijevanog željeza oblikovan u blokove koji su stvarali metalnu prašinu | Londonska podzemna željeznica | 1930. |
| Fleksibilna vezivna smola s više kompleksnih komponenti | Prvi kočioni bubnjevi | 1930-te |
| Smolom povezane metalne obloge | Industrijska i avionska industrija | 1950-te |
| Staklena vlakna, mineralna vlakna, metalna vlakna, ugljik sa sintetičkim vlaknima za dobivanje polu-metala s boljim performansama od azbesta | Automobili i kamioni | 1960-te |
| Ne-azbestni materijali (stakloplastika) | Kočioni bubnjevi na automobilima | 1980-te |
| Ugljična vlakna | Automobili | 1990-te |




**Slika 4.4. Presjek kočione obloge [5]**

Tablica 4.2 Dijelovi kočione obloge i njihovi zadaci [5]

| **Sloj** | **Zadatak** |
|---|---|
| Frikcijski materijali | Izravno u dodiru s diskovima, utječe na trenje, a time i na performanse. |
| Donji sloj (Underlayer) | Toplinsko izolira stražnju oblogu, a time i klip i kočionu tekućinu od topline stvorene zbog trenja.<br>Poboljšava udobnost ograničavajući prijenos vibracija i buke od trenja. Dobar koeficijent trenja je u svakom trenutku potreban zbog sigurnosnih razloga. |
| Adhezivni sloj | Osigurava visoku čvrstoću između podloge i stražnje obloge |
| Stražnja obloga (Backing plate) | Distribuira silu koju klip prenosi na cijelu kontaktnu površinu, raspršava tangencijalnu silu generiranu tijekom kočenja između materijala za trenje i diska kroz pomoćnu ploču. |
| Metalna podloga (Shim) | Sprječava prijenos vibracija na ostale dijelove kočionog sustava. |

Najsuvremenije kočione pločice danas se sastoje od polimerom vezanih kompozitnih frikcijskih materijala. Posebno su oblikovani tako da daju dobar omjer trenja i trošenja. Temelj takvih kompozita je polimerno vezivo s dodatkom punila i vlakana koja osiguravaju dobru učinkovitost trenja tijekom kočenja i mehaničke čvrstoće potrebne za izdržavanje generirane tlačne sile. Ne postoji stroga regulacija klasificiranja organskih frikcijskih materijala u smislu kemijskog sastava, ali su obično podijeljeni kao što je opisano u tablici gdje nomenklatura varira od proizvođača do proizvođača [5].

Tablica 4.3 Klasifikacija materijala kočionih obloga [6]

| **Klasifikacija materijala** | **Uobičajeni sadržaj** | **Glavne značajke** |
|---|---|---|
| NAO (Non-Asbestos Organic), vrlo nizak postotak čelika ili ne-čelični materijali U primjeni, NAO-i se često nazivaju "keramikom", to se ne smije miješati s predkeramičkim materijalima koji se temelje na silikonskim smolama. | Manje od 10% Cu, Fe i njihovih legura. Sadrže neželjene metale, razne abrazive i maziva, mineralna vlakna i druga pojačanja | - niski ili srednji visoki faktor trenja 0,33 -0,40.<br>- izvrsna otpornost trošenju na nižim temperaturama. <200C.<br>- niska razina otpadnih čestica na naplatcima.<br>- relativno loše trošenje u teškim uvjetima rada (frekfencija kočione sile) i na višim razinama trenja.<br>- dobra karakteristike buke i hrapavosti |
| "Niska razina čelika" ili "Low-metallics" („Low-Met”)<br>Ponekad se spominje kao "Europski" ili "ECE" | 10-50% Fe, Cu i Cu legura<br>Sadrže čelična vlakna i željezni prah uz dodatak raznih abraziva i maziva, mogućnost obojenih metala. | - srednji visoki faktor trenja, obično 0,35-0,5<br>- dobar osjećaj kod sile pritiska papučice<br>- dobra otpornosti „fadingu“ (smanjenje faktora trenja) i mogućnost kočenja s velikih brzina.<br>- velika potrošnja obloge / diska.<br>- dobro za velike brzine.<br>- puno otpadne prašine<br>- mogućost korektivnog djelovanja.<br>- smanjeni šum i buka. |

| | | |
|---|---|---|
| Polumetali | Više od 50% Fe, Čelik Prvenstveno sadrže čelična vlakna, željezo u prahu, abrazivi i grafit / koks, lubrikanti | - Niski do srednji faktor trenja 0,28 -0,38<br>- relativno visoka varijacija temperatura (radni ciklus)<br>- dobre značajke trošenja<br>- loše trošenje na niskim temperaturama ( <100 °C)<br>- izvrsno trošenje na temperaturama. višim od 200 °C<br>- dobro trošenje pod teškim teretima.<br>- loše trošenje pri velikim brzinama.<br>- proizvode buku i vibracije<br>- ne sadrže bakar<br>- niski troškovi proizvodnje<br>- visoke temperature kočione tekućine mogu biti problem. |

Zbog činjenice da azbest nije dopušten u suvremenim frikcijskim materijalima, znanstveno govoreći, svi klasificirani materijali u tablici su ne-azbestno-organski. Također postoje i neorganski materijali, na primjer sinterirani metali, kompoziti ugljika i ostali. Tipični frikcijski materijal je spoj od 10 do 30 različitih podkomponenata odabranim od nekoliko tisuća različitih materijala. Komponente su podijeljene u klase ovisno o njihovim funkcijama.

Tablica 4.4 Funkcije materijala kočionih obloga [6]

| **Funkcija materijala** | **Obilježje** |
|---|---|
| Veziva | Drže sve materijale u cijelini, utječu na mehanička svojstva obloge. |
| Ojačala | Povećavaju mehanička svojstva, smanjuju trošenje. |
| Abrazivi | Poboljšavaju faktor trenja, čiste površinu diska. U tu skupinu ulaze materijali s Mohsovom tvrdoćom većom od 5, obično metalni oksidi i keramika poput karbida i nitrida. |
| Lubrikanti | Stabiliziraju faktora trenja, kontrolira stvaranje trenja.<br>To su obično materijali s niskim koeficijentom trenja kao što su grafitni metalni sulfidi i PTFE. Čvrsta maziva odgovorna za stvaranja efekta abraziva. |
| Punila | Pomažu pri proizvodnom procesu, daju jeftiniji krajnji proizvod, štite od korozije, omogućavaju bojanje, povećavaju ili smanjuju prijenos topline i smanjuju šum.<br>Organski i anorganski materijali koji nisu izravno vezani za učinkovitost sustava. |

# 5. Komponente frikcijskog materijala

Materijali kočionih obloga pripadaju među najsloženije proizvedene kompozitne materijale jer sadrže tri različite vrste materijala: metale, keramiku i polimere. Ovakva kemijska i kemijsko-fizikalna raznolikost otežava pronalaženje pravog omjera i sastava komponenti. Općenito frikcijski materijali moraju podnijeti uvijete velikog opterećenja i temperatura, ali i moraju zadovoljiti uvijete trajnosti, udobnosti, dostupnosti i sigurnosti [6].

Glavne komponente materijala kočionih pločica su ojačala, veziva, punila, abrazivi i aditivi (maziva). Važno je napomenuti da određene komponente obavljaju višestruke funkcije. Ojačala (najčešće vlakna) su glavna komponenta u pogledu mehaničkih, frikcijskih i svojstava toplinske stabilnosti. Frikcijski materijali pretežito koriste više vrsta armirajućih vlakana, uključujući mineralna vlakna, metalna, umjetna polimerna, staklena, aramidna i aluminij-oksidna vlakna. Veziva vežu sve komponente tako da mogu pravilno obavljati svoje funkcije te prenose opterećenja. Uglavnom su to organski polimeri kao što su termoreaktivni polimeri; fenolna smola, poliimidna smola, esterska smola i poliuretanska guma. Njihova primarna funkcija je osigurati mehaničku čvrstoću i integritet tijekom proizvodnje te u radnim uvjetima. Druga funkcija veziva je prigušenje vibracije i poboljšanje udobnosti tijekom kočenja, također vezivo treba imati visoku termičku stabilnost i otpornost na oksidaciju na visokoj temperaturi. Punila se koriste za poboljšanje toplinske vodljivosti, poroznosti, otpornosti na trošenje i redukciju buke. Oni su jeftini materijali te su time korisni za smanjenje cijene kočione obloge, a bez pogoršavanja svojstava. Punila su najčešće kalcijev karbonat ($CaCO_3$), barijev sulfat ($BaSO_4$), gline i tinjac. Aditivi su posebni materijali koji poboljšavaju interakciju između obloga i diskova tijekom kočenja. To su komponente koje se dodaju materijalima kako bi se izmijenili i prilagodili koeficijenti trenja. Abrazivi su uglavnom oksidni prahovi raznih metala i njihova je funkcija stvaranje visokog i stabilnog prianjanja tijekom kočenja. Najčešće korišteni abrazivi su magnezijev oksid, cirkonijev oksid, cirkonijev silikat, aluminijev oksid i kromov oksid [6].

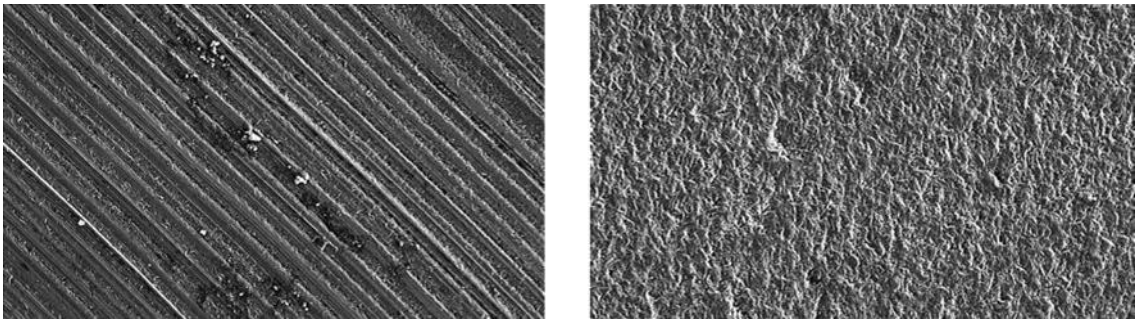
## 5.1. Abrazivi

Abrazivi u kočionim sustavima moraju ispuniti dvije važne uloge:

- povećanje faktora trenja na dodiru diska i kočione obloge
- povećanje otpornosti na trošenje frikcijskog materijala

Da bi se razumio odabir abrazivnih sirovina, potrebno je pregledati mehanizme trošenja. Trošenje se definira kao progresivni gubitak tvari s radne površine tijela koja se javlja kao posljedica relativnog gibanja. Može se pojaviti u obliku abrazija, erozija, oksidacija, delaminacija ili njihovom kombinacijom.

Za opisivanje abrazivnog trošenja postoje više klasifikacija, a jedan od najčešćih korištenih modela dijeli abraziju u mehanizmima dva tijela i tri tijela (slika 5.1.). Dvostruka abrazija, tvrde čestice ili krutine čvrsto zaglavljene na prvom tijelu, mogu prodrijeti u drugo tijelo tijekom trljanja dvaju tijela pod opterećenjem. Trostruka abrazija je kada se neki materijal, bilo autogeno stvoren ili strano tijelo, pojavi na granici između prvog i drugog tijela tijekom trljanja dvaju tijela pod opterećenjem. Pod mikroskopom se vidi učinak dva modela trošenja, utori nastali izravnom abrazijom drugog tijela na prvom (dva tijela) i udubljenja (tragovi) nepravilnog oblika bez usmjerenja na površini (tri tijela) [10] .

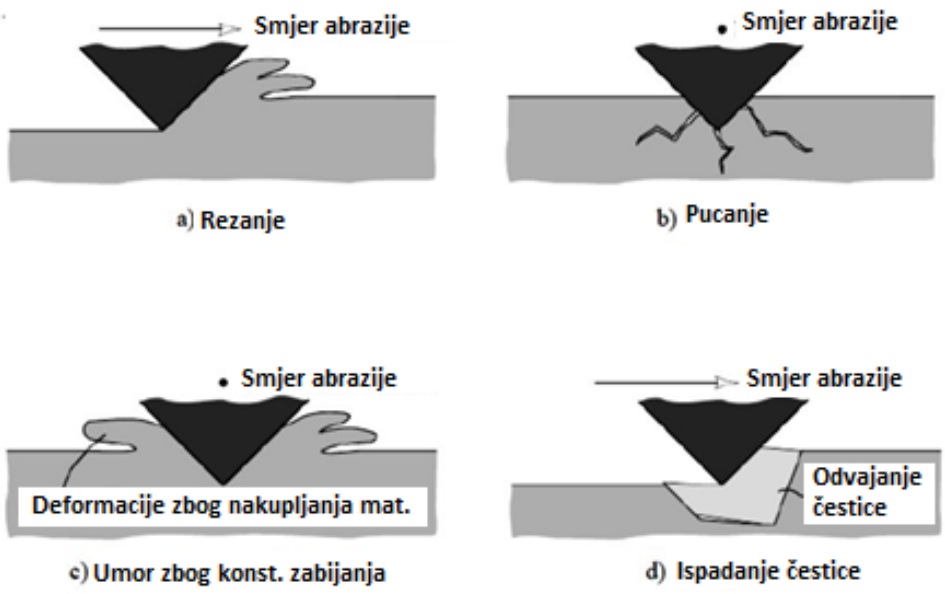


a) mehanizam trošenja „dva tijela“ b) mehanizam trošenja „tri tijela „

**Slika 4.1. Učinak dva modela trošenja abrazivnog djelovanja [10]**

Prvo tijelo je ono čija površina trpi trošenje, drugo tijelo je u relativnom gibanju s prvim tijelom tako da se dio sile može prenijeti. Drugo tijelo može biti u izravnom ili neizravnom kontaktu s prvim tijelom i može trpjeti trošenje. Također, drugo tijelo se može zvati prvo tijelo (ukoliko oba tijela trpe trošenje) i u tom se slučaju oni nazivaju prva tijela. Prvo tijelo se naziva „tijelo“, a drugo tijelo se naziva „protutijelo“. Postoje četiri mehanizma abrazivnog

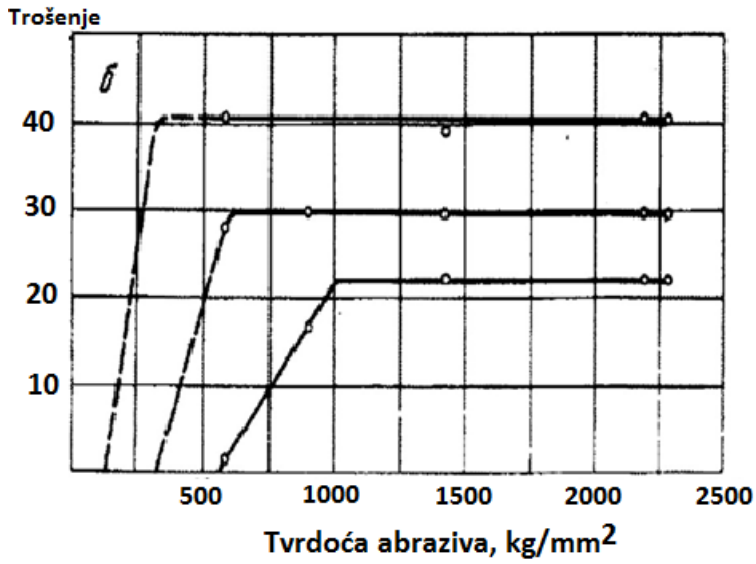
trošenja: mikro-rezanje, fraktura (puknuće), umor i izvlačenje čestica i ona su prikazana na slici 4.2.




**Slika 5.2. Četiri mehanizma abrazivnog trošenja [11]**

Na slici je opisana interakcija između abrazivnog materijala i kliznih površina, ali postavlja se pitanje kada se materijal može smatrati abrazivnim i kolika je intenzitet abrazije?.

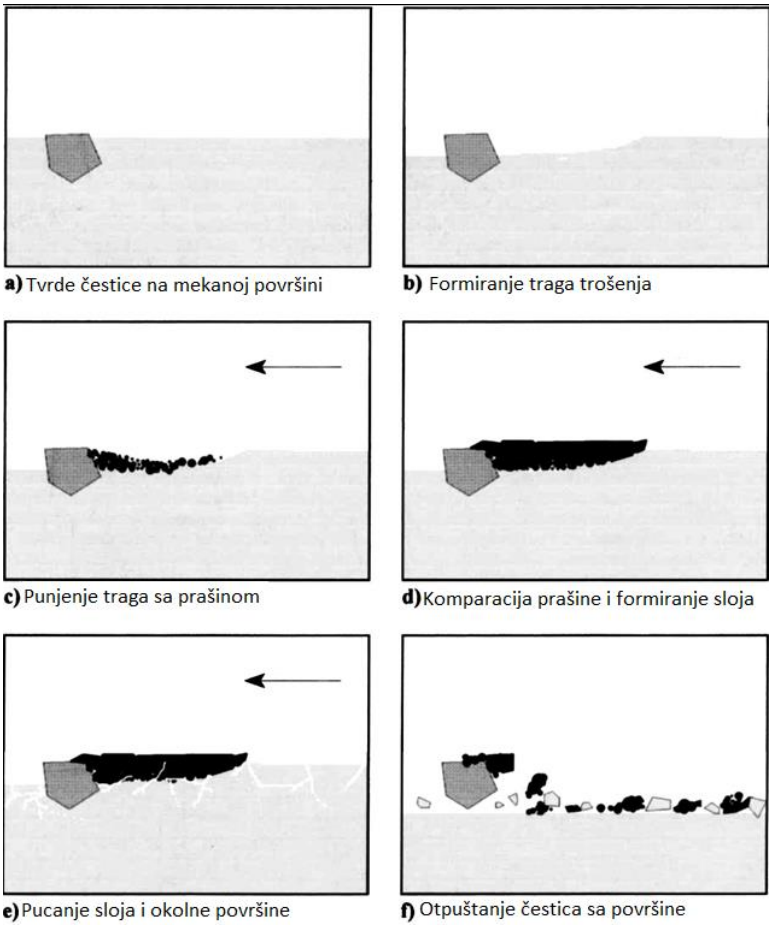
Na slici 5.3 (3 čelika istrošeni s česticama stakla (585 HV), kremena (908 HV), granit (1426 HV) je prikazan graf usporedba tvrdoće površine materijala i tvrdoće abraziva. Opisano je relativno trošenje kaljenog čelika izbrazdanog abrazivima jednake veličine, ali različite tvrdoće. Može se primijetiti da se nakon određene vrijednosti omjera tvrdoće, trošenje ne mijenja [11].




**Slika 5.3. Usporedba tvrdoće površine materijala i tvrdoće abraziva [10]**

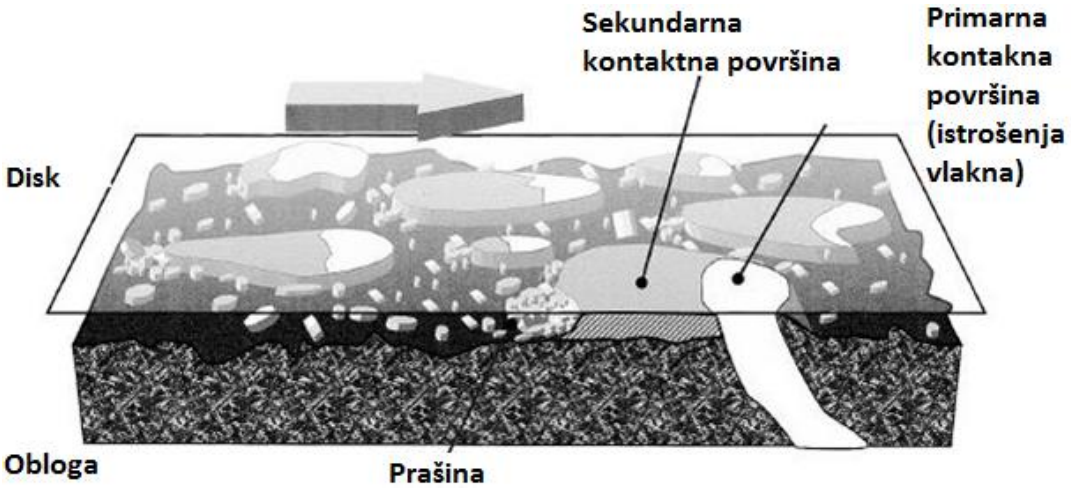
Veličina čestica abraziva može se tijekom trenja promijeniti zbog fragmentacije (usitnjavanja). Smanjenjem tvrdoće i povećanjem lomne žilavosti dolazi do kritične veličine abraziva pri kojoj dolazi do usitnjavanja čestica. Čvrstoća abrazivnih materijala može se mijenjati ovisno o materijalu, veličini zrna i poroznosti [10].

Kod kočionog sustava abrazijski model je važan za fazu uhodavanja. Kada nove površine diskova i kočnih pločica dođu u dodir, osjetljive su na abrazivno trošenje. Nakon oslobađanja čestica, zbog djelovanja trenja, moguće je abrazivno trošenje koje ovisi o veličini čestica, debljini tribofilmova i pritisku kočnice (sili između površina dva tijela). Tijekom kočenja male čestice abrazivnim mehanizmom mogu povećati faktor trenja i povećati stvarnu površinu formiranjem sekundarne kontaktne površine [10].




**Slika 5.4. Generiranje, rast i degradacija mikro-čestica na površini kočnog obloge [10]**

Prekomjerna debljina sloja stranog trećeg tijela može smanjiti površinu kontakta s abrazivnim sredstvima, a nedostatak ili nehomogena debljina trećeg sloja može uzrokovati neravnomjernost debljine diska tijekom kočenja zbog različitog koeficijenta trenja na različitim dijelovima diska. Nedostatak paralelnosti između unutarnjih i vanjskih kočnih površina i jedan je od glavnih uzroka vibracija prilikom kočenja. Primarna kontaktna površina čisti površinu diska, ali se time smanjuje debljina tj. sloj koji regulira odnos čestice na dodirnoj površini diska i kočione obloge. Najbolji način za povećanje koeficijenta trenja na kočionom sustavu bez znatnog povećanja trošenja diska je dovoljno odvođenje toplinske energije. S druge strane, za smanjenje trošenja kočionih pločica potrebne su velike čestice abraziva. Granulacije čestica se lako fragmentiraju, a temperatura može promijeniti kompaktnost materijala ili sastav trećeg sloja. Iz tog razloga, prilikom odabira materijala, potrebno je odabrati više od jednog abrazivnog materijala s različitim tvrdoćama, veličinama čestica, oblikom i čvrstoćom kako bi kočioni sustav funkcionirao pri različitim brzinama, tlaku i temperaturi [10].




**Slika 5.5 Generiranje primarne i sekundarne kontaktne površine na plohi dodira obloge i diska [10]**

### 5.1.1. Karbidi, boridi i nitridi

Visoka tvrdoća, dobra toplinska vodljivost, dobra otpornost na toplinski udar, visoka temperatura tališta i dobra otpornost na oksidaciju i kemikalije glavna su obilježja karbida koji se koriste kao abrazivi u frikcijskom materijalu. U tablici 5.1 su prikazane neke vrste karbida koje se upotrebljavaju kao abrazivi u kočionim oblogama [11].

Tablica 5.1 Vrste karbida upotrebljavani kao abrazivi u kočionim oblogama [11]

| **Tip karbida** | **Tip veze** | **Svojstva** |
|---|---|---|
| Slani karbidi | Ionska | Sastavljeni od alkalijskih metala. Nedostatak električne vodljivosti, visoka prozirnost, lako formiranje metana, acetilena ili propina i metalnog hidroksida |
| Intersticijski karbidi | Djelomično kovalentna i ionska, uglavnom metalna | Najviša temperatura taljenja i tvrdoća, dobra kemijska stabilnost, dobra električna i toplinska vodljivost |
| Intermedijalni tranzicijski karbidi | Djelomično kovalentna, ionska i metalna | Nisu kemijski stabilni, lako hidrolizirani razrijeđenim kiselinama, proizvode ugljikovodike i vodik |
| Kovalentni karbidi | Kovalentna | Velika tvrdoća, temperatura taljenja, toplinska i kemijska stabilnost. Niska gustoća |

Ne preporučaju se slani i intermedijalni karbidi zbog nestabilnog kemijskog vezanja u vodi ili razrijeđenim kiselinama. Intersticijski karbidi ispunjavaju sve zahtjeve za abrazivne materijale. Tablica 5.2 prikazuje intersticijske karbide korištene kao abraziv te njihova svojstva.

Tablica 5.2 Najčešće upotrebljavani karbidi [11]

| **Grupa karbida** | **Karbid** | **Gustoća** [g/cm$^3$] | **Tvrdoća** [Vickers] |
|---|---|---|---|
| Intersticijski | TiC | 4,91 | 28-35 |
| | ZrC | 6,59 | 25 |
| | HfC | 12,67 | 26 |
| | VC | 5,65 | 27 |
| | NbC | 7,79 | 19 |
| | TaC | 14,5 | 16 |
| | $Cr_2C_2$ | 6,68 | 10-18 |
| | $Mo_2C$ | 9,06 | 15-24 |
| | WC | 15,8 | 22 |

Jedna od najboljih rješenja su borovi karbidi, međutim, nisu povoljni zbog svoje cijene. Najprikladniji su kovalentni vezani boridi i nitridi. Njihova svojstva su prikazana u tablici 5.3.

Tablica 5.3 Glavne karakteristike karbida u usporedbi s dijamantom i silicij-karbidom [10]

| **Materijali** | **Gustoća** [g/cm$^3$] | **Temperatura taljenja** [$^0$C] | **Tvrdoća** [HV] |
|---|---|---|---|
| C (dijamant) | 3,52 | 3800 | 8000 |
| BN | 3,48 | 2730 | 5000 |
| $B_4C$ | 2,52 | 2450 | 4000 |
| $AlB_{12}$ | 2,58 | 2150 | 2600 |
| SiC | 3,22 | 2760 | 2600 |
| $SiB_6$ | 2,43 | 1900 | 2300 |
| $Si_3N_4$ | 3,19 | 1900 | 1720 |
| AlN | 3,26 | 2250 | 1230 |

Usporedbom materijala može se vidjeti da su boridi i karbidi teži i manje krhki od nitrida, imaju više temperature taljenja, ali nižu termičku stabilnost u oksidirajućem okolišu. Većina tih materijala smatra se posebnim tehničkim keramičkim materijalima zbog visoke cijene. SiC je značajno jeftiniji od ostalih kovalentnih borida i nitrida, niske je gustoće, visoke tvrdoće i temperature taljenja, dobre je otpornosti na toplinske udare i kemijski je stabilan pri visokim temperaturama. Stoga je SiC jedan od najčešće korištenih abraziva u frikcijskim materijalima za kočione obloge u automobilskoj industriji i smatra se najboljim odabirom.

### 5.1.2. Metalni oksidi i silikati

Oksidi se sve više upotrebljavaju u frikcijskim materijalima zbog niske cijene i visoke otpornosti na temperaturu u oksidirajućem okolišu. Tvrdoća lijevanog željeza od kojeg ne proizveden kočioni disk je visoka, pa se kočioni disk smatra tvrdim abrazivom.

Prilikom selekcije oksida i silikata treba uzeti u obzir tvrdoću i gustoću, kemijsku i toplinsku stabilnost, procjenu rizika za okoliš i zdravlje ljudi, netopljivost u vodi, te omjer cijene i kvalitete. Samo nekoliko minerala iz ove skupine se može smatrati tvrdim abrazivima, a neki od tih prirodnih čvrstih abraziva imaju visoku cijenu jer se rijetko pronalaze u prirodi. Većina ih se može smatrati blagim abrazivima, punilima ili u nekom konkretnom slučaju, mazivima. Da bi se nadomjestio nedostatak prirodnih oksida i silikata, koriste se tvrdo abrazivni sintetički oksidi i silikati. Jedan od tih je aluminijev oksid. Proizvodi se industrijski tzv. Bayerovim postupkom iz boksitne rude. Boksit je prirodna mješavina minerala uglavnom sastavljenih od dibita, bemita, kvarca, hematita, antasa i rutila. Često se koristi u frikcijskim materijalima zbog velike tvrdoće (9) na Mohrovoj ljestvici i dolazi u različitim granulacijama i oblicima. Specifičan je u suzbijanju „fadeing“-a [7].

Ovdje treba spomenuti cirkonij oksid. Glavni prirodni oblik cirkonij oksida je mineral bakelit Mohrove tvrdoće 6,5. Cirkonij oksid ima druga dva polimorfa, prostornu skupinu tetragonske strukture koja je stabilna od 1700 °C do 2370 °C i prostornu skupinu kubične strukture, pa je primjenjiv na temperaturama većim od 2370 °C. Da bi se sintetizirala stabilna cirkonijska temperatura s visokom tvrdoćom, velikom čvrstoćom, dobrom toplinskom vodljivošću i izbjegavanjem prijelaza između faza koje uključuje strukturne deformacije s velikom promjenom volumena, potreban je stabilizator strukture. Stabilizacija se vrši pomoću dodatnog cirkona uz dodatak dopaina u strukturu cirkonij oksida stvaranjem slobodnih radikala kisika za energetsku favorizaciju kubičnih struktura. Neki od primjera stabilizatora su itrij-oksid, kalcijev oksid, magnezijev oksid, aluminij oksid i cerijev oksid [7].

## 5.2. Lubrikanti

U kočionom sustavu dolazi do kontakta između dvije površine, kočionih pločica i kočnog diska. Statički i dinamički kontakt između ta dva tijela stvara napetosti na površini, a takvo stanje mijenja faktor trenja pa se upotrebljavaju lubrikanat koji moraju ispuniti sljedeće zahtjeve:

- prilagoditi koeficijent trenja u potrebnom rasponu
- formirati kontinuirani film s elastičnim svojstvima na dodirnoj plohi
- stvoriti fizičke ili kemijske veze s površinom
- smanjiti trošenje diska i obloge
- smanjiti „fadeing“ efekt pri visokim brzinama (visokim temperaturama)
- smanjiti buku
- stvoriti visoku toplinsku vodljivost kako bi se izbjeglo lokalno taljenje

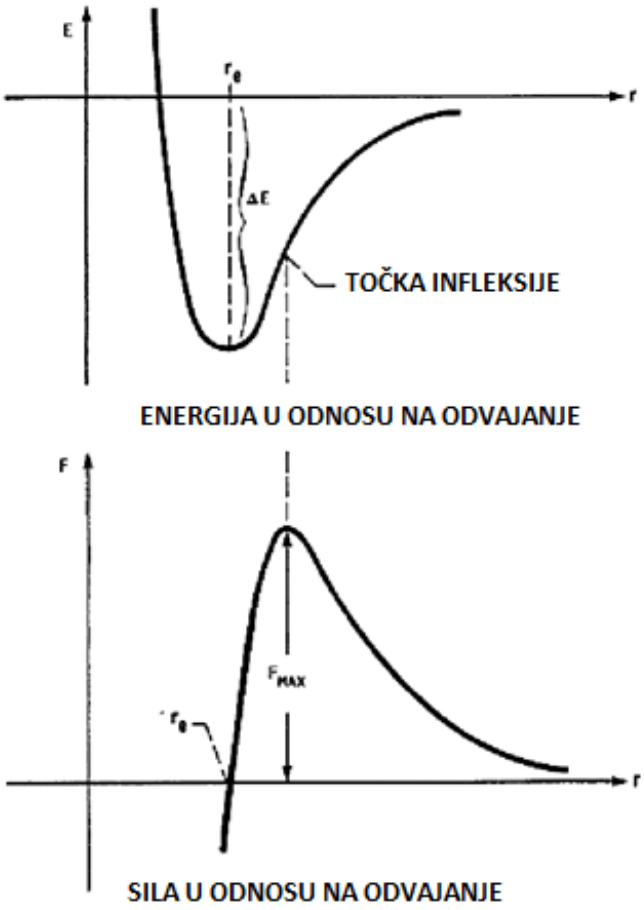
Kao što je već napomenuto, poželjno je da tijekom kočenja dolazi do stvaranja stabilnog kontinuiranog faktora trenja i to uz jaku fizičku i kemijsku interakciju na površini tribo-parova. Na dodirnoj površini treba postojati kontinuirani film s dobrim elastičnim svojstvima koji štiti komponente od prevelikog trošenja i korozije, a koji će stvoriti stabilni faktor trenja te zaustaviti lijepljenje (adheziju) čestica na dodirnu površinu kočionog diska i obloge. Lubrikanti određuju karakteristike frikcijskog para u pogledu prianjanja i podmazivanja [12].

### 5.2.1. Adhezija

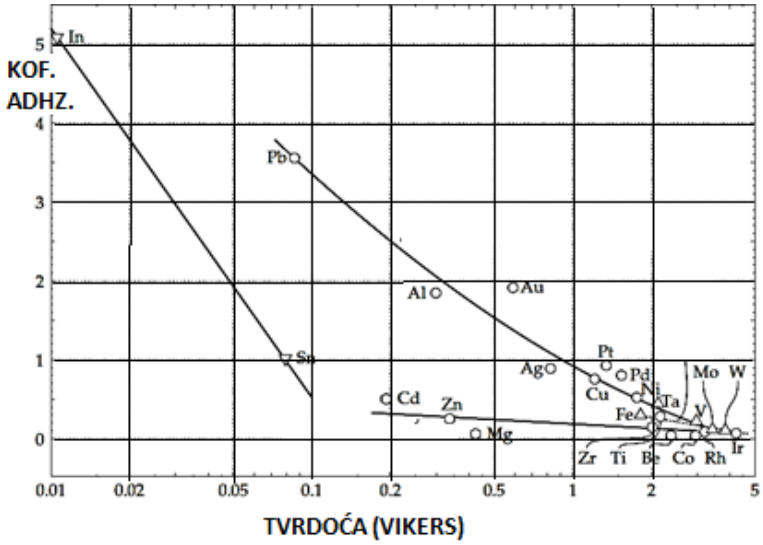
Različite čestice se stvaraju na dodirnoj plohi diska i obloge zbog interakcije između komponenti. Čestice koje utječu na abrazivno trošenje su opisane u prethodnom, abrazivnom dijelu, a u ovom poglavlju se govori o prianjanju i adheziji (naljepljivanju). Posebna se pozornost mora posvetiti tijekom početne faze uhodavanja, početnog dodirivanja diska i obloge kada su površine čiste i tribolfilm se tek počinje generirati. Općenito, kada tribofilm nije prisutan, mali sloj oksida koji prirodno pokriva metale uklanja se trošenjem, lijevani disk je izravno u kontaktu s materijalima kočionih pločica koje su u vlaknastom obliku i pri tom dodiru se javljaju nepoželjni mehanizmi. Mnogi parametri utječu na adheziju između tijela:

čvrstoća veze, kemijske karakteristike, elastične i plastične deformacije, apsorpcija nečistoća iz okoliša i mogućnost odvajanja materijala.

Izračunato je da maksimalna sila prianjanja metalnog para (minimalna ukupna energija) više ovisi o faktoru razmjene energije nego o faktoru kinetičke energije (slika 5.6.). To određuje jačinu adhezivne veze [7].




**Slika 5.6. Usporedba faktora razmjene energije i faktora kinetičke energije [12]**

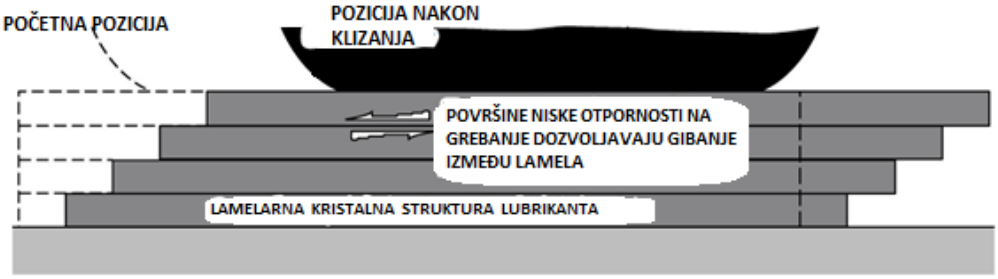



**Slika 5.7. Otvrdnuće zbog mehanizama uslijed trenja [12]**

Metal može poprilično otvrdnuti zbog mehanizama koji se javljaju uslijed trenja (slika 5.7.). Interakcija između očvrsnulog materijala i izvornog materijala može uzrokovati plastičnu deformaciju povećavajući površinu kontakta, a posljedično i adheziju. Potrebno je uzeti u obzir i prijenos elektrona između metala kao i između kiselina i metala. Nema svaki metal adhezivna svojstva, neke međufazne faze na kontaktnoj površini mogu imati pozitivnu slobodnu energiju za formiranje atomske veze. „Smearing“ je oslobađanje materijala na površini prilikom kojeg se stvara tanki film. Film može dovesti do nepoželjnih situacija, kao što su ogrebotine od struganja i naprezanja, ali to ovisi o kemijskoj i fizičkoj interakciji frikcijskog materijala, te o uvjetima rada kao što su temperatura i pritisna sila. Za održavanje trošenja pod kontrolom potreban je sustav za podmazivanje, dva su glavna mehanizma (slika 4.7) za kočione sustave:

- odvajanje (otpuštanje) čestica
- mekani film

Za prvi mehanizam, odvajanje čestica, važno je napomenuti da su materijali, kada su umetnuti između dvije lamelarne krute klizne plohe, strukturirani tako da imaju tendenciju ljuštenja.




**Slika 5.8. Djelovanje mehanizama sustava za podmazivanje [12]**

Materijali s malim slabim lamelarnim vezama smatraju se mazivima, materijali s jakim lamelarnim silama vezanja mogu se smatrati blagim abrazivima. Lamelarne krute tvari imaju važna tribološka svojstva, potiču podmazivanje kočnih sustava pri visokim brzinama i silama. Primjer lamelnih krutih maziva su grafiti i metali kao što su sulfidi, selenidi i teleuridi. Moraju biti otporni na visoke temperature i ne smiju biti topljivi u vodi, granica upotrebe većine lamelarnih krutina je do 500 °C, nakon čega mogu oksidirati i promijeniti kemijski sastav, te gube mazivnu snagu [12].

Drugi mehanizam, mekani tribofilm, ne samo da sprječava izravni kontakt između površina trljanja, već ima ulogu pomicanja opterećenja čime povećava kontaktnu površinu i smanjuje lokalni pritisak. Kada su dvije tvrde plohe u dodiru, male površine i velika sila daju veliki faktor trenja. Također kada je tvrda ploha u dodiru s mekanom, velike površine i mala sila mogu biti uzrok povećanog faktora trenja. Mekani tribofilm umetnut između dvije tvrde plohe regulira faktor trenja, te ga u potrebnim trenucima može smanjiti. Tribofilmovi su najčešće polimeri otporni na visoke temperature, metali, metalni oksidi i fluoridi.

### 5.2.2. Lubrikanti na bazi ugljika

Svojstva lubrikanata na bazi ugljika temelje se na svojstvima grafita, odnosno jednoj od njegovih alotropskih modifikacija. Grafit je kristalna polimorfna struktura običnog ugljika. Postoje dvije vrste prostornog rasporeda ugljikovih slojeva: heksagonska struktura, termodinamički stabilna na temperaturama manjim od 2000 °C i tlačnog naprezanja do 130 kbar, povezana je Van der Waalsovim vezama, te romboidna struktura, koja je metastabilna faza što nestaje na visokim temperaturama i ona se ne proučava kao zasebna faza prirodnog grafita. Niski koeficijent trenja kod grafita pripisuje se maloj otpornosti na smicanje između

atomskog sloja vezanog slabom Van der Waalsovom silom. Grafitna rešetka ima veliku inter-lamelarnu energiju vezivanja koja se može smanjiti uz utjecaj plinova ili tekućina poput vode. Utjecajem inertnih plinova atomi se umeću između kristalita, čime se povećava njihova mobilnost. Visoke temperature smanjuju količinu hlapljivih komponenti povećavajući faktor trenja grafita koji u tom slučaju može djelovati blago abrazivno. Grafit se u prirodi pojavljuju u različitim oblicima stijena i taloga:

- dispersirani kripto-kristalni pigment i kriptokristalinična prašina;
- submikroskopni kristaliti koji se nakuplja u obliku granulata;
- Različite pojedinačne čestice, ploče ili lamele;
- impregniran u obliku pirolitičkih čvorova ili oblika rozeta;
- komadići, fragmenti i monokristalinične čestice.

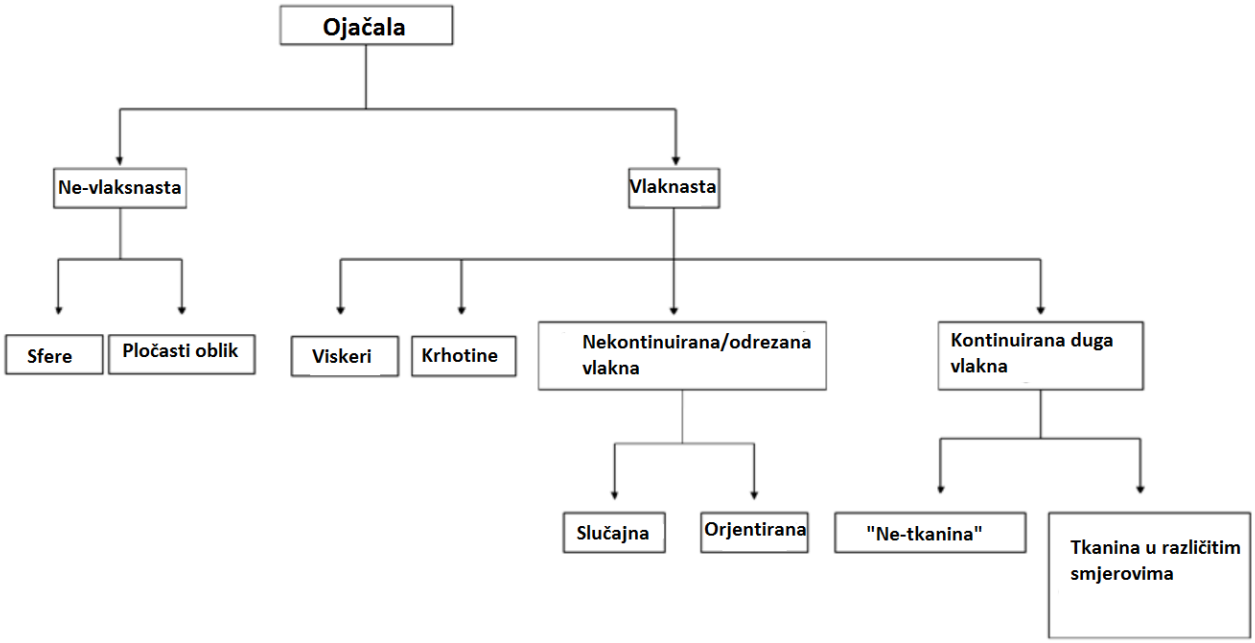
Postoje tri varijacije grafita: amorfni, kapilarni i pahuljasti. Amorfni grafit je dobio ime zbog svoje razgranate morfologije, struktura mu je polikristalna i izotropna. Komercijalno dolazi u 70 % do 80% čistoće u česticama veličine desetak centimetara, pa sve do mikrometarskog praha. Podmazujući je, vodljiv i kemijski stabilan. Kapilarni grafit je prirodni oblik pirolitičkog ugljika koji se taloži iz tekuće faze. Pahuljasti grafiti se pronalaze u prirodi kao fosilni ostaci koji su grafitirani tijekom dugog niza vremena pod ekstremnim tlakom i temperaturama. Pronalaze se u metamorfnim stijenama. Također postoji i sintetski grafit koji se dobiva iz kalciniranog koksa. Njegovo dobivanje započinje kristalom ugljika koji se grafitizira iznad 2700 °C, te se mikrostruktura mijenja i povećavaju se kristali koji čine polikristalnu strukturu sintetskog grafita [12].

Kristalizacija i njene karakteristike nisu jedini parametar koji utječe na tribološke performanse grafita, već utječe i veličina čestica maziva kojom se mijenja koeficijent trenja pri različitim opterećenjima.

## 5.3. Ojačala

Glavni zadaci ojačanja u frikcijskim materijalima:

- minimizacija trošenja
- stabilizacija u bilo kojem radnom temperaturnom području ili uvjetima, npr. različite brzine, temperature („fadeing“), pritiska i trajanja kočenja
- održavanje visokog i stabilnog koeficijenta trenja
- povećanje mehaničke čvrstoće, poboljšanje stabilnosti rubova kočionih pločica i povećanje otpornosti na lom
- dimenzijska stabilnost.




**Slika 5.9. Podjela ojačala [7]**

### 5.3.1. Vlaknasta ojačala

Teoretski vlakna su definirana kao tijelo koje ima dimenzijski omjer tri ili više (odnos širine i duljine), ali se u tu definiciju se ubrajaju mnoge kristalne supstance tako da se uzima omjer deset ili više. U ovom radu je uzeta definicija vlakna kao objekt koji ima promjer manji od 1. Ukoliko je promjer veći od 200 μm daje se naziv velika vlakna, kada je promjer od 100 μm do 200 μm naziva ih strukturna vlakna. Kada je promjer od 1 μm do 25 μm nazivaju se mikrovlakna (mikrofiber), te kada je promjer od 1 nm do 100 nm nazivaju se nanovlakna. Promjer je od velike važnosti za vlačnu čvrstoću, jer svi materijali pokazuju povećanje krhke lomljivosti sa smanjenjem promjera. Moguće je grupirati niti u snopove da bi se dobio veći poprečni presjek a da se istovremeno ne poveća promjer vlakna. Tako je moguće dobiti sjeckani snop kratkih vlakana, sjeckana tkana vlakana, sjeckane vlaknaste prstene ili sjeckani roving. Potrebno je analizirati površinu vlakana i matrice na mjestu gdje se prenosi opterećenje. Opterećenje se u kompozitnom materijalu prenosi iz matrice na vlakno. Što je veći omjer vlakana, veća je i kontaktna površina između matrice i vlakna.

Kritična duljina vlakana ovisi o prianjanju između vlakana i matrice, a to je minimalna duljina gdje vlakna počinju pucati ili, ekvivalentno, maksimalna duljina gdje su vlakna sposobna održati svoj oblik odstranjujući se iz matrice. Duga i kontinuirana vlakna imaju bolju otpornost na udarce i veću krutost, bolju dimenzijsku stabilnost i povećanu otpornost na puzanje i umor, no češća je uporaba kratkih vlakana zbog nižih troškova proizvodnje.

Vlakna orijentirana na kliznu površinu pružaju najbolje ojačanje u frikcijskom materijalu. Uporaba kratkih vlakana neravnomjerno i nekontinuirano raspoređenih vrlo je učinkovita za ojačanje, čak ako je tijekom prešanja i malo orijentirano u nepoželjnom smjeru.

Vlakna mogu biti kemijski podijeljena u dvije klase: amorfna i kristalna. Kada je vlakno izrađeno od jednog kristala zove se visker. Svaka grupa može se podijeliti u četiri klase: prirodni minerali, sintetička anorganska ili umjetna anorganska, prirodna organska i sintetička organska ili umjetna organska vlakna. [7]

Prije su se azbestna vlakna koristila u frikcijskim materijalima zbog dobrih svojstava kemijske i toplinske stabilnosti i dobrog poboljšanja otpornosti na trošenje. Azbest se predlaže u dva oblika: dugi, zavojit i savitljiv, te kratki i ravni. Danas je zabranjeno korištenje azbesta.

### 5.3.2. Ne-vlaknasta ojačanja

Materijali s različitim oblikom, poput čestica, sfera, ploča i pahuljica, mogu se koristiti kao pojačanje za frikcijske materijale. Pretpostavljajući da pojačanja imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na matricu, glavna razlika neojačanih i ojačanih punila je da ojačani povećavaju mehaničku učinkovitost (žilavost i čvrstoću) kompozitnog materijala u odnosu na samu matricu. Kompatibilnost materijala i stvarno područje kontakta su glavni parametri za određivanje je li ojačalo ispunilo svoj zadatak budući da je adhezija između punila i matrice ključna i da prenosi opterećenje. Što su čestice manje, veća je dodirna površina, štoviše što su čestice manje, veća je prijelomna energija čestica pa se stoga smatra da velike čestice nisu dobre. Čestice i mikrosfere nemaju orijentacijski efekt osiguravajući izotropna svojstva kompozita, a manje pojačanje, u usporedbi s vlaknima, kompenzira se uvođenjem veće gustoće punila. Pločice i pahuljice jamče dobro pojačanje u dva smjera, a prostorna

Termoplastičnim materijalima koji se ojačaju česticama, povećava se čvrstoća matrice i tako smanjuje mogućnost deformacije tijekom kočenja. Čađa, aktivni ugljik i silicijev dioksid (*silika*) su najčešće čestice koje se koriste u ojačanjima kočionih pločica.

Crni ugljik se dobiva u plinovitom obliku iz nepotpunog izgaranja u atmosferi s manjkom kisika. Tijekom procesa karbonizacije nanostruktura formiranog materijala je teksturirana kao heksagonski ugljični sloj orijentiran duž površine. Crni ugljik ne dodaje se direktno u frikcijski materijal (koji je proizveden miješanjem svih komponenti), već se dodaje u prethodno promiješanu gumenu smjesu. Površina, veličina čestica i struktura određuju karakterizaciju efekta crnog ugljika na kompozitni materijal [7].

Aktivni ugljik nastaje u dvije faze. U prvoj fazi - stabilizacija, proces karbonizacije čvrstih smola generira ljuske koje se sastoje od ugljičnih heksagonalnih slojeva. One se nazivaju staklastim ugljikom radi mehaničkih svojstava. U drugoj fazi aktivacije se događa oksidacija ugljika. Nastaju pore na površini čestica stvarajući CO i $CO_2$. Pore omogućavaju protok viskoznih tekućina, a koriste se za adsorpciju mirisa i dima. U frikcijskim materijalima poboljšavaju svojstva pri visokim temperaturama, smanjuju efekt „fadeing“-a i smanjuju buku.

Čestice silicijevog dioksida (silike) se koriste za povećanje otpornosti na trošenje kočionih obloga i smanjenje razine buke tijekom kočenja. Dolaze u obliku mikrokuglica ili poroznih staklenih perli [7].

## 5.4. Punila i modifikatori

U frikcijskim materijala svaka komponenta ima utjecaj na faktor trenja, odnosno svaka se komponenta može smatrati modifikatorom trenja. U ovom dijelu, sirovine koje ne pripadaju abrazivima, mazivima, ojačalimama svrstavaju se u dvije glavne podskupine. Punila su termički stabilni jeftini materijali koji imaju minimalan utjecaj na svojstva frikcijske obloge. Punila koja popunjavaju prostor između drugih komponenti i olakšavaju proces proizvodnje same obloge pripadaju prvoj podskupini, dok su modulatori druga podskupina. [8]

Modulatori su svi materijali koji nisu uključeni u prethodne skupine, a koji osiguravaju specifična svojstva konačnog frikcijskog spoja poput prigušivača buke, boje, inhibitora korozije itd.

### 5.4.1. Punila

Kompozit se može definirati kao proizvod koji proizlazi iz ugradnje nekog osnovnog strukturnog materijala u matricu. U prošlosti su svi ugrađeni materijali u frikcijskom spoju bili nazvani punila, a do nedavno su punila smatrana samo kao materijali koji smanjuju omjer troškova i koristi. Glavna svojstva punila su visoka termička stabilnost, minimalni utjecaj na trenje, netopivost u vodi i niski troškovi. Kompatibilni su u smislu adhezije s matricom iako specifična površinska obrada i upotreba sredstva za spajanje mogu biti skupi. S gledišta proizvodnje kočionih obloga, prisutnost punila u frikcijskom spoju tijekom proizvodnje smanjuje skupljanje tijekom oblikovanja i stvrdnjavanja. Materijali iz mineralnih izvora (Tablica 5.4) pogodni su za punila zbog niske cijene (minerali kao što su karbonati, sulfati, nitrati i fosfati) [8].

Tablica 5.4 Svojstva minerala karbonatnih sulfata i fosfata [8]

| Grupa kristala | Formula | Mineral | Gustoća [g/cm$^3$] | Mohrova tvrdoća |
|---|---|---|---|---|
| Kalcit | $MgCO_3$ | Magnesit | 3.010 | 3.5-4.5 |
| | $ZnCO_3$ | Smitozit | 4.434 | 4.5 |
| | $FeCO_3$ | Siderit | 3.973 | 4-4.5 |
| | $MnCO_3$ | Rodokrozit | 3.720 | 3.5-4 |
| | $CdCO_3$ | Otavit | 5.024 | 3.5-4 |
| | $CaCO_3$ | Kalcit | 2.7106 | 3 |
| | $NaNO_3$ | Nitratin | 2.261 | 1.5-2 |
| Dolomiti | $Ca(CO_3)_2$ | Dolomit | 2.868 | 3.5-4 |
| | $CaFe(CO_3)_2$ | Ankerit | 3.293 | 2.5-4 |
| Aragonite | $CaCO_3$ | Aragonit | 2.930 | 3.5-4 |
| | $SrCO_3$ | Strontianit | 3.843 | 3.5 |
| | $PbCO_3$ | Cerusit | 6.577 | 3-3.5 |
| | $BaCO_3$ | Vitherit | 4.314 | 3-3.5 |
| | $KNO_3$ | Niter | 2.079 | 2 |
| Malahit | $Cu_2(OH)_2CO_3$ | Malazit | 3.8 | 3.5-4 |
| Azurit | $Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$ | Azurit | 3.83 | 3.5-4 |
| Barit | $SrSO_4$ | Celestin | 3.961 | 3-3.5 |
| | $PbSO_4$ | Anglesit | 6.321 | 2.5-3 |
| | $BaSO_4$ | Barit | 4.467 | 3-3.5 |
| Gips | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | Gips | 2.313 | 2 |
| Anhidit | $CaSO_4$ | Anhidrit | 2.953 | 3.5 |
| Apatit | $Ca_5(PO_4)_3OH$ | Hidroksapatit | 3.153 | 5 |
| | $Ca_5(PO_4)_3F$ | Fluorapaitit | 3.201 | 5 |
| | $Ca_5(PO_4)_3Cl$ | Klorapatit | 3.185 | 5 |
| Monazite | $CePO_4$ | Monazit | 5.226 | 5-5.5 |

Da bi se postigao minimalni utjecaj na vrijednost faktora trenja, potrebno je uzeti u obzir samo materijale koji ne pripadaju skupinama abraziva i maziva. Svi minerali s tvrdoćom između 3 i 4.5 mogu biti prihvatljivi kao punila ukoliko im je cijena odgovarajuća. Oksidi i materijali na bazi silicija u ovom rasponu već su navedeni u dijelu rada o abrazivima. Sulfati i karbonati dobro zadovoljavaju zahtjeve cijene i tvrdoće i široko se primjenjuju u sastavu frikcijskih materijala. Sulfati su kemijski i termički otporniji od karbonata iako su jeftiniji.

### 5.4.2. Modulatori

Neki od problema u kočionim sustavima su buka, vibracije i hrapavost te se zbog tih problema dodaju modulatori

#### 5.4.2.1. Porozne čestice

Poroznost frikcijskog materijala ima važnu ulogu u apsorpciji zvuka, a brojnost, veličina i vrsta pora važni su čimbenici pri ispitivanju mehanizma apsorpcije zvuka. Često korišteni kao apsorberi plina, čestice s poroznim strukturama mogu smanjiti gustoću i povećati poroznost materijala. Osim smanjenja buke, poroznost može povećati otpornost na „fadeing“ zbog svoje strukture koja olakšava dinamiku plinova nastalih pri visokim temperaturama. Kao i kod drugih komponenti frikcijskog materijala, bitne su značajke toplinske otpornosti i netopljivost u vodi. Porozni materijali mogu biti dobiveni iz sintetičkih ili prirodnih izvora kao što su aktivni ugljen, porozni silicijev dioksid, dijatomejske mikro-školjke, zeoliti, porozne staklene mikrosfere ili iz sintetičke kristalne keramike [8].

#### 5.4.2.2. Slojevita struktura

Anorganski materijali koji imaju ravnu mrežastu kristalnu strukturu djeluju kao prigušivači zvuka. Najpogodniji su mineralni filosilikati koji se nazivaju i slojeviti silikati, a koji su obrađeni u poglavlju o abrazivima.

#### 5.4.2.3. Elastomeri

Elastomeri, koji se nazivaju i gumama, uglavnom se koriste u kompozitnim materijalima kako bi se povećala elastičnost i smanjila toplinska difuzivnost na spoju diska i obloge. Karakterizira ih visoka kompresibilnost, fleksibilnost i prigušivanje. Elastomeri se mogu dodati u tekućem ili krutom granuliranom obliku u mješavinu samostalno ili u prethodno pomiješanom spoju. Većina elastomera su mekano ljepljivi materijali, nisu otporni u pogledu trošenja ili dinamičkog opterećenja i ne održavaju oblik nakon velike deformacije. Kada su

čestice gume izložene velikim silama trenja, loše prianjanje s fenolnom smolom može ugroziti kočione obloge ostavljajući nepoželjne rupe na površini. Radna temperatura može razumno doseći – 40 °C, a buka pri niskim temperaturama može se mijenjati ovisno o termo-mehaničkom ponašanju frikcijskog materijala pa se niska temperatura staklastog prijelaza elastomera mora uzeti u obzir. Otpornost elastomera na visoke temperature i veća mehanička otpornost mogu se postići na različite načine, s pojačanjima, punilima i modulatorima. Kao što je već vidljivo, vlaknasta i čestična pojačanja mogu povećati mehaničku čvrstoću i elastičnost gume. Druge komponente, mogu djelovati kao antioksidanti povećavajući otpornost na toplinu. Rubber premix (gumeni blok ili jednostavno premiks) može se proizvesti pomoću unutarnje gumene miješalice, koja se naziva i Banbury mikser, gdje rotirajući rotori intenzivno miješaju gumu s drugim sastojcima. Na kraju se miješani gumeni blok granulira odabranom veličinom čestica. Drugi način povećanja termomehaničke otpornosti gume je postupak vulkanizacije. Vulkanizacija je kemijski proces u kojem su elastične makromolekule poprečno povezane i tvore trodimenzionalnu mrežu, mrežasta struktura smanjuje količinu trajne deformacije koja povećava elastičnost i smanjuje plastičnost izvorne elastomera [8].

## 5.5. Veziva

### 5.5.1. Organska veziva

Fenolformaldehidna smola je jedna od glavnih upotrebljivih veziva za frikcijske materijale. Fenolne smole nastaju reakcijom fenola s aldehidima. Za frikcijske materijale koriste se fenol-formaldehidni polimeri. Kako bi se poboljšala svojstva fenolnih smola dodaje se CNSL tekućina (Cardanol) koja poboljšava fleksibilnost, električnu izoliranost, toplinsku stabilnost i otpornost na kiseline i lužine. Mogu se dodati akrilne smole koje osiguravaju izvrsnu fleksibilnost i apsorpciju vibracija. Dodatkom silikonskih modificiranih smola dobiva se dobra termička stabilnost, kemijska i udarna otpornost, električna izolacija, vodootpornost i anti-adhezivna svojstva. Moguće je poboljšati svojstva i dodatkom fenol akrilnih smola koje pružaju stabilnost faktora trenja i smanjuju trošenje, povećava se toplinska i kemijska otpornost te se smanjuju vibracije, kao i razina buke tijekom kočenja. Uz fenolformaldehidne smole upotrebljavaju se i silikonske smole. Koriste se za posebnu skupinu kočionih pločica visokih performansi, zbog povećanja toplinske otpornost frikcijskog materijala. Kako bi se postigla keramizacija veziva na bazi silicija koristi se proces pirolize pri 400 °C - 600 °C. Ovaj keramički frikcijski materijal se razlikuje od “pravog keramičkog materijala” [13].

### 5.5.2. Anorganska veziva

Ideja o uporabi anorganskih hidrauličkih veziva u frikcijskim materijalima datira od početka dvadesetog stoljeća kada su kočnice za željeznicu bile bazirane na običnom portland cementu (OPC). Posljednjih godina pokušalo se napraviti frikcijski materijali na bazi cementa i vodenog stakla. Godine 1993. razvijena je frikcijska obloga na temelju smjese topivih silikata i reaktivnih oksida (kao što se koriste u cementima otpornim na visoke temperature) [13].

# 6. Eksperimentalni rad

Procjena fizikalnih, toplinskih i mehaničkih svojstava kočionih obloga su od velike važnosti jer daju uvid u ponašanje cjelokupnog odnosa učinkovitosti, sigurnosti i trošenja kočionih obloga kao i kočionog sustava kao cjelini. Imajući ovo na umu, u ovom istraživanju ispitana su svojstva kao što su specifična težina, tvrdoća, hrapavost površine, faktor trenja, kompresibilnost, tribološka svojstva te je obavljena analiza mikrostrukture. Većina ispitivanja nije rađena po standardima radi lakšeg provođenja laboratorijskih testova te jednostavnosti cjelokupnog ispitivanja usporednim metodama. Nabavljene su disk kočione obloge različitih proizvođača i cjenovnih razreda te se željelo provjeriti ima li razlike u korištenju predmetnih disk kočionih obloga na automobilu, te je li se te razlike očituju i u rezultatima laboratorijskih ispitivanja.

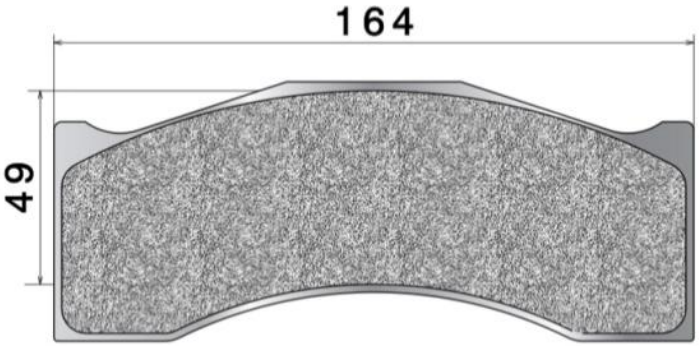
## 6.1. Laboratorijska analiza uzoraka prije ugradnje i ispitivanja na automobilu

Ispitivane su tri različite fikcijske kočione obloge (tzv. *disk pločica*) koje su namijenjene ugradnji u kombi vozilo (M1/N1) marke VW Transporter T5 2.0 TDI, 2012. godine proizvodnje. Kočione obloge su kupljene kod velikog prodavača „neoriginalnih dijelova“ za automobile u Zagrebu kojom prilikom su odabrani različiti proizvođači i cjenovni razredi. Pa tako su najskuplje nabavljene kočione obloge svjetski poznatog proizvođača UZORAK 1 koji proizvodi dijelove kočnih sustava za prvu ugradnju (cijena seta za prednje kotače iznosi 580,00 kn), kočione obloge relativno poznatog proizvođača UZORAK 2 (cijena 320,00 kn), te nepoznatog proizvođača UZORAK 3 (cijena 290,00 kn). Sve ove kočione obloge imaju otisnutu *E*-oznaku i mogu se stavljati na tržište rezervnih dijelova namijenjenih javnom cestovnom prometu u Europi. Pa tako UZORAK 1 ima oznaku *E1*, što znači da je kočiona obloga homologirana u Njemačkoj, *UZORAK 2* ima oznaku *E4* – Nizozemska, a UZORAK 3 oznaku *E20* – Poljska.

Dimenzije uzoraka su prikazane na slici 6.1.

Njihove karakteristike tj. tvorničke specifikacije, su vidljive u tablici 6.1.

U tablici 6.2 prikazane su nabavne cijene pojedinog uzorka seta kočionih obloga za prednje kotače.




**Slika 6.1 Dimenzije kočione obloge**

Tablica 6.1 Tvorničke specifikacije kočionih obloga korištenih u ispitivanju [9]

| Uzorak | Specifična gustoća [g/cm$^3$] | Minimalna sila smicanja [N] | Maksimalna pritisna sila [N] | Maksimalna kontinuirana temperatura držanja [°C] | Maksimalna temperatura [°C] |
|---|---|---|---|---|---|
| UZORAK 1 | 3,19 | 250 | 800 | 350 | 800 |
| UZORAK 2 | 3,05 | 250 | 800 | 350 | 800 |
| UZORAK 3 | 3,08 | 250 | 800 | 350 | 800 |

Tablica 6.2 Cijene uzoraka korištenih u ispitivanju

| Uzorci | UZORAK 1 | UZORAK 2 | UZORAK 3 |
|---|---|---|---|
| Cijena (set) | 580,00 kn | 290,00 kn | 320,00 kn |

### 6.1.1. Mjerenje faktora trenja

Tijekom ispitivanja provedeno je mjerenje faktora trenja za sva tri uzoraka. Za to je korišten uređaj prikazan na slici 6.3 koji je dostupan u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Uređaj je prvo baždaren kako bi se utvrdila konstanta opruge koja se nalazi u uređaju i služi pri mjerenju sile. Postavljeni uteg imao je masu 2 kg te je pritiskao uzorak na ispitni prsten normalnom silom $F_n$ = 100 N. Na temelju rezultata baždarenja i podešene normalne sile, te očitane sile trenja $F_{tr}$, izračunavani su faktori trenja prema sljedećem izrazu:

$$\mu = \frac{Ftr}{Fn}$$

gdje je: $\mu$ … faktor trenja,

$F$tr … očitana sila trenja [N]

$F$n …podešena normalna sila trenja (iznosi 100 N)

**Slika 6.2 Uređaj za ispitivanje faktora trenja**

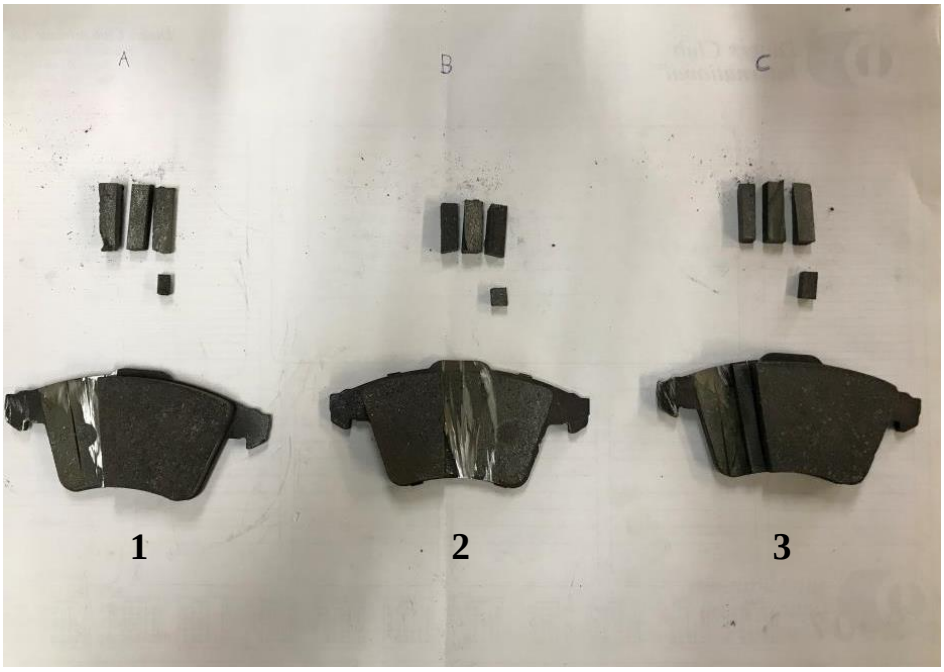
Izmjereni rezultati su prikazani u tablici 6.3, a u tablici 6.4 su izračunate srednje vrijednosti faktora trenja:

Tablica 6.3 Rezultati produljenja opruge uređaja za ispitivanje faktora trenja

| **Mjerenje produljenja opruge pri 100 N** | **UZORAK 1** | **UZORAK 2** | **UZORAK 3** |
|---|---|---|---|
| 1. | 2,4 | 2,52 | 3,41 |
| 2. | 2,45 | 2,64 | 3,65 |
| 3. | 2,51 | 2,80 | 3,90 |

Tablica 6.4 Rezultati ispitivanja faktora trenja

| **Uzorci / mjerenje** | **1. mjerenje** | **2. mjerenje** | **3. mjerenje** | **Srednja vrijednost** |
|---|---|---|---|---|
| UZORAK 1 | 0,422 | 0,425 | 0,429 | 0,427 |
| UZORAK 2 | 0,411 | 0,395 | 0,398 | 0,400 |
| UZORAK 3 | 0,385 | 0,397 | 0,396 | 0,393 |




Slika 6.3 Uzorci korišteni u ispitivanju

### 6.1.2. Mjerenje tvrdoće

Prilikom provedbe samog mjerenja tvrdoće na sva tri uzorka, penetrator (*kuglica*) se utiskivala u ispitne uzorke pod djelovanjem određene sile. Nakon 10 do 15 sekundi, koliko traje utiskivanje, penetrator se odmiče i pomoću mjernog mikroskopa mjeri se promjer baze otiska *d*. Tvrdoća po Brinellu se računa pomoću izraza:

$$\mathrm{HB} = 0,102\frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{(D^2-d^2)})}$$

gdje je: $F$ … sila utiskivanja kuglica [N],

$D$ … promjer kuglice [mm]

$d$ … promjer baze kugličnе kalote (otiska) [mm]

Na slici 5.4 su prikazani svjetlosnim mikroskopom izmjereni promjeri otisaka penetratora pa su te vrijednosti unesene u prethodni izraz .

**1** **2** **3**

**Slika 6.4 Otisci uređaja za ispitivanje tvrdoće na uzorcima**

Tablica 6.5 Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorcima

| Uzorak | UZORAK 1 | UZORAK 2 | UZORAK 3 |
|---|---|---|---|
| Tvrdoća (HB) | 1,35 | 1,33 | 1,33 |

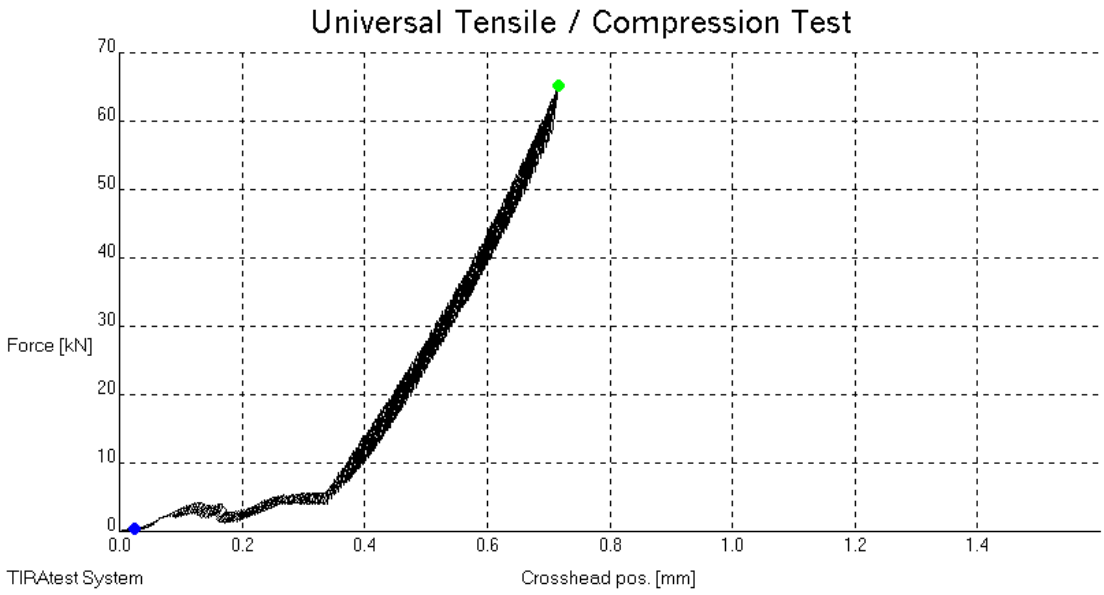
### 6.1.3. Test tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća je promjena debljine obloge zbog primjene normalne sile na površinu kočione obloge. Ovo ispitivanje se provodi na sobnoj temperaturi (tzv. *hladna kompresibilnost*) i na povećanoj temperaturi. Na sobnoj temperaturi kompersibilnost ne smije biti veća od 2 %.

Tijekom testa, provedenog na povišenoj temperaturi, maksimalna tlačna čvrstoća mora biti manja od 5 %. Treba naglasiti da je tlačna čvrstoća kočionih obloga jedna od njihovih važnijih karakteristika jer utječe na apsorbiranje vibracije između diska i obloge, čime se smanjuje štetni učinci vibracija na cjelokupni kočioni sustav, kao i razina buke.

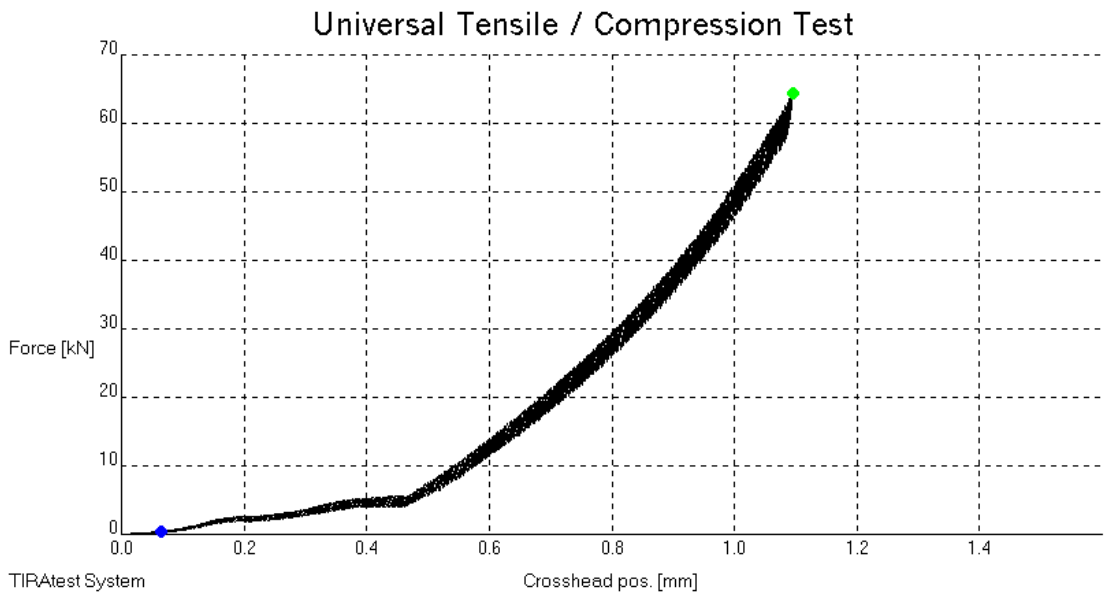
Ispitivanje je provođeno u Laboratoriju za mehanička ispitivanja na FSB-u na kidalici brzinom 0,5 kN/s. Na slici 6.5 je prikazan jedan od uzoraka tijekom ispitivanja na kidalici.

**Slika 6.5 Jedan od uzoraka tijekom ispitivanja na kidalici**



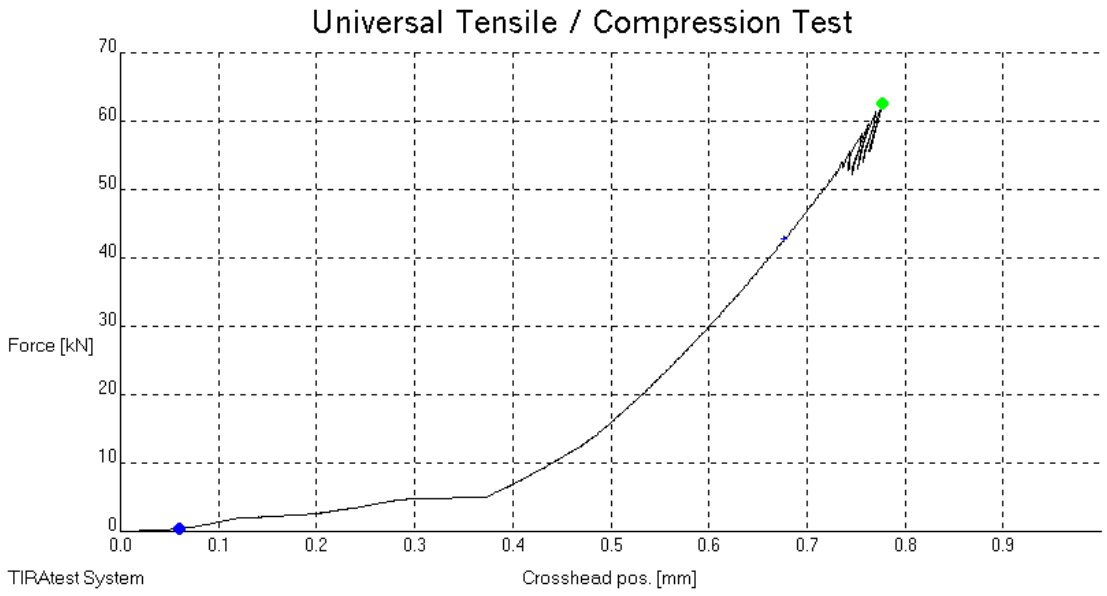

**Slika 6.6 Dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 1**

Na slici 6.6 je prikazan dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 1, maksimalna sila ostvarena prilikom mjerenja je 66 kN i pomak 0,70 mm.




**Slika 6.7 Dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 2**

Na slici 6.7 je prikazan dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 2, maksimalna sila ostvarena prilikom mjerenja je 65 kN i pomak 1,10 mm.




**Slika 6.8 Dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 3**

Na slici 6.8 je prikazan dijagram pomaka i pritisne sile za UZORAK 3, maksimalna sila ostvarena prilikom mjerenja je 62 kN i pomak 0,78 mm.

U tablici 6.6 prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće, te dimenzije prije i poslije prešanja. Te dimenzije su izmjerene s pomičnim digitalnim mjerilom. One ne moraju odgovarati pomaku prikazanom na dijagramu zbog elastičnog povrata. Dimenzije su mjerene digitalnim pomičnim mjerilom.

Tablica 6.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka

| | **UZORAK 1** | **UZORAK 2** | **UZORAK 3** |
|---|---|---|---|
| Dimenzije prije prešanja [mm] | 18,48 | 18,29 | 19,35 |
| Dimenzije poslije prešanja [mm] | 18,28 | 18, 05 | 19,00 |
| Kompresibilnost [%] | 1 | 1,3 | 1,8 |

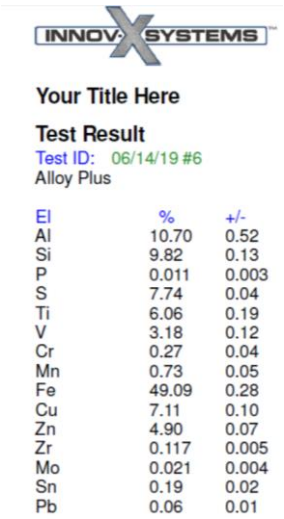
### 6.1.4. Analiza sastava i mikroskopski prikaz površine

Kvantitativna kemijska analiza uzoraka provedena je nerazornom metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF) na uređaju XRF- Olympus, proizvođača Innov-X Systems, Inc., USA, model: DS 2000-C u Laboratoriju za zaštitu materijala FSB-a. Analiza strukture provedena je na mikroskopu OLYMPUS GX51.

**Slika 6.9 Uzorak tijekom ispitivanja na XRF uređaju**

### 6.1.4.1. UZORAK 1

Na slici 6.10 je prikaz ispisa elemenata pronađenih analizom sastava na XRF uređaju za UZORAK 1 (a) i površina kočione obloge prije ispitivanja (b).



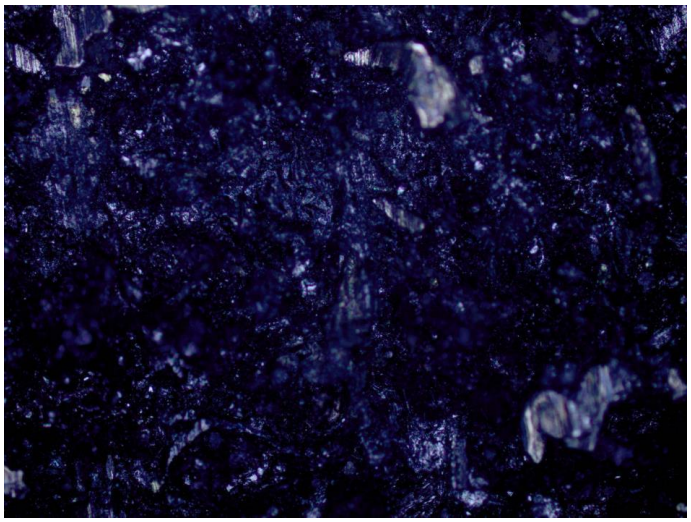
Your Title Here

Test Result

Test ID: 06/14/19 #6

Alloy Plus

| El | % | +/- |
|---|---|---|
| Al | 10.70 | 0.52 |
| Si | 9.82 | 0.13 |
| P | 0.011 | 0.003 |
| S | 7.74 | 0.04 |
| Ti | 6.06 | 0.19 |
| V | 3.18 | 0.12 |
| Cr | 0.27 | 0.04 |
| Mn | 0.73 | 0.05 |
| Fe | 49.09 | 0.28 |
| Cu | 7.11 | 0.10 |
| Zn | 4.90 | 0.07 |
| Zr | 0.117 | 0.005 |
| Mo | 0.021 | 0.004 |
| Sn | 0.19 | 0.02 |
| Pb | 0.06 | 0.01 |

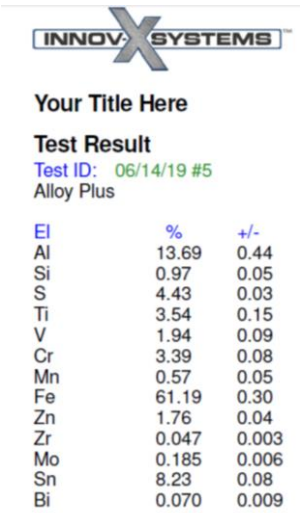


a) b)

**Slika 6.10 Ispis elemenata i površina kočione obloge, UZORAK 1**

### 6.1.4.2. UZORAK 2

Na slici 6.11 je prikaz ispis elementa pronađenih analizom sastava na XRF uređaju za UZORAK 2 (a) i površina kočione obloge prije ispitivanja (b).



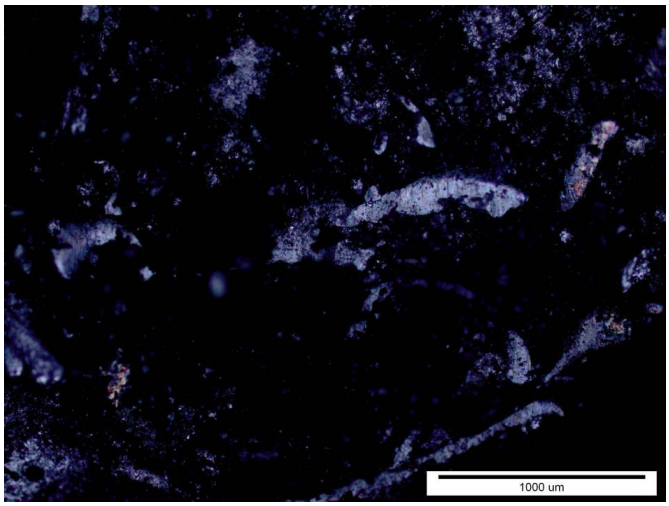
Your Title Here

Test Result

Test ID: 06/14/19 #5

Alloy Plus

| El | % | +/- |
|---|---|---|
| Al | 13.69 | 0.44 |
| Si | 0.97 | 0.05 |
| S | 4.43 | 0.03 |
| Ti | 3.54 | 0.15 |
| V | 1.94 | 0.09 |
| Cr | 3.39 | 0.08 |
| Mn | 0.57 | 0.05 |
| Fe | 61.19 | 0.30 |
| Zn | 1.76 | 0.04 |
| Zr | 0.047 | 0.003 |
| Mo | 0.185 | 0.006 |
| Sn | 8.23 | 0.08 |
| Bi | 0.070 | 0.009 |




a) b)

**Slika 6.11 Ispis elemenata i površina kočione obloge, UZORAK 2**

### 6.1.4.3. UZORAK 3

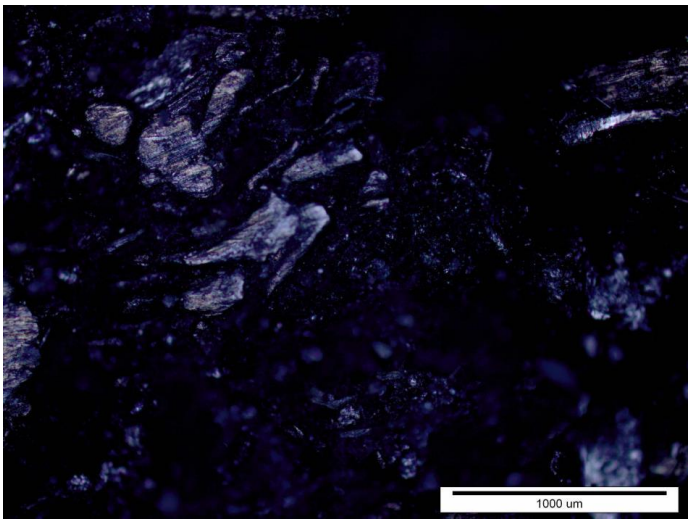
Na slici 6.12 je prikaz ispis elementa pronađenih analizom sastava na XRF uređaju za UZORAK 3 (a) i površina kočione obloge prije ispitivanja (b).

Your Title Here

Test Result
Test ID: 06/14/19 #7
Alloy Plus

| El | % | +/- |
|---|---|---|
| Al | 7.28 | 0.48 |
| Si | 8.10 | 0.11 |
| S | 5.95 | 0.03 |
| Ti | 6.66 | 0.21 |
| V | 3.55 | 0.13 |
| Cr | 1.84 | 0.08 |
| Mn | 0.50 | 0.05 |
| Fe | 54.91 | 0.32 |
| Cu | 5.93 | 0.10 |
| Zn | 0.20 | 0.02 |
| Zr | 0.065 | 0.004 |
| Sb | 5.02 | 0.07 |

a)




b)

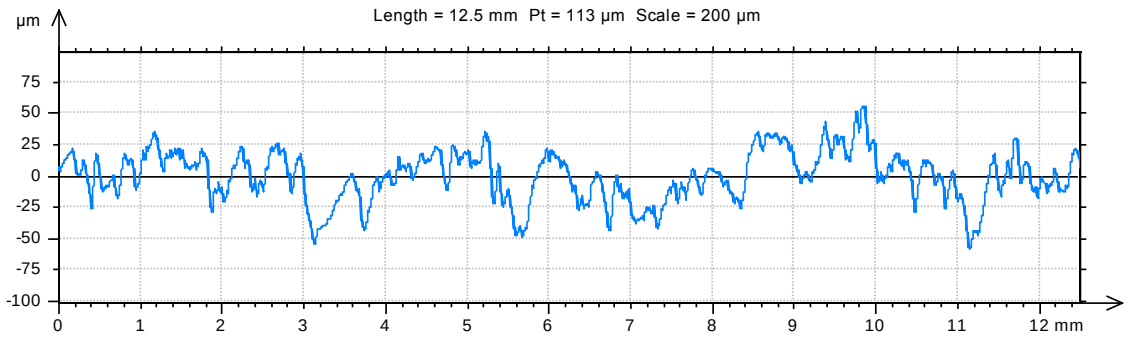
**Slika 6.12 Ispis elemenata i površina kočione obloge, UZORAK 3**

### 6.1.5. Mjerenje hrapavost površine

Ispitivanje hrapavosti površina provedeno je kontaktnom metodom korištenjem elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom Perthometer S8P u Nacionalnom laboratoriju za duljinu RH na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Slijedivost rezultata mjerenja parametara hrapavosti osigurana je preko državnog etalona hrapavosti RH. Na svakom uzorku provedeno je mjerenje na 3 profila hrapavosti uz korištenje ticala radijusa zakrivljenosti 5 μm i Gauss-ovog filtra, CUT-OFF 0,8 mm. Ispitivanje hrapavosti površina provedeno je u skladu sa zahtjevima sljedećih norma: HRN EN ISO 4287:1997 Geometrijske Specifikacije Proizvoda (GSP) — Tekstura površine: metoda snimanja profila, HRN EN ISO 4288:1996 Geometrijske Specifikacije Proizvoda (GSP), tekstura površine: metoda snimanja profila i DIN EN ISO 3274:1996 Geometrijske Specifikacije Proizvoda (GSP). Na slikama su prikazanI profili hrapavosti površina, a u tablicama parametri hrapavosti.

#### 6.1.5.1. UZORAK 1

Na slici 6.13 se nalazi profil hrapavosti za UZORAK 1, a u tablici 5.7 su prikazane vrijednosti parametara hrapavosti površine za UZORAK 1



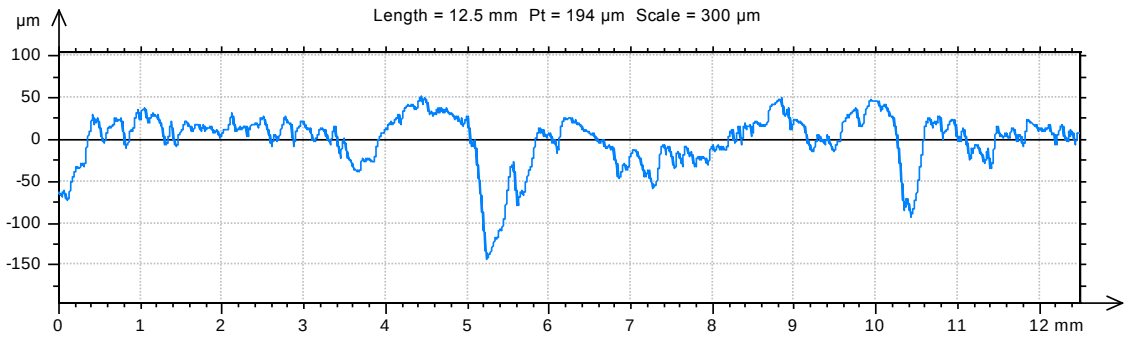

**Slika 6.13 Profil hrapavosti za uzorak UZORAK 1**

Tablica 6.7 Srednje vrijednosti parametara hrapavosti površine za UZORAK 1

| ISO 4287 | | | ISO 4287 | | | ISO 4287 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | Amplitude parameters - Roughness profile | | | Amplitude parameters - Roughness profile | | |
| Rp | 19,7 | µm | Rp | 18,3 | µm | Rp | 20,5 | µm |
| Rv | 24,2 | µm | Rv | 23,4 | µm | Rv | 23,9 | µm |
| Rz | 43,9 | µm | Rz | 41,7 | µm | Rz | 44,3 | µm |
| Rt | 57,0 | µm | Rt | 73,5 | µm | Rt | 64,9 | µm |
| Ra | 8,74 | µm | Ra | 7,81 | µm | Ra | 8,88 | µm |
| Rq | 10,6 | µm | Rq | 9,67 | µm | Rq | 10,8 | µm |

### 6.1.5.2. UZORAK 2

Na slici 6.14 se nalazi profil hrapavosti za UZORAK 2, a u tablici 5.8 su prikazane vrijednosti parametara hrapavosti površine za UZORAK 2.



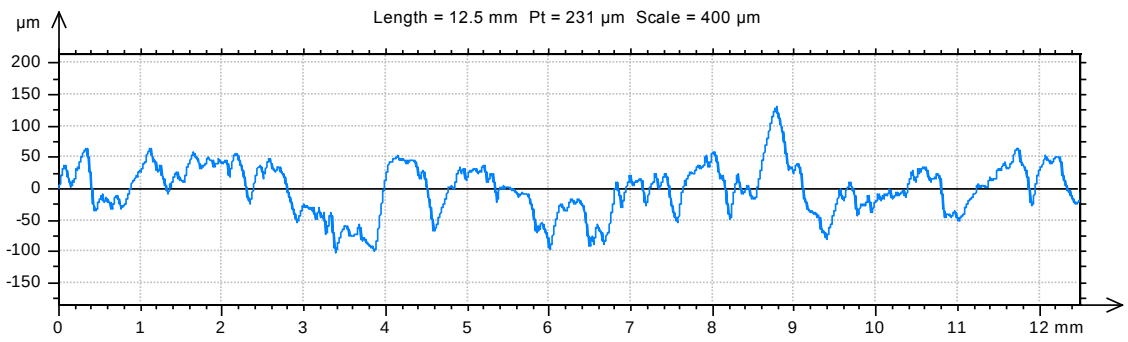

**Slika 6.14 Profil hrapavosti za uzorak UZORAK 2**

Tablica 6.8 Srednje vrijednosti parametara hrapavosti površine za UZORAK 2

| ISO 4287 | | | ISO 4287 | | | ISO 4287 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | Amplitude parameters - Roughness profile | | | Amplitude parameters - Roughness profile | | |
| Rp | 20,7 | µm | Rp | 21,9 | µm | Rp | 21,3 | µm |
| Rv | 28,6 | µm | Rv | 27,9 | µm | Rv | 28,1 | µm |
| Rz | 49,3 | µm | Rz | 49,8 | µm | Rz | 49,4 | µm |
| Rt | 99,8 | µm | Rt | 86,4 | µm | Rt | 87,9 | µm |
| Ra | 9,63 | µm | Ra | 9,59 | µm | Ra | 9,21 | µm |
| Rq | 11,8 | µm | Rq | 11,9 | µm | Rq | 11,9 | µm |

### 6.1.5.3. UZORAK 3

Na slici 6.15 se nalazi profil hrapavosti za UZORAK 3, a u tablici 6.9 su prikazane vrijednosti parametara hrapavosti površine za UZORAK 3.




**Slika 6.15 Profil hrapavosti za uzorak UZORAK 3**

Tablica 6.9 Srednje vrijednosti parametara hrapavosti površine za uzorak UZORAK 3

| ISO 4287 | | | ISO 4287 | | | ISO 4287 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | Amplitude parameters - Roughness profile | | | Amplitude parameters - Roughness profile | | |
| Rp | 29,4 | µm | Rp | 32,7 | µm | Rp | 31,1 | µm |
| Rv | 40,9 | µm | Rv | 36,4 | µm | Rv | 35,9 | µm |
| Rz | 70,4 | µm | Rz | 69,1 | µm | Rz | 67,0 | µm |
| Rt | 113 | µm | Rt | 102 | µm | Rt | 109 | µm |
| Ra | 13,5 | µm | Ra | 13,8 | µm | Ra | 13,2 | µm |
| Rq | 16,8 | µm | Rq | 16,6 | µm | Rq | 15,9 | µm |

### 6.1.6. Gustoća i poroznost

Kod ovog ispitivanja se koristila metoda bez razaranja za kontrolu kvalitete konzistentnosti formulacije materijala. Teoretska i stvarna specifična težina ne bi se trebale razlikovati za više od 2 %. Uzorci su se odvojili od metalne podloge te se odredila masa uzorka s točnošću 0,1 gram. U sljedećem koraku uzorak se uronio u vodu sobne temperature, ali na način da je ispod površine vode i ne dodiruje stjenke posude, te su se uzorci vadili iz spremnika i masa izmjerila s točnošću 0,1 gram.

Gustoća se izračunava sljedećim izrazom:

$$\text{gustoća} = \frac{(W\text{a})}{(W\text{a} - W\text{b})}$$

gdje je: $W_a$ … masa uzorka izmjerenog na zraku (suhog),

$W_b$ … masa uzorka izmjerenog nakon uranjanja u vodu.

Tablica 6.10 Rezultati mjerenja gustoće

| | UZORAK 1 | UZORAK 2 | UZORAK 3 |
|---|---|---|---|
| $W_a$ [g] | 4,00 g | 4,00 g | 4,00 g |
| $W_b$ [g] | 2,84 g | 2,55 g | 2,71 g |
| Gustoća | 3,43 g | 2,75 g | 2,95 g |

Po završetku ispitivanja gustoće, izrezani su se uzorci (slika 6.16) uronili u ulje sobne temperature na 30 minuta da bi se odredila poroznost. Poroznost je relativni volumen udjela šupljina u materijalu uzoraka. Uključuje pore, zračne džepove i sve šupljine. Kod kočionih obloga poroznost se izražava kao postotak apsorbiranog volumena ulja u odnosu na volumen ispitnog uzorka prema JIS-D 4118 standardu. Teoretski udio pora mora biti manji od 5 %. Prevelika poroznost može uzrokovati prerano trošenje, a preniska poroznost dovodi do nastanka neugodnog zvuka tzv. cviljenja prilikom kočnja.

$$P = \left\{ \frac{m_2 - m_1}{\rho} \times \frac{1}{V} \times 100 \right\}$$

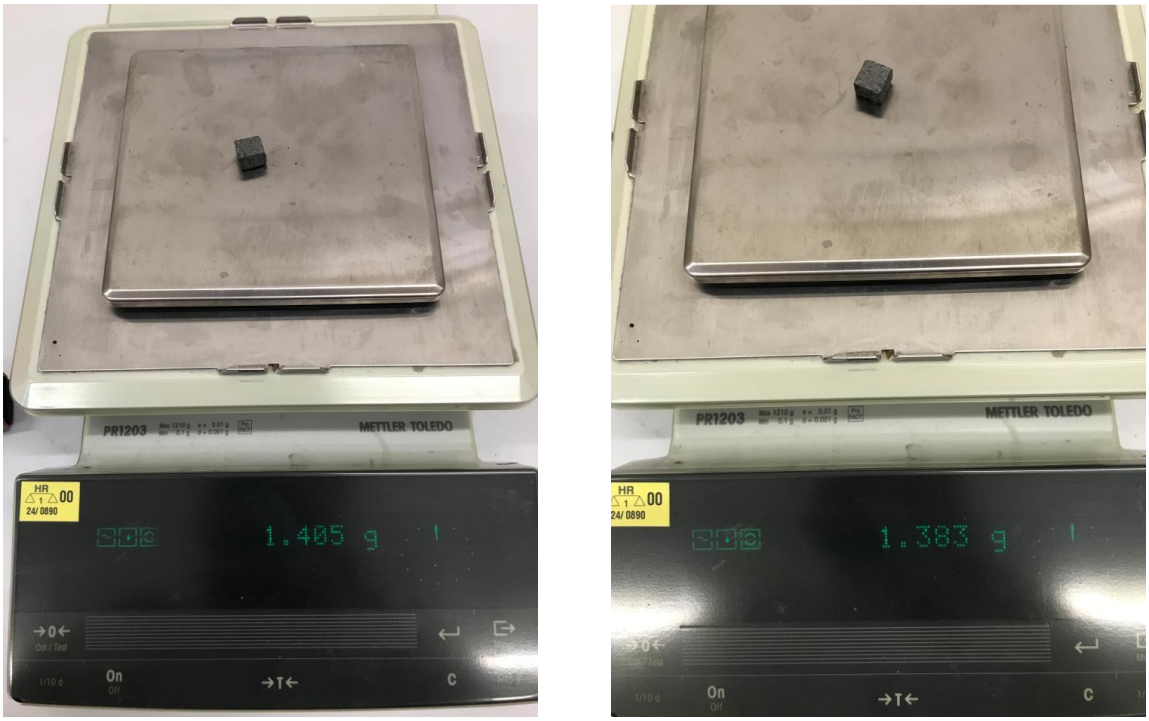
gdje je: P … poroznost [%],

$m_1$ … masa testnog uzorka [g],

$m_2$ … masa uzorka nakon apsorbiranja ulja [g],

$\rho$ … gustoća ulja [g/cm$^3$],

$V$ … volumen uzorka [cm$^3$]




**Slika 6.16 Masa uzoraka tijekom mjerenja poroznosti**

Tablica 6.11 Rezultati poroznosti

| **Uzorak** | **Poroznost** [%] |
|---|---|
| UZORAK 1 | 1,56 |
| UZORAK 2 | 2,05 |
| UZORAK 3 | 2,14 |

## 6.2. Terensko ispitivanje uzoraka

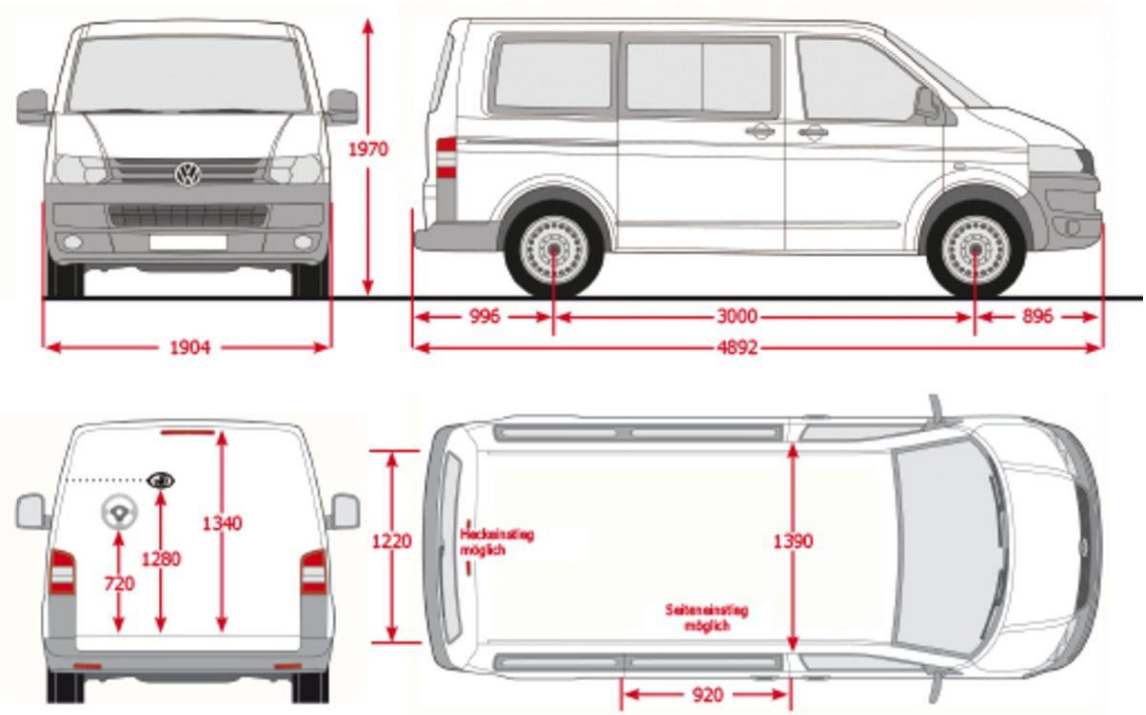
U pripremi ovog rada i želji da se utvrdi razlika u putu zaustavljanja i temperaturi koja se razvija na prednjim kočionim oblogama prilikom kočenja između predmetnih kočnih obloga u praksi, tvrtka Centar za vozila Hrvatske d.d., odnosno njihov Odjel za ispitivanje ustupila je pristup testnoj stazi u Velikoj Gorici. Testna staza je asfaltirana servisna poletno-sletna pista Zrakoplovnog tehničkog centra (ZTC) Velika Gorica. Sama testna staza je duljine 2200 m (vidljivo na slici 6.17). U dogovoru s ZTC-om omogućeno je ispitivanje kočnica u 3 navrata u jutarnjim satima (dana 8.5.2019. godine , 6.6.2019. godine  i 11.6.2019. godine).

**Slika 6.17 Satelitski prikaz piste za mjerenje**

### 6.2.1. Priprema  prije ispitivanje

Za ispitivanje se koristio teretni (N1) automobil marke VW Transporter T5 2.0 TDI (zatvoreni, furgon, L1H1), 2012. godine proizvodnje, slika 5.18. Sam automobil ima masu (bez tereta) 1794 kg, a maksimalno dopuštena masa mu je 2800 kg. Automobil je duljine 4892 mm, širine 1904 mm i visine 1970 mm kao što je prikazano na slici 6.19. Međuosovinski razmak iznosi 3000 mm.  Automobil je opremljen dvokružnim hidrauličkim disk kočnicama na svim kotačima s vakuumskim pojačivačem sile kočenja. Na prednjim kotačima su ventilirani diskovi promjera Φ 308 mm, a kočne čeljusti su nepomične s 4 klipa. Dimenzije disk pločica su vidljive na slici 5.1 , na stranici 60.

**Slika 6.18 Vozilo korišteno za ispitivanje**




**Slika 6.19 Dimenzije vozila korištenog za ispitivanje**

U vrijeme ispitivanja na automobilu su na svim kotačima bili ugrađeni pneumatici ljetnog profila marke Continental Van Eco dimenzija 205/65 R 16 C. Pneumatici su na početku ispitivanja imali prosječnu dubinu utora 3 mm. Da se eliminira utjecaj korištenih diskova kočnica nabavljena su tri seta novih uzoraka diskova za prednje kotače. Ideja ispitivanja je bila da se, prije svakog ispitivanja zaustavnog puta i temperature, zamijene diskovi i kočione obloge i s istima se proveze barem 100-injak kilometara da bi se isti prilagodili. Potom bi se, sljedećeg dana u jutarnjim satima pristupilo ispitivanju zaustavnog puta i mjerenju temperature kočnica prednjih kotača.

Da bi se samo ispitivanje ubrzalo, automobil je natovaren s 1000 kg tereta (pijesak u vrećama na paleti) i isti je naslonjen na pregradu između putničkog o teretnog prostora kao što je vidljivo na slici 6.20. Svaki put, prije ispitivanja na testnoj pisti, automobil je izvagan na Stanici za tehnički pregled, te su provjerene/ispitane kočnice na valjcima za ispitivanje kočnica.

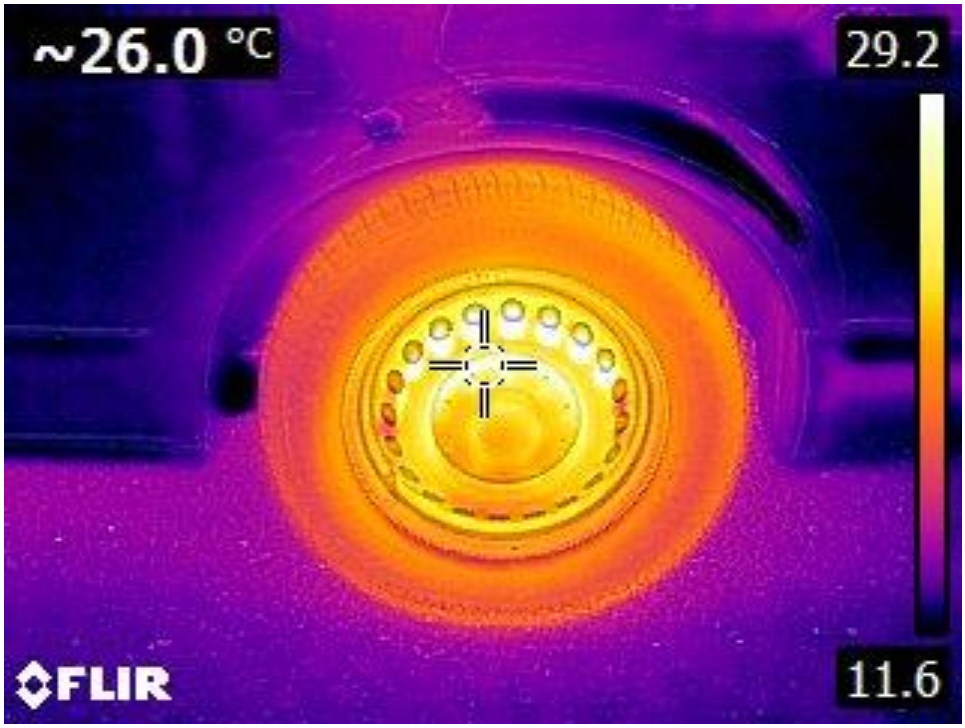
**Slika 6.20 Način opterećenja automobila teretom i način učvršćenja tereta (*Q/g* = 1000kg)**

Vaganjem opterećenog automobila (1030 kg tereta, te vozač i suvozač) je dobiveno opterećenje prednje osovine s 1675 kg (prednji lijevi kotač 840 kg, prednji desni kotač 835 kg), opterećenje stražnje osovine 1410 kg (stražnji lijevi kotač 724 kg, stražnji desni kotač 686 kg). Ukupna masa automobila je bila 3085 kg, odnosno isti je *u pretovaru* bio 285 kg (10,2%). Prilikom sva tri ispitivanja, odnosno vaganja su dobivene gotovo iste mase

automobila, te odnosi opterećenja prednje i stražnje osovine (maksimalna razlika je bila 10 kg).

Za ispitivanja su korišteni isti tipovi kočionih obloga koji tipom i proizvođačem odgovaraju prethodno laboratorijski ispitivanim uzorcima, budući da su laboratorijskim ispitivanjem isti bili nepovratno uništeni.

Ispitivanje kočnica se provodilo na način da se predmetnim automobilom ubrzalo na 100 km/h (27,7 m/s) i potom se intenzivnim kočenjem zaustavio automobil. Suvozač bi izašao iz automobila i pirometrom bi izmjerio trenutačnu temperaturu diska prednjeg desnog i lijevog kotača (što bliže kočionim čeljustima).




**Slika 6.21 Prikaz kotača prije ispitivanja termo kamerom**

Također prije ispitivanja napravljena je snimka termo kamerom (slika 6.21) kako bi se prikazale početne temperature pneumatika i podloge, ali termokamera nema veliki raspon mjerenja temperature pa je mjerenje nastavljeno pirometrom (slika 6.22).

**Slika 6.22 Pirometar**

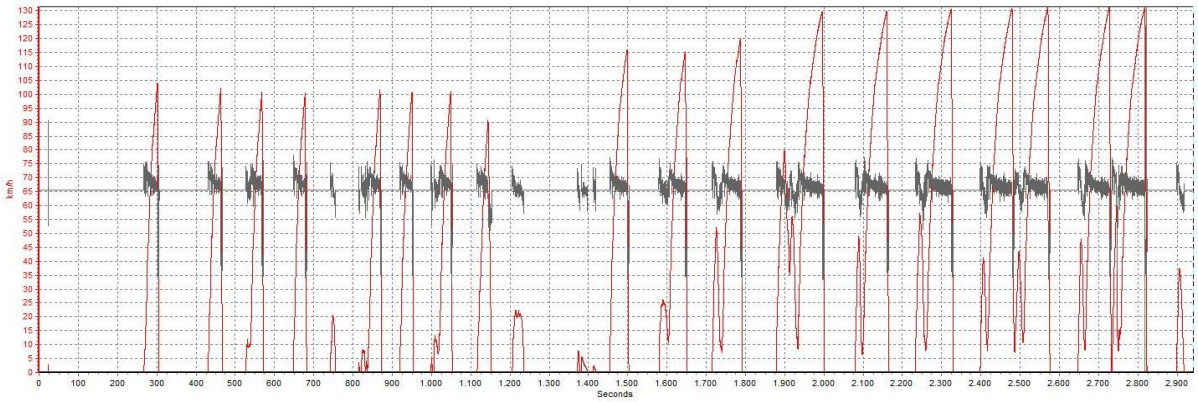
Potom bi suvozač ponovo ušao u automobil pa bi se ponovno ubrzalo i dostigla brzina od 100 km/h te ponovilo kočenje. Ideja je bila da se tijekom mjerenja temperature automobil što kraće zadrži u stajanju kako se kočnice ne bi stigle isuviše ohladiti. Samo usporenje kao i zaustavni put mjereni su uređajem *RACE LOGIC DRIFT-BOX* (slika 6.23). *RACE LOGIC DRIFT-BOX* je 10 Hz *„GPS“* uređaj koji mjeri performanse vozila. Sadrži sofisticirane senzore pomaka koji omogućuju mjerenje kuta zanosa vozila, „*G*“ sile, brzinu, usporenje, ubrzanje i zaustavni put. Svi parametri se spremaju na SD memorijsku karticu, te se na prilagođenom Race Logic softwearu očitavaju podaci prikazani u sljedećim poglavljima.

**Slika 6.23 RACE LOGIC DRIFT-BOX uređaj**

### 6.2.2. Ispitivanje kočionih obloga

#### 6.2.2.1. UZORAK 1

Dijagram na osi x prikazuje vrijeme ispitivanja, a time i vrijeme do zaustavljanja, a na osi y brzinu vozila izraženu u kilometrima na sat. Svaki crveni dijagram prikazuje zasebno ubrzavanje do određene brzine i naglo kočenje. Uzeto je devet relevantnih kočenja te su ti rezultati prikazani u tablici.




**Slika 6.24 Slika dijagrama vremena ubrzanja i brzine vozila**

U tablici 6.12 su prikazane temperature uzoraka kočionih obloga izmjerenih prijenosnim laserskim pirometrom. Može se primijetiti kako temperatura sa svakim kočenjem raste, a s njome i zaustavni put. U ovom slučaju, unatoč 9 kočenja disk se nije uspio jače zagrijati već je temperatura ostala relativno niska (u odnosu na druge pločice). Iako je zagrijavanjem smanjeno usporenje, nije došlo do opasnog niskog usporenja. Tada se ponovilo mjerenja s brzine od 130 km/h zaustavljajući intenzivnim kočenjem automobil i to se ponovilo 15-tak puta. Kočione obloge nisu se uspjele „pregrijati“. Namjera je bila provjeriti je li moguće pregrijati kočnicu i doći do „fadeinga“. Na kraju ispitivanja izmjerena je temperatura diska od 470 ºC, no i nadalje su kočnice radile, bez tragova „fadeinga“ (ili plamena).

Tablica 6.12 Temperature lijevog i desnog uzorka  kočione obloge tijekom kočenja

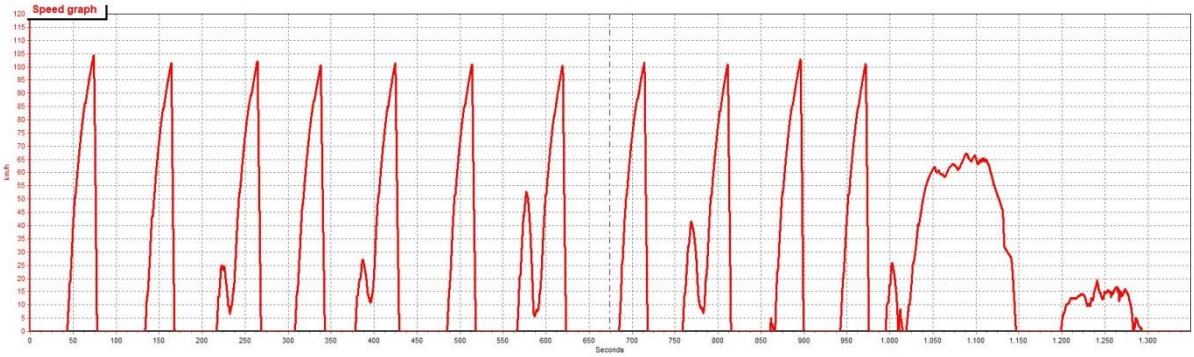
| **Kočenje** | **Temperatura uzorka lijeve kočne obloge [ºC]** | **Temperatura uzorka desne kočne obloge [ºC]** |
|---|---|---|
| 1. | 65 | 68 |
| 2. | 72 | 77 |
| 3. | 80 | 83 |
| 4. | 105 | 109 |
| 5. | 138 | 142 |
| 6. | 166 | 167 |
| 7. | 210 | 215 |
| 8. | 285 | 300 |
| 9. | 325 | 329 |

Tablica 6.13 Prikaz usporenja, zaustavnog puta i vremena zaustavljanja tijekom ispitivanja

| **Kočenje** | **Zaustavni put [m]** | **Usporenje [m/s$^2$]** | **Vrijeme zaustavljanja [s]** | **Početna brzina [m/s]** |
|---|---|---|---|---|
| 1. | 47,52 | 7,8 | 3,52 | 27,7 |
| 2. | 47,33 | 7,8 | 3,55 | 27,7 |
| 3. | 48,00 | 7,6 | 3,60 | 27,7 |
| 4. | 48,42 | 7,6 | 3,63 | 27,7 |
| 5. | 48,05 | 7,6 | 3,60 | 27,7 |
| 6. | 48,52 | 7,4 | 3,73 | 27,7 |
| 7. | 48,96 | 7,2 | 3,84 | 27,7 |
| 8. | 50,52 | 6,2 | 4,40 | 27,7 |
| 9. | 52,51 | 5,9 | 4,62 | 27,7 |

### 6.2.2.2. UZORAK 2

Dijagram na osi x prikazuje vrijeme ispitivanja, a time i vrijeme do zaustavljanja, a na osi y brzinu vozila izraženu u kilometrima na sat. Svaki crveni dijagram prikazuje zasebno ubrzavanje do određene brzine i naglo kočenje. Uzeto je devet relevantnih kočenja te su ti rezultati prikazani u tablici.




**Slika 6.25 Slika dijagrama vremena ubrzanja i brzine vozila**

U tablici 6.14 su prikazane temperature uzoraka kočionih obloga izmjerene prijenosnim laserskim pirometrom. Može se primijetiti kako temperatura sa svakim kočenjem raste, a s njome i zaustavni put. Tijekom 9. ispitivanja i izmjerene temperature od 458 ºC došlo je do razvoja plamena na desnom kotaču (slika 5.26), u području čeljusti kočnice (diska i kočione obloge). Plamen je ugašen i automobil je pokrenut kako bi struja zraka ohladila disk i ugasila plamen na uzorku kočione obloge. Nakon toga je kočiona obloga ostala bez firkcijskih značajki, te je prekinuto ispitivanje.

**Slika 6.26 Plamen na kočionoj oblozi nakon 9. ispitivanja**

Tablica 6.14 Temperature lijevog i desnog uzorka  kočione obloge tijekom kočenja

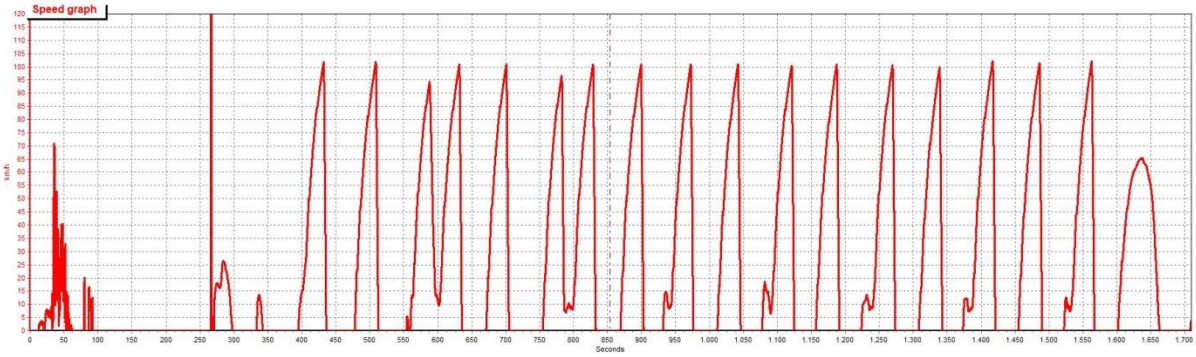
| Kočenje | Temperatura uzorka lijeve kočne obloge [ºC] | Temperatura uzorka desne kočne obloge [ºC] |
|---|---|---|
| 1. | 82 | 87 |
| 2. | 108 | 110 |
| 3. | 125 | 122 |
| 4. | 148 | 152 |
| 5. | 175 | 210 |
| 6. | 183 | 240 |
| 7. | 341 | 347 |
| 8. | 397 | 394 |
| 9. | 470 | 458 |

Tablica 6.15 Prikaz usporenja, zaustavnog puta i vremena zaustavljanja tijekom ispitivanja

| Kočenje | Zaustavni put [m] | Usporenje [m/s$^2$] | Vrijeme zaustavljanja [s] | Početna brzina [m/s] |
|---|---|---|---|---|
| 1. | 48,55 | 7,5 | 3,69 | 27,7 |
| 2. | 48,98 | 7,2 | 3,80 | 27,7 |
| 3. | 49,85 | 7,0 | 3,95 | 27,7 |
| 4. | 50,53 | 6,1 | 4,48 | 27,7 |
| 5. | 51,83 | 5,5 | 4,95 | 27,7 |
| 6. | 52,15 | 5,3 | 5,15 | 27,7 |
| 7. | 52,88 | 4,7 | 5,85 | 27,7 |
| 8. | 54,50 | 4,6 | 6,00 | 27,7 |
| 9. | 55,15 | 4,02 | 6,88 | 27,7 |

### 6.2.2.3. UZORAK 3

Dijagram na osi x prikazuje vrijeme ispitivanja, a time i vrijeme do zaustavljanja, a na osi y brzinu vozila izraženu u kilometrima na sat. Svaki crveni dijagram prikazuje zasebno ubrzavanje do određene brzine i naglo kočenje. Uzeto je devet relevantnih kočenja te su ti rezultati prikazani u tablici.




**Slika 6.27 Slika dijagrama vremena ubrzanja i brzine vozila**

Tablica 6.16 Temperature lijevog i desnog uzorka kočione obloge tijekom kočenja

| Kočenje | Temperatura uzorka lijeve kočne obloge [ºC] | Temperatura uzorka desne kočne obloge [ºC] |
|---|---|---|
| 1. | 79 | 79 |
| 2. | 105 | 102 |
| 3. | 118 | 120 |
| 4. | 135 | 143 |
| 5. | 152 | 173 |
| 6. | 238 | 245 |
| 7. | 295 | 303 |
| 8. | 330 | 345 |
| 9. | 395 | 408 |

U tablici su prikazane temperature kočionih obloga izmjerenim prijenosnim laserskim pirometrom. Temperatura sa svakim kočenjem raste, a s njome raste i zaustavni put. Ovdje se ispitivanje također ponovilo 9 puta no nije uočen plamen u području čeljusti kočnice. No usporenje na kraju ispitivanja je značajno smanjeno, a utisak vozača je da su, nakon ispitivanja, kočnice bile mnogo manje efikasne.

Tablica 6.17 Prikaz usporenja, zaustavnog puta i vremena zaustavljanja tijekom ispitivanja

| **Kočenje** | **Zaustavni put [m]** | **Usporenje [m/s$^2$]** | **Vrijeme zaustavljanja [s]** | **Početna brzina [m/s]** |
|---|---|---|---|---|
| 1. | 48,50 | 7,0 | 3,95 | 27,7 |
| 2. | 48,86 | 7,2 | 3,80 | 27,7 |
| 3. | 49,05 | 6,9 | 3,96 | 27,7 |
| 4. | 49,95 | 6,8 | 4,05 | 27,7 |
| 5. | 50,45 | 6,2 | 4,45 | 27,7 |
| 6. | 51,85 | 5,4 | 5,05 | 27,7 |
| 7. | 52,32 | 5,0 | 5,51 | 27,7 |
| 8. | 53,00 | 4,7 | 5,88 | 27,7 |
| 9. | 54,15 | 4,5 | 6,06 | 27,7 |

## 6.3. Laboratorijska analiza uzoraka nakon terenskog ispitivanja

Nakon ispitivanja na pisti, iste kočione obloge su laboratorijski ispitivane. Rađena je XFR analiza sastava, mjeren je faktor trenja, analizirala se površinska hrapavost sa svim parametrima hrapavosti, te je napravljena analiza na svjetlosnom mikroskopu kako bi se prikazali učinci trošenja.

### 6.3.1. XFR analiza uzoraka

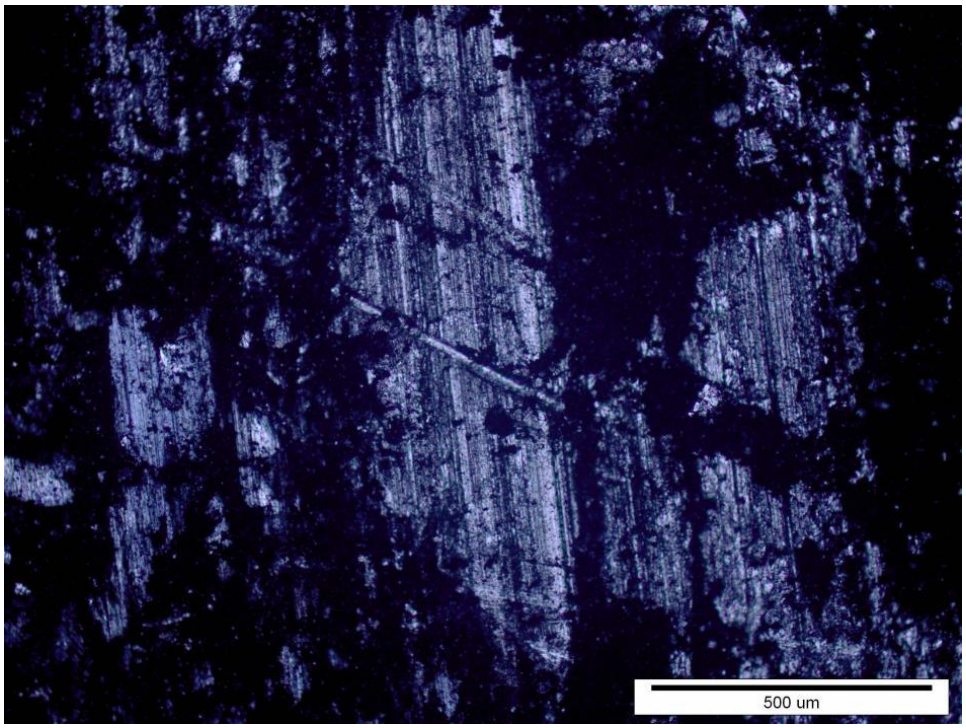
Kvantitativna kemijska analiza uzoraka provedena je nerazornom metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF) na uređaju XRF- Olympus, proizvođača Innov-X Systems, Inc., USA, model: DS 2000-C u Laboratoriju za zaštitu materijala FSB-a kao i kod prvog laboratorijskog ispitivanja. U tablici 6.18 je prikazan ispis elementa očitanih XRF uređajem. Vidljiva je kvalitativna i kvantitativna promjena u sastavu uzrokovanu promjenom temperature, adhezijom materijala diska i utjecajem nečistoća na kočionu oblogu.

Tablica 6.18 Ispis elemenata . očitanih XRF uređajem

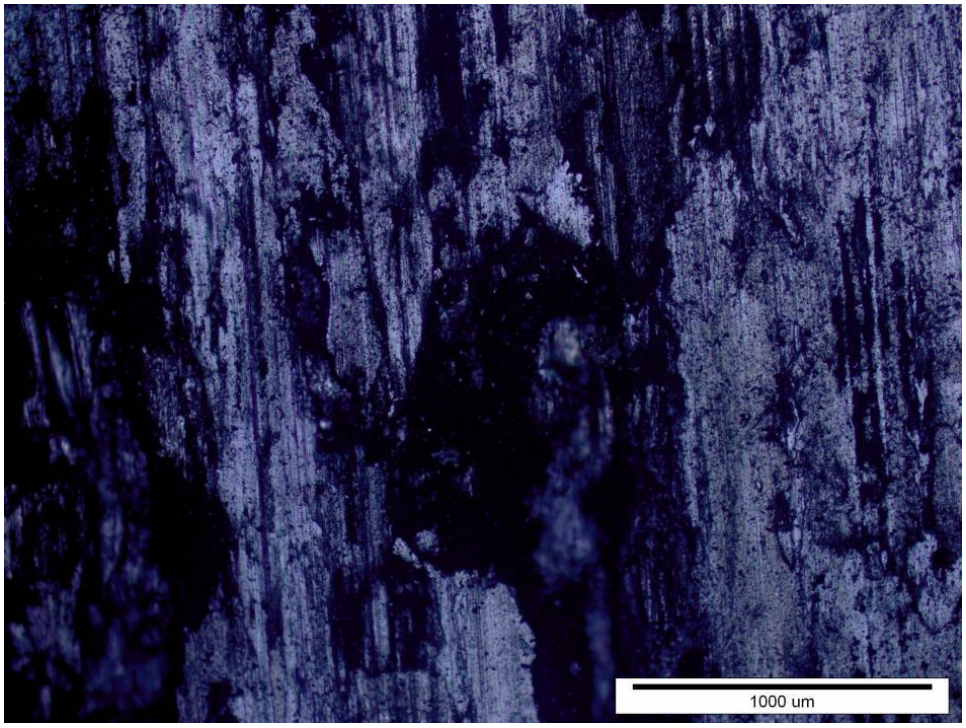
| Element [%] | UZORAK 1 | UZORAK 2 | UZORAK 3 |
|---|---|---|---|
| **Si** | 4,9 | 4,6 | 0,94 |
| **S** | 4,16 | 3,59 | 2,98 |
| **Ti** | 4,54 | 6,15 | 3,53 |
| **V** | 2,4 | 3,56 | 1,91 |
| **Cr** | 0,19 | 1,69 | 3,28 |
| **Mn** | 0,75 | 0,61 | 0,73 |
| **Fe** | 70,18 | 71,83 | 68,66 |
| **Cu** | 6,84 | 1,96 | - |
| **Zn** | 5,83 | 0,36 | 1,63 |
| **Zr** | 0,14 | 0,076 | 0.055 |
| **Al** | - | - | 5.28 |

### 6.3.2. Prikaz mikrostrukture nakon ispitivanja

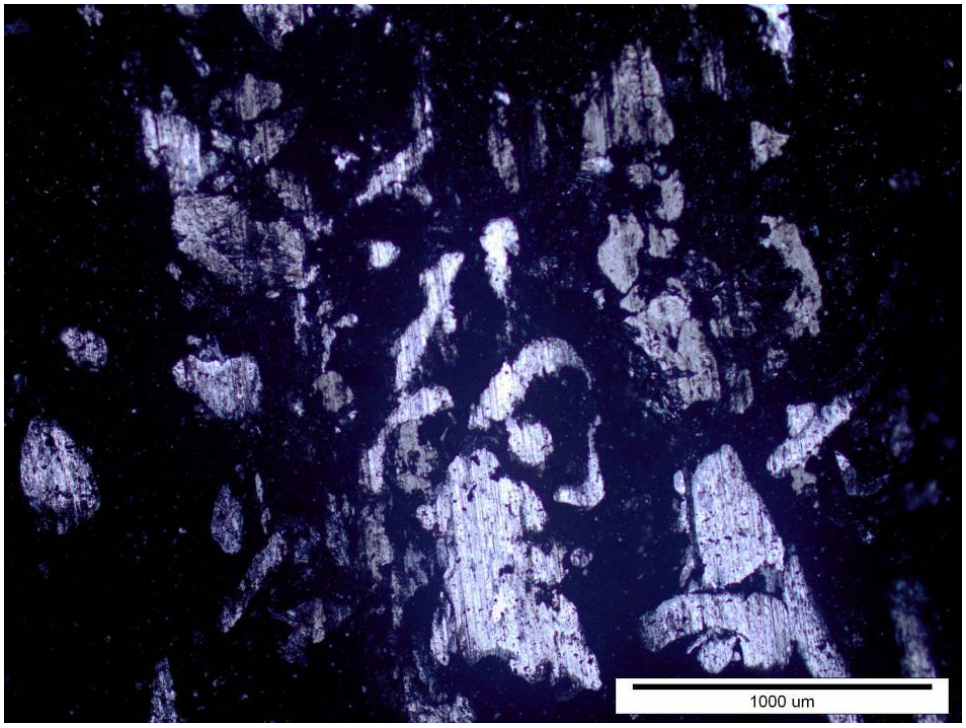
Na svjetlosnom mikroskopu su izrađene slike kočionih obloga nakon ispitivanja, te su utvrđeni smjerovi trošenja i oštećenja. Na sljedećim slikama su prikazane površine uzoraka:




**Slika 6.28 Prikaz površine za UZORAK 1**




**Slika 6.28 Prikaz površine za UZORAK 2**




**Slika 6.29 Prikaz površine za UZORAK 3**

### 6.3.3. Mjerenje faktora trenja

Nakon ispitivanja kočionih obloga na pisti, ponovno je mjeren faktor trenja kočionih obloga. Pokušalo se utvrditi je li došlo do adhezije materijala diska i time smanjenje faktora trenja. Rezultati u prikazani u tablici 6.19.

Tablica 6.19 Rezultati ispitivanja faktora trenja nakon terenskih ispitivanja

| Uzorci/Mjerenje | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | Srednja vrijednost |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **UZORAK 1** | 0,405 | 0,398 | 0,385 | 0,401 | 0,410 | 0,399 |
| **UZORAK 2** | 0,388 | 0,392 | 0,390 | 0,398 | 0,390 | 0,391 |
| **UZORAK 3** | 0,355 | 0,387 | 0,365 | 0,386 | 0,390 | 0,376 |

### 6.3.4. Analiza površinske hrapavosti

#### 6.3.4.1. UZORAK 1

Tablica 6.18 Parametri hrapavosti nakon terenskih ispitivanja

| ISO 4287 | | | ISO 4287 | | | ISO 4287 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | | Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | | Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | |
| Rz | 20,30 | µm | Rz | 17,23 | µm | Rz | 15,49 | µm |
| Rt | 27,88 | µm | Rt | 21,84 | µm | Rt | 23,82 | µm |
| Ra | 4,33 | µm | Ra | 3,71 | µm | Ra | 3,59 | µm |
| Rq | 5,46 | µm | Rq | 4,71 | µm | Rq | 4,34 | µm |

#### 6.3.4.2. UZORAK 2

Tablica 6.19 Parametri hrapavosti nakon terenskih ispitivanja

| ISO 4287 | | | ISO 4287 | | | ISO 4287 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | | Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | | Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | |
| Rz | 22,44 | µm | Rz | 24,85 | µm | Rz | 20,12 | µm |
| Rt | 33,00 | µm | Rt | 44,98 | µm | Rt | 34,01 | µm |
| Ra | 5,02 | µm | Ra | 5,84 | µm | Ra | 4,37 | µm |
| Rq | 6,31 | µm | Rq | 7,70 | µm | Rq | 5,75 | µm |

#### 6.3.4.3. UZORAK 3

Tablica 6.20 Parametri hrapavosti nakon terenskih ispitivanja

| ISO 4287 | | | ISO 4287 | | | ISO 4287 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | | Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | | Amplitudni parametri – profil hrapavosti | | |
| Rz | 27,41 | µm | Rz | 30,71 | µm | Rz | 27,28 | µm |
| Rt | 47,01 | µm | Rt | 57,20 | µm | Rt | 40,08 | µm |
| Ra | 7,07 | µm | Ra | 7,50 | µm | Ra | 6,28 | µm |
| Rq | 9,09 | µm | Rq | 9,49 | µm | Rq | 7,76 | µm |

## 6.4. Analiza rezultata

Rezultati laboratorijskih istraživanja tri vrste kočionh obloga prikazani su u tablici 6.21, te je napravljena usporedba faktora trenja, tvrdoće, kompresibilnosti, hrapavosti površine, poroznosti i specifične mase. Usporedbom uzoraka se vidi da je UZORAK 1 postigao najbolje rezultate u svim segmentima ispitivanja. Tvrdoću je bilo teško odrediti zbog mekoće uzorka te se ona ne razlikuje između uzoraka, tlačna čvrstoća mjerena na kidalici pokazuje najbolje rezultate za UZORAK 1, kao i rezultati poroznosti i specifične mase.

Tablica 6.21 Konačni rezultati laboratorijskih ispitivanja

| **Uzorak** | **Faktor trenja μ** | **Tvrdoća (HB)** | **Kompresibilnost [%]** | **Poroznost [%]** | **Specifična masa [g]** |
|---|---|---|---|---|---|
| **UZORAK 1** | 0,427 | 1,35 | 1 | 1,56 | 3,43 |
| **UZORAK 2** | 0,400 | 1,33 | 1,3 | 2,05 | 2,75 |
| **UZORAK 3** | 0,393 | 1,33 | 1,8 | 2,14 | 2,95 |

Nakon što su svi uzorci prošli ispitivanje u laboratorijskim uvjetima, slijedilo je terensko ispitivanje. U tablici 6.22 su prikazane usporedne vrijednosti temperatura uzoraka lijevih i desnih kočionih obloga, zaustavnog puta i usporenja. Rezultati prikazuju dominantnost UZORKA 1.

Tablica 6.22 Prikaz rezultata dobivenih terenskim ispitivanjem

| **Uzorak** | **Temperatura uzorka desne obloge [ºC]** | **Temperatura uzorka lijeve obloge [ºC]** | **Zaustavni put [m]** | **Usporenje [m/s$^2$]** |
|---|---|---|---|---|
| UZORAK 1 | 165 | 149 | 48,8 | 7,2 |
| UZORAK 2 | 235 | 225 | 51,6 | 5,7 |
| UZORAK 3 | 202 | 205 | 50,9 | 5,9 |

Nakon ispitivanja i obrade rezultata, isti uzorci koji su korišteni u ispitivanju na vozilu podvrgnuti su naknadnom laboratorijskom ispitivanju. Rađena je analiza sastava na XRF uređaju, mjeren je faktor trenja i analizirana je površinska hrapavost, te su prikazane slike površine kočionih obloga nakon trošenja. Tablice prikazuju usporedbu sastava prije i nakon ispitivanja.

Tablica 6.23 Usporedba sastava materijala za UZORAK 1, prije i poslije ispitivanja na automobilu

| UZORAK 1 | | | |
|---|---|---|---|
| Prije ispitivanja na automobilu | | Poslije ispitivanja na automobilu | |
| Element | Udio [%] | Element | Udio [%] |
| Fe | 49 | Fe | 70 |
| Al | 10 | Si | 4,9 |
| Si | 9,82 | Cu | 6,84 |
| Cu | 7,11 | Ti | 4,55 |
| Ti | 6,1 | | |

Tablica 6.24 Usporedba sastava materijala za UZORAK 2, prije i poslije ispitivanja na automobilu

| UZORAK 2 | | | |
|---|---|---|---|
| Prije ispitivanja na automobilu | | Poslije ispitivanja na automobilu | |
| Element | Udio [%] | Element | Udio [%] |
| Fe | 61 | Fe | 54 |
| Al | 13 | Al | 7,28 |
| Sn | 8,2 | Si | 8,1 |
| S | 4,43 | Cu | 5,93 |
| Ti | 3,54 | Ti | 6,66 |

Tablica 6.25 Usporedba sastava materijala za UZORAK 3, prije i poslije ispitivanja na automobilu

| UZORAK 3 | | | |
|---|---|---|---|
| Prije ispitivanja na automobilu | | Poslije ispitivanja na automobilu | |
| Element | Udio [%] | Element | Udio [%] |
| Fe | 68,66 | Fe | 71,83 |
| Al | 5,28 | Al | 5,50 |
| Sn | 10,80 | Sn | 8,2 |
| S | 2,98 | S | 4,67 |
| Ti | 3,53 | Ti | 6,15 |

Nakon analize na XRF uređaju, ponovno je izmjeren faktor trenja pa su ti rezultati prikazani u tablici 6.26. Vidljivo je kako je faktor trenja rastao s obzirom na rezultate prije ispitivanja na automobilu. To se može pripisati visokim temperaturama (nedozvoljeno područje) prilikom kojih je došlo do adhezije materijala diska (Fe lijev) i faktor trenja se snizio.

Tablica 6.26 Rezultati faktora trenja

| **Uzorci/Mjerenje** | **1.** | **2.** | **3.** | **4.** | **5.** | **Srednja vrijednost** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **UZORAK 1** | 0,405 | 0,398 | 0,385 | 0,401 | 0,410 | 0,399 |
| **UZORAK 2** | 0,388 | 0,392 | 0,390 | 0,398 | 0,390 | 0,391 |
| **UZORAK 3** | 0,355 | 0,387 | 0,365 | 0,386 | 0,390 | 0,376 |

# 7. Zaključak

Najvažniji materijali u kočionim sustavima su frikcijski materijali koji moraju izvršiti zadatke u različitim režimima rada. Frikcijski materijali se plasiraju na tržište pod raznim komercijalnim nazivima, uz navođenje samo nekih karakteristika koje mogu poslužiti kao osnovna orijentacija za izbor, odnosno za preliminarno odlučivanje proizvođača vozila ili krajnjeg kupca. Konačan izbor frikcijskog materijali za određenu kočnicu i očekivane režime rada zasnovan je na naknadnim analizama i eksperimentima. U radu su ispitane tri vrste kočionih obloga za isti tip automobila, te su ispitana njihova najvažnija svojstva i karakteristike u novom, nekorištenom stanju, te nakon intenzivnog korištenja u realnim uvjetima. Također je praćeno ponašanje tih obloga tijekom korištenja te su mjerene najvažnije značajke kočenja. Rezultati laboratorijskih istraživanja tri vrste kočionih obloga pokazuju različitost svojstava svih kočionih obloga, faktora trenja, tlačne čvrstoće, tvrdoće, površinske hrapavosti i kemijskog sastava. Laboratorijski pokusi rađeni su na principu usporedbe te su neki parametri pokusa promijenjeni radi lakšeg izvođenja ispitivanja. U svim laboratorijskim uvjetima dokazana je dominantnost UZORKA 1 koji ujedno ima i najvišu, ali ne previsoku cijenu. Prilikom terenskog ispitivanja, kada su kočione obloge bile testirane u ekstremnim uvjetima na opterećenom gospodarskom vozilu, specijalnim GPS uređajem *RACE LOGIC* utvrđene su vrhunske karakteristike i performanse kočionih obloga UZORKA 1, a zabrinjavajuće i opasno loše značajke UZORKA 3, koji se prodaje po najnižoj cijeni. Kočione obloge UZORKA 1 pokazale su, prilikom kočenja, 10 % kraći zaustavni put i 30 % nižu temperaturu nakon 9. intenzivnog kočenja od kočionih obloga UZORKA 3.

# 8. Literatura


[1] Z. Lulić, K. Ormuž, G. Šagi: Motorna vozila, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014./2015.

[2] Todorović J., Borislavljević M., Nikolajević S., Kočenje motornih vozila, 2005.

[3] Britannica, Encyclopaedia. Power brake system, http://www.britannica.com/media/full/44957/47836.

[4] *Tribological surfaces of organic brake pads.* Eriksson, Mikael and Jacobson, Staffan. 2000. , Tribology International, str. 817-827.

[5] Blau, Peter J. *Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives.* Metals and Cerarmics Division, Oak Ridge National Laboratory. 2001.

[6] S. Turani, K. Vikulov, M. Valle and M. Orlandi. *Method for making a ceramic matrix material for friction components of brakes and ceramic matrix material made by such method*, 2008.

[7] Dante, Roberto C. *Handbook of Friction Materials and Their Applications.* 2015.

[8] *Fillers in friction materials.* Spurr, R.T. 3, December 1972, Wear, str. 367–372.

[9] *Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials - A Review.* Bijwe, Jayashree, 1997, POLYMER COMPOSITES, str. 378-396.

[10] *Two-body and three-body abrasion: A critical discussion.* Gates, J.D. 1998, Wear, str. 139-146.

[11] Moore, M.A. *Abrasive wear, in Fundamentals of Friction and Wear of Materials.* Rigney : D.A., 1981.

[12] *Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts.* Hyncica, J. A. Williams and A. M. 1992, Wear, str. 57-74.

[12] *Alkali-activated binders: Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products.* Fernando Pacheco-Torgal, Joa˜o Castro-Gomes, Said Jalali. 2008, Construction and Building Materials