

# Analiza materijala valjaka za mjerenje kočne sile

---

**Novosel, Dean**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:134864>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Dean Novosel**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:  
**Izv. prof. dr. sc. Krešimir Grilec**

Student:  
**Dean Novosel**

Zagreb, 2015.

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stećenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem profesoru dr. sc. Krešimiru Grilecu na stručnoj pomoći u izradi ovog rada i kolegama na Katedri za materijale i tribologiju.

Na kraju se zahvaljujem svim profesorima i kolegama, koje sam upoznao tijekom studiranja, na stručnoj pomoći, te svojoj obitelji na potpori i razumijevanju.

Dean Novosel

U Zagrebu, 14. siječnja 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dean Novosel** Mat. br.: 0035168365

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA MATERIJALA VALJAKA ZA MJERENJE KOČNE SILE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MATERIALS ANALYSIS OF ROLLERS FOR MEASURING BRAKE FORCE**

Opis zadatka:

Kočnice vozila služe za usporavanje i zaustavljanje vozila na siguran način, te zadržavanje vozila u mirovanju. Ispitivanje ispravnosti uređaja za kočenje provodi se pri periodičnom tehničkom pregledu motornog vozila. Valjci za mjerenje kočne sile predstavljaju jednostavan i efikasan način za kontrolu kočnih sustava, ali i za određivanje kočne sile na svakom kočenom kotaču.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Objasniti princip mjerenja kočne sile
- 2) Istražiti literaturne podatke o materijalima valjaka za mjerenje kočne sile
- 3) Predložiti materijale koji do sada nisu korišteni u tu svrhu
- 4) Laboratorijski ispitati uzorke dostupnih materijala nekom od raspoloživih metoda
- 4) Provesti prateća ispitivanja i dati zaključak.

Zadatak zadan:  
13. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
15. siječnja 2015.

Predviđeni datum obrane:  
21., 22. i 23. siječnja 2015.

Zadatak zadao:

*K. Grilec*

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Predsjednik Povjerenstva:

*F. Cajner*

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

Popis oznaka.....	7
Popis slika .....	8
Popis tablica .....	10
SAŽETAK.....	11
1. UVOD .....	12
2. MJERNA OPREMA ZA ISPITIVANJE KOČNIH SVOJSTAVA VOZILA.....	13
3. PRINCIP RADA ISPITIVANJA KOČIONE SILE.....	14
4. SUSTAV KOČNOG PROCESA .....	17
4.1 Zbrajanje sila kočenja.....	18
3.3. Raspodjela sila kočenja .....	19
4.2. Kočenje vozila.....	19
5. ZAKONSKE OBVEZE I REGULATIVA .....	21
5.1 Preporuke Centra za vozila Hrvatske .....	22
6. TRENJE IZMEĐU CESTE I PNEUMATIKA.....	23
7. USPOREDBA GLAVNIH PROIZVOĐAČA OPREME ZA MJERENJE.....	24
5.1. Cartec .....	24
7.2. Maha.....	26
7.3. Bosch.....	27
7.3.1 Svojstva korunda .....	28
7.4. Nussbaum.....	28
8. PROBLEMI KOD VALJAKA ZA ISPITIVANJE KOČNE SILE .....	30
9. MATERIJALI VALJAKA.....	31
9.1. Kompoziti.....	33
9.2. Čelik za strojogradnju .....	35
9.3. Prevlake.....	37
10. TRIBOLOGIJA.....	39

10.1. Elementi tribosustava .....	39
10.2. Tribosustav koji djeluje u ovom slučaju .....	40
10.2.1. Abrazija .....	43
10.2.2. Umor površine.....	45
11. EKSPERIMENTALNI DIO.....	46
11.1. SEM i EDS analiza.....	46
11.1.1. Skenirajući (scanning) elektronski mikroskop- SEM .....	47
11.2. Rezultati skenirajućeg elektronskog mikroskopa- SEM i EDS mikroanalize.....	48
11.2.1. Silicijev karbid- SiC .....	54
11.3. Udio veziva i ojačala (matrice i ojačala).....	55
11.4. Načini obnove valjaka za mjerenje kočne sile .....	58
11.4.1. Tvrtka A .....	58
11.4.2. Tvrtka B.....	60
11.4.3. Izgled obnovljenih prevlaka na valjcima .....	61
11.5. Ispitivanje koeficijenata trenja obnovljene prevlake.....	63
11.6. Ispitivanje prionjivosti prevlake.....	65
12. UZROK OTPADANJA PREVLAKE S VALJAKA .....	66
13. MOGUĆA RJEŠENJA OTPADANJA PREVLAKE .....	67
14. ZAKLJUČAK .....	69
POPIS LITERATURE .....	70

## Popis oznaka

$a_k$	<i>usporenje vozila (<math>m/s^2</math>)</i>
$F$	<i>sila, opterećenje, (N)</i>
$F_k$	<i>ukupna sila kočenja (N)</i>
$F_{k1}$	<i>sila kočenja na prednjoj osovini (N)</i>
$F_{k2}$	<i>sila kočenja na stražnjoj osovini (N)</i>
$F_{kpl}$	<i>sila kočenja na prednjem lijevom kotaču (N)</i>
$F_{kpd}$	<i>sila kočenja na prednjem desnom kotaču (N)</i>
$F_{ksl}$	<i>sila kočenja na stražnjem lijevom kotaču (N)</i>
$F_{ksd}$	<i>sila kočenja na stražnjem desnom kotaču (N)</i>
$G$	<i>težina vozila (N)</i>
$k_{abr}$	<i>bezdimenzijska konstanta abrazijskog trošenja</i>
$N_1$	<i>normalna reakcija podloge ispod prednje osovine (N)</i>
$N_2$	<i>normalna reakcija podloge ispod stražnje osovine (N)</i>
$S_k$	<i>put kočenja (m)</i>
$v$	<i>brzina vozila (km/h)</i>
$W_x$	<i>normalno opterećenje, (N)</i>
$\mu$	<i>faktor trenja između kotača i podloge</i>



## Popis slika

Slika 1. Valjci za ispitivanje sile kočenja [2] .....	13
Slika 2. Načelna shema tlocrta valjaka za ispitivanje kočnica [2] .....	14
Slika 3. Vozilo na valjcima za ispitivanje sile kočenja [3] .....	16
Slika 4. Zbrajanje sila kočenja po osovinama [4] .....	18
Slika 5. Preraspodjela opterećenja na osovine pri kočenju vozila [2].....	19
Slika 6. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Cartec [8] .....	25
Slika 7. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Maha [9].....	26
Slika 8. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Bosch [10].....	27
Slika 9. Korund i njegova svojstva [11].....	28
Slika 10. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Nussbaum [12].....	29
Slika 11. Valjak s kojeg je otpao sloj kompozitne prevlake .....	30
Slika 12. Valjci s navarenom površinom (bradavicama) [13].....	32
Slika 13. Valjci s kompozitnom prevlakom [14] .....	32
Slika 14. Valjak za ispitivanje sile kočenja vozila izrađen od čelika 1.0050 / St 50-2 / E 295 [17] .....	36
Slika 15. Elementi tribosustava [20] .....	40
Slika 16. Shematski prikaz abrazijskog trošenja [20]: .....	44
Slika 17. Valjci s kojih je otpala prevlaka [21] .....	46
Slika 18. Skenirajući elektronski mikroskop (Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu)	48
Slika 19. Uzorci za analizu.....	49
Slika 20. Kontaktna površina prevlake i valjka.....	50
Slika 21. Prikaz pora na prevlaci za valjke .....	51
Slika 22. Prikaz poroznosti prevlake na snimkama SEM-a (lijeva slika pod povećanjem 34x, desna pogled izbliza bez povećanja) .....	51
Slika 23. EDS analiza uzorka (sivo područje).....	52
Slika 24. EDS analiza uzorka (tamno područje) .....	53
Slika 25. Granulat silicijevog karbida- SiC [25] .....	55
Slika 26. Mufolna peć .....	56
Slika 27. Uzorci prije i poslije žarenja .....	57
Slika 28. Brušenje valjaka radi boljeg prijanjanja nove kompozitne prevlake .....	58
Slika 29. Ručno nanašanje primera .....	59

Slika 30. Postupak nanašanja čestica korunda i smole.....	60
Slika 31. Snimka korunda na SEM-u pod povećanjem 34 x.....	61
Slika 32. Površina obnovljenih valjaka .....	62
Slika 33. Uzorci za ispitivanje faktora trenja .....	63
Slika 34. Ispitivanje faktora trenja .....	64
Slika 35. Ispitivanje uzoraka na kidalici .....	65
Slika 36. Produkti korozije na valjcima .....	66

## Popis tablica

Tablica 1. Prosječne vrijednosti faktor trenja $\mu$ između pneumatika i raznih vrsta kolnika [5] .....	20
Tablica 2. Faktor trenja između pneumatika i podloge [7] .....	23
Tablica 3. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Cartec [8] .....	25
Tablica 4. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Maha [9].....	26
Tablica 5. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Bosch [10].....	27
Tablica 6. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Nussbaum [12].....	29
Tablica 7. Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50 320 i VDI 3822 [21] .....	41
Tablica 8. Mase konstituenata veziva i matrice u uzorku .....	56
Tablica 9. Maseni udio konstituenata u uzorcima (SiC i vezivo) .....	56
Tablica 10 Izračunati faktori trenja s obzirom na primjenjivanu silu od 25 N .....	64

## SAŽETAK

U ovom radu bit će objašnjeno čemu služe valjci za ispitivanje kočne sile te način na koji se mjeri sila kočenja i uvjeti koji trebaju biti ispunjeni. Nakon određenog vremena eksploatacije samih valjaka dolazi do otpadanja prevlake te takvi valjci više nisu dobri za upotrebu i daju pogrešne rezultate.

Prevlaka je potrebna na valjcima iz razloga što ona osigurava dovoljno visok faktor trenja između pneumatika i valjka koji po zakonu ne smije biti manji od 0,5. Otpadanjem dijelova prevlake sa valjka javljaju se područja gdje se postižu niski faktori trenja, te time ni izmjerena kočna sila nije dosljedna i pojavljuju se skokovi u mjerenju.

U eksperimentalnom dijelu rada otkriven je uzrok otpadanja prevlake te analizirani uvjeti rada i mehanizmi trošenja prevlake. Navedeni su primjeri obnove od strane dvije tvrtke, te ponuđena rješenja i načini obnove kako bi se osigurala dogotravnost prevlake i time produjilo vrijeme eksploatacije samih valjaka.

## 1. UVOD

Tehnički pregled vozila u Hrvatskoj ima dugu tradiciju koja svoje početke ima još u pedesetim godinama prošlog stoljeća, kada su se prve kontrole tehničke ispravnosti vozila provodile na cestama.

Šezdesetih godina prošlog stoljeća otvaraju se prve stanice za tehnički pregled vozila (STP) koje su uključivale provjere karoserije i osnovnih sklopova na vozilu. Početkom sedamdesetih godina prepoznata je potreba za stalnim praćenjem razvoja tehnike vozila i tehnologije provedbe tehničkih pregleda, čime se Hrvatska svrstala među rijetke zemlje u Europi koju su u to doba organizirano obavljale redovne tehničke preglede vozila.

Sustav je objedinjen s ciljem organiziranja i stručnog praćenja poslova u svezi s radom stanica za tehnički pregled vozila, obavljanja poslova ispitivanja vozila, stalne obuke nadzornika tehničke ispravnosti vozila, održavanja ispitnih uređaja u stanicama, a sve sukladno propisima iz područja sigurnosti prometa na cestama. Usporedno s razvojem sustava tehničkog pregleda u Hrvatskoj, razvijala se i europska legislativa koja opisuje i regulira to područje. Prvi "moderan" propis o tehničkim pregledima, koji bi se mogao tako nazvati, izdan je 1977. godine pod nazivom Direktiva Vijeća 77/143/EEC o usklađivanju pravnih propisa država članica o tehničkim pregledima motornih i priključnih vozila. [1]

## 2. MJERNA OPREMA ZA ISPITIVANJE KOČNIH SVOJSTAVA VOZILA

Na periodičnom tehničkom pregledu motornog vozila, ispitivanje se svodi na mjerenje kočne sile svakog pojedinog kotača. Osnovna je svrha takvog ispitivanja provjeriti ispravnost izvršnih organa uređaja za kočenje (kao zakonske obveze), s osnovnim ciljem da se utvrdi aktivna sigurnost svakog motornog vozila koje sudjeluje u prometu na javnim cestama. U tu se svrhu već dugi niz godina koristi razna oprema, ona za mjerenje kočnih sila i ona za mjerenje usporenja pri kočenju. Kao što je navedeno, u suvremeno doba koriste se valjci za ispitivanje kočnica. Danas ne samo da svaka stanica za tehničke preglede posjeduje valjke za ispitivanje sile kočenja, nego već i svako veće poduzeće za obavljanje prijevoznike djelatnosti, koje u svom voznom parku ima veći broj transportnih jedinica – motornih vozila. [2]

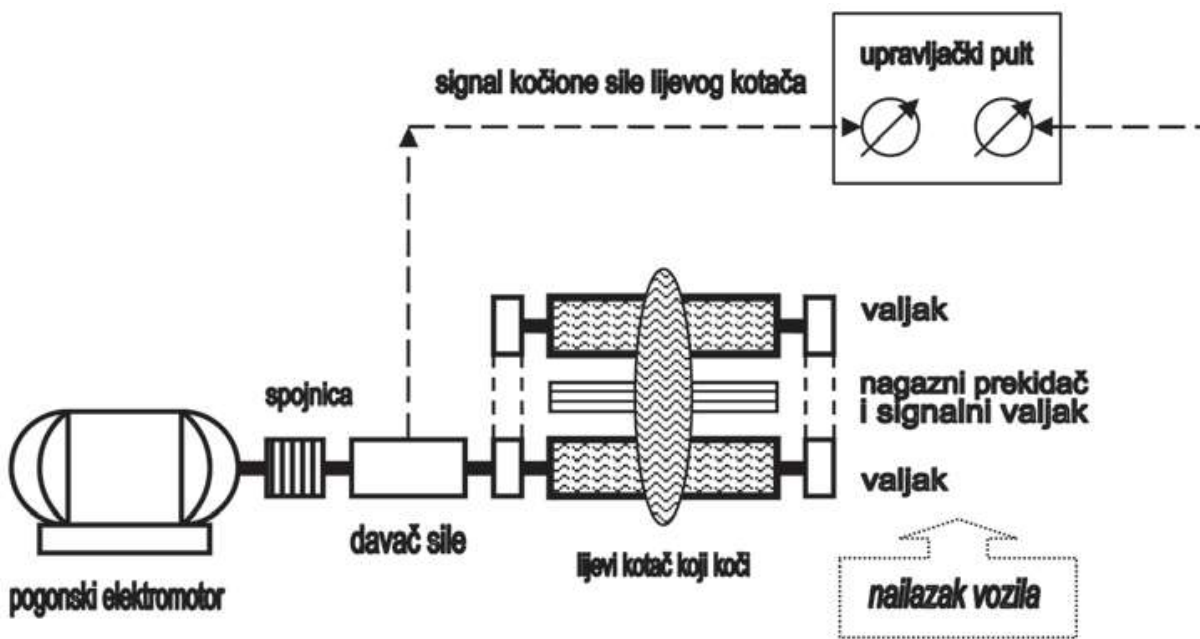


Slika 1. Valjci za ispitivanje sile kočenja [2]

### 3. PRINCIP RADA ISPITIVANJA KOČIONE SILE

Ispitivanjem kočnica na valjcima mjeri se kočna sila na svakom kočenom kotaču. Tako se može odrediti ukupna kočna sila, kao zbroj parcijalnih kočnih sila svakog kotača. Poznatim iznosom tako dobivene ukupne kočne sile može se odrediti usporenje koje je njome moguće realizirati. Naravno, pritom se mora voditi računa da to vrijedi samo za kočenje po podlozi koja je istih tavnih svojstava kao i materijal od kojeg su načinjeni valjci za ispitivanje kočnica. Uređaj za kontrolu kočnica na valjcima sastoji se od dva para valjaka. Svaki par valjaka ima svoj pogon i mjerni lanac. Postavljeni su tako da istodobno mjere sile kočenja obaju kotača na jednoj osovini.

Na slici 2. prikazana je načelna shema valjaka za mjerenje sile kočenja s upravljačkim pultom. Na njoj je prikazano slijedeće:



Slika 2. Načelna shema tlocrta valjaka za ispitivanje kočnica [2]

Valjci za ispitivanje kočnica proizvode se specijalizirano za mjerenje kočne sile određene kategorije vozila, ali i kao univerzalni uređaji za mjerenje kočne sile više kategorija. Kontrola kočnica motornog vozila na valjcima prilagođena je potrebama službenog tehničkog pregleda. Valjci za ispitivanje kočnica u stanicama tehničkog pregleda moraju imati tipno odobrenje i moraju biti umjereni sukladno Zakonu o mjeriteljstvu. Valjci su najčešće (zbog tehnološkog postupka tehničkog pregleda) smješteni na kanalu za pregled postroja vozila. Konstrukcijski su izvedeni tako da pružaju mogućnost ispitivanja:

- kočne sile na svakom kotaču,
- nejednolikosti sile kočenja na svakom kotaču i
- otpora kotrljanja kotača.

Prilikom kontrole kočnica nadzornik navozi vozilo na uređaj za ispitivanje kočnica vozila, mjeri kočnu silu radne kočnice na svakoj osovini, a nakon toga i kočnu silu pomoćne (ručne) kočnice. Pri tome utvrđuje koeficijente kočenja ovisno o vrsti vozila i razliku sila kočenja između lijevog i desnog kotača. Neznatna razlika sila kočenja između lijevog i desnog kotača prednje i stražnje osovine osigurava pravocrtno kretanje vozila pri kočenju. Stoga je utvrđivanje razlike između sile kočenja lijevog i desnog kotača jednako važno kao izračunavanje koeficijenata kočenja. Svako odstupanje od propisanih vrijednosti znači da vozilo nije ispravno za promet na javnim cestama.

Kada vozilo kotačima nagazi na valjke, aktivira se signalni valjak koji automatski uključuje uređaj za ispitivanje i zaštitu od blokiranja. Elektromotor pokreće valjke koji okreću kotače automobila, prednje ili stražnje osovine, konstantnom obodnom brzinom od približno 2,5 km/h. Pri ispitivanju, na samom početku, tako dugo dok se ne pritisne papučica za kočenje, indikator pokazuje samo otpor kotrljanja kotača. Pritiskom na papučicu kočnice počinje kočenje kotača uz njegovo kotrljanje. Koči se do granice klizanja kotača, kada nastupa parcijalno proklizavanje između kotača i valjaka prije blokiranja. Računalo valjaka neprekidno uspoređuje brzinu vrtnje pogonskih valjaka i brzinu vrtnje signalnog valjka koji se okreće istom obodnom brzinom kao kotači. Kada dođe do velike (unaprijed određene) razlike između tih dviju brzina, računalo zaustavlja valjke. Na indikatoru se prikazuje maksimalna kočna sila u trenutku isključenja.

Kočna sila  $F_k$  zapravo se mjeri kontrolom reaktivnog momenta  $MR$ , jer se uz pomoć poluge premješta moment kočenja na senzor savijanja grede (tenzometar). Generirani signali senzora vode se do indikatora na kojem se može očitati kočna sila na obodu kotača. Kočenjem vozila na valjcima mjeri se otpor pogonskog valjka, odnosno kočne sile na svakom kotaču, što daje ukupnu silu kočenja:

$$\Sigma F_k = F_k = F_{kpl} + F_{kpd} + F_{ksl} + F_{ksd} ;$$

$F_{kpl}$  – sila kočenja na prednjem lijevom kotaču,

$F_{kpd}$  – sila kočenja na prednjem desnom kotaču,

$F_{ksl}$  – sila kočenja na stražnjem lijevom kotaču,

$F_{ksd}$  – sila kočenja na stražnjem desnom kotaču.



Nakon toga može se izračunati:

- koeficijent kočenja  $z$ ,
- razlika u silama kočenja kotača svake pojedine osovine  $\Delta F$ , te
- očekivano usporenje vozila  $a_k$ .

Koeficijent kočenja ne predstavlja realnu kočnu sposobnost ispitivanog vozila. U realnim uvjetima kočenja na cesti mogu vozila postići i veća usporenja odnosno sile kočenja. Najveća sila kočenja koja se može postići na valjcima direktno je ovisna o faktoru trenja između valjka i pneumatika. Ako bi se jedno vozilo testiralo na dva različita valjka, dobile bi se različite sile kočenja, a time i koeficijenti kočenja. Isto tako, valjci ne daju mogućnost ispitivanja utjecaja preraspodjele vertikalnih dinamičkih reakcija podloge, koje su realno egzistirajuće u stvarnim uvjetima pri kočenju na cesti. Dakle, na periodičnom tehničkom pregledu vozila ne promatra se stvarni (eksploatacijski) odnos sila kočenja među osovinama, nego se na temelju izračunanoga koeficijenta kočenja odlučuje o zadovoljavanju propisom utvrđenih iznosa. Pritom se uzimaju najveće postignute sile kočenja, bez obzira na to kojom se silom djeluje na papučicu kočnice – do najveće propisane sile na papučicu 500 N. [2]



Slika 3. Vozilo na valjcima za ispitivanje sile kočenja [3]

## 4. SUSTAV KOČNOG PROCESA

Na kočni proces, odnosno na proces zaustavljanja motornog vozila utječe cjelokupan sustav koji se sastoji od; vozača, automobila i okoliša kojim se vozilo kreće (cesta-teren, gustoća zraka, vjetar...)

Svaka od tih sastavnica kočnog sustava ostvaruje posebne utjecaje. U ispitivanju kočnih svojstava vozila najčešće se ispituje uređaj za kočenje.

Uređaj za kočenje, ili kraće - kočnice, vozila služe za usporavanje i zaustavljanje vozila na siguran način, te zadržavanje vozila u mirovanju. Stoga kočnice izravno utječu na aktivnu sigurnost kretanja vozila. Djelotvorne i pouzdane kočnice omogućuju sigurno zaustavljanje vozila. Mogućnost promjena intenziteta usporavanja i ubrzanja vozila utječe na prosječnu brzinu kretanja vozila. Zbog toga je kočna karakteristika vozila dio ukupnih dinamičkih svojstava vozila.

Kao što je poznato, uređaj za kočenje na svakom motornom vozilu ima: radnu kočnicu, pomoćnu kočnicu i parkirnu kočnicu, a neke kategorije težih motornih vozila moraju imati i *usporivač* za dugotrajno kočenje (retarder).

Isto je tako poznato da svaka od tih kočnica ima:

- izvršnu* sastavnicu (koja neposredno usporava - ili zadržava - neke pokretne detalje automobila, pa onda i cijelo vozilo) i

- prijenosnu* sastavnicu (koja ima zadaću da vozačevu zamisao, odnosno njegovo djelovanje na ručicu - ili papučicu - prenese do izvršne sastavnice).

Zbog iznimnog utjecaja na aktivnu sigurnost uporabe automobila, kvaliteti se kočnih svojstava motornog vozila uvijek posvećivala posebna pozornost. Danas se od suvremenih uređaja zahtijeva i postiže:

- visoka učinkovitost djelovanja, ocjenjuje se standardnim kočnim parametrima;

- dostatan energetska kapacitet, omogućuje višekratno i trajno kočenje automobila, bez pojave pregrijavanja ili promjene kočnih karakteristika, odnosno opadanje sposobnosti kočenja zbog pregrijavanja

- nužna stabilnost (i upravljivost) pri kočenju, osigurava se podešavanjem kočnih momenata na svakom kočenom kotaču i sprječavanjem njihova blokiranja (danas su takvi uređaji postali dio standardne opreme svih putničkih vozila);

- visoka pouzdanost, vjerojatnost da će uređaj funkcionirati ispravno u određenim uvjetima;

-nužna pogodnost za održavanje, vjerojatnost da će uređaj za kočenje biti popravljen i doveden u ispravno stanje u određenim uvjetima održavanja. [2]

#### 4.1 Zbrajanje sila kočenja

Ispunjavanjem navedenih zahtjeva obuhvaćena je većina problema koje mora riješiti proizvođač svakog uređaja za kočenje, kakvi se danas susreću na suvremenim motornim vozilima.

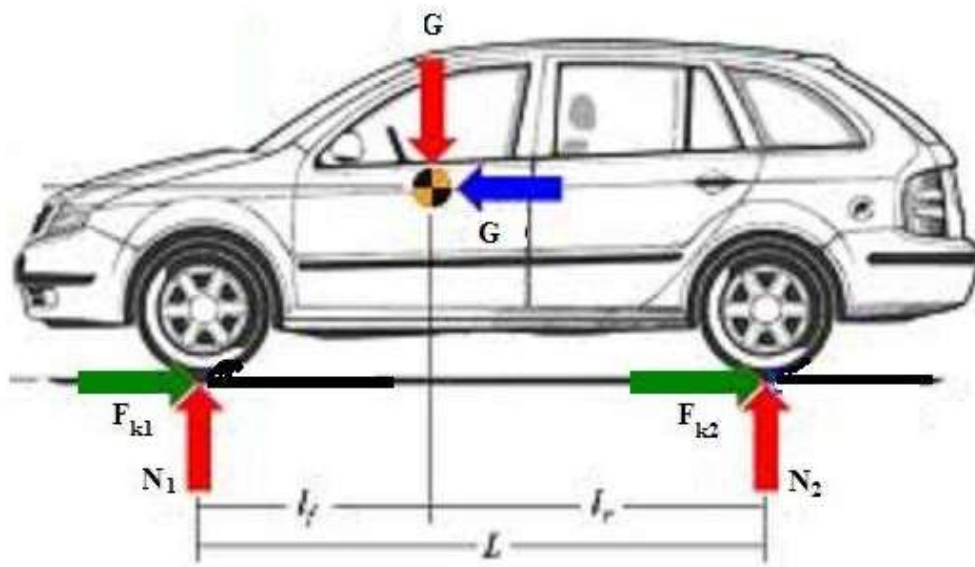
Pri normalnoj uporabi vozila koristi se radna kočnica. Ukupna sila kočenja vozila radnom kočnicom  $F_k$  sastoji se od sile kočenja na prednjoj  $F_{k1}$  i sile kočenja na stražnjoj osovini  $F_{k2}$ :

$$F_k = F_{k1} + F_{k2} .$$

Maksimalna sila kočenja iz uvjeta prijanjanja između kotača i podloge:

$$F_{k \max} = F_{k1 \max} + F_{k2 \max}$$

$$F_{k \max} = N_1 \mu + N_2 \mu$$



Slika 4. Zbrajanje sila kočenja po osovinama [4]

$$F_{k \max} = \mu N$$

$\mu$  - faktor trenja između kotača i podloge

$G$  - težina vozila

$N_1$  - normalna reakcija podloge ispod prednje osovine

$N_2$  - normalna reakcija podloge ispod stražnje osovine

Pritom treba voditi računa o jednom detalju - ako je sila kočenja veća ili jednaka maksimalnoj sili kočenja iz uvjeta prijanjanja, tj. ako je

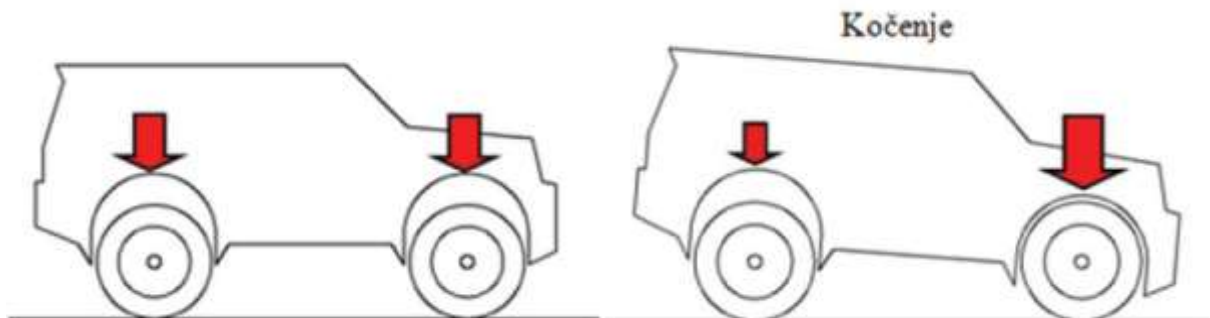
$$F_k \geq F_k \max .$$

prestaje kotrljanje kotača, nastaje njegovo blokiranje i klizanje. Blokiranje i klizanje kotača je nepoželjno jer dovodi do gubitka upravljivosti vozila. [4]

### 3.3. Raspodjela sila kočenja

Prednja se osovina pri kočenju dodatno opterećuje, a stražnja rasterećuje (slika 5.) To znači da su normalne dinamičke reakcije ( $N_1$ ,  $N_2$ ) promjenjive u odnosu na statičke ( $G_1$ ,  $G_2$ ). Prema tome, kako bi kotači mogli ravnomjerno kočiti bez zanošenja vozila, sila kočenja osovina treba biti proporcionalna njihovom opterećenju. Stoga slijedi uvjet efikasnosti kočnica:

$$\frac{F_{k1}}{F_{k2}} = \frac{N_1}{N_2}$$



Slika 5. Preraspodjela opterećenja na osovine pri kočenju vozila [2]

Kako sila kočenja treba biti u skladu s opterećenjem osovina, u uređaj kočenja stražnje osovine ugrađuje se regulator kočenja koji će sukladno rasterećenju osovine smanjiti tlak kočenja u kočnom cilindru stražnjih kotača. Na taj će se način izbjeći nepoželjno prijevremeno blokiranje stražnjih kotača.

### 4.2. Kočenje vozila

Zna li se da je najveća vrijednost sile kočenja vozila određena prijanjanjem kotača na cestu, vrijedi i

$$F_{k \max} = \mu G \cos \alpha.$$

Iz naprijed navedene balance sila slijedi:

$$G/g a_k = \mu G \cos \alpha \pm G \sin \alpha,$$

odnosno, usporenje vozila uzbrdo ili nizbrdo je

$$a_k = g (\mu \cos \alpha \pm \sin \alpha).$$

Na vodoravnoj podlozi najveće moguće konstantno usporenje vozila je:

$$a_k = g \mu \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$a_k \approx 10 \mu \text{ [m/s}^2\text{]}.$$

Kao što je poznato, faktor trenja  $\mu$  ovisi o vrsti, kakvoći i stanju ceste. Za njega se mogu pronaći podaci u postojećoj i dostupnoj stručnoj literaturi prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Prosječne vrijednosti faktor trenja  $\mu$  između pneumatika i raznih vrsta kolnika [5]

Vrsta kolničkog zastora	Stanje kolničkog zastora	Granične vrijednosti	Prosječna vrijednost
Beton	Suh, nov, grub	0,73– 0,90	0,82
	Suh, star, istrošen, glatki	0,65– 0,80	0,72
	Mokar, star, istrošen, glatki	0,41– 0,67	0,54
Asfalt	Suh, nov, grub	0,72 – 0,87	0,80
	Suh, star, istrošen, glatki	0,70– 0,89	0,80
	Mokar, star, istrošen, glatki	0,53– 0,73	0,63
Makadam	Suh, tvrd, prašnjav	0,41– 0,55	0,48
	Vlažan, tvrd, blatnjav	0,37– 0,47	0,42
	Mokar, tvrd, pješčan	0,27– 0,43	0,35
Snijeg	Utrti suhi	0,13– 0,19	0,16
	Rasuti suhi	0,12– 0,16	0,14
	Raskvašeni mokri	0,18– 0,22	0,20

Vrijednosti u tablici 1. mogu se prihvatiti samo kao orijentacijske jer faktor trenja  $\mu$  ovisi najviše o stanju podloge ceste, ali i o stanju pneumatika (novi, korišteni), te o početnoj brzini kočenja vozila. Najveći faktor trenja postiže se na suhoj podlozi kad je brzina između 50 i 90 km/h.

Maksimalni faktor trenja ispod kotača suvremenih vozila s potpuno novim gumama na vrlo kvalitetnoj suhoj asfaltnoj cesti može dostići vrijednosti i od  $\mu = 1,2$ , a posebno izrađeni vrlo meki i “ljepljivi” pneumatici (sportska vozila za utrke) faktore trenja i do  $\mu = 1,8$ . [2]

## **5. ZAKONSKE OBVEZE I REGULATIVA**

„Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za uređaje s valjcima kojima se provjerava kočna sila po obodu kotača kod vozila na motorni pogon i priključnih vozila“, „Narodne novine“, broj 93/96 i 122/99)

Ovim se pravilnikom propisuju mjeriteljski zahtjevi koje moraju zadovoljavati uređaji s valjcima za provjeru kočne sile po obodu kotača kod vozila na motorni pogon i priključnih vozila (u daljnjem tekstu: uređaji s valjcima).

### **I. OPĆE ODREDBE**

#### **Članak 2.**

Uređaji s valjcima uređaji su kojima se mjeri djelovanje kočnica vozila na motorni pogon i priključnih vozila tako da se kočna sila neposredno mjeri i prikazuje i/ili grafički prikazuje za svaki kotač vozila posebno

### **II. IZRADBENA SVOJSTVA**

#### **Članak 4.**

Ovisno o namjeni, uređaj s valjcima može biti konstruiran za mjerenje kočne sile jedne vrste vozila ili kao univerzalni uređaj s valjcima za mjerenje kočne sile raznih vrsta vozila na motorni pogon i priključnih vozila.

Uređaj s valjcima mora biti konstruiran tako da je siguran pri redovitoj uporabi, jednostavan za rukovanje te da nosivost dijelova na koje se postavlja ispitivano vozilo zadovoljava predviđena opterećenja.

### **III. MJERNO-TEHNIČKA SVOJSTVA**

#### **Članak 7.**

Površinski sloj valjaka na koje naliježu kotači ispitivanog vozila moraju imati tarna svojstva koja omogućuju da se u svim uvjetima ostvari koeficijent trenja od najmanje 0,5.

#### **Članak 9.**

Obodna brzina valjaka na koje naliježu kotači ispitivanog vozila ne smije biti manja od 2 km/h.

### **IV. PROVJERA ISPRAVNOSTI**

#### **Članak 13.**

Provjera ispravnosti uređaja s valjcima obuhvaća:

1. ispitivanje kakvoće uređaja s valjcima (vanjsko i funkcionalno ispitivanje)
2. ispitivanje kakvoće površine valjaka (istrošenost površine, mehanička oštećenja i dr.)

3. ispitivanje općeg stanja uređaja s valjcima (valjaka, pokaznih uređaja, dodatnih uređaja i dr.)
4. ispitivanje pokretljivosti uređaja s valjcima (da li se pokretni dijelovi lako pokreću)
5. ispitivanje kakvoće strujnih i tlačnih vodova uređaja s valjcima
6. vizualni pregled grabe (učvršćenje valjaka s temeljem - mogućnost njihova pomicanja, prljavština grabe, strani otpadni dijelovi u grabi)
7. mjerno-tehničko ispitivanje (stanje pokaznih i ispisnih uređaja, stanje analognih i digitalnih uređaja, mogućnost ručnog i automatskog uključivanja i isključivanja, isključivanje i ponovno uključivanje uređaja pri blokadi kotača vozila i dr.)
8. ispitivanje promjera valjaka (održavanje rezultata ispitivanja u granicama dopuštenog odstupanja koje je odredio proizvođač)
9. ispitivanje točnosti uređaja s valjcima (održavanje rezultata ispitivanja u granicama najveće dopuštene pogreške propisane u članku 16. ovoga pravilnika) [6]

### **5.1 Preporuke Centra za vozila Hrvatske**

Kao što se spominje u samom principu rada valjaka za mjerenje sile kočenja jedan od glavnih faktora za uspješno mjerenje sile kočenja je i samo prijanjanje materijala valjaka za pneumatik odnosno faktor trenja između njih. Najmanji faktor trenja 0,5 je također i propisan zakonom što je vidljivo u gore navedenom tekstu.

Zbog nepostojanja jedinstvenoga hrvatskog ispisa o ispitivanju kočnica kao i zbog loših prijevoda postojećih ispisa, u ispisima različitih tipova valjaka koeficijent kočenja s obzirom na najveću dopuštenu masu različito se naziva. Navest će se nekoliko uobičajenih naziva:

BOSCH: „Visoki račun“

CARTEC: „Usporenje prema najv. dopušt. Masi“ ili „Koefic. Kočenja“

MAHA: „Kočenje obzirom na dopuštenu ukupnu težinu“ ili „Kočenje u odnosu na doz. ukupnu težinu“

Svatko treba dobro poznavati vlastite valjke i njihove ispise. Vozilu koje pri ispitivanju kočnica ima manji koeficijent kočenja s obzirom na najveću dopuštenu masu od propisanog ne smije se ovjeriti PTPK, dok koeficijenti kočenja koji se izračunaju s obzirom na masu vozila (za radnu i pomoćnu kočnicu) smiju biti manji od propisanih ako se rukom u zapisnik utvrdi da je pri ispitivanju nastupila blokada svih kočenih kotača. [4]

## 6. TRENJE IZMEĐU CESTE I PNEUMATIKA

Put kočenja je put koji automobil prođe za trajanja kočenja. On ovisi o kvadratu brzine (akcelerirano gibanje). Na put kočenja utječu i uvjeti na cesti: kvaliteta kolnika, vremenski uvjeti i uspon ili nizbrdica. [7]

$S_k$  - put kočenja (m)

$v$  - brzina vozila (km/h)

$\mu$  - faktor trenja ovisan o podlozi

$$S_k = \frac{v^2}{245\mu}$$

Tablica 2. Faktor trenja između pneumatika i podloge [7]

<b>Faktor trenja <math>\mu</math></b>	<b>suh</b>	<b>mokar</b>
asfalt nov	0,7-0,8	0,5-0,6
asfalt star, prljav	0,6-0,7	0,25-0,45
šljunak, sitan kamen	0,6-0,7	0,3-0,5
snijeg ugažen	0,2-0,4	
led	0,05-0,1	



## **7. USPOREDBA GLAVNIH PROIZVOĐAČA OPREME ZA MJERENJE**

Različiti proizvođači nude razna rješenja i različite izvedbe opreme za ispitivanje sile kočenja. U daljnjem tekstu bit će navedeni neki od glavnih svjetskih proizvođača opreme, te prikazani podaci i svojstva testnih traka za ispitivanje vozila koje oni nude u svojim katalozima.

### **5.1. Cartec**

-Combine 2204

za automobile do 3 tone osovinskog opterećenja, s analognim prikazom 0-6 kN

-Combine 2304

Za automobile do 4 tone osovinskog opterećenja, s analognim prikazom 0-8 kN

-Videoline 2204

za automobile do 3 tone osovinskog opterećenja, PC verzija

-Videoline 2304

za automobile do 4 tone osovinskog opterećenja, PC verzija

Standardna oprema seta valjaka:

- mehanika linije u kompaktnom ravnom dizajnu, te pocinčana i time pogodna za ugradnju na otvorenom
- valjci s dugotrajnim premazom od silicij-keramike otporni su na trošenje i vrlo blago djeluju na trošenje guma
- setovi valjaka otporni na koroziju
- motori otporni na vlažne uvijete
- električno automatsko pokretanje

Test kočnica obuhvaća sljedeće mjerene veličine:

- otpor kotrljanja
- ovalnost kotača
- nejednolikost sile kočenja na lijevom i desnom kotaču
- sila kočenja lijevog i desnog kotača [8]

Tablica 3. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Cartec [8]

Tehnički podaci		Combiline 2204	Combiline 2304
<b>Uređaj za test kočnica</b>			
Max opterećenje osovine	t	3	4
Faktor trenja suho-mokro		0,9-0,5	0,9-0,5
Širina testiranja vozila min/max	mm	800/2200	800/2200
Brzina vrtnje praznog hoda	km/h	3,4	5,4
Dimenzije valjaka	mm	580x2350x205	670x2350x255
Promjer valjaka	mm	175	216
Duljina valjaka	mm	700	700
Snaga motora	kW	2x2,5	2x2,5
Težina	kg	330	370



Slika 6. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Cartec [8]

## 7.2. Maha

Opis:

- električno automatsko pokretanje valjaka i pomoć pri izlasku
- automatsko isključivanje nakon izlaska
- RS 232 sučelje za priključak za pisač ili računalo
- čelični zavareni valjci (polimerni premaz na zahtjev)
- motori otporni na vlažne uvijete
- pocinčani dijelovi opreme

Standardna isporuka: analogni zaslon s dva pokazivača sile kočenja (promjera 350 mm) [9]

Tablica 4. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Maha [9]

Tehnički podaci	
Osigurač	25 A
Brzina vrtnje	5 km/h
Mjerno područje	0-6 kN
Visina valjaka	280 mm
Duljina valjaka	680 mm
Promjer valjaka	202 mm
Max širina staze	2200 mm
Min širina staze	780 mm
Najveće osovinsko opterećenje	3000 kg



Slika 7. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Maha [9]

### 7.3. Bosch

Opis:

- brzo i precizno mjerene rezultat zahvaljujući inovativnoj tehnologiji
- automatski ili ručni pogon daljinskim upravljačem
- brzo reagiranje mjernog sustava (mjerenje naprezanja)
- valjci sa senzorom za kontrolu proklizavanja
- umrežavanje kroz najnovije računalne tehnologije
- analogni paralelni zasloni s integriranom elektronikom
- LED žarulje za prikazivanje automatski / ručni način rada
- dugi životni vijek zahvaljujući najvišim standardima kvalitete
- vruće pocinčani set valjaka i valjci za testiranje s polimernim premazom korunda (svojstva opisana u poglavlju 7.3.1.) faktora trenja od 0,8 (suho) i 0,7 (mokro) [10]

Tablica 5. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Bosch [10]

Tehnički podaci		BSA 4361	BSA 4440
Max opterećenje osovine	t	2,5	7,5
Širina testiranja vozila min/max	mm	800/2800	860/2800
Brzina vrtnje praznog hoda	km/h	5,2	2,3
Dimenzije valjaka	mm	660x2960x280	690x2940x280
Promjer valjaka	mm	205	205
Duljina valjaka	mm	1000	970
Snaga motora	kW	2x3,7	2x3,7
Težina	kg	550	580



Slika 8. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Bosch [10]

### 7.3.1 Svojstva korunda

Korund (šmirgl) je vrsta minerala, kristalni oblik aluminijevog oksida  $Al_2O_3$ . Na Mohsovoj skali se nalazi pod brojem 9 što znači da je na toj skali drugi najtvrdi mineral poslije dijamanta. Iako se nalazi odmah iza dijamanta njegova tvrdoća je 4 puta manja nego tvrdoća dijamanta. (usporedbe radi tvrdoća dijamanta- 10000 HV, korund- 2000/3000 HV).[11]

Korund	
	
Općenito	
Kategorija	mineral
Kemijska formula	aluminijev oksid, $Al_2O_3$
Identifikacija	
Boja	smeđa do siva, rjeđe crvena, plava, bijela ili žuta
Mohsova tvrdoća	9
Ogreb	bijel
Gustoća	3,95 - 4,1
Taljivost	netaljiv
Topljivost	netopiv

Slika 9. Korund i njegova svojstva [11]

### 7.4. Nussbaum

Opis:

- za osobna vozila i kombi vozila
- maksimalno osovinsko opterećenje do 4 tone
- sile kočenja do 6 kN
- jednodijelni pocinčani set valjaka
- elektronički mjerni sustav
- automatsko uključivanje i ponovno pokretanje
- zaštita protiv blokade
- moguća montaža na zid
- motori otporni na vlažne uvijete
- čvrsti i trajni valjci sa zavarenom površinom

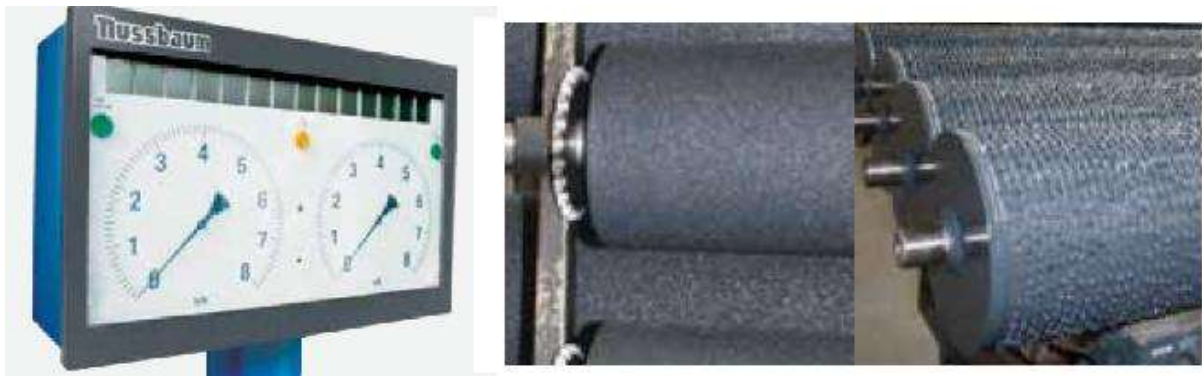
-odabir površine valjaka:

polimerna prevlaka s korundom

navarena površina [12]

Tablica 6. Tehnički podaci trake za ispitivanje- Nussbaum [12]

Tehnički podaci		BT 110	BT 400
Uređaj za test kočnica			
Max opterećenje osovine	t	4	3
Faktor trenja suho-mokro		0,7-0,6	0,7-0,6
Širina testiranja vozila min/max	mm	800/2200	800/2200
Brzina vrtnje praznog hoda	km/h	5	3,3
Promjer valjaka	mm	202	202
Snaga motora	kW	2x3,5	2x2,5



Slika 10. Izgled valjaka i pokaznog uređaja sile kočenja- Nussbaum [12]



## 8. PROBLEMI KOD VALJAKA ZA ISPITIVANJE KOČNE SILE

Prilikom nailaska vozila na valjke za ispitivanje sile kočenja nakon nekog određenog vremena korištenja dolazi do otpadanja kompozitnog premaza sa površine valjaka. Taj kompozitni sloj služi za osiguravanje faktora trenja većeg od 0,5 između pneumatika i valjaka. Sam čelični valjak ne posjeduje tako dobru prionjivost pogotovo ne u vlažnim uvjetima. Na slici 11 je prikazan valjak sa kojeg je otpao sloj tog premaza.



Slika 11. Valjak s kojeg je otpao sloj kompozitne prevlake

## 9. MATERIJALI VALJAKA

Različite tvrtke nude različita rješenja kako dobiti što kvalitetnije valjke i sa što boljom površinom što se tiče prijanjanja za pneumatike kako bi se dobili čim veći faktori trenja u različitim uvjetima (suho-mokro). Od samog izbora materijala površine valjaka do raznih drugih konstrukcijskih rješenja. Uglavnom svi veći proizvođači rade valjke od čelika za strojogradnju, koje zatim premazuju raznim polimernim smjesama koje sadrže čestice velike tvrdoće koje osiguravaju visoke faktore trenja. Uglavnom kod takvih izvedba riječ je o kompozitima koji kao vezivo sadrže razne polimerne smole, najčešće se radi o višekomponentnim smolama na bazi poliestera, a kao ojačalo sadrže najčešće prirodne minerale kao što su kvarc i korund. Međutim također se javljaju i valjci koji umjesto prevlake imaju navarene izbočine (bradavice) koje zadiru u pneumatike kontroliranog vozila te se time ostvaruje jako dobro prijanjanje. Međutim kako kod takve izvedbe valjaka dolazi do prodiranja samih navarenih izbočina u pneumatik može se reći da u tom slučaju prijanjanje se ne ostvaruje samo trenjem nego se javlja i djelovanje zupčanika. Navarene izbočine ulaze u pneumatik i njegove udubine te kod pritiska na papučicu kočnog uređaja dolazi do oštećivanja mekšeg materijala što je u ovom slučaju pneumatik.

Upravo zbog toga razloga takva izvedba valjaka za testiranje kočne sile sve je manje popularna te nailazi na kritike od većeg dijela autoindustrije. Različite izvedbe valjaka prikazane su na sljedećim slikama.





Slika 12. Valjci s navarenom površinom (bradavicama) [13]



Slika 13. Valjci s kompozitnom prevlakom [14]

## 9.1. Kompoziti

Kompozitni materijali ili kompoziti su proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih. Posljedica je dobivanje materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Neke od općih prednosti kompozitnih materijala pred konvencionalnim materijalima jesu: mogućnost izrade vrlo složenih oblika, smanjenje troškova naknadne obrade dijelova, mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje, dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima, otpornost na koroziju i dizajniranje svojstva.

Kompozitni materijali se sastoje od dva osnovna konstituenta: matrice i ojačala. Zadaća ojačala je da budu nosivi element kompozita, tj. da osiguraju: visoku čvrstoću, visoki modul elastičnosti – krutost, te otpornost na trošenje. Zadaće matrica je da: drži ojačala zajedno, štiti ih od vanjskih utjecaja, ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na ojačalo, daje vanjsku formu kompozitu, određuje njegovo ponašanje u obzirom na djelovanje atmosfere, itd..

Tako će svojstva kompozita ovisiti o: svojstvima konstituenata tj. matrice i ojačala, veličini i raspodijeli konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata, te prirodi i jakosti veza između konstituenata.

Podjela kompozita najčešća je s obzirom na materijal matrice i oblik ojačala. Matrica može biti: metalna – MMC, keramička – CMC i polimerna - PMC

### PODJELA PREMA MATERIJALU MATRICE

- metali – čvrsti, duktilni, u pravilu teški
- polimeri – slabi, jako duktilni, laki
- keramike – tvrde, krhke, stabilne pri visokim temperaturama, lake.

Kompoziti mogu istovremeno postići: visoku čvrstoću, visoku krutost i malu masu, otpornost na različite medije i druge kombinacije svojstava.

### PODJELA PREMA OBLIKU OJAČALA

- Čestice
- Vlakna
- Strukturni kompoziti:
  - Slojeviti kompoziti – laminati
  - Sendvič konstrukcije

## KOMPOZITI S ČESTICAMA

Diskretne jednolično raspoređene čestice – tvrd i krhak materijal, obavijene mekanijom i duktilnijom matricom. Struktura je kao kod mnogih dvofaznih disperzijski ojačanih metalnih legura. Primaran cilj je povišenje otpornosti na trošenje, te mehaničke otpornosti pri visokim temperaturama. Postoje: Kompoziti s disperzijom – sitnije čestice  $< 0,1 \mu\text{m}$ , te kompoziti s velikim česticama - čestice  $> 1 \mu\text{m}$

Čestice su najčešće od oksida, nitrida i karbida, npr.:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$  itd.

## VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI

Vlakna se razlikuju prema:

- vrsti materijala,
- duljini,
- promjeru,
- orijentaciji i
- hibridizaciji.

Anizotropni materijali, znatno bolja svojstva u smjeru vlakana.

## FUNKCIJE MATRICE I VLAKANA

VLAKNA: nose opterećenje, zbog visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine i u mikro području (sama vlakna se ne mogu primijeniti jer bi se brzo oštetila).

MATRICA: povezuje vlakna, prenosi opterećenje na vlakna, zaštićuje vlakna od okolnih utjecaja i oštećenja, dodatno, matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknom i mora dobro prijanjati uz vlakna.

## VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI

Vlakna su ili polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer. Polimerna ili keramička - aramidna, staklena, ugljična (grafitna), vlakna bora,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiC}$ .

## VRSTE MATRICA

Metalne (MMC), polimerne (PMC) ili keramičke (CMC). Najčešće polimerne matrice su: poliesterske smole, vinilesterske smole, epoksidne smole, PA, PP, ABS, PPS, PEEK, PEI itd. Metalne: Al-, Ti-, Cu-, Mg-legure, superlegure itd. Dok su keramičke:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{ZrO}_2$  itd.

## POLIMERNE MATRICE

Matrica mora biti dovoljno kruta, a opet s druge strane mora biti u određenoj mjeri otporna na propagaciju pukotine. Kontakt između vlakana i matrice mora biti dovoljno čvrst kako prilikom opterećenja ne bi došlo do odvajanja. Matrica mora biti otporna na utjecaj agresivnih medija. Plastomerne matrice su: PA, PE, PP, ABS, visokotemperaturni plastomeri (PEEK, PPS, PEI). Dok su duromerne: poliesterske, epoksidne, vinil esterske, fenolne smole itd. Među najčešće korištenim su duromerne matrice.

### Poliesterske smole

Najčešće u primjeni zbog niže cijene od drugih. Poliesteri su makromolekule na bazi diabazičnih kiselina (ortoftalna, izoftalna, tereftalna kiselina itd.) i diola kao što su etilen glikol, propilen glikol, neopentil glikol, bisfenol itd.

Na konačna svojstva poliestera utječe kombinacija diabazičnih kiselina i diola.

### Vinil esterske smole

Vrlo slične poliesterskim smolama - nešto bolja mehanička svojstva. Otporne su na djelovanje nekih kiselina, lužina i drugih otapala. Standardne vinil esterske smole mogu se primijeniti do »125 °C. Često se koriste različiti dodaci kojima se poboljšava otpornost na djelovanje UV zraka, te vatrootpornost.

### Epoksidne smole

Vrlo dobra mehanička svojstva ali viša cijena. Upravo zbog toga se kompoziti s matricom od epoksidne smole koriste uglavnom u zrakoplovnoj industriji gdje nešto viša cijena materijala ne igra preveliku ulogu. Vrlo dobra otpornost na djelovanje agresivnih medija i vodu (primjena u brodogradnji). [15]

## 9.2. Čelik za strojogradnju

Valjci za ispitivanje sile kočenja vozila (slika 14.) se izrađuju od čelika za strojogradnju koji spadaju u grupu konstrukcijskih čelika. Velikom većinom se radi o čeliku 1.0050 / St 50-2 / E 295, ovisno o proizvođaču valjaka.

Konstrukcijski čelik je ugljični čelik (obični ili plemeniti) s udjelom ugljika manjem od 0,6% (maseni udio) ili legirani čelik (uglavnom s manganom, silicijem, kromom, niklom, volframom). Koriste se za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i

različitih uređaja. Razlikuju se obični (ugljični ili niskolegirani) čelici za opću masovnu upotrebu i plemeniti (rafinirani) ugljični ili legirani čelici za dijelove s većim zahtjevima (dijelovi strojeva itd.).

Konstruktivski čelici se koriste kod izrade karakterističnih konstruktivskih dijelova strojeva i uređaja. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. S obzirom na mehanička svojstva, konstruktivski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama, te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Pored toga, konstruktivski čelici moraju biti otporni na trošenje i koroziju, te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), zavarljivi, skloni hladnom oblikovanju (savijanje, štancanje, duboko vučenje) itd.

Čelici za strojogradnju se primjenjuju za strojne dijelove koji se gibaju u odnosu na druge dijelove stroja ili prenose sile i momente. Najčešće se koriste za izradu osovina u kliznim ležajevima, vretena, slabije opterećenih zupčanika, te raznih klinova, vijaka, ručica, poluga i sl. U pogledu zavarljivosti i žilavosti prema čelicima za strojogradnju nema nikakvih zahtjeva. Ova skupina konstruktivskih čelika slabije je zavarljiva zbog viših udjela ugljika, ali iskazuje višu čvrstoću (500-700 N/mm<sup>2</sup>) i nižu istezljivost (10-20%) od čelika za nosive konstrukcije. Iako imaju viši sadržaj ugljika nisu namijenjeni za kaljenje. Karakteristični čelici ove skupine prema EN 10027 su: E295 (Č0545) s oko 0,3% C, E335 (Č0645) s oko 0,4% C, te E360 (Č0745) s oko 0,5% C. [16]



Slika 14. Valjak za ispitivanje sile kočenja vozila izrađen od čelika 1.0050 / St 50-2 / E 295

[17]

### 9.3. Prevlake

Osnovni cilj postupaka prevlačenja površina alata i konstrukcijskih dijelova je postizanje otpornosti na trošenje (tzv. "tribološke prevlake"). Dodatno se određenim postupcima povisuje korozijska postojanost, otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju i toplinski umor. Prevlačenja površine alata i dijelova tribološkim prevlakama mogu se provesti djelovanjem topline, pritiska, napanjanjem, kemijskim i elektrokemijskim postupcima. Pri tome se stvaraju tanki i tvrdi keramički ili dijamantu slični slojevi. Keramički slojevi uobičajeno su višeslojni sastavljeni od oksidnih ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i neoksidnih spojeva (TiC, TiN, TiCN). Od niza dolje navedenih postupaka za primjenu u izradi alata i dijelova zbog povoljnih svojstava prevlaka te produktivnosti, fleksibilnosti i ekonomičnosti postupka ističu se postupci prevlačenja (i legiranja) laserskim snopom, postupci naštrcavanja (plamenom ili plazmom) te postupci kemijskog (CVD) i fizikalnog (PVD) prevlačenja iz parne faze. [18]

Također u novije vrijeme koriste se sve više polimerne i kompozitne prevlake koje osim zaštite od korozije služe također za postizanje otpornosti na koroziju.

Prevlake je moguće podijeliti na više načina, no u praksi je ipak najčešće razvrstavanje prevlaka na osnovi vrste vezivnog sredstva. Prema toj podjeli, najvažnije skupine prevlaka su na osnovi: sušivih ulja, poliplastičnih veziva (alkidne smole), epoksidnih smola, poliuretanskih smola, vinilnih smola, akrilata, politetrafluoretilena (PTFE), nezasićenih poliestera, fenoplasta, silikona, prirodnih smola i gumenih veziva na osnovi vulkaniziranog kaučuka. Pritom, ovisno o vrsti veziva, premaz može otvrdnuti (skrutiti se) na dva osnovna načina:

- *fizikalnim* isparavanjem jedne od komponenata otapala (razrjeđivača)
- *kemijskim* reakcijama (najčešće oksidacijom) u vezivu ili s vezivom.

Kemijski proces otvrdnjivanja, koji se često u literaturi i zasebno klasificira prilikom opisa načina otvrdnjivanja premaza, jest i *polimerizacija* – tj. proces otvrdnjivanja zbog oksidacijske kemijske reakcije uz sudjelovanje kisika iz zraka, umrežavanja nezasićenih polimera vlagom iz zraka ili zbog reakcije između veziva i otvrdnjivača kod dvokomponentnih premaza, a koji se miješaju neposredno prije nanošenja. Premazno sredstvo u tom slučaju polimerizira i tvori umreženu strukturu, a njegova kasnija svojstva uvelike su određena stupnjem i prirodom tog umrežavanja. [19]

U slučaju valjaka za mjerenje kočne sile upravo se koriste kompozitne prevlake koje kao ojačalo sadrže tvrde čestice koje dobro djeluju na tribološko trošenje same prevlake, dok se

kao vezivo (matrica) koriste polimerne smole koje također osim vrlo jednostavnog nanošenja posjeduju jako dobra mehanička svojstva. Deatlnije o kojim se prevlakama radi u ovom slučaju, materijal matrice i materijal ojačala, bit će navedeno u eksperimentalnom dijelu rada.

## 10. TRIBOLOGIJA

Tribologija je znanstveno-stručna disciplina koja se bavi problematikom trenja i trošenja. U popularnom izražavanju tribologija uključuje trenje (*friction*), trošenje (*wear*) i podmazivanje (*lubrication*).

Bit tribologije predstavlja razumijevanje prirode postojećih interakcija i rješavanje proizvodnih problema koji su povezani s fenomenima međupovršina materijala u relativnom gibanju. Tribologija obuhvaća osnovne discipline koje opisuju prirodu površina, interakcije, gibanja i materijale. Primijenjene discipline tribologije opisuju utjecaj odabira materijala, obradu površine, podmazivanje površina u primjeni, kao i područje novih istraživanja u nanotehnici .

Tribologija je stoga interdisciplinarna znanost gdje su osnovne (fundamentalne) discipline tribologije, koje opisuju osnovnu prirodu površina, interakcije, gibanja i materijale, fizika, kemija, matematika, mehanika fluida, mehanika, znanost o materijalima, metalurgija i strojarstvo. Primijenjene discipline tribologije, koje opisuju efekte odabira materijala, obradbe, podmazivanja i primjene su materijali (metali, polimeri, keramika, 'novi' materijali), obradba materijala (površinski tretmani materijala), podmazivanje materijala (ulja, masti, aditivi), mehaničke konstrukcije (zupčanicima, ležajima, klizni elementi), kao i nova istraživanja (nanotehnologije).

Osnovni zadatak tribologije je kontrola ('upravljanje') trenja i trošenja. Tribologija je ključna u modernoj mehanizaciji i u strojarstvu gdje se koriste površine koje se međusobno klizaju, kotrljaju ili se kreću relativno jedna u odnosu na drugu.[20]

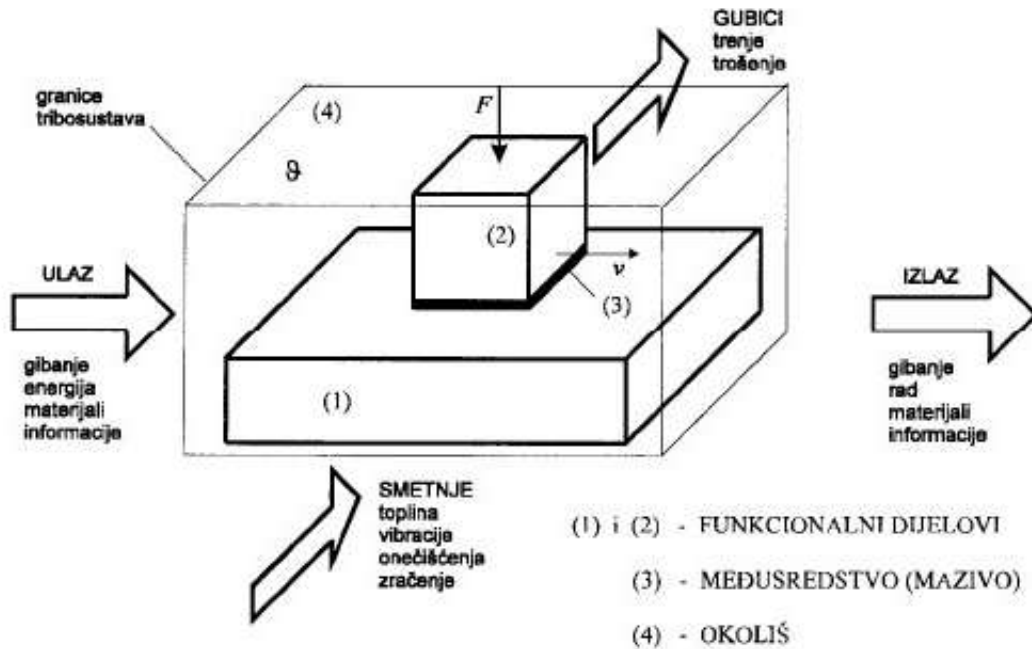
### 10.1. Elementi tribosustava

Elementi jednostavnog tribosustava prikazanog na slici 15. su materijali koji su u kontaktu kod gibanja (1) i (2), uz među-sredstvo (mazivo) (3) kao i djelovanje okoline (4) (kao na pr. korozijsko djelovanje).

Za postizanje optimalnih rezultata kod rješavanja triboloških problema trenja, trošenja i podmazivanja, treba uzeti u obzir opterećenje,  $F$ , silu trenja,  $\mu$ , smjer gibanja,  $v$ , ULAZ-IZLAZ protok kroz sustav (gibanje, energija, materijali, informacije), kao i razne SMETNJE i



GUBITKE radi trenja i trošenja. Djelatni uvjeti trenja utječu na međupovršinsko trošenje u danom tribosustavu. [20]

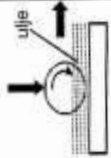
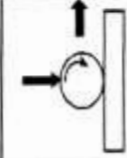
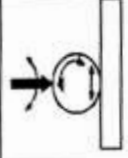
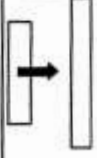
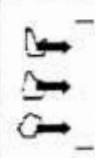
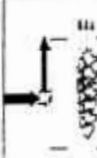





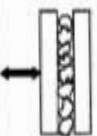
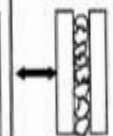





Slika 15. Elementi tribosustava [20]

## 10.2. Tribosustav koji djeluje u ovom slučaju

Najveći problem javlja se prilikom nailaska vozila na valjke za ispitivanje kočne sile koji se zatim počnu okretati te kontaktom sa pneumaticima vozila također pokreću i cijeli prijenosni sklop automobila, odnosno ispitnog vozila. Maksimalno tribološko opterećenje javlja se prilikom pritiska papučice kočnog sustava vozila te dolazi do suprostavljanja smjera gibanja pneumatika s obzirom na smjer gibanja valjaka. Vrste i načini trošenja uzimaju se iz tablice 7 koja je napravljena prema normi DIN 50 320 i VDI 3822.

Tablica 7. Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50 320 i VDI 3822 [21]

Struktura sustava	Tribološko naprezanje		Primjeri iz prakse	Vrsta trošenja	Mehanizam trošenja			
					Adhezija	Abrazija	Umor površine	Tribokorozija
Kruće tijelo - Međumedij (potpuno razdvajanje filma) - Kruće tijelo		Klizanje, Kotrljanje, Valjanje, Udaranje	Hidrodinamički podmazivani ležaji	-			●	○
	Kotrljanje, Valjanje	Valjkasti ležaji, igličasti ležaji, valjkasti ležaji, zupčanici, klizne površine bregaste osovine	○	○		●	○	
								
	Udaranje	Igle ventila, ventili, udarno opterećeni graničnici	○	○		○	○	
								
	Klizanje	Udaranje	○	○		○	○	
								Kruće tijelo - Čestice
			Abrazijsko- klizno			●	○	

				ABRAZIJA				EROZIJA										
Kruće tijelo - Kruće tijelo i čestice	Klizanje		Zaprijani ležaji i vodilice zbog neželjenih procesa	Abrazijsko-tri tijela	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Kruće tijelo - Tekućina s česticama	Strujanje		Lopaticice, pumpe, cjevovodi	Hydroabrazijsko	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Valjanje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi, puževi ekstrudera		Udaranje	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	Strujanje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi	Klizno trošenje mlazom čestica	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Udaranje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi		Strujanje, Udaranje	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	Strujanje, Udaranje		Uredaji za transport usitnjena, ugljena, cimenta i žitarica	Trošenje udarom mlaza	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kruće tijelo - Tekućina	Strujanje, Vibriranje		Pumpe, ventilatori, brodski vijci	Erozija udarom kapljica	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Kruće tijelo - Plin	Strujanje		Lopaticice parnih turbina	Erozija udarom kapljica	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Udaranje		Pumpe, ventili, cjevovodi	Erozija tekućinom	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		Strujanje		Ploče za toplinsku zaštitu u plinskim turbinama	Erozija plinom	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	

Gledajući strukturu tribološkog sustava iz dane tablice vidi se da se radi o kotrljanju krutog tijela (pneumatik i valjak) te u trenutku kočenja dolazi do klizanja krutog tijela (pneumatik) i krutog tijela s česticama (površina valjka). Prema tablici 7 zaključuje se da dolazi do kotrljajućeg i kliznog trošenja a glavni mehanizmi trošenja za navedeni slučaj su abrazija i umor površine.

### **10.2.1. Abrazija**

Abrazijsko trošenje (*abrasive wear*) nastaje kada neravnine hrapave tvrde površine ili tvrde čestice klize po mekšoj površini i oštećuju površinu pomoću plastične deformacije ili loma. Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama (slika 16.).

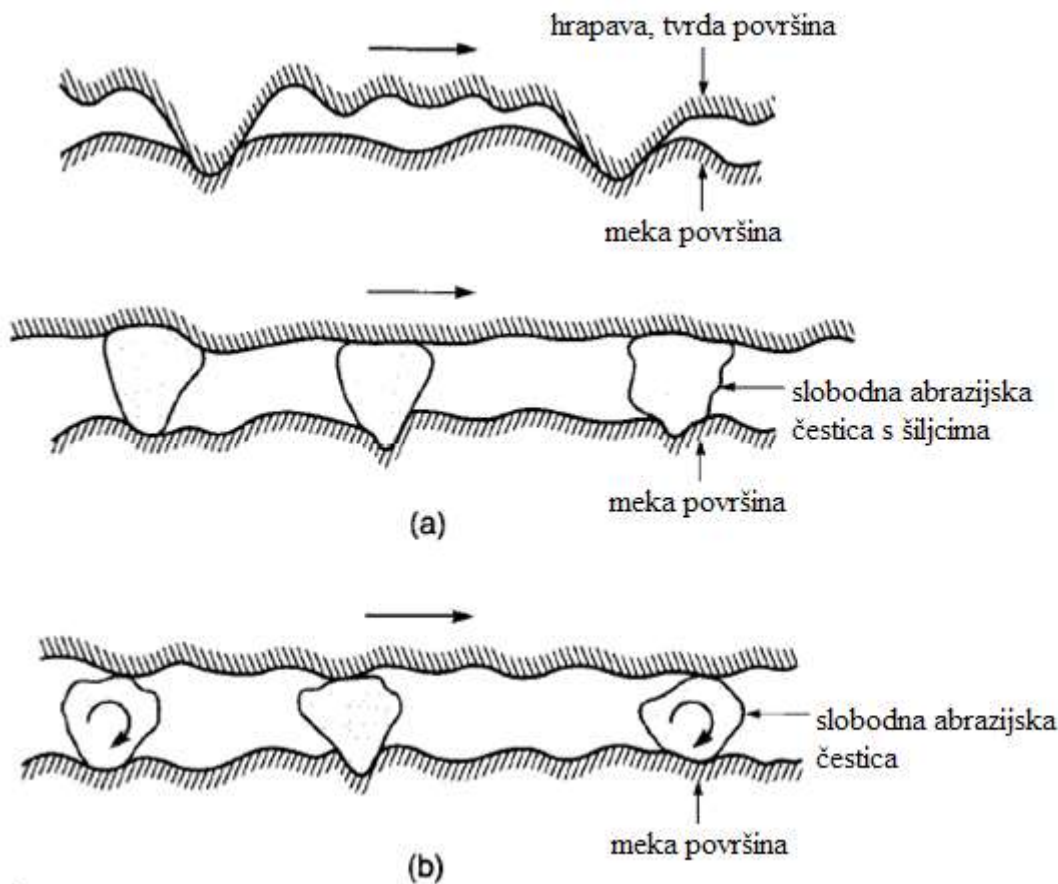
Mehanizmi abrazijskog trošenja djelotvorni su za vrijeme direktnog fizičkog kontakta između dviju površina. Ako su površine odvojene kapljevitim filmom (isključene su abrazijske čestice) ti mehanizmi trošenja ne djeluju.

Kod abrazijskog trošenja u većini situacija dolazi do grebanja i opažaju se brazde na mekšoj površini, koje se vide kao serije utora-žljebova paralelnih s smjerom klizanja. Termini koji se koriste za abrazijsko trošenje su grebanje, zarezivanje s pomoću dijetla ovisno o stupnju djelovanja na površinu.

Jednadžba za adhezijsko trošenje također može pokriti i široko područje abrazijskih situacija:

$$v = \frac{k_{abr} W_x}{H}$$

gdje je  $k_{abr}$  bezdimenzijska konstanta abrazijskog trošenja za dani sustav, koja uključuje i geometriju neravnina odnosno hrapavost površine. [20]



Slika 16. Shematski prikaz abrazijskog trošenja [20]:

- (a) hrapava, tvrda površina ili površina s abrazijskim šiljcima za grebanje klizi po mekšoj površini (operacije brušenja, rezanja);
- (b) slobodna abrazijska čestica s šiljcima koji je smješten između površina od kojih je barem jedna mekša od abrazijske čestice (operacije poliranja).

Utjecaj hrapavosti na volumen abrazijskog trošenja vrlo je izrazit. U uvjetima elastičnog kontakta stvarnih površina u dodiru, abrazijsko trošenje opada s porastom hrapavosti površine.

U uvjetima plastičnog kontakta brzina abrazijskog trošenja raste s hrapavošću površine. Brzina abrazijskog trošenja mijenja se kao funkcija brzine klizanja i veličine čestica abrazijskog papira. Brzina abrazijskog trošenja često je vrlo velika – dva do tri reda veličine veća od adhezijskog trošenja.

Eksperimenti pokazuju da je brzina trošenja sustava s dva tijela općenito obrnuto proporcionalna tvrdoći i da je proporcionalna normalnom opterećenju i udaljenosti kod klizanja za mnoge čiste metale; svojstva legura puno su kompleksnija. [20]

### ***10.2.2. Umor površine***

Umor površine i potpovršina (dubinska površina) javlja se za vrijeme cikličkih promjena naprezanja: ponovljenog kotrljanja (*rolling*) odnosno ponovljenog klizanja (*sliding*). Ponovljeni ciklusi opterećenja i rasterećenja kojima se materijal podvrgava mogu izazvati stvaranje potpovršine ili površinskih pukotina, koje na kraju, nakon kritičnog broja ciklusa, mogu rezultirati u prekidu površine i stvaranju velikih fragmenata, ostavljajući velike jame. Prije te kritične točke nakon više ciklusa dolazi do zanemarivog trošenja, što je suprotno od mehanizama trošenja uzrokovanog adhezijskim ili abrazijskim trošenjem, gdje trošenje izaziva postupnu istrošenost od početka kretanja.

Količina materijala koja se ukloni kod trošenja umorom nije korisni parametar za procjenu. Relevantniji faktor za procjenu trošenja umorom je broj ciklusa ili vrijeme prije nego se dogodi popuštanje umorom, izražen kao vijek trajanja/dinamička izdržljivost.

Mehanizam umora djeluje na međupovršini. Površine u kontaktu doživljavaju velika naprezanja koja se prenose na međupovršinu. Maksimum tlačnih naprezanja javlja se na površini a maksimum smičnih naprezanja javlja se na nekoj udaljenosti od površine. [20]

## 11. EKSPERIMENTALNI DIO

Tijekom eksploatacije valjaka za ispitivanje kočne sile nakon većeg broja ispitanih vozila osim stanjivanja prevlake dolazi do odvajanja prevlake na pojedinim mjestima te se tako javljaju gola područja (rupe) čime se narušava sposobnost ispravnog mjerenja kočne sile vozila. Iz navedenog slučaja i prikazanog na slici 17 dolazi se do zaključka da abrazijsko trošenje u ovom slučaju predstavlja manji problem upravo iz razloga što je tvrdoća pneumatika niža naspram tvrdoće prevlake pa dolazi do većeg abrazijskog trošenja pneumatika, što u ovom slučaju ne predstavlja nikakav problem. Iz navedenog dolazi se do pretpostavke da glavni čimbenik trošenja i otpadanja prevlake je umor površine. U sljedećim poglavljima uzorci otpale prevlake bit će proučavani raznim metodama kako bi se bolje saznalo zbog čega dolazi do odvajanja prevlake od podloge tj. čelične konstrukcije valjaka.



Slika 17. Valjci s kojih je otpala prevlaka [21]

### 11.1. SEM i EDS analiza

U ovom poglavlju bit će prikazani rezultati analize uzoraka na skenirajućem (scanning) elektronskom mikroskopu- SEM koji također ima mogućnost EDS analize (Energy Dispersive Spectrometry) tako da će biti prikazan i atomski sastav prevlake valjaka. Uređaj na kojem je provedena EDS mikroanaliza uzoraka izrađen je od strane proizvođača OXFORD

INSTRUMENTS, dok je skenirajući elektronski mikroskop proizveden od tvrtke TESCAN, tip VEGA 5136 MM. Analiza uzoraka obavljena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### ***11.1.1. Skenirajući (scanning) elektronski mikroskop- SEM***

Osnove rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa sastoje se od skeniranja površine ispitivanog uzorka vrlo precizno fokusiranim snopom elektrona. Snop elektrona pobuđuje (izbijaju) elektrone u sastavu atoma uzorka. Energija elektrona iz snopa u izravnoj je proporciji s interaktivno pobuđenim elektronima iz uzorka.

Energije proizašlih elektrona iz uzorka skupljaju se i mjere specijalnim detektorima i uz pomoć mikroprocesora stvara se pseudotrodimenzionalna slika valnih duljina elektrona jedinstvenih za element koji se nalazi uzorku.

SEM ima izrazitu prednost nad ostalim mikroskopima u području nekoliko osnovnih mjerenja i metoda. Jedna od najuvjerljivijih definitivno je rezolucija – sposobnost da se "vide" veoma mali objekti. Zatim, dubina polja – sposobnost da objekti različite "visine" na uzorkovnoj površini ostanu u fokusu, te mikroanaliza – sposobnost da se analizira sastav uzorka.

Uzorak se analizira tako da X-zrake nastaju kad ubrzani elektron, uglavnom iz snopa elektrona, "izbije" elektron iz unutarnje ljuske istog atoma. Elektron iz vanjske ljuske, s višom energijom, tada popunjava upražnjeno mjesto i otpušta "višak" energije u obliku fotona X-zrake. Zbog toga što se energija elektrona razlikuje od ljuske do ljuske unutar atoma i specifična je za svaki određeni element, energija emitiranog fotona X-zrake karakteristična je za pobuđeni atom.

Spektrometar X-zraka prikuplja te karakteristične X-zrake, broji ih i sortira, uobičajeno na temelju energije (Energy Dispersive Spectrometry – EDS). Dobiveni spektar iscrtava broj X-zraka, na okomitoj osi, nasuprot energiji, na vodoravnoj osi. Vrhovi na spektru odgovaraju elementima prisutnim u uzorcima. Visina vrha energije na spektru označava koji je element u pitanju. Broj signala u određenom vrhu na spektru označava udio elementa u analiziranom dijelu uzorka. [22]





Slika 18 Skenirajući elektronski mikroskop (Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu)

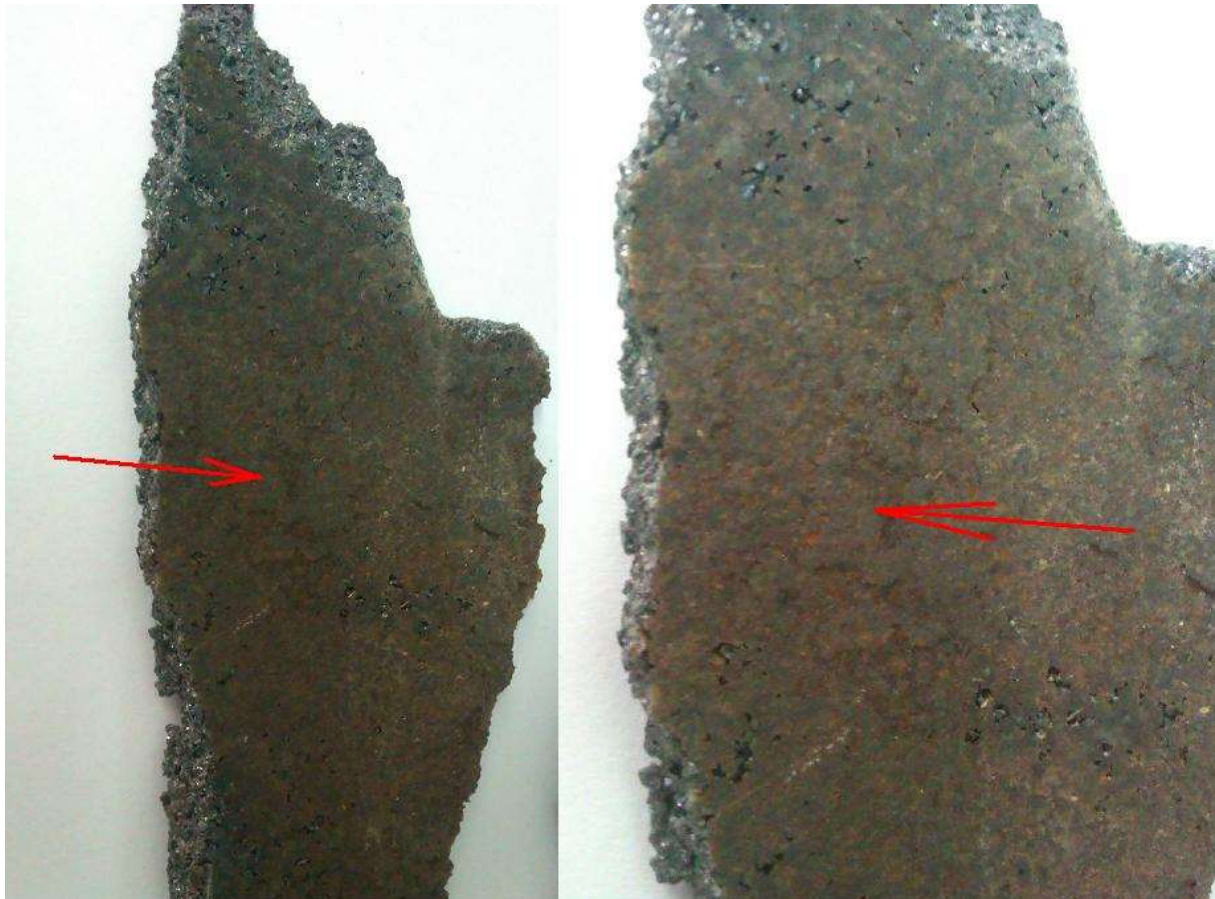
## 11.2. Rezultati skenirajućeg elektronskog mikroskopa- SEM i EDS mikroanalize

Na sljedećim slikama bit će prikazani uzorci otpalih originalnih prevlaka valjaka za ispitivanje kočne sile, te izneseni zaključci te objašnjenja prikazanih uzoraka.



Slika 19. Uzorci za analizu

Gledajući dobivene uzorke sa gornje strane tj. sa strane na kojoj dolazi do kontakta sa pneumatikom ne očituju se gotovo nikakve greške koje bi dovele do otpadanja prevlake sa površine valjaka. No gledajući sliku 20 koja prikazuje površinu prevlake koja je bila u kontaktu sa površinom valjaka dolazi se do očitijeg problema tj. uzroka zbog kojeg je vjerovatno došlo do odvajanja prevlake.

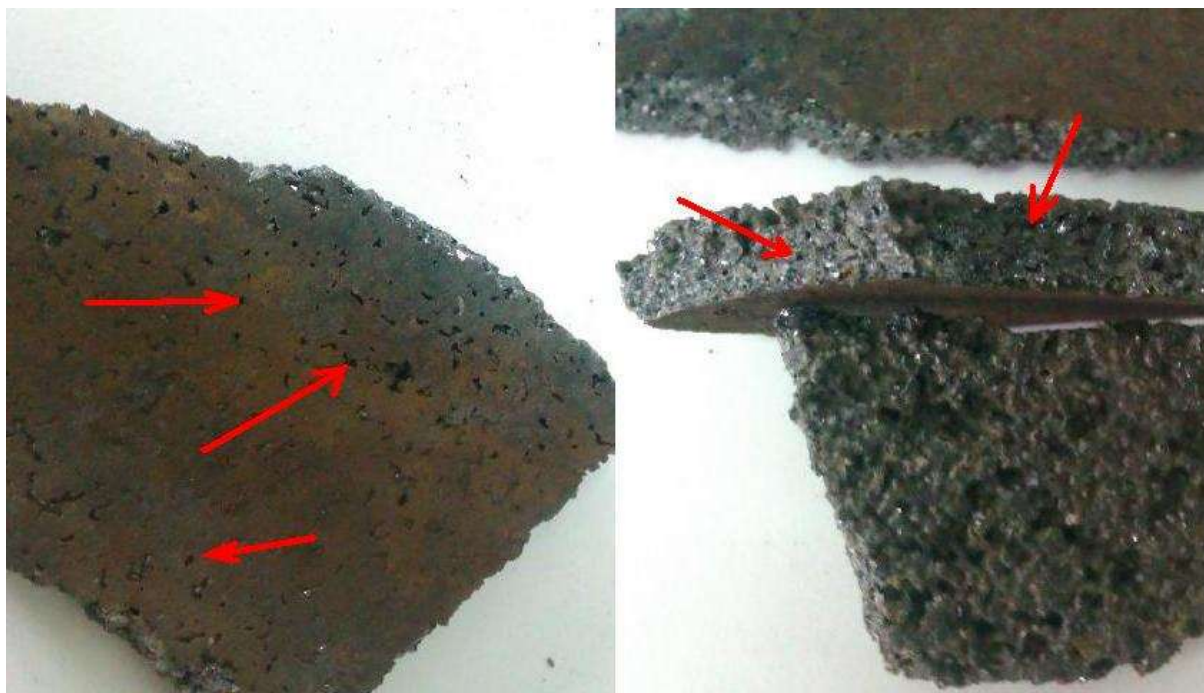


Slika 20. Kontaktna površina prevlake i valjka

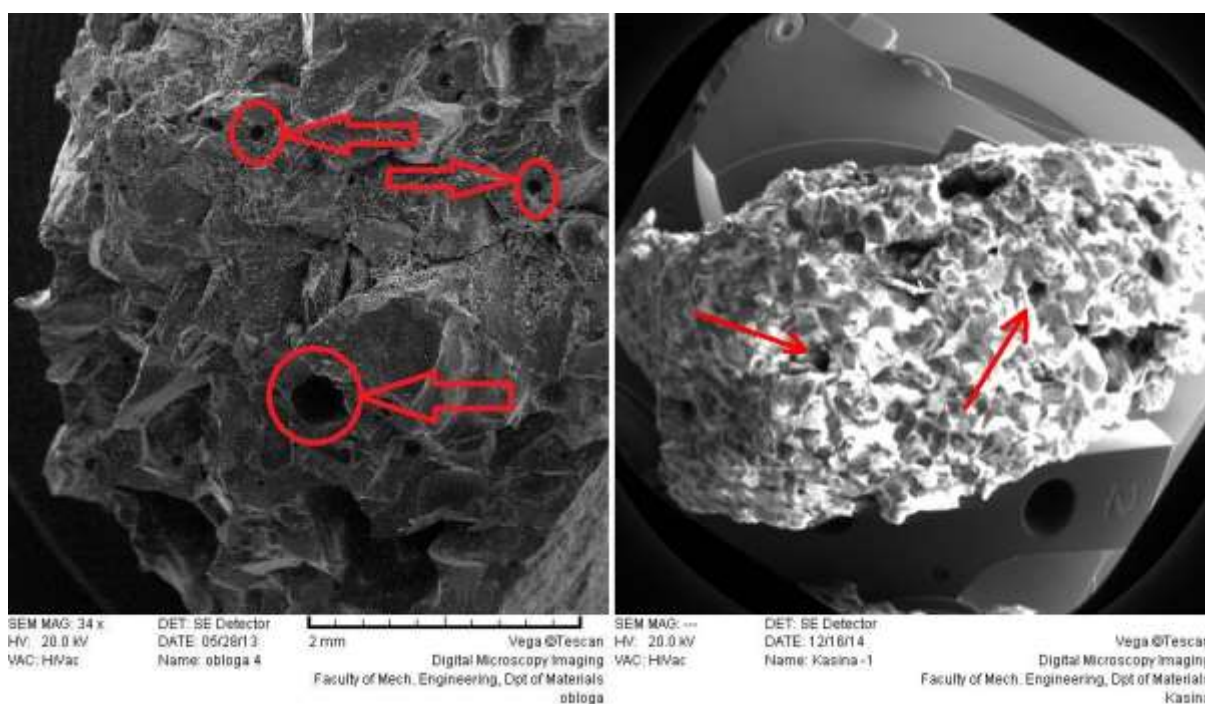
Područje prikazano strelicom na slici 20 pokazuje da dolazi do korozivnog djelovanja između površine prevlake i površine valjaka. Uzme li se u obzir još tribološko djelovanje umora površine jasno je da taj korodirani sloj prilikom nailaska vozila velike mase na sam valjak ne može izdržati pritisak takve sile te dolazi do odvajanja prevlake.

Osim produkata korozije vidljive su i sitne pukotine – pore koje su vjerojatno glavni uzrok zbog kojeg dolazi do korozivnog djelovanja. Te pore dobro se vide sa donje strane prevlake, površina koja je u kontaktu sa valjcima, te s poprečne strane prevlake. Također osim na makro razini pore postoje i na mikrorazini te su prikazane strelicama na slikama koje slijede.



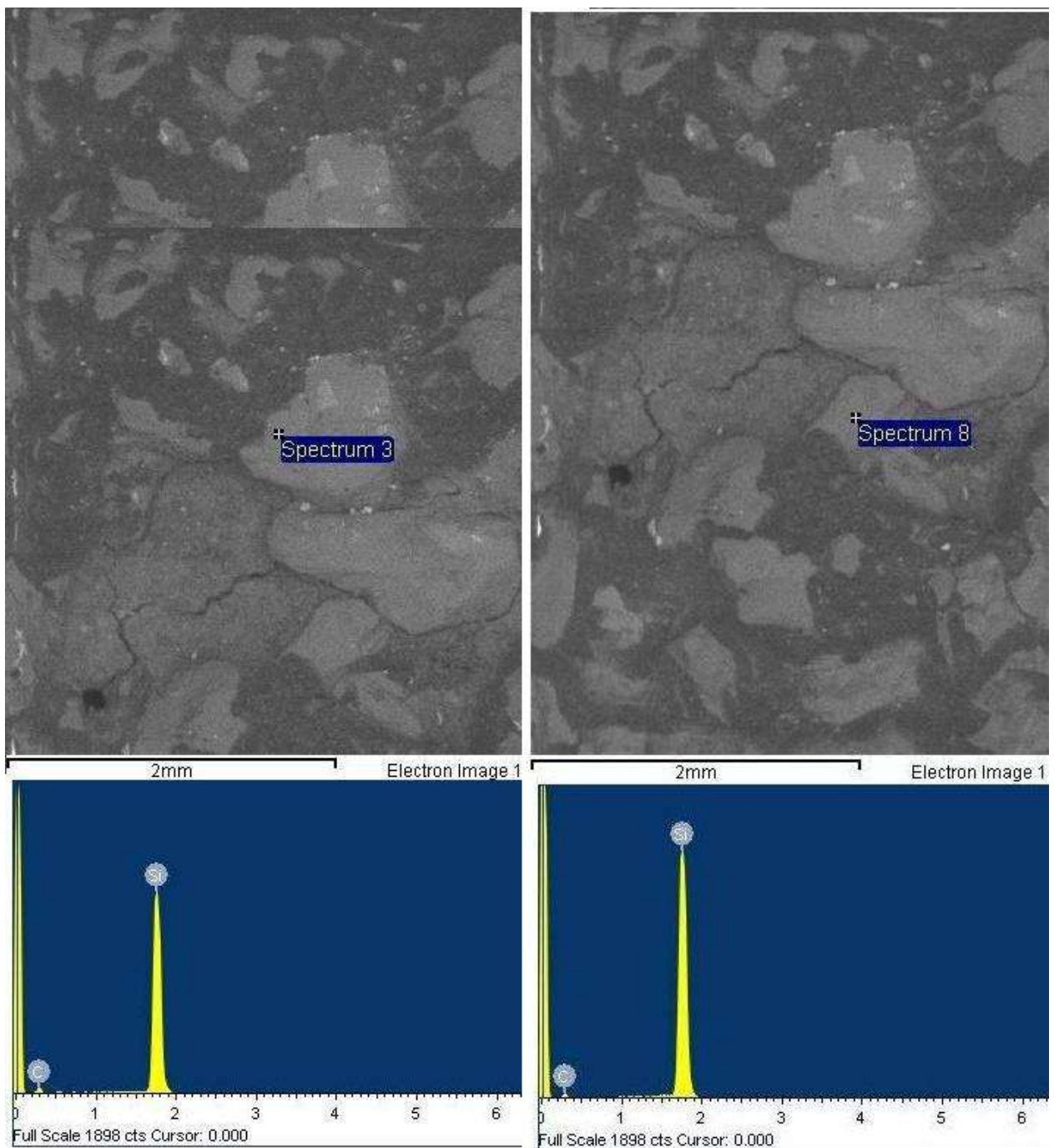


Slika 21. Prikaz pora na prevlaci za valjke



Slika 22. Prikaz poroznosti prevlake na snimkama SEM-a (lijeva slika pod povećanjem 34x, desna pogled izbliza bez povećanja)

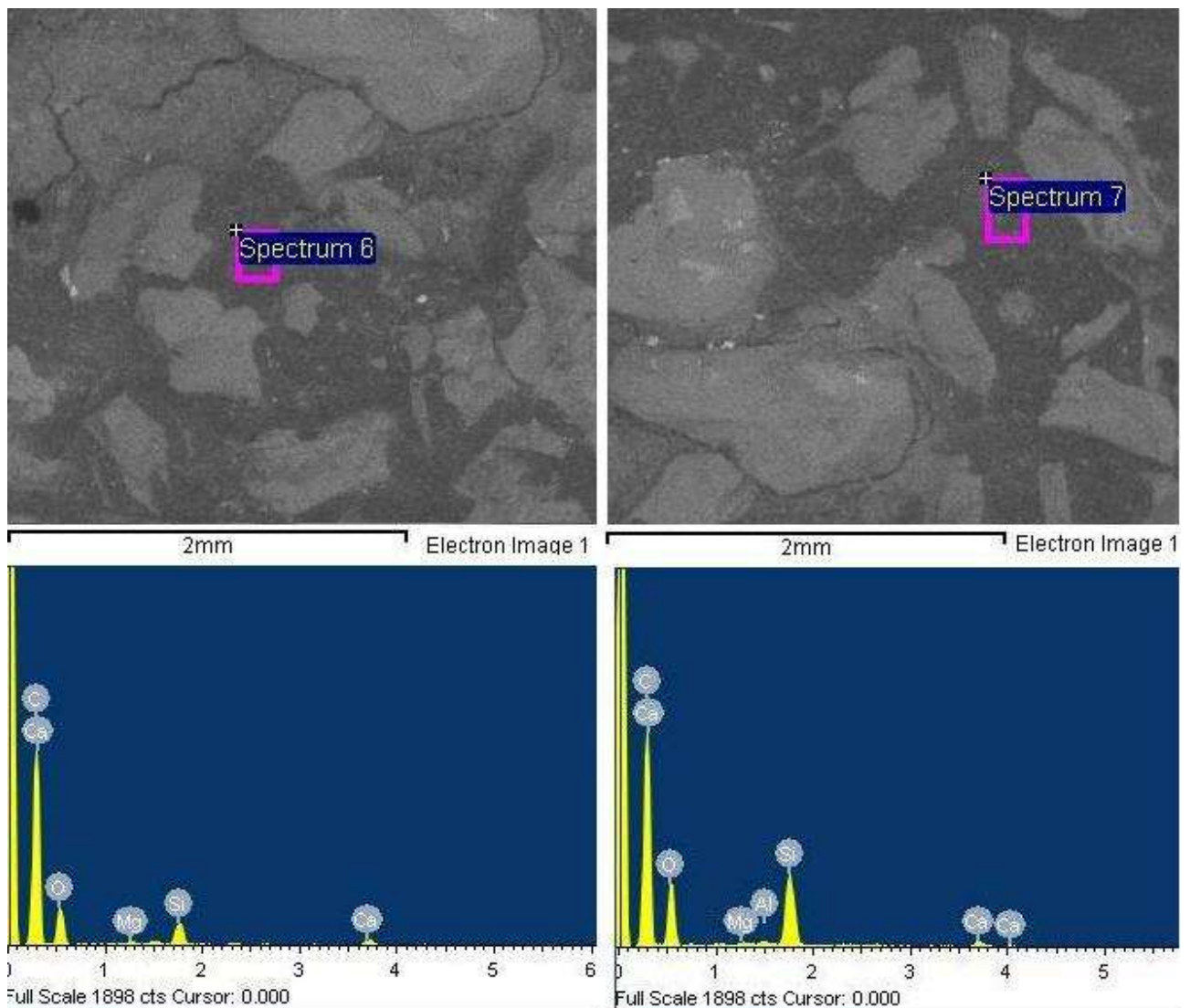
Također je napravljena i EDS analiza kako bi se vidjelo od kojih elemenata se sastoji ispitivani kompozitni premaz.



Slika 23. EDS analiza uzorka (sivo područje)

Ispitana područja su točke na slici 23 označene križićem te oznakom „Spectrum 8“ i „Spectrum 3“. Prema mikroanalizi vidi se da je prevladavajući kemijski element silicij- Si, te se još vidi da u oba slučaja javlja se i ugljik- C. Iz navedenog može se zaključiti da je riječ o silicijevom karbidu- SiC, što i je prikladan materijal za čestice ojačala u kompozitnoj prevlaci zbog njegove velike tvrdoće i dobrih svojstva što se tiče prijanjanja za pneumatik.

Na sljedećim slikama prikazana je mikroanaliza drugih malo većih područja ispitanog uzorka te se dolazi do zaključka da su ta prikazana i ispitana područja dijelovi koje ispunjava vezivo. Iza samog sastava ne može se točno zaključiti o kojem je vezivu (matrici) riječ, no najvjerojatnije se radi o nekoj polimernoj smoli. Većinom sve polimerne smole imaju jako dobra antikorozivna svojstva (jedno od glavnih svojstava primjene) te se time može zaključiti da sam sastav ispitane kompozitne prevlake ne utječe na pojavu korozije. Iz navedenih analiza na skening elektronskom mikroskopu i EDS mikroanalizom dolazi se do zaključka da je glavni krivac pojave korozije upravo poroznost ove kompozitne prevlake.



Slika 24. EDS analiza uzorka (tamno područje)

### ***11.2.1. Silicijev karbid- SiC***

Silicijev karbid, jako tvrd, sintetički proizveden kristalni spoj silicija i ugljika. Njegova kemijska formula je SiC. Od kraja 19. stoljeća silicijev karbid je važan materijal za izradu brusnih ploča i reznih alata. U novije vrijeme, pronašao je primjenu u vatrostalnim oblogama i grijačima za industrijske peći. Koristi se još za izradu dijelova za pumpe i raketne motore koji trebaju biti otporni na trošenje, te poluvodičkih podloga za svjetleće diode.

Silicijev karbid otkrio je američki izumitelj Edward G. Acheson 1891. pokušavajući proizvesti umjetne dijamante. Otkrio je kristale koji imaju približno tvrdoću dijamanta te je odmah shvatio značaj svog otkrića. Njegov rani proizvod u početku bilo je ponuđen kao sredstvo za poliranje dragulja i prodavan po cijeni usporedivoj s cijenom prirodne dijamantne prašine. Novi spoj, koji je moguće dobiti od jeftinih sirovina i u većim količinama, ubrzo je postao snažni industrijski abraziv. [23]

Najvažniji predstavnici karbidne keramike su materijali na bazi silicijeva karbida (SiC). SiC keramika primjenjuje se u različitim varijantima, već prema svrsi primjene, ali sve se odlikuju tipičnim svojstvima SiC.

Najvažnija svojstva silicijeva karbida jesu:

- velika do vrlo velika čvrstoća,
- korozijska postojanost na izuzetno visokim temperaturama,
- izvanredna mehanička svojstva pri visokim temperaturama,
- vrlo dobra otpornost na promjene temperature,
- mala toplinka rastezljivost,
- velika otornost na trošenje,
- vrlo velika tvrdoća,
- poluvodička svojstva. [24]





Slika 25. Granulat silicijevog karbida- SiC [25]

### **11.3. Udio veziva i ojačala (matrice i ojačala)**

Kao što je gore navedeno glavni uzrok nastajanja korozije čine pore u koje preko pneumatika ulazi vlaga te kroz određeno vrijeme dolazi do korozije samog materijala valjaka. U većini slučajeva kod izrade kompozitne prevlake ili samog kompozita bolje je kada je udio ojačala osjetno veći od udjela matrice tj. veziva, no u ovom slučaju bilo bi bolje da su pore, koje vidimo na uzorcima, ipak popunjene vezivom.

Kako bi točno odredili udio veziva u kompozitnoj prevlaci napravljeno je žarenje uzorka u trajanju od 4 sata na temperaturi od 500 °C. Žarenje se odvijalo u Laboratoriju za nemetale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u mufolnoj peći proizvođača INSTRUMENTARIA. Tip takve peći prikazan je na slici 26.





Slika 26. Mufolna peć

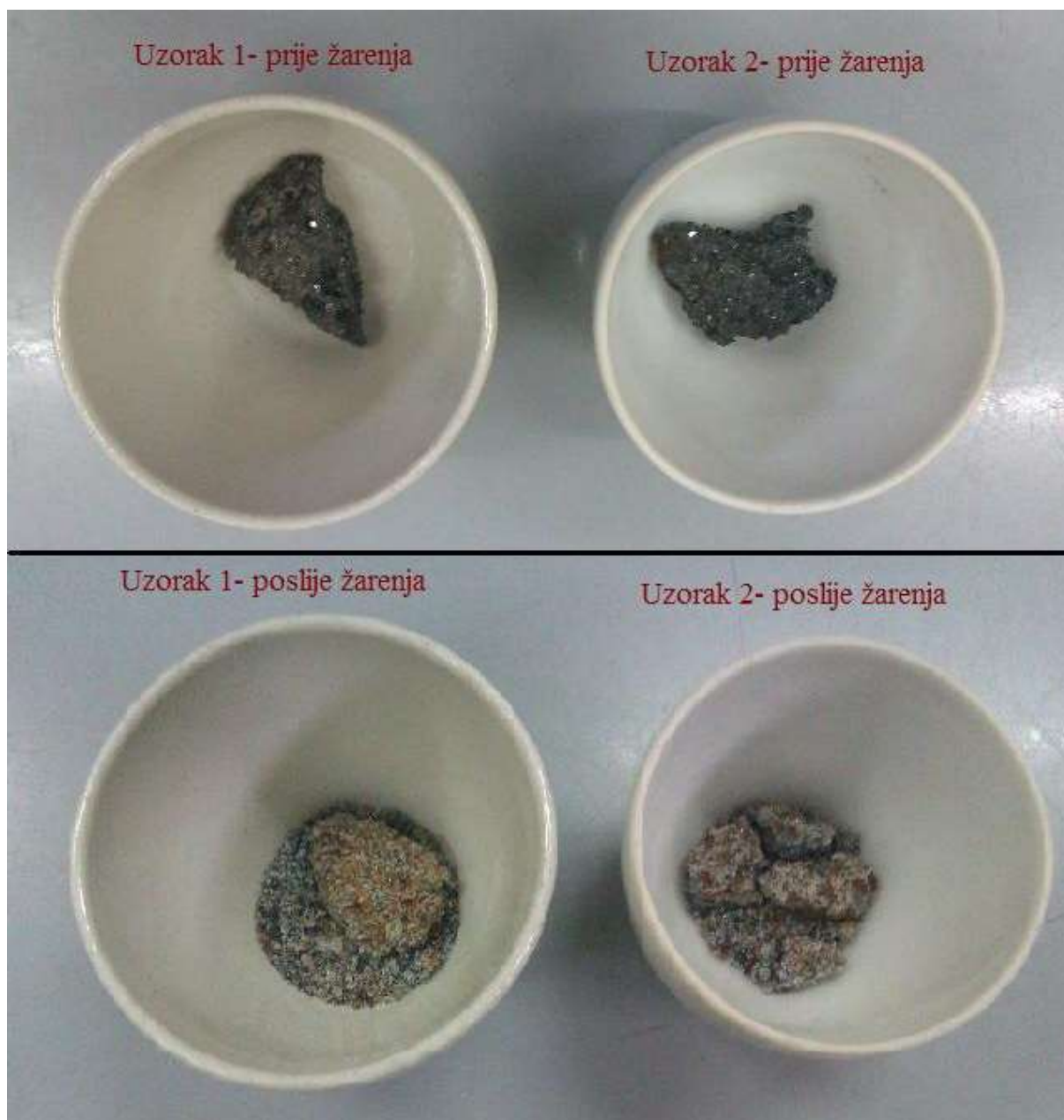
Žarilo se prema standardu EN ISO 1172 te su rezultati žarenja prikazani u tablici 8 i tablici 9, a u nastavku su prikazane slike uzoraka prije i poslije žarenja. Žarenjem na toj temperaturi dolazi do isparavanja konstituenata veziva te na završetku žarenja ostaje samo ojačalo (SiC). Ispitana su dva uzorka dobivena od različitih pružatelja usluge prevlačenja valjaka.

Tablica 8. Mase konstituenata veziva i matrice u uzorku

Lončić	Uzorak	m (lončić) [g]	m (lončić+ uzorak) [g]	m (lončić+ ostatak) [g]
2	1	26,6582 g	29,1972 g	28,6545 g
3	2	21,8161 g	24,2946 g	23,7881 g

Tablica 9. Maseni udio konstituenata u uzorcima (SiC i vezivo)

Lončić	Uzorak	m (uzorak) [g]	m (ostatak- SiC) [g]	w (SiC) [%]	m (ispareno vezivo) [g]	w (ispareno vezivo) [%]
2	1	2,539 g	1,9963 g	78,6	0,5427 g	21,4
3	2	2,4785g	1,972 g	79,6	0,5065 g	20,4



Slika 27. Uzorci prije i poslije žarenja

Iz navedenog vidi se da gledajući masene udjele konstituenata u većoj mjeri prevladava udio ojačala, SiC.

## 11.4. Načini obnove valjaka za mjerenje kočne sile

Nakon što prevlaka otpadne s valjaka oni nisu više dobri za upotrebu jer ne daju dobre rezultate mjerenja sile kočenja te postaju neupotrebiti. Proizvođači kao alternativu nude kupnju drugih valjaka kao rezervnih dijelova za sustav za koji se podrazumijeva da valjci spadaju pod potrošnu robu, tj. dijelove koji se troše. Takva opcija za ispitne stanice tehničke ispravnosti vozila u Hrvatskoj nije najbolje rješenje jer je komplet novih valjaka, gledajući s ekonomske strane, jako skup, a često se događa da prevlaka padne samo s jednog valjka dok drugi još duže vrijeme zadovoljavaju uvjete rada.

Iz tog razloga postoje tvrtke koje su se specijalizirale za obnovu istrošenih valjaka te će biti navedene dvije tvrtke te načini i usporedbe njihove obnove.

### 11.4.1. Tvrtka A

Prije nanošenja nove prevlake potrebno je skinuti staru i istrošenu prevlaku kako bi se stavio sloj nove kompozitne prevlake. Tvrtka A vrši obnovu valjaka na licu mjesta tj. u samoj stanici za tehničke preglede. Način na koji se to vrši prikazan je na sljedećim slikama uz objašnjenja. Prvi korak je skidanje stare prevlake. To se vrši na dosta jednostavan način koristeći udarnu bušilicu i dljetu. Time se skida stara prevlaka i dolazi do samog čeličnog valjka. Nakon toga valjak se brusi dijamanтном brusnom pločom kako bi novi kompozitni sloj bolje primio za čeličnu površinu valjka.



Slika 28. Brušenje valjaka radi boljeg prijanjanja nove kompozitne prevlake

Nakon brušenja površine valjaka nanosi se sloj „primer-a“ (podloge) s katalizatorom za metal. On služi za zaštitu samog čelika te osigurava bolju prionjivost čelične površine s kompozitnom prevlakom. Za tu svrhu koristi se „primer“ tvrtke Orel industrijskog naziva Degadur 418 te se tomu dodaje 3% utvrđivača i 0,2% katalizatora za metal.

Degadur 418 je nisko- viskozna elastična metakrilatna dvo- komponentna smola koja se koristi za izradu podnih obloga. Nanaša se lopaticom, djeluje samonivelirajući te tvori glatku površinu na betonskim i metalnim površinama. Primjenjuje se za mokra i suha područja. [26]



Slika 29. Ručno nanašanje primera

Nakon sušenja nanesenog sloja u trajanju od 2-3 sata nanaša se sloj sljedeće smole industrijskog naziva Degadur 526. To je nisko-viskozna metakrilatna dvokomponentna smola koja se koristi za završne premaze tvoreći tvrdu i glatku prevlaku. Na nju se ručno posipavaju zrnca korunda  $Al_2O_3$  veličine 1-2 mm. Taj se postupak ponavlja dok se ne dobije željena debljina prevlake, te je prikazan na slici 30.



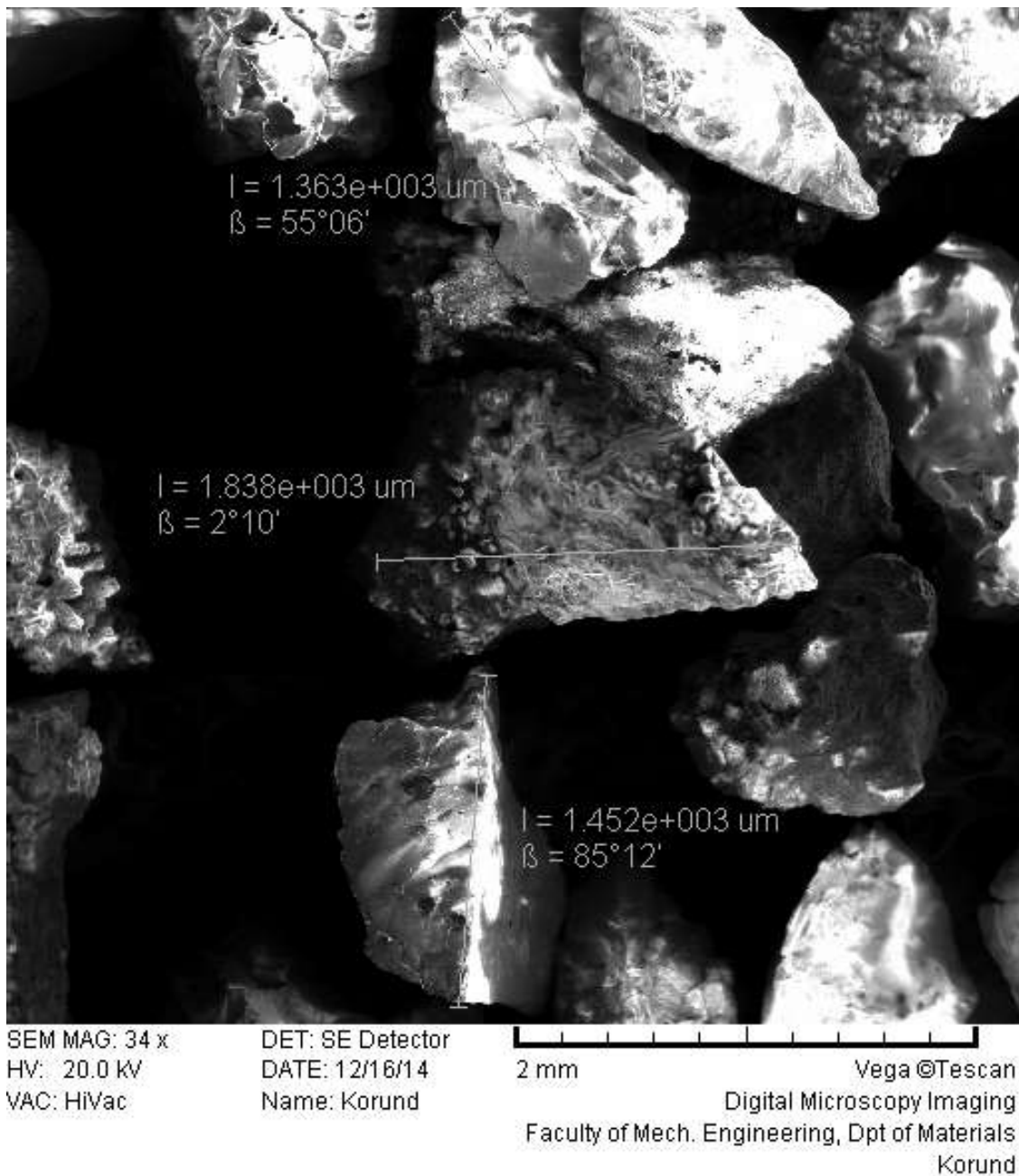


Slika 30. Postupak nanašanja čestica korunda i smole

#### ***11.4.2. Tvrтка B***

Druga tvrtka ima malo drukčiju metodu obnove, no na kraju se više- manje dobivaju slične prevlake valjaka koje imaju jako slična svojstva. Umjesto obnove na licu mjesta, tj. na stanici za tehnički pregled tvrtka B skida valjke te ih nosi u svoj pogon na ponovno stavljanje prevlake. Stara prevlaka skida se pjeskarenjem, što je malo bolja metoda jer se time također u potpunosti skidaju i produkti korozije sa površine valjaka. Osim što se dobije površina koja je očišćena od produkata korozije također se dobije površina koja je relativno hrapava te pruža bolje prijanjanje prevlake za površinu valjaka.

Također se kao ojačalo koristi granulat korunda veličine zrnaca od 1-2 mm, dok se kao vezivo koristi smola na bazi poliesteru industrijskog naziva A 120 proizvođača Scott Bader.



Slika 31. Snimka korunda na SEM-u pod povećanjem 34 x

#### 11.4.3. Izgled obnovljenih prevlaka na valjcima

Kao što je vidljivo na nekim slikama obnove valjaka dosta je velik utrošak veziva prilikom obnove prevlake valjaka, no time se rješava glavni problem koji se javlja kod originalnih valjaka a to je popunjavanje pora vezivom. Popunjavanjem pora smanjuje se utjecaj prodiranja vlage do osnovnog materijala valjaka tj. čelika, te se znatno smanjuje djelovanje korozije. Na slici 32 su prikazani neki od obnovljenih valjaka.





Slika 32. Površina obnovljenih valjaka

### 11.5. Ispitivanje koeficijenta trenja obnovljene prevlake

Kao što je navedeno u petom poglavlju najmanji faktor trenja propisan zakonom, koji valjci za ispitivanje kočne sile moraju ispuniti, iznosi 0,5. Kako bi se provjerilo da obnovljeni valjci ispunjavaju navedeni uvjet napravljeni su uzorci za testiranje faktora trenja između pneumatika i novo nanesene prevlake. Korišteni su isti materijali kakve koristi i tvrtka A (ojačalo- korund, matrica- Degadur 526). Kao podloga korišten je prsten promjera 40 mm izrađen od niskolegiranog Cr- čelika koji spada u grupu alatnih čelika za hladni rad.



Slika 33. Uzorci za ispitivanje faktora trenja

Faktor trenja ispitivan je na način da je uzorak pneumatika, izrezan na dimenzije  $7 \times 7 \times 15$  mm, stavljen na uzorak pripremljene prevlake kao što se vidi na slici 33 te se opteretio silom od 25 N. Na taj način ne dobije se direktno iznos faktora trenja, nego se mjeri produljenje elastične opruge. Nakon toga se dinamometrom izmjeri kolika sila je potrebna da bi se ostvarilo takvo produljenje i ta sila onda odgovara sili trenja. Na kraju je samo potrebno podijeliti silu trenja sa silom kojom je opterećen pneumatik i time se dobiva koeficijent trenja. Rezultati tih mjerenja prikazani su u sljedećoj tablici.



Tablica 10 Izračunati faktori trenja s obzirom na primjenjivanu silu od 25 N

Redni broj mjerjenja	Produljenje elastične opruge [mm]	Sila potrebna za navedeno produljenje opruge [N]	Izračunati koeficijent trenja $\mu$
1.	5,4	36	1,44
2.	5,7	39	1,56
3.	5,5	37	1,48



Slika 34. Ispitivanje faktora trenja

Kao što je vidljivo iz tablice 10 dobivene su visoke vrijednosti faktora trenja, te se može očekivati da će se nakon eksploatacije taj faktor malo smanjiti djelovanjem abrazije no to će još uvijek zadovoljavati zakonske norme. Još je važno naglasiti da je brzina vrtnje ispitivanog uzorka bila 1,5 okretaja u minuti, uzmemo li u obzir da je promjer ispitivanog uzorka bio 44 mm dobije se iznos obodne brzine u iznosu 0,003454 m/s. Visoka vrijednost faktora trenja dobivena je zahvaljujući vrlo velikoj hrapavosti površine prevlake, budući da poprilično velika zrna korunda vire iz polimerne matrice prevlake. Sama smola bez ojačala imala bi daleko manje vrijednosti faktora trenja.

## 11.6. Ispitivanje prionjivosti prevlake

Kako bi se vidjelo da li prevlaka dobro prijanja za čeličnu podlogu, provedeno je ispitivanje uzorka podloge za valjke na kidalici kako bi se dobili brožčani rezultati koje sile ta prevlaka može izdržati. Uzorak je bio pripremljen od strane tvrtke A istim postupkom kako se vrši obnova u prostorijama stanica za tehnički pregled, na način da je sloj prevlake nanesen na komad čeličnog lima dimenzije 80 x 50 mm i debljine 1 mm. Ukupna debljina lima i prevlake iznosi oko 4 mm.

Brzina hoda kidalice iznosila je 10 mm/min te je pucanje prevlake krenulo pri opterećenju od 350 N, dok je maksimalna sila koju je prevlaka izdržala iznosila 420 N.

Osim navedenih rezultata još je važnija informacija da nije došlo do odvajanja prevlake od čeličnog lima prilikom ispitivanja na kidalici. Unatoč krutosti i krhkosti prevlake došlo je do njezinog puknuća na mjestu djelovanja sile, ali nije došlo do odvajanja većih komada od podloge, što dovodi do zaključka da je ostvarena jako dobra prionjivost prevlake za podlogu. U nastavku su prikazane slike uzorka i ispitivanja na kidalici.



Slika 35. Ispitivanje uzorka na kidalici

## 12. UZROK OTPADANJA PREVLAKE S VALJAKA

Usprkos izloženosti valjaka za ispitivanje kočne sile velikom tribološkom trošenju djelovanjem abrazije i umora površine to nije glavni razlog opadanja prevlake. Utjecajem vanjskih uvjeta kao što su vlaga i voda dolazi do prodiranja vode kroz pore prevlake te stvaranja produkata korozije na osnovnom materijalu valjka, a to je čelik. Korodiranjem čelika dolazi do slabog prijanjanja premaza za podlogu te djelovanjem umora površine i abrazije kompozitna prevlaka se odvaja s područja gdje je čelik korodirao (prikazano na slici 36.). Inače sama prevlaka rađena je od jako otpornih materijala koji bi, da nema pojave korozije, izdržali puno dulje vrijeme eksploatacije prije potrebe za obnovom ili zamjenom.



Slika 36. Produkti korozije na valjcima

### 13. MOGUĆA RJEŠENJA OTPADANJA PREVLAKE

Nakon što se ustanovilo da je glavni uzrok otpadanja prevlake pojava korozije na čeličnim valjcima, postoje sljedeća rješenja:

1) Nabava novih valjaka svaki put kada dođe do odvajanja prevlake

Ovo rješenje preporučuju proizvođači valjaka. Pokazalo se je preskupim budući da originalni valjci moraju biti često mijenjani. Jedan od razloga je u tome što nije u interesu proizvođača valjaka njihov dugotrajni rad.

2) Zamjena originalnog materijala valjka nehrđajućim čelikom.

Budući da se radi o valjcima velikih dimenzija, zamjena valjaka od čelika za strojogradnju onima od nehrđajućeg čelika uzrokovala bi značajne troškove ne samo nabave materijala nego i njegove izrade.

3) Stavljanje međusloja između čeličnog valjka i kompozitne prevlake

Jedna od mogućnosti bila bi da se prvo na čelični valjak nanese neka „klasična“ kompaktna prevlaka namjenjena zaštiti od korozije, a nakon toga na nju nanese zahtjevana prevlaka velike hrapavosti koja u sebi uključuje abrazivne čestice koje povećavaju faktor trenja tako da on zadovolji zakonske uvjete. Ovdje su najznačajniji troškovi nanošenja međusloja budući da se radi o valjcima velikih dimenzija. Osim toga trebalo bi osigurati dobru prionjivost kako međusloja na čelik, tako i kompozitne prevlake na međusloj.

4) Zamjena postojeće kompozitne prevlake drugom, koja je manje porozna

Ovu metodu koriste tvrtka A i tvrtka B. Rješenje se pokazalo jako dobrim jer koriste smole koje služe kao vezivo i kao zaštita od korozije. Osnovni materijal se dobro očisti od starih korodiranih područja te se novim premazom valjak štiti od daljnje korozije. Također koristi se veći udio smole u kompozitnoj prevlaci kako bi se smanjila poroznost te time i sam utjecaj vlage na čelik. Ovako obnovljeni valjci imaju puno dulji eksploatacijski vijek od originalnih prevlaka.

Sva ova predložena rješenja nije moguće troškovno usporediti budući da u praksi nisu korištena rješenja 2 i 3 pa je nemoguće odrediti eksploatacijski vijek na taj način dobivenih valjaka. Nepoznat je i eksploatacijski vijek rješenja 4, koje se koristi, ali za sada, unazad nekoliko godina koliko se koriste, nije zabilježen slučaj otpadanja tako nanasene nove kompozitne prevlake. Jedino što je sigurno da su ovako obnovljeni valjci trajniji za sve istraživane slučajeve u ovom radu. Pri tome se koriste kao polimerne matrice različite gotove

smjese široke potrošnje, uglavnom namjenjene za izradu industrijskih podova. Iskustvo istraživanih tvrtki koje se bave obnovom valjaka, pokazalo je da je primjena korunda umjesto kvarca, kao keramičkih čestica, nešto pogodnija.



## 14. ZAKLJUČAK

Kako bi se osigurala sigurnost vozača i putnika motornih vozila, te također ostalih sudionika u prometu važno je da vozila budu tehnički ispravna. Ispravnost vozila vrši se u stanicama za tehnički pregled na kojima se jedno od glavnih ispitivanja odnosi na ispravnost kočnih sustava vozila te njihova mogućnost usporavanja i smanjenja puta kočenja.

To ispitivanje se vrši na valjcima za ispitivanje kočne sile na način da se mjere kočne sile svakog kotača posebno te uspoređuju s masom vozila te također međusobno. Kako bi se mogle izmjeriti maksimalne sile kočenja koje određeno vozilo može postići potrebno je postići čim veće faktore trenja između samog pneumatika i valjka za ispitivanje.

Najmanji faktor trenja propisan je zakonom i on iznosi 0,5. Zbog toga različiti proizvođači opreme za testiranje nude različite prevlake na svojim valjcima kako bi dobili čim veće faktore trenja. U pravilu ti faktori se kreću od 0,9-0,5 što također ovisi o vanjskim uvjetima (suho/mokro).

Najveći problem za proizvođače i za korisnike njihove opreme predstavlja tribološko trošenje tih prevlaka, zato različiti proizvođači nude različite izvedbe samih valjaka i njihove površine, te razne prevlake koje bi bile dugotrajnije, a da zadovoljavaju propisane uvjete.

Kao što je navedeno u radu samo tribološko trošenje u slučaju valjaka za ispitivanje kočne sile ne predstavlja tako veliki problem jer je izbor materijala što se tiče abrazijskog trošenja više nego dobar. U ovom slučaju glavni problem otpadanja prevlake uzrokuje korozija koja nastaje tako da voda (vlaga), koja se prenosi na valjke s pneumatika ispitivanih vozila (posebice u uvjetima kiše i snijega na cestama kada vozila dolaze na pregled), ulazi u pore prevlake te tako reagira s osnovnim materijalom valjaka a to je čelik za strojogradnju. Smanjenjem poroznosti jako se utječe na trajnost prevlake. Ako se još prije zaštiti i sam čelični valjak posebnim premazom koji štiti čelik od korozije i poboljšava prionjivost same prevlake za valjak, njegova eksploatacijska vrijednost produljuje se na trajanje čak preko 10 godina.

## POPIS LITERATURE

- [1] <http://www.poslovni.hr/hrvatska/hrvatska-je-meu-prvima-u-europi-organizirano-kontrolirala-ispravnost-vozila-260058#> [5.12.2014.]
- [2] Đorđe Šilić: „Ispitivanje motornih vozila“, Velika Gorica, 2010.
- [3] <http://www.maha.de/roller-brake-tester-mbt-2100.htm>[6] [25.11.2014.]
- [4] <http://banquciozamora.blogspot.com/> [12.12.2014]
- [5] BOSCH, “Automotive Handbook” , 7th Edition, Robert Bosch Gmbh, ISBN 978-0-470-51936-3, Plochingen, 2007
- [6] „Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za uređaje s valjcima kojima se provjerava kočna sila po obodu kotača kod vozila na motorni pogon i priključnih vozila“, „Narodne novine“, broj 93/96 i 122/99
- [7] V. Perotić, Prometna tehnika 1, Škola za cestovni promet, Zagreb, 1994.
- [8] Cartec, „Test line for cars“ <http://www.lubomir-schafer.cz/docs/zkusebny/roller-brake-testers-BDE.pdf> [28.11.2014].
- [9] <http://www.maha.de/roller-brake-tester-mbt-2100.htm>[6] [22.11.2014.]
- [10] [http://rb-aa.bosch.com/boaa-sg/kidownload?type=application/pdf&publication=7&cl\\_id=20&pos=1&attrv\\_id=4383](http://rb-aa.bosch.com/boaa-sg/kidownload?type=application/pdf&publication=7&cl_id=20&pos=1&attrv_id=4383) [4.12.2014.]
- [11] <http://www.chemie.de/lexikon/Korund.html> [6.12.2014.]
- [12] „Katalog\_BT\_GB.pdf“ <http://www.nussbaum-group.de/english/business-units/workshop-equipment/testing-equipment/bt-nts-brake-tester-test-lane/brake-tester-policy-2011/index.html> [10.12.2014].
- [13] <http://www.stltools.com/en/equipments/test-lane/roller-brake-tester/mbt-2250-euro>  
<http://www.stltools.com/products/equipments/mahatestlane/rollerbraketester/or/mbt2250.png> [2.12.2014]
- [14] [http://www.smartgarageequipment.co.uk/commercial\\_brake\\_testers.html](http://www.smartgarageequipment.co.uk/commercial_brake_testers.html) [13.12.2014.]
- [15] [http://www.fsb.unizg.hr/zavod\\_za\\_materijale/download/8f5b1e68977077c0bc5053548b75628c.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/download/8f5b1e68977077c0bc5053548b75628c.pdf) [20.12.2014.]
- [16] S. Kožuh, „Specijalni čelici“ –skripta
- [17] <http://www.torwegge.de/shop/media/catalog/product/cache/1/image/5e06319eda06f020e4> [18.12.2014.]

- [18] [http://www.fsb.unizg.hr/zavod\\_za\\_materijale/download/fe5ea98fc9eff2798096fc5f8bd88f94.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/download/fe5ea98fc9eff2798096fc5f8bd88f94.pdf) [19.12.2014.]
- [19] Vinko Šimunović, Ivan Juraga, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu: Polimerne prevlake: Osvrt na mnogobrojne mogućnosti i načine primjene
- [20] V.Kovačević, D. Vrsaljko „Tribologija“ (nastavni materijal), Zagreb, 2011.
- [20] T. Filetin, K. Grilec „Postupci modificiranja i prevlačenja površina“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [21] [http://www.rollenbeschichtung.de/en\\_service.php](http://www.rollenbeschichtung.de/en_service.php) [15.12.2014.]
- [22] G. Mršić, S. Žugaj „Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX)” (stručni članak), Zagreb 2007
- [23] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/544369/silicon-carbide> (Written by: The Editors of Encyclopædia Britannica) [21.12.2014.]
- [24] T. Filetin, I.Kramer, "Tehnička keramika-priručnik za primjenu"
- [25] <http://sandblastingabrasives.com/black-silicon-carbide-abrasive.html> [27.12.2014.]
- [26] <http://corporate.evonik.com/en/products/search-products/pages/product-details.aspx?pid=21902&pfsearch=D&pfcmd=letter&backUrl=http%253a%252f%252fcorporate.evonik.com%252fen%252fproducts%252fsearch-products%252fpages%252fsearch.aspx%253dletter%2526pfsearch%253dD%2526plid%253d4421> [28.12.2014.]