

Trošenje kotača niskopodnog tramvaja serije TMK 2300

Sambolec, Antonia

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:956535>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonia Samolec

Zagreb, 2025. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Antonia Samolec

Zagreb, 2025. godina.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Suzani Jakovljević, na uloženom trudu i pristupačnosti tijekom izrade ovog rada, ali i tijekom nastave.

Velike zahvale kolegama iz tvrtke Končar – Električna vozila d.d. Dora, Krešo, Neno, Medo, Tomo, Gogić i Chella, hvala vam na susretljivosti, velikoj količini znanja i toploj atmosferi.

Od srca se zahvaljujem svojoj obitelji, posebno majci Nataši. Bez tvoje ljubavi ništa ne bi bilo isto. Hvala ocu Mariju, sestri Leoneli i bratu Karlu što su me uvijek gurali naprijed i bili tu za mene.

Zahvaljujem se svojim prijateljima, vi ste moja druga obitelj. Paula, Petra i Sara, hvala vam na svemu. Sretna sam što vas mogu zvati svojim prijateljicama.

Hvala Lovri na potpunoj podršci na svakom koraku mog školovanja, ali i života. Hvala ti što vjeruješ u mene kada ja ne mogu. „Do druge galaksije i nazad.“

Antonia Sambolec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonia Sambolec** JMBAG: **0035234488**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje kotača niskopodnog tramvaja serije TMK 2300**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of wheel of low-floor tram serie TMK 2300**

Opis zadatka:

Tramvaj je električno vozilo za gradski prijevoz putnika koje se kreće po tračnicama. Grad Zagreb je nabavkom niskopodnih električnih tramvajskih vozila modernizirao tramvajski vozni park i podigao kvalitetu usluge prijevoza putnika. Niskopodni tramvaji pružaju ugodniju vožnju i prilagođeni su osobama s invaliditetom i smanjene pokretljivosti. Tribosustav kotač – tračnice utječe na širenje buke i vibracija i na udobnost pri vožnji tramvaja, ali i na troškove održavanja vozila i kolosijeka. Na trošenje kotača tramvaja utječu konstrukcija osovinskog sklopa tračnog vozila, vrsta kotača, kvaliteta materijala i kotača i tračnica, stanje kolosiječne konstrukcije i broj prijedanih kilometara tračnog vozila.

U radu je potrebno:

- 1) Opisati konstrukcijske izvedbe osovinskog sklopa tračnog vozila.
- 2) Istražiti koji se materijali najviše koriste za izradu kotača tramvaja.
- 3) Analizirati i opisati mehanizme trošenja koji se javljaju u tribosustavu kotač-tračnice.
- 4) Izmjeriti geometriju trošenog kotača niskopodnog tramvaja serije TMK 2300 i usporediti s vrijednostima novog kotača.
- 5) Na izabranom primjeru karakterizirati mikrostrukturu materijala kotača tramvaja TMK 2300.
- 6) Analizirati rezultate i dati zaključak.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. OSOVINSKI SKLOP TRAČNIČKOG VOZILA MODELA TMK2300.....	3
3. KOTAČI TRAMVAJA	6
3.1. Izvedbe kotača tračničkih vozila [7]	6
3.2. Materijali i toplinska obrada kotača tramvaja.....	8
4. TROŠENJA	12
4.1. Abrazijsko trošenje [15].....	12
4.2. Adhezijsko trošenje [15]	13
4.3. Umor površine [15].....	13
4.4. Tribokorozija [15]	14
4.5. Mehanizmi trošenja specifični za tribološki par kotač-tračnica [16].....	15
5. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA.....	18
6. EKSPERIMENTALNI DIO	20
6.1. Profil i dimenzije gazne površine kotača	20
6.1.1. Analiza mjerenja profila i dimenzija gazne površine kotača	24
6.2. Priprema uzorka	25
6.3. Analiza mikrostrukture	28
6.4. Analiza mjerenja tvrdoće uzorka	32
7. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prvi tramvaj vučen konjem na prugi između Swansea i Mumblesa [2]	1
Slika 2.	Kolni ormar TMK2300 – podijeljen po modulima [6].....	3
Slika 3.	Vodilice kotača s centralnim zglobovima [6]	4
Slika 4.	Pogonski par kotača [6]	5
Slika 5.	Okretno postolje tramvaja TMK2300 [6].....	5
Slika 6.	Kotač s obručem [7]	6
Slika 7.	Kotač iz jednog dijela [7]	7
Slika 8.	Kotač s gumenim umecima [7]	8
Slika 9.	Dijagram izotermičke normalizacije [14].....	11
Slika 10.	Jedinični događaj abrazije [15].....	12
Slika 11.	Jedinični događaj adhezije [15]	13
Slika 12.	Jedinični događaj umora površine [14]	14
Slika 13.	Jedinični događaj tribokorozije [15].....	15
Slika 14.	Primjer „ljuskanja“ (engl. <i>shelling</i>).....	16
Slika 15.	Jamice nastale rupičanjem (engl. <i>spalling</i>)	17
Slika 16.	Obruč kotača tramvaja modela TMK 2300	20
Slika 17.	Profil i dimenzije gazne površine novog kotača tramvaja TMK 2300 [22]	21
Slika 18.	Dimenzije profila tračnica u gradu Zagrebu:	21
Slika 19.	Mjerenje dimenzija profila kotača.....	22
Slika 20.	Plan mjerenja profila i geometrije gazne površine kotača	23
Slika 21.	Profila kotača [23]	24
Slika 22.	Nepravilnost u geometriji kotača uzrokovano obradom [19].....	25
Slika 23.	Obruč kotača tramvaja modela TMK 2300 i označeno mjesto rezanja obruča kotača.....	26
Slika 24.	Poprečni presjek površina kotača modela tramvaja TMK 2300	26
Slika 25.	Izrezani uzorci obruča kotača modela tramvaja TMK 2300:	27
Slika 26.	Ispitni uzorak	28
Slika 27.	Sredina uzorka, povećanje 200 x.....	29
Slika 28.	Sredina uzorka, povećanje 1000 x.....	29
Slika 29.	Sredina uzorka uvećana 500 x nakon računalne obrade [25]	30
Slika 30.	Volumni udio feritne faze u uzorku [25].....	30
Slika 31.	Rub uzorka, povećanje 200 x	31
Slika 32.	Rub uzorka, povećanje 50 x	31
Slika 33.	Grafički prikaz tijeka pada tvrdoće ovisno o udaljenosti od ruba gazne površine	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Maksimalni postotci različitih elemenata [9]	9
Tablica 2. Vrijednost tvrdoće obruča kotača, HB [9].....	9
Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće obruča kotača, HV [9]	9
Tablica 4. Kemijski sastav obruča kotača vozila modela TMK 2300[10]	9
Tablica 5. Rezultati mjerenja profila i geometrije kotača	23
Tablica 6. Razlike izmjerenih vrijednosti profila i dimenzija istrošenog kotača i vrijednosti novog kotača.....	24
Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće HV1	32
Tablica 8. Mehanička svojstva [9]	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HB	MPa	Tvrdoća po Brinellu
HV	MPa	Tvrdoća po Vickersu
D	mm	Promjer kotača
V_v	mm	Visina vijenca kotača
D_v	mm	Debljina vijenca kotača
O_v	mm	Istrošenost vijenca kotača
F_N	N/mm ²	Normalna komponenta opterećenja
F_t	N/mm ²	Tangencijalna komponenta opterećenja
Č	-	čestica
R_{eH}	N/mm ²	Gornja granica ravlačenja
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
A_5	%	Istezljivost

SAŽETAK

S razvojem željezničkog prometa, raste potreba za povećanjem sigurnosti i udobnosti tijekom vožnje. Posljedično, primjena znanja tribologije postaju ključna u svim fazama razvoja i održavanja vozila – od konstrukcije i dizajna, preko odabira materijala i metode toplinske obrade, do održavanja sustava. U ovom radu detaljno je analiziran uzorak istrošenog kotača tramvaja modela TMK 2300. Opisana je konstrukcijska izvedba osovinskog sklopa niskopodnog tramvaja. Nadalje, proučene su različiti tipovi kotača tračničkih vozila, a u sklopu toga je opisana izvedba kotača niskopodnog tramvaja modela TMK 2300. Analizirani su najčešći mehanizmi i procesi trošenja te su priloženi primjeri istih s analiziranog uzorka. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je mjerenje profila i dimenzija gazne površine kotača koja je uspoređena s dimenzijama profila novog kotača, analizirana je mikrostruktura materijala kotača te izmjerena i analizirana tvrdoća materijala na različitim udaljenostima od gazne površine prema središtu kotača.

Ključne riječi: tribologija, trošenje, kotač, tramvaj

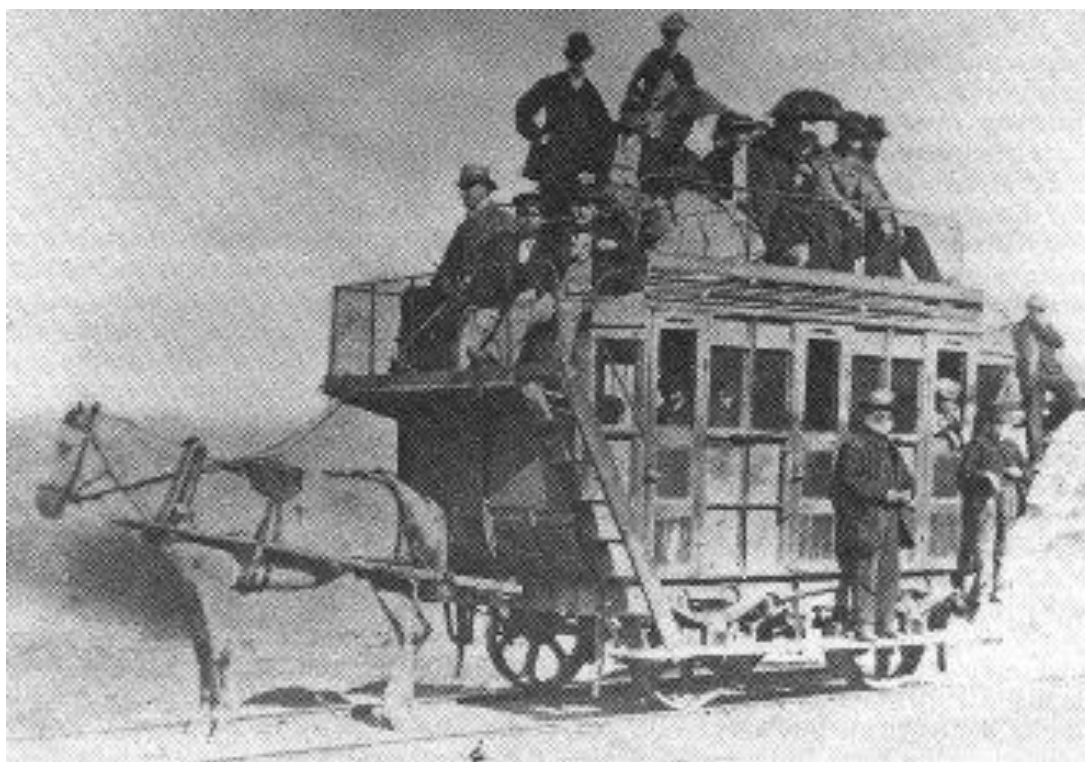
SUMMARY

With the advancement of railway transportation, there is an increasing demand for improved safety and passenger comfort. Consequently, the application of tribological principles is essential at all stages of vehicle development and maintenance, including design and construction, material selection and heat treatment processes, as well as system maintenance. This study presents a comprehensive analysis of a worn tram wheel from the TMK 2300 model. It details the structural design of the low-floor tram axle assembly and explores various types of wheels used in rail vehicles, emphasizing the design features of the TMK 2300 low-floor tram wheel. Predominant wear mechanisms and processes were investigated, supported by examples from the analysed sample. The experimental section includes measurements of wheel tread profile dimensions, which were compared to those of a new wheel profile. Additionally, the microstructure of the wheel material was examined, and hardness measurements were conducted at varying distances from the tread wear surface towards the wheel centre.

Key words: tribology, wear, wheel, tram

1. UVOD

Razvoj prvih pruga za tramvaje, a time i tramvajskih vozila, počinje u 19. stoljeću u Južnom Walesu kada željeznička pruga između Swansea i Mumblesea postaje prenamijenjena u prugu za tramvaje. Prvi tramvaji su bili sačinjeni od jednog vagona bez sjedećih mjesta te su bili vučeni konjima, što je prikazano na slici 1. Ubrzo se takav način prijevoza proširio u Sjedinjenim Američkim Državama, Francuskoj, Čileu, Egipat itd. [1]



Slika 1. Prvi tramvaj vučen konjem na prugi između Swansea i Mumblesea [2]

U kasnom 19. stoljeću tramvaji polako poprimaju današnji oblik. Umjesto konja tramvaje pogoni parna lokomotiva koja se u 1880. godini zamjenjuje s električnim pogonom. Prvi takav je tramvaj pušten u promet u Sankt Petersburgu, a projektirao ga je Fyodor Pirotsky. Osnovni Pirotskyev princip rada takvog prvog električnog tramvaja ostaje jednak do danas – električni napon se s vanjskih vodova preko pantografa prenosi na električni motor. [1]

Gradu Zagrebu je 27. travnja 2005. godine isporučen prvi niskopodni tramvaj te je svečano pušten u promet 13. srpnja iste godine na liniji broj 12. [3] Niskopodni tramvaj je tramvaj čija

je visina poda putničkog prostora na razini uličnog nogostupa. Takav dizajn tramvaja donosi razne prednosti, poput lakšeg ulaznja i izlaska putnika, pristupačnosti osobama s invaliditetom, povećanog kapaciteta putnika unutar tramvaja. [4]

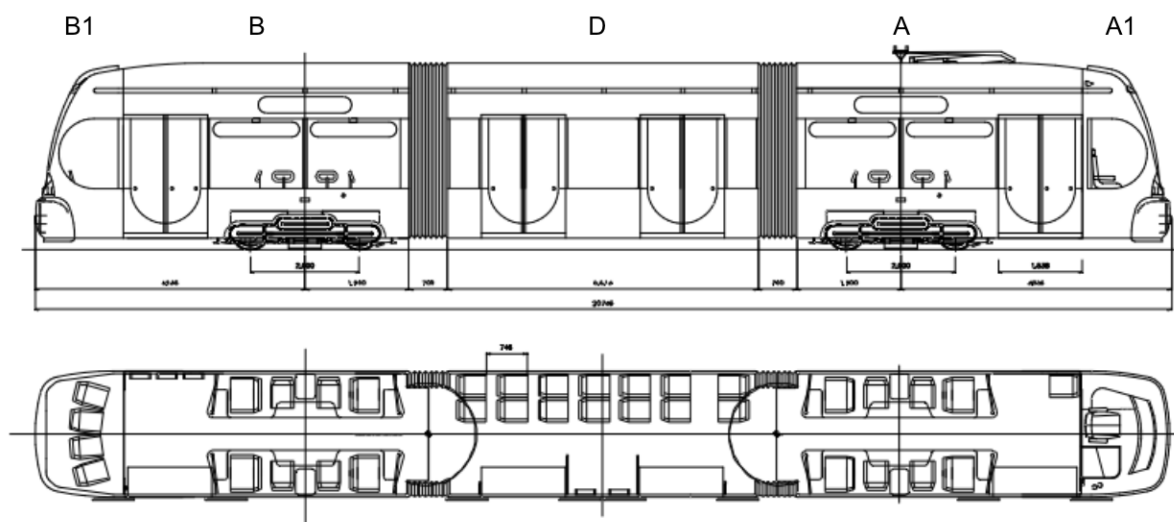
Prilikom razvoja gradskog željezničkog prometa, odnosno gradskih tramvaja, pojavio se problem njihovog održavanja i projektiranja. S većom učestalošću vožnje, masom vozila te sa sve većim zahtjevom za udobnost putnika, veća je i potreba za primjenom znanja tribologije, konstruiranja i odabira materijala kako bi se zadovoljili željeni uvjeti vožnje i osigurala sigurnost u vožnji.

Na trošenje kotača i tračnica, koji su u promatranom slučaju tribološki par, utječu razni faktori. Neki od razmatranih faktora u ovom istraživanju su: materijal kotača, odnosno njihova mikrostruktura i tvrdoća, stanje tračnica, opterećenje na kotače, intenzitet kočenja, radijus zakrivljenosti pruge, kvaliteta održavanja kolosijeka i kotača te vremenski uvjeti.

2. OSOVINSKI SKLOP TRAČNIČKOG VOZILA MODELA TMK2300

Model tramvaj TMK2300 je potpuno niskopodni, jednosmjerni i desnostrani tramvaj namijenjen za prijevoz putnika u javnom gradskom prometu. Riječ je o kraćoj verziji modela tramvaja TMK2200 s smanjenim kapacitetom prijevoza putnika, odnosno njih 130. [5]

Kolni ormar modela tramvaja TMK2300 je trodjelni i višezglobni te ga pogone dva motorna postolja. Postolja se nalaze ispod modula A i B kolnog ormara te su simetrično opterećena. Sama konstrukcija ovakvog postolja omogućuje niskopodnost vozila, bez stepenica i kosina u putničkom prostoru. [6] Izgled kolnog ormara je prikazan na slici 2.

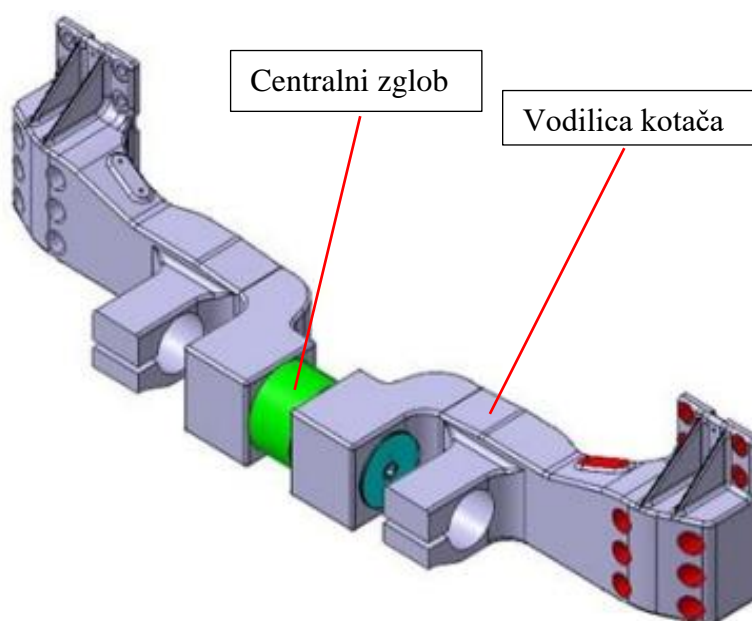


Slika 2. Kolni ormar TMK2300 – podijeljen po modulima [6]

Osovinski sklop ili kolni slog sastoji se od vratila i čvrsto navučenih kotača koji djeluju kao cjelina. Izraz „osovinski sklop“ je zbog uvriježenosti u željezničkom vokabularu ostao neispravan kao takav, odnosno za razliku od osovine koja je opterećena na savijanje, vratilo prenosi i okretni moment, odnosno opterećeno je i na uvijanje. Prijenos okretnog momenta s vučnog elektromotora na kolni slog ostvaruje se preko reduktora. Razlikuju se pogonski i slobodni slog. Slobodni kolni slog nema pogonski element te se sastoji od vratila s dva čvrsto navučena kotača.

Vratila na pogonskim postoljima opterećena su na velika dinamička opterećenja uslijed vučne sile elektromotora, kočne sile i sila nastalih zbog samog ovjesa. [7] Zbog toga je proces proizvodnje vratila za tračnička vozila vrlo složen te se sastoji od procesa kovanja, pa tokarenja do željenih grubljih dimenzija, brušenja za postizanje glatke površine i dimenzija visoke preciznosti, toplinske obrade te prevlačenja i modificiranja površine. [8]

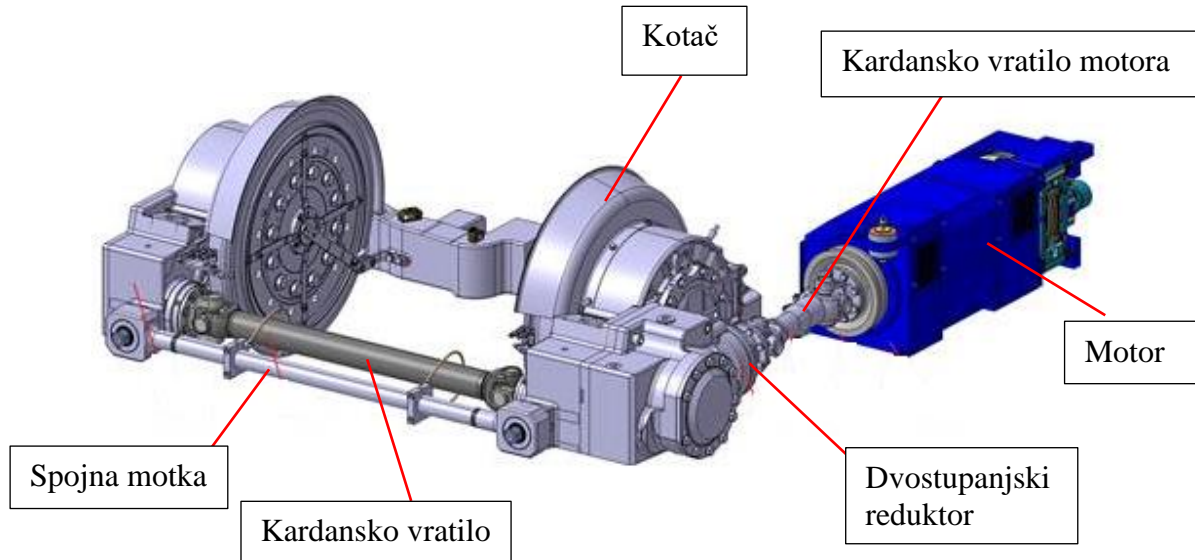
U slučaju modela tramvaja TMK2300, motorno postolje ima dva para pogonskih kotača. Kolni slog sastoji se od reduktora, vodilica kotača, centralnih rotacijskih zglobova i samih kotača. Kolni slog je u ovom slučaju izveden bez klasičnog spoja vratila i kotača gdje vratilo spaja kotača u njihovom centru. Sustav vođenja svakog kotača sastoji se od kućišta reduktora pričvršćenog vijcima na vodilice kotača. Vodilice kotača su međusobno povezane centralnim rotacijskim zglobom, prikazanim na slici 3.



Slika 3. Vodilice kotača s centralnim zglobom [6]

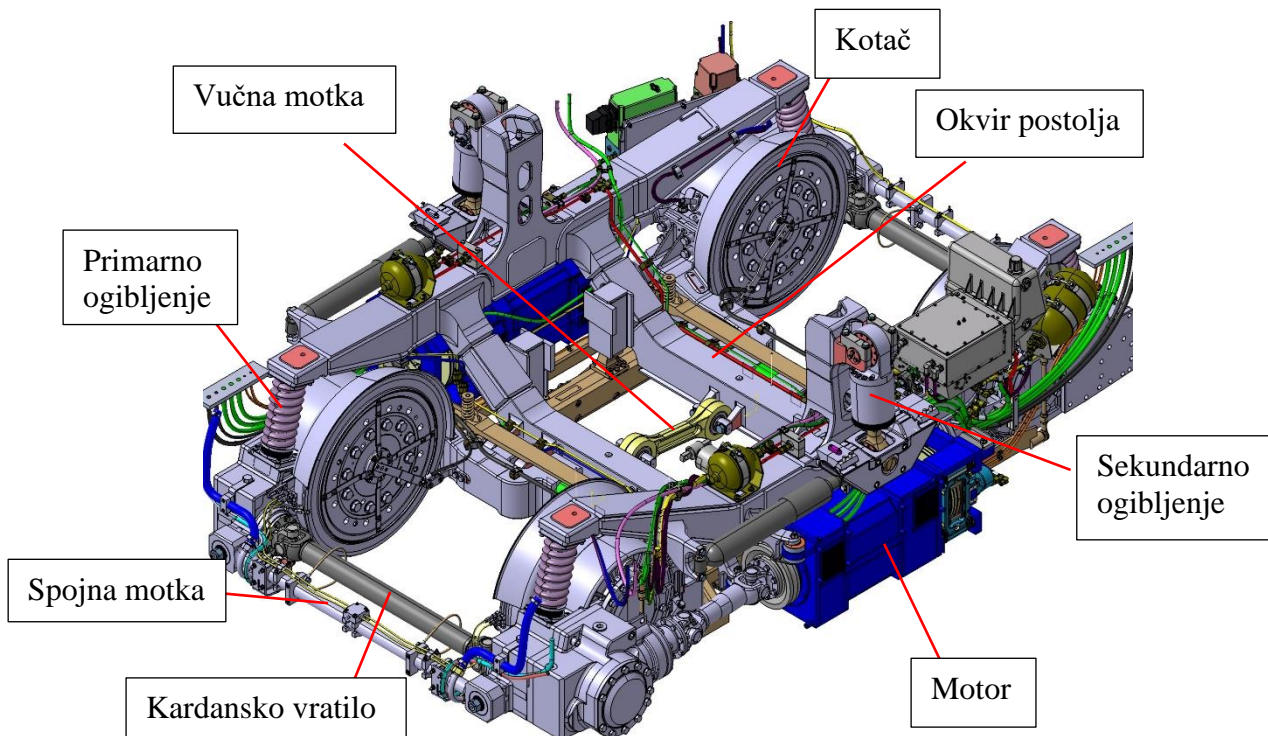
Centralni zglob omogućuje nezavisne pomake lijevog i desnog kotača u osovinskom sklopu. Takav sustav osigurava: ujednačen raspored reakcijske sile nastale između kotača i tračnice, veću sigurnost od iskliznuća, ujednačenije trošenje kotača i time produljuje životni vijek samih kotača.

Kotači pogonskog kolnog sloga međusobno su povezani poprečnim vratilom i dvama reduktorima. Na taj način oba prenose silu vučnog motora. Vučni je motor spojen preko kardanskog vratila s elastičnom spojkom na jedan reduktor, slika 4.



Slika 4. Pogonski par kotača [6]

Kolni slog, prikazan na slici 5, kao sastavni dio okretnog postolja, vezan je elastičnim gumenim ležajevima za okvir postolja. [6]



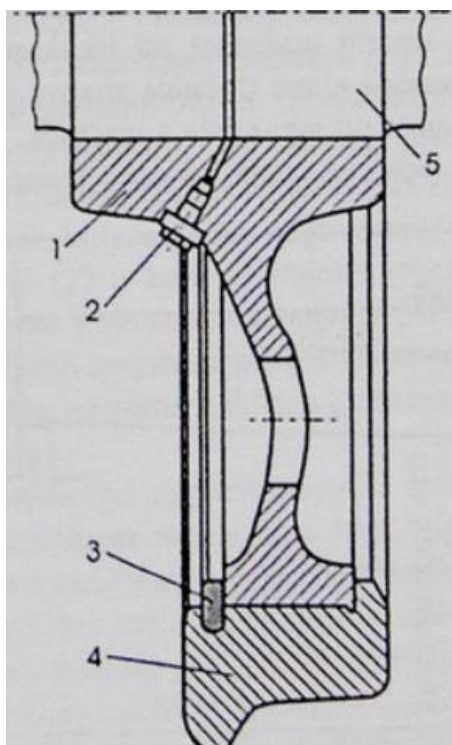
Slika 5. Okretno postolje tramvaja TMK2300 [6]

3. KOTAČI TRAMVAJA

3.1. Izvedbe kotača tračničkih vozila [7]

Kotači osovinskog sklopa mogu biti izvedeni na dva načina, kao kotači s obručem ili bandažom ili kotači iz jednog dijela, odnosno monoblok kotači.

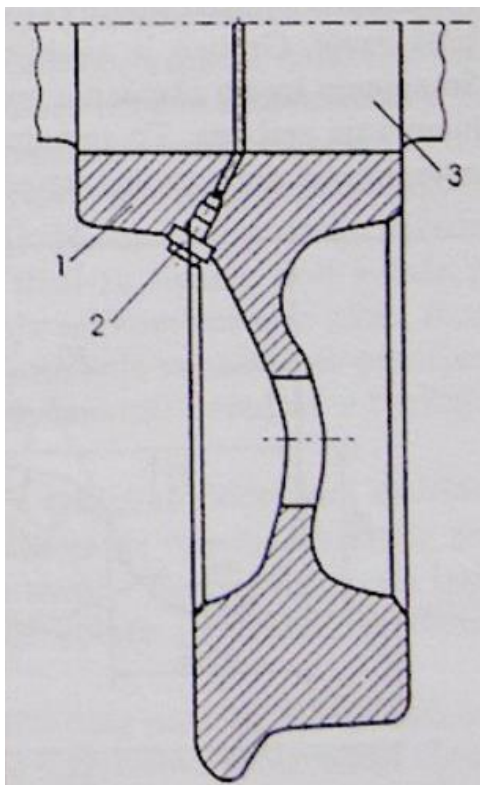
Kotač s obručem, koji je prikazan na slici 6 se sastoji od tijela kotača (1), obruča (4) i sigurnosnog prstena (3). Obruč se navlači na zagrijano tijelo kotača te se njihovim daljnjem hlađenjem osigurava čvrsti spoj. Kako se kočenjem ponovno zagrijava navedeni spoj, ugrađuje se sigurnosti prsten koji sprječava ispadanje obruča s tijela kotača. Kotači se na osovinu (5) navlače pomoću preše. Glavna prednost ovakvog tipa kotača je zamjena samo obruča kotača nakon što se istroši.



Slika 6. Kotač s obručem [7]

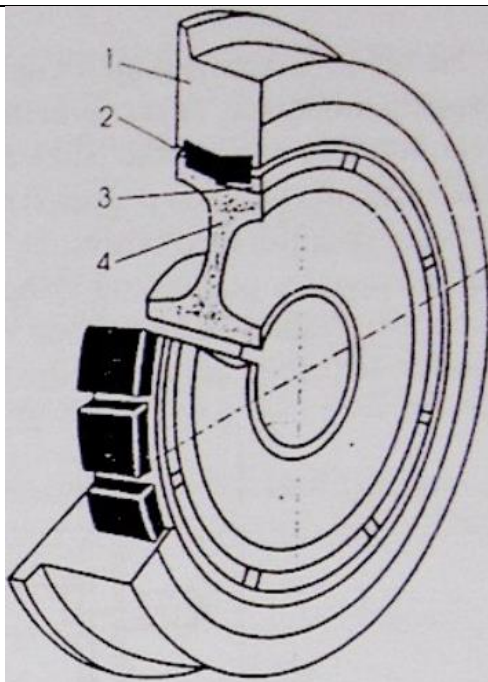
Monoblok kotači, prikazani na slici 7, imaju mnoge prednosti od kotača s obručem. Glavna prednost je da su sigurniji u eksploataciji jer nema opasnosti od loma i ispadanja kotača. Osim toga, manje se troše te su lakši od kotača s obručem, no njihova je izrada skuplja. Kotač (1) se

na osovinu (3) navlači pomoću preše i skida se dovođenjem ulja iz hidraulične preše pod visokim tlakom između dodirnih površina osovine i tijela kotača preko odgovarajućeg priključka na kotaču (2).



Slika 7. Kotač iz jednog dijela [7]

Vrsta kotača koja se koristi u tračničkom vozilu modela TMK2300 je kotač s obručom s gumenim umetcima između obruča i tijela kotača prikazan na slici 8. Oni se koriste jer gumeni element prigušuje vibracije te smanjuje dinamička opterećenja na tijelo kotača. Sastoji se od tijela kotača (4), obruča kotača (1), gumenih elementa (2) i prstena (3). Prsten osigurava ostvarenje čvrstog spoja između tijela kotača (4) i obruča kotača (1) te sprječava ispadanje obruča kotača tijekom vibracija.



Slika 8. Kotač s gumenim umecima [7]

3.2. Materijali i toplinska obrada kotača tramvaja

Karakteristike kotača tračničkih vozila propisane su europskim i državnim normama te direktivama. Jedna od najvažnijih karakteristika kotača je čvrstoća. Regulatorna tijela propisuju norme o mehaničkim svojstvima, odnosno o čvrstoći, kako bi se spriječio trenutni lom kotača. Norma koja definira zahtjeve za kotače željezničkih vozila u Hrvatskoj je HRN EN 13262. Prema navedenoj normi u Europi se koriste četiri vrste čelika, ER6, ER7, ER8 i ER9 (E – engl. *Engineering steel*; R – engl. *railway*). U tablici 1 prikazan je njihov kemijski sastav, u tablici 2 prikazana je tvrdoća po Brinellu te u tablici 3 tvrdoća po Vickersu za dvije kategorije. Prva kategorija su tračnička vozila koja voze brzinama preko 200 km/h, a druga kategorija je su vozila koja voze brzinama do 200 km/h. Maseni udio određenih kemijskih elemenata, poput ugljika, je okvirno zadan i može se mijenjati ovisno o eksploatacijskim zahtjevima. U tablici 4 prikazan je kemijski sastav materijala obruča kotača tramvaja modela TMK 2300. Uspoređujući vrijednosti iz tablice 1 i tablice 4 može se zaključiti da je materijal obruča kotača TMK 2300 u razredu čelika (engl. *steel grade*) ER9, no s povećanim masenim udjelom ugljika u svrhu povećanja otpornosti na trošenje.

Tablica 1. Maksimalni postotci različitih elemenata [9]

Čelik	MAKSIMALNI UDIO ELEMENTA, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr + Mo + Ni
ER6	0,48	0,4	0,75	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5
ER7	0,52	0,4	0,8	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5
ER8	0,56	0,4	0,8	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5
ER9	0,6	0,4	0,8	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5

Tablica 2. Vrijednost tvrdoće obruča kotača, HB [9]

Čelik	MINIMALNA TVRDOĆA PO BRINELLU, HB	
	KATEGORIJA 1	KATEGORIJA 2
ER6	-	225
ER7	245	235
ER8	245	245
ER9	-	255

Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće obruča kotača, HV [9]

Čelik	MINIMALNA TVRDOĆA PO VICKERSU, HV	
	KATEGORIJA 1	KATEGORIJA 2
ER6	-	227
ER7	252	241
ER8	252	252
ER9	-	258

Tablica 4. Kemijski sastav obruča kotača vozila modela TMK 2300[10]

Kemijski sastav	
C	0,640%
Mn	0,780%
Si	0,100%
P	0,015%
S	0,001%
Cr	0,380%
Mo	0,010%
Ni	0,210%
V	0,001%
Cu	0,020%
Al	0,003%

Karakteristike kotača tračničkih vozila su visoka tvrdoća i čvrstoća, otpornost na trošenje, otpornost na oštećenja pri povišenim temperaturama, otpornost na umor materijala itd. Povišenim masenim udjelom ugljika (što je vidljivo u slučaju obruča kotača tramvaja modela TMK 2300) povećava se čvrstoću obruča što pridonosi otpornosti na trošenje kotača. Primjenom normalizacijskog žarenja te legiranje (s npr. kromom, manganom i vanadijem) osigurava se dovoljno visoka tvrdoća i čvrstoća kotača tramvaja. Tijekom kočenja površina kotača se zagrijava što može dovesti do pukotina nastalih uslijed toplinskih naprezanja. Kako bi se pukotine nastale uslijed toplinskih naprezanja spriječile, obruč se legira sa spomenutim legirajućim elementima. Također, gazna površina mora biti otporna na abrazijsko i kotrljajuće trošenje te na umor materijala kako bi se te izbjegao trenutni lom kotača te produžio životni vijek kotača. Tijelo kotača je otporno na umor materijala kako bi izdržao dinamička opterećenja nastala tijekom vožnje. Kako bi se smanjile vibracije uzrokovane nepravilnom gaznom površinom kotača, oni se reprofiliraju na tokarskom stroju nakon prijeđenih 30 000 – 50 000 km. Nadalje, kako bi se smanjile vibracije umeću se gumeni elementi između obruča i tijela kotača. [11]

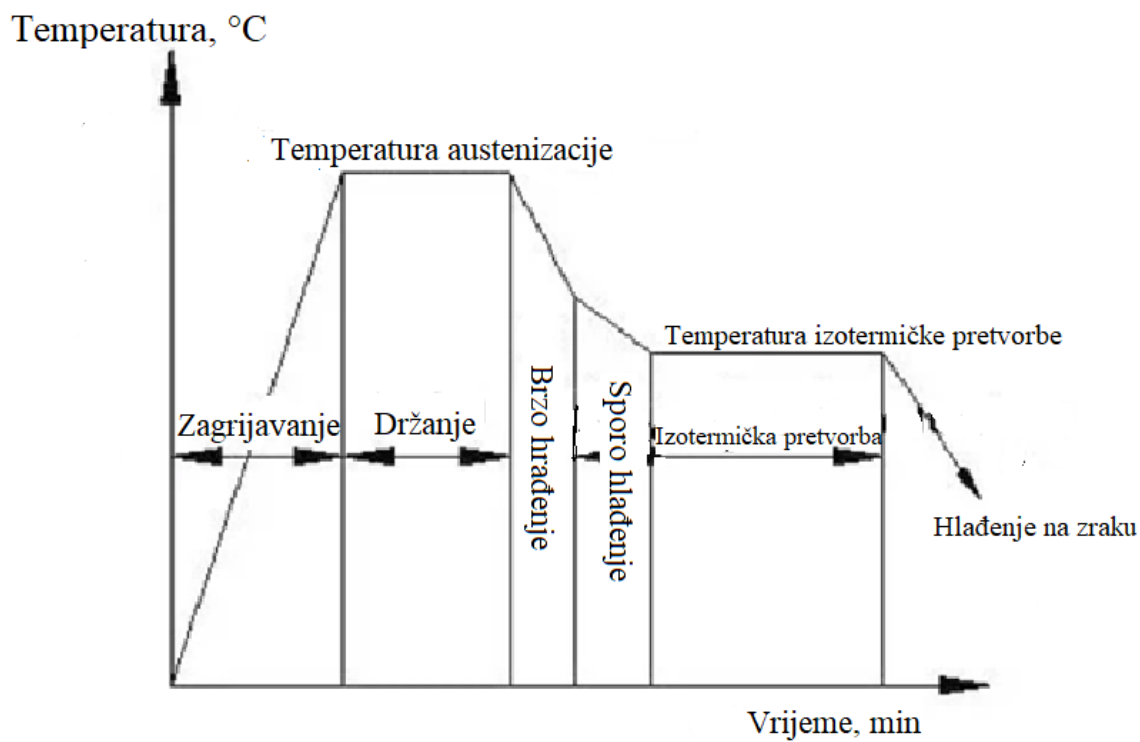
Prema [12] Za izradu kotača se koriste podeutektoidni čelici s 0,65 – 0,75% ugljika s perlitno – feritnom mikrostrukturom u kojoj prevladava perlit. Karakteristike perlita su dobra tvrdoća i otpornost na puzanje, otpornost na trošenje i niža duktilnost zbog cementita u obliku lamela u mekoj matrici ferita. Uspoređujući podatke iz tablice 1 s referentima vrijednostima iz literature

[13], zaključuje se da se radi o ugljičnim čelicima za poboljšavanje. Takve čelike koristimo za izradu elemenata izloženim visokim naprezanjima i karakterizira ih visoka otpornost na trošenje.

Norma HRN EN 13262 propisuje provedbu normalizacijsko žarenje na kotačima tračničkih vozila. Normalizacijsko žarenje je postupak grijanja na temperaturu normalizacije te ohlađivanja na zraku kako bi se postigla jednolična i sitnozrnata mikrostruktura ferita i perlita što znatno povećava žilavost materijala. Kako se kotači proizvode kovanjem, normalizacijsko žarenje služi za eliminaciju nepoželjnih struktura nastalih tijekom deformiranja u hladnom stanju. Kako bi se skratilo vrijeme procesa i omogući kontinuirani proces vođenja čitavog procesa češće se koristi izotermička normalizacija. Izotermička normalizacija se sastoji od zagrijavanja materijala na temperaturu austenizacije, potom brzog hlađenja do temperature

normalizacije (oko 550 °C) te zadržavanje na toj temperaturi neko vrijeme. Zatim se materijal brzo hladi do zone transformacije perlita na kojoj se zadržava, a potom hladi na zraku. [14]

Prikaz izotermičke normalizacije prikazan je na slici 9.



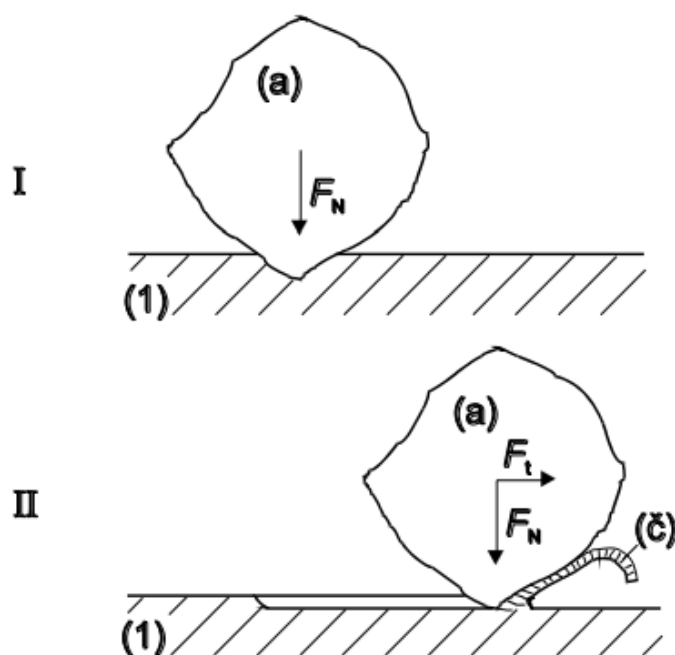
Slika 9. Dijagram izotermičke normalizacije [14]

4. TROŠENJA

Trošenje materijala definira se kao neželjeni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i česticama. Unatoč velikom broju slučajeva trošenja postoje četiri mehanizma trošenja: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Mehanizme trošenja opisuju se jediničnim događajima, odnosno slijedom zbivanja koji dovode do odvajanja jedne čestice trošenja s trošne površine. [15]

4.1. Abrazijsko trošenje [15]

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, što možemo vidjeti na slici 10.

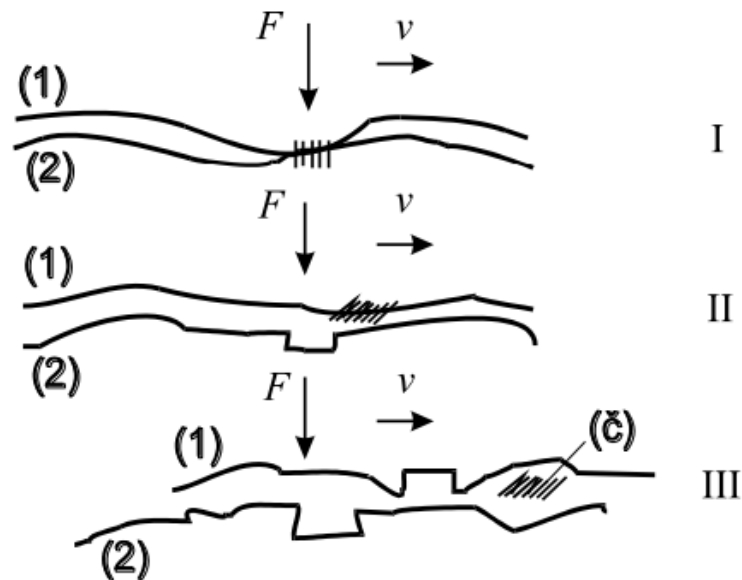


Slika 10. Jedinični događaj abrazije [15]

Navedeni jedinični događaji abrazije se sastoje do dvije faze: prva faza obuhvaća prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja, F_N ; te druga faza obuhvaća istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja, F_t . [15]

4.2. Adhezijsko trošenje [15]

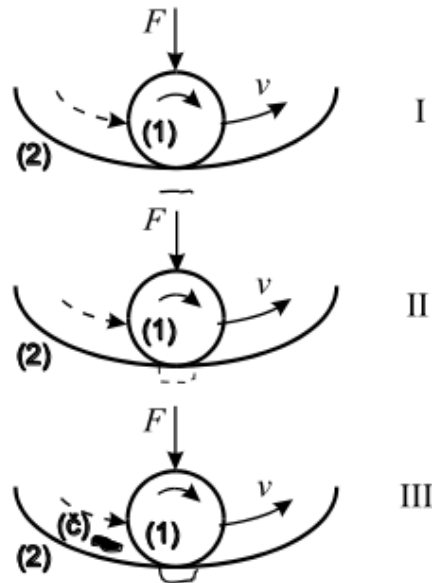
Adhezijsko trošenje podrazumijeva prijelaz materijala s jedne klizne površine na drugu pri relativnom gibanju zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije ima tri faze, prikazane na slici 11. Prva faza se sastoji od nastajanja adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina. Duga faza podrazumijeva raskidanje adhezijskog spoja, a čestica trošenja ostaje spontano nalijepljena na jednom članu kliznog para. Nadalje, treća faza se sastoji od otkidanja čestica, što se ne mora nužno dogoditi u svim slučajevima.



Slika 11. Jedinični događaj adhezije [15]

4.3. Umor površine [15]

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena napreznja te se sastoji od tri jedinična događaja, prikazana na slici 12.

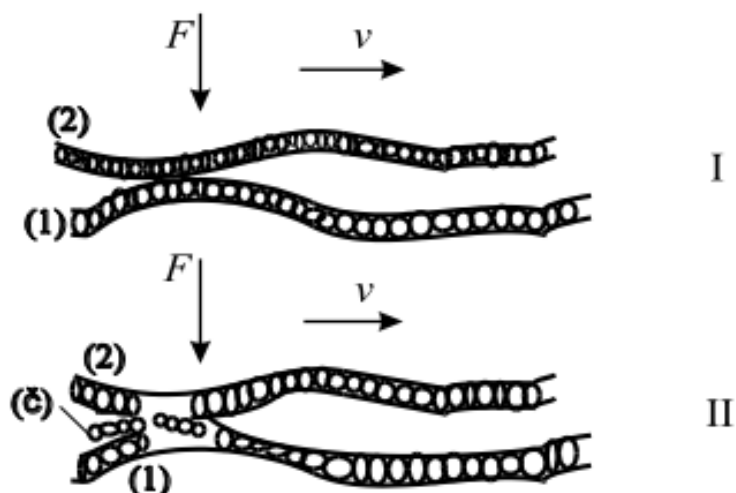


Slika 12. Jedinični događaj umora površine [14]

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertz-ovo naprezanje) uvijek ispod same površine. Ovo nazivamo i faza inkubacije jer nema odvajanja čestica. U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu te nadalje iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. U trećoj fazi dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje).

4.4. Tribokorozija [15]

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem te ga čine dvije faze jediničnih događaja, koje možemo vidjeti na slici 13. Prva faza podrazumijeva stvaranje sloja produkta korozije, a druga mjestimično razaranje sloja produkta korozije.



Slika 13. Jedinični događaj tribokorozije [15]

4.5. Mehanizmi trošenja specifični za tribološki par kotač-tračnica [16]

Kod tribo para kotač – tračnica javlja se kotrljajuće trošenje čiji je dominantni mehanizam trošenja umor površine. Površina između tribološkog para kotača i tračnice je relativno mala i odgovorna je za prijenos cjelokupnog opterećenja vozila. Na temelju toga zaključuje se da je sila trenja vrlo visoka u tome području. Nadalje, velika sila trenja dovodi do naglog povećanja temperature tijekom kočenja i proklizavanja kotača u zavojima. Temperature tada obično dostižu nekoliko stotina stupnjeva celzijusa, a u ekstremnim slučajevima i preko 1000°C. Takvi uvjeti rada su polazište za trošenje kotača uzrokovanim trenjem i umorom površine. Kotači se po tračnicama mogu kretati kotrljanjem ili klizanjem (u slučaju kočenja ili vožnje u zavoju), a poznato je da je trenje kotrljanja manje od trenja klizanja, stoga je poželjno trošenje jest kotrljajuće trošenje. No, eksploatacijski uvjeti, odnosno greške u profilu kotača i u mikrostrukтури kotača onemogućuju da jedino trošenje bude kotrljajuće trošenje ovom tribološkom paru.

Najčešći mehanizam trošenja kotača tramvaja je umor površine, a procesi trošenja u kojim je umor površine dominantan nazivamo „rupičenje ili jamičenje“ (engl. *spalling ili macropitting*) i „ljuskanjem“ (engl. *shelling*). Kada je ukupna gazna površina dulji vremenski period zagrijana na temperaturu iznad 315 °C dolazi do pada vrijednosti tvrdoće i stvaranja toplinskog zaostalog naprežanja. Takvo zaostalo naprežanje, u općenitom slučaju tribološkog para kotač – tračnice, uzrokuje pukotine koje daljnjom vožnjom propagiraju u površinu

materijala i rastu paralelno s površinom. Ovaj proces trošenja naziva se ljuskanje ili *shelling*.

Primjer ljuskanja prikazan je na slici 14.



Slika 14. Primjer „ljuskanja“ (engl. *shelling*)

Drugi spomenuti tip trošenja je rupičenje (engl. *spalling*). Kod rupičenja, zbog trenja koji nastaje kočenjem i proklizavanjem u zavojima (češće manjeg radijusa), površina kotača je kratko (par sekundi) zagrijana na temperaturu veću od 730 °C te se daljnjom vrtnjom brzo hladi. Zbog toga dolazi do pretvorbe perlita u čvrst i krhak martenzit koji se daljnjom vožnjom ljušti u obliku plitkih ljuskica s površine gazne površine. Rupičenje je opasniji jer prodire dublje u materijal te izaziva dublje rupe, odnosno dolazi do ispadanja čestica trošenja iz unutrašnjosti materijala. Na površini kotača prikazane na slici 15 vidljive su crne jamice na uzorku kotača koji će se analizirati u eksperimentalnu dijelu završnog rada.



Slika 15. Jamice nastale rupičanjem (engl. *spalling*)

Bitno je napomenuti da voda, premda ima pozitivan učinak lubrikacije tračnica, ima vrlo loš utjecaj na kotače gradskih tramvaja. Voda se kotrljanjem kotača po tračnicama utiskuje u inicijalne pukotine pod vrlo visokim tlakom i tako uzrokuje brži razvoj oštećenja površine.

Gazna površina oštećena umorom površine je vrlo nestabilna i mjesto je gdje vrlo lako nastaje adhezijski spoj između materijala kotača i tračnice koji su u dodiru. Takav adhezijski spoj najčešće nastaje proklizavanjem u zavojima. Nadalje, otkinuta čestica nastala adhezijom počinje se ponašati kao abrazivna čestica koja uzrokuje abrazivno trošenje kotača i tračnice. [16]

5. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Istraživanje provedeno na Tehničkom sveučilištu u Poznańu [17] ispituje povezanost mehanizma trošenja, oblika kotača te uvjeta vožnje. Potvrđuje kako velika većina oštećenja gazne površine nastaju zbog proklizavanja kotača u zavoju, naglog kočenja i grešaka u geometriji profila kotača. Rezultati istraživanja tvrde da su prevladavajući mehanizmi trošenja kotača: umor površine, adhezijsko trošenje i abrazijsko trošenje. Navode kako bi se smanjilo trošenje kotača profil obruča treba biti što pravilniji, odnosno treba osigurati kotrljajuće gibanje kotača bez proklizavanja. Kako bi se osiguralo kotrljajuće gibanje kotača preporučeno je podmazivanje tračnica, reprofiliranje kotača na tokarskom stroju u trenutku kada dijametar kotača dosegne veličinu 520 mm te smanjiti udarna opterećenja između kotača i tračnice.

Istraživanje u radu [18] ističe važnost većeg radijusa zavoja u smanjenju proklizavanja kotača, a time i smanjenju trošenja te produživanja životnog vijeka kotača. U zavojima malog radijusa proklizavanje kotača dovodi do većih vibracija, a time i bučnije i manje ugodne vožnje. Pokazuje se kako s većim faktorom trenja, μ povećava se i trošenje kotača na: prvom vratilu prvog postolja i kotača na zadnjem vratilu zadnjeg postolja. Isto tako navodi kako je trošenje kotača na unutrašnjoj strani osovine u zavoju veće nego kotača na vanjskoj strani osovine.

U radu [19] istražuje se utjecaj nepravilnosti radijusa profila kotača u ubrzanom trošenju kotača. Navode da zbog umora površine pojavljuje se ljuskanje (engl. *shelling*) te jamičanje površine (engl. *spalling*). Zbog načina vožnje u gradovima dolazi do čestog kočenja koji navode da dovodi do kliznog trošenja kotača. Nadalje takva vrsta trošenja može dovesti do nastajanja ravnog dijela na gaznoj površini kotača. Drugi razlog ravnog dijela gazne površine kotača je neujednačena mikrostruktura gazne površine. Zadnji razlog koji navode za nepravilni oblik kotača je tehnološkog podrijetla (nastao tokarenjem tijekom reprofiliranja). Ravni dio u profilu gazne površine kotača dovodi do stvaranja intenzivnih vibracija i većeg osovinskog pritiska na prugu što vodi do bržeg trošenja kotača i pruge.

Istraživanje u radu [20] analizira brzinu trošenja na reprofiliranom kotaču. Reprofiliranje kotača je proces kojim se na tokarilici uklanjaju nepravilnosti na gaznoj površini, odnosno obnavlja se originalni profil gazne površine kotača. Navode da je gubitak materijala s kotača veći nakon prvog reprofiliranja zbog smanjenjem tvrdoće gazne površine kotača te zbog porasta zaostalih naprezanja nastalih tokarenjem. Nadalje, analizom geometrije profila gazne

površine, odnosno mjerenjem promjera kotača D , zaključuju kako je trošenje kotača na srednjem postolju najmanje, što potvrđuje rezultate istraživanja.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Prvi željeznički kotači rađeni su od drveta i kovanog željeza. Industrijskom revolucijom počinje se koristiti lijevano željezo zbog veće čvrstoće i otpornosti trošenju. S razvojem brzih vlakova počinje i razvoj novih skupina čelika. Razvija se strojogradbeni čelik za željeznicu, odnosno čelik oznake ER. Danas je najčešći korišten materijal za izradu kotača tračničkih vozila čelik ER7 i ER8. [21]

Eksperimentalni dio ovog rada sastoji se od mjerenja dimenzija i profila gazne površine istrošenog kotača te usporedbe dobivenih rezultata s dimenzijama i profilom gazne površine novog kotača. U radu se analizirala mikrostruktura gazne površine kotača i izmjerena je tvrdoća uzorka kotača.

Obruč kotača na kojem je provedena analiza je prešao otprilike 150 000 km, čime je ostvario puni životni vijek te je prikazan na slici 16. Njegov kemijski sastav je prikazan u tablici 4.

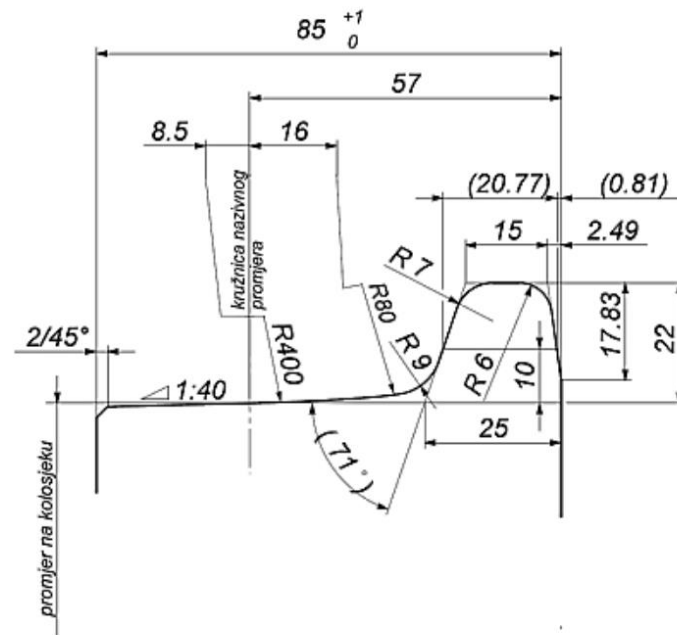


Slika 16. Obruč kotača tramvaja modela TMK 2300

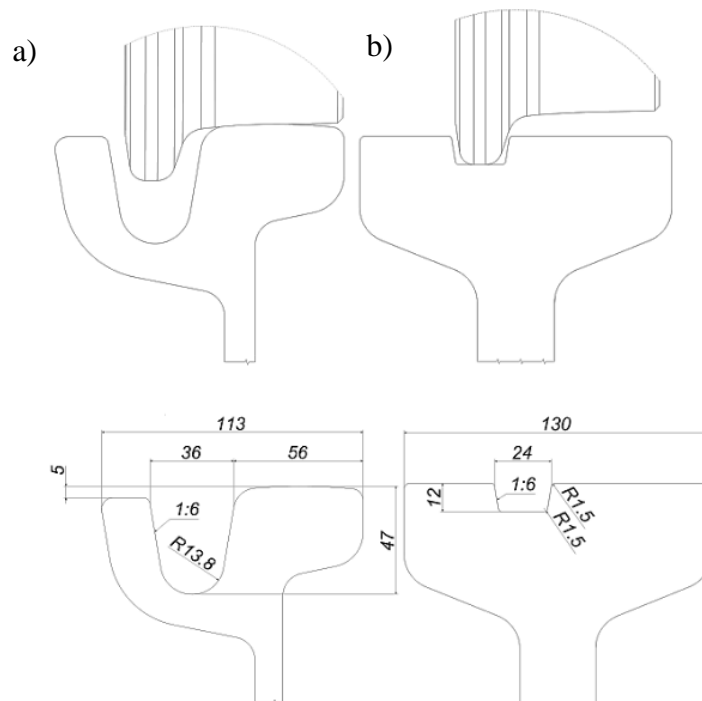
6.1. Profil i dimenzije gazne površine kotača

Profil i dimenzije novog kotača niskopodnog tramvaja modela TMK 2300 prikazana je na slici 17. Kolosijek tramvajske mreže u gradu Zagrebu sastoji se od Vignjolovih tračnica s

dubokim žlijebom RI60 te tračnica s plitkim žlijebom VKD180/105. Profili tračnica, kao i međusobni položaj kotača i tračnica, za oba tipa tračnica, prikazani su na slici 18. [22]



Slika 17. Profil i dimenzije gazne površine novog kotača tramvaja TMK 2300 [22]



Slika 18. Dimenzije profila tračnica u gradu Zagrebu:

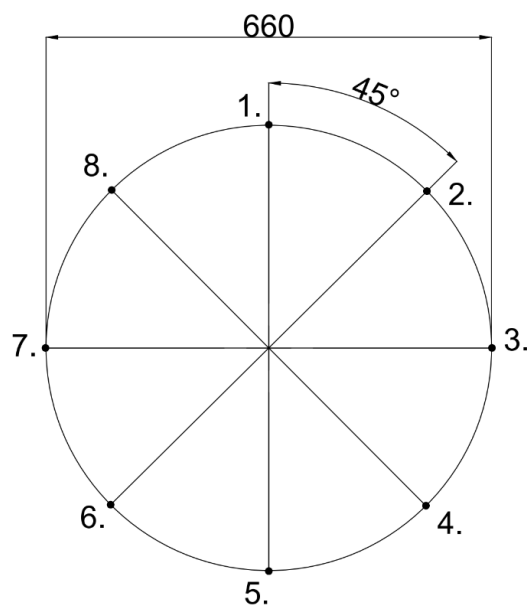
- a) s dubokim žlijebom, RI60;
- b) s plitkim žlijebom, VKD 180/105 [22]

Mjerenje profila gazne površine istrošenog kotača modela tramvaja TMK 2300 prikazano je na slici 19. Mjerenje se provodi pomoću uređaja - mjerke za mjerenje obruča kotača tračničkih vozila. Mjerka se sastoji od pomičnih dijelova s linearnom skalom koji omogućuju tijekom jednog mjerenje bilježenje visine vijenca V_v , debljine vijenca D_v i istrošenosti vijenca (nagib vijenca) O_v .



Slika 19. Mjerenje dimenzija profila kotača

Mjerenje profila i geometrije istrošene gazne površine kotača tramvaja modela TMK 2300 izmjereno je na osam točaka. Na slici 20 prikazana je skica kotača s označenim promjerom novog kotača 660 mm te su prikazane točke na kojima se provodilo mjerenje. Međusobna udaljenost dvije mjerne točke je 45° . Rezultati mjerenja profila i geometrije istrošenog kotača prikazani su u tablici 5 te su uspoređeni s profilom i dimenzijama gazne površine novog kotača.

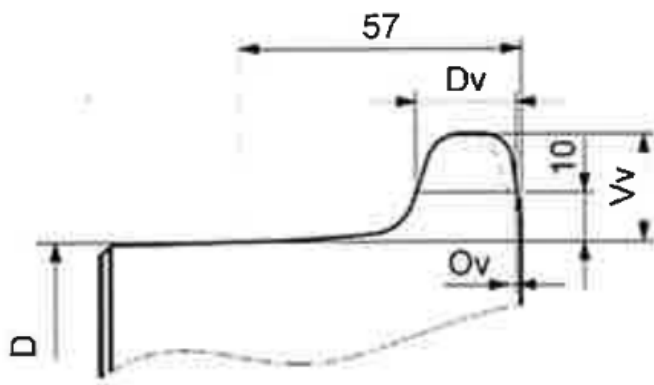


Slika 20. Plan mjerenja profila i geometrije gazne površine kotača

Tablica 5. Rezultati mjerenja profila i geometrije kotača

Broj mjerenja, i	Promjer kotača D_i , mm	Visina vijenca $V_{v,i}$, mm	Debljina vijenca $D_{v,i}$, mm	Istrošenost vijenca $O_{v,i}$, mm
1	653	20,7	15	3,6
2	650	19,3	16,9	0,6
3	653	20,2	16,8	3,5
4	653	19	20,5	-0,6
5	653	20	17,1	1,7
6	652	19,8	17,5	1,5
7	654	20,4	19,7	0,9
8	655	20,2	19,4	0,9
Prosjek	652,88	19,95	17,863	1,513
Dimenzije novog kotača	660	22	20,77	0

Profil kotača s označenim dimenzijama promjera kotača D , visine vijenca V_v , debljine vijenca D_v i istrošenost vijenca O_v prikazani su na slici 21.



Slika 21. Profila kotača [23]

6.1.1. Analiza mjerenja profila i dimenzija gazne površine kotača

U tablici 6 prikazane su razlike u izmjerenim vrijednostima profila i dimenzija gazne površine istrošenog kotača i novog kotača. Izračunate su razlike vrijednosti promjera kotača, visine vijenca, debljine vijenca i istrošenosti vijenca

Tablica 6. Razlike izmjerenih vrijednosti profila i dimenzija istrošenog kotača i vrijednosti novog kotača

BROJ MJERENJA	$D_0 - D_i$	$V_{v,0} - V_{v,i}$	$D_{v,0} - D_{v,i}$	$O_{v,0} - O_{v,i}$
1	-7	-1,3	-5,77	3,6
2	-10	-2,7	-3,87	0,6
3	-7	-1,8	-3,97	3,5
4	-7	-3	-0,27	-0,6
5	-7	-2	-3,67	1,7
6	-8	-2,2	-3,27	1,5
7	-6	-1,6	-1,07	0,9
8	-5	-1,8	-1,37	0,9

Promjena promjera kotača računa se prema jednadžbi :

$$\Delta D = D_0 - D_i \quad (1)$$

gdje je: ΔD – promjena promjera kotača, mm

D_0 – promjer novog kotača, mm

D_i – promjer kotača na mjerenju broja i, mm

Najviša vrijednost promjene promjera kotača je u 2. točki mjerenja, 10 mm.

Korištenjem istog principa izračuna promjene vrijednosti kao u jednadžbi (1) izračunate su i promjene kod visine i debljine te promjene kod istrošenosti vijenca. Zaključuje se da na četvrtoj točki mjerenja visina vijenca V_v se najviše promijenila, odnosno promjena te dimenzije je 3 mm. Nadalje na prvoj točki mjerenja najveća je promjena debljina vijenca D_v te iznosi 7,77 mm, a najveća promjena istrošenosti vijenca O_v iznosi 3,6 mm što je isto tako izmjereno na prvoj točki mjerenja.

Dimenzije profila i geometrije kotača najviše su se promijenile na točki gdje se provodilo prvo mjerenje. Takvo trošenje kotača je prouzročeno proklizavanjem kotača u zavoju i greškama u proizvodnji. Greške u proizvodnji dovode do defekata u pravilnosti geometrije kotača što može pridonijeti bržem trošenju gazne površine kotača. Na slici 22 prikazano je odstupanje osi rotacije kotača (siva kružnica) od osi rotacije tokarskog stroja (žuta kružnica) što dovodi do nepodudaranja osi kotača s osi rotacije tijekom vožnje. To uzrokuje veće vibracije, neravnomjerno trošenje gazne površine kotača i smanjenje stabilnosti tijekom vožnje. [19]



Slika 22. Nepravilnost u geometriji kotača uzrokovano obradom [19]

6.2. Priprema uzorka

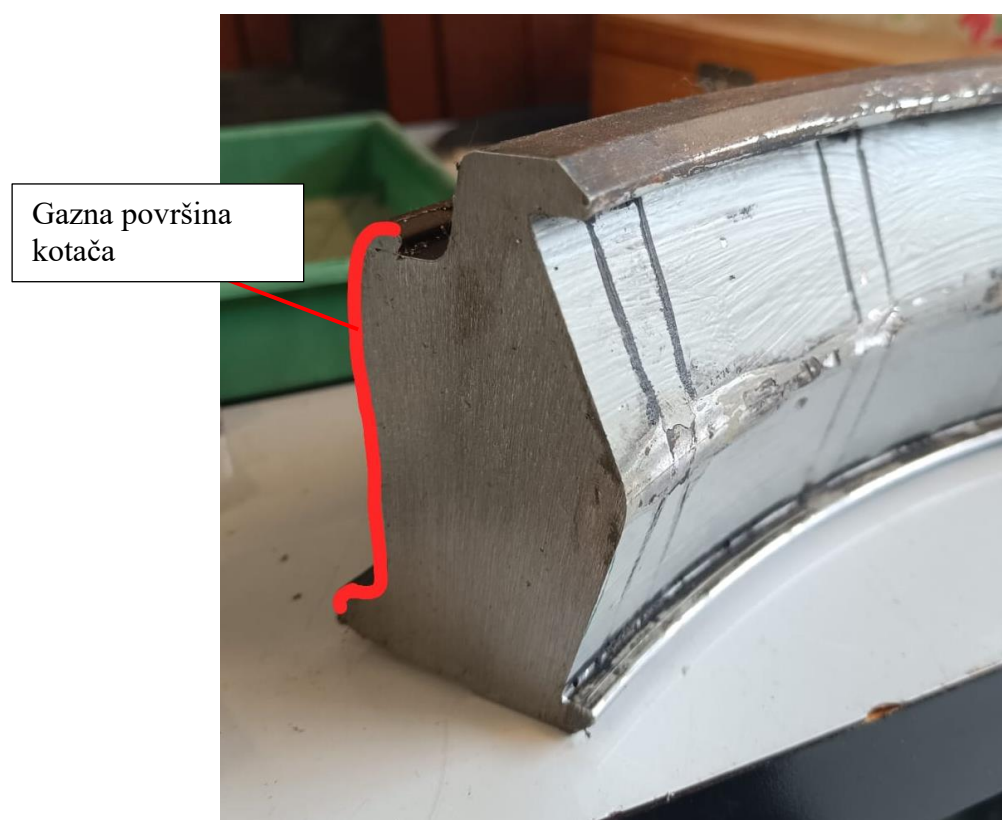
Kako bi se analizirala mikrostruktura kotača tramvaja, potrebno je pripremiti uzorak za mikroskopiranje. Priprema uzorka sastoji se od izrezivanja uzorka do željenih dimenzija, brušenja, poliranja i nagrivanja.

Na slici 23 je prikazan obruč kotača modela tramvaja TMK 2300 i označeno mjesto rezanja obruča kotača. Iz isječka obruča kotača prikazanog na slici 24 izrezan je ispitni uzorak

prikladan za daljnje rukovanje. Na slici 24 crvenom linijom označena je gazna površina obruča kotača. Kako bi se izbjegao unos topline, a time i promjena mikrostrukture, postupak rezanja se provodi uz dovođenje vodenog mlaza koji hladi uzorak.

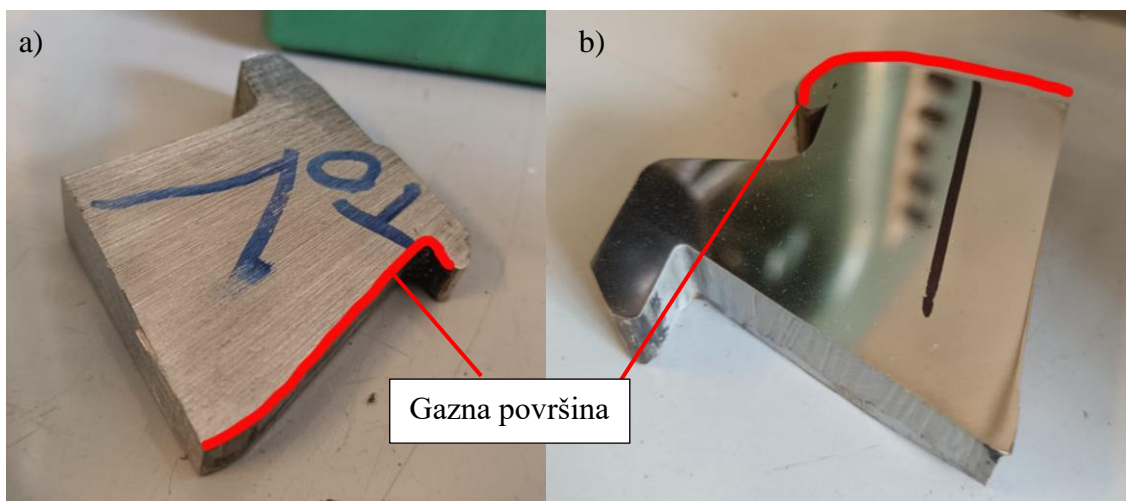


Slika 23. Obruč kotača tramvaja modela TMK 2300 i označeno mjesto rezanja obruča kotača



Slika 24. Poprečni presjek površina kotača modela tramvaja TMK 2300

Na slici 25 prikazani su izrezani ispitni uzorci obruča modela tramvaja TMK 2300 na kojima je crvenom linijom označena gazna površina. Na slici 25 a) prikazana je ispitni uzorak na kojem je provedeno mjerenje tvrdoće, a na slici 25 b) prikazan je ispitni uzorak. na kojem je ispititana mikrostruktura.



Slika 25. Izrezani uzorci obruča kotača modela tramvaja TMK 2300:

- a) uzorak korišten za mjerenje tvrdoće;
- b) uzorak korišten za analiziranje mikrostrukture

Brušenje se provodi kako bi se uklonile nečistoće, oksidi i deformirani sloj s površine uzorka s brusnom trakom koja se okreće brzinom 300 okretaja po minuti uz neprestano hlađenje vodom. Korišten je brusni papir od grublje do finije granulacije, 80, 320, 600, 1000, 2400, 4000.

Poliranjem se postiže zrcalnu površinu uzorka, bez nabora i neravnina. Postupak se provodi pomoću tkanine i dijamantne paste. Uzorak se polira brzinom od 150 okretaja po min uz lubrikant umjesto vode. Postupak se sastoji od dva koraka. U prvom se koraku koristi tkanina MD MOL i dijamantna pasta s veličinom abraziva 3 μm , a u drugom koraku tkanina MD CHEM i dijamantna pasta s veličinom abraziva 0,03 μm .

Nakon poliranja slijedi postupak nagrizanja. Nagrizanje je postupak selektivnog korodiranja površine materijala uranjanjem površine uzorka u kiselinu kako bi se uklonio deformirani

sloj, metalne i nemetalne nečistoće i dobila površina određenog reljefa. Postupak se provodi uranjanjem uzoraka u sredstvo za nagrizanje, odnosno u 3% nital, a potom se uranja u vodu kako bi se prekinula kemijsku reakciju. Ispitni uzorak prikazan je na slici 26.



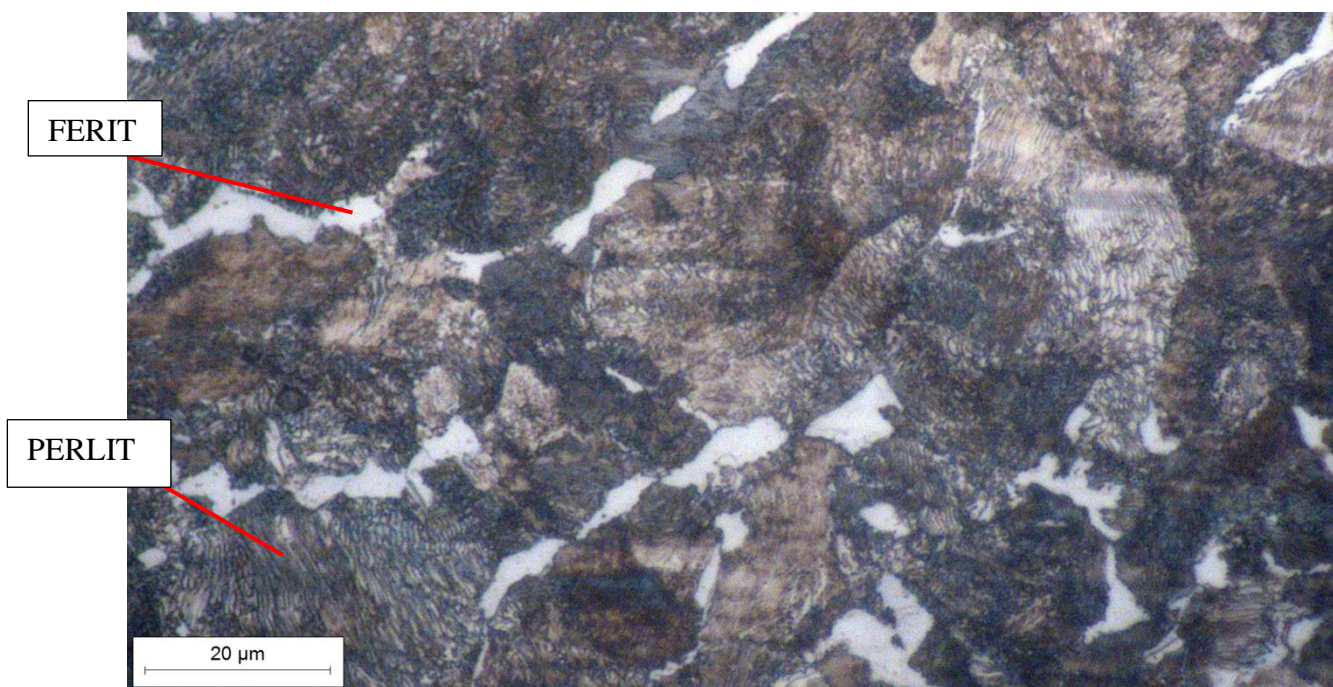
Slika 26. Ispitni uzorak

6.3. Analiza mikrostrukture

Nakon postupka pripreme uzorka provedeno je ispitivanje mikrostrukture uzorka na invertnom metalografskom mikroskopu OLYMPUS serije GX 51. Na slikama 27 i 28 prikazana je mikrostruktura jezgre uzorka pri različitim povećanjima.



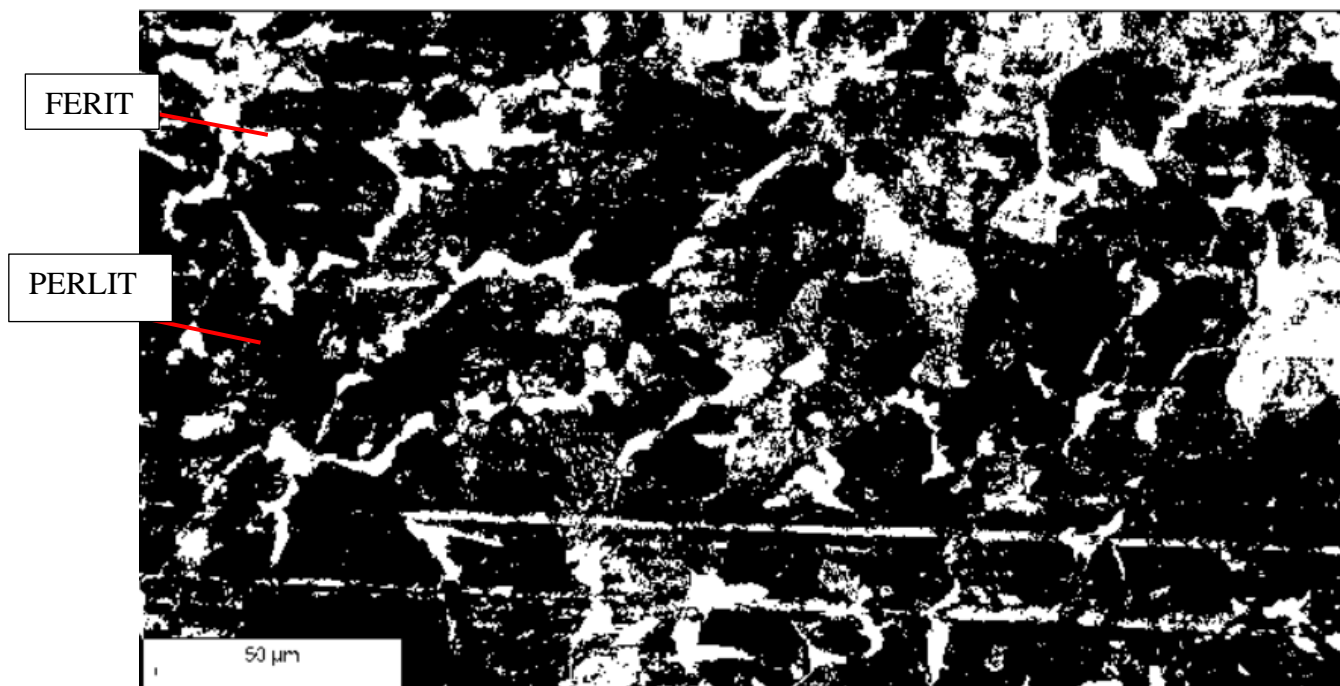
Slika 27. Sredina uzorka, povećanje 200 x



Slika 28. Sredina uzorka, povećanje 1000 x

Na slikama snimljenim mikroskopom vidljiva je perlitno feritna mikrostruktura.. Prema usporedbi s literaturom [24], na slici 27 crvenim kružićem su označena mjesta gdje su vidljivi izlučeni MnS uključci. [24]

Pomoću računalnog softvera ImageJ određen je volumni udio pojedinih faza. Na slici 29 prikazana je obrađena slika sredine uzorka, gdje je crnom bojom prikazana perlitna faza, a bijelom bojom feritna faza. Na slici 30 prikazan je zaključak o udjela bijele faze, odnosno volumni udio ferita u mikrostrukuri uzorka kotača modela tramvaja TMK 2300. Analizom rezultata dobiven je udio ferita (svijetle faze) u mikrostrukuri koji iznosi 26%, dok volumni udio perlita (crne faze) iznosi 74%.



Slika 29. Sredina uzorka uvećana 500 x nakon računalne obrade [25]

Summary

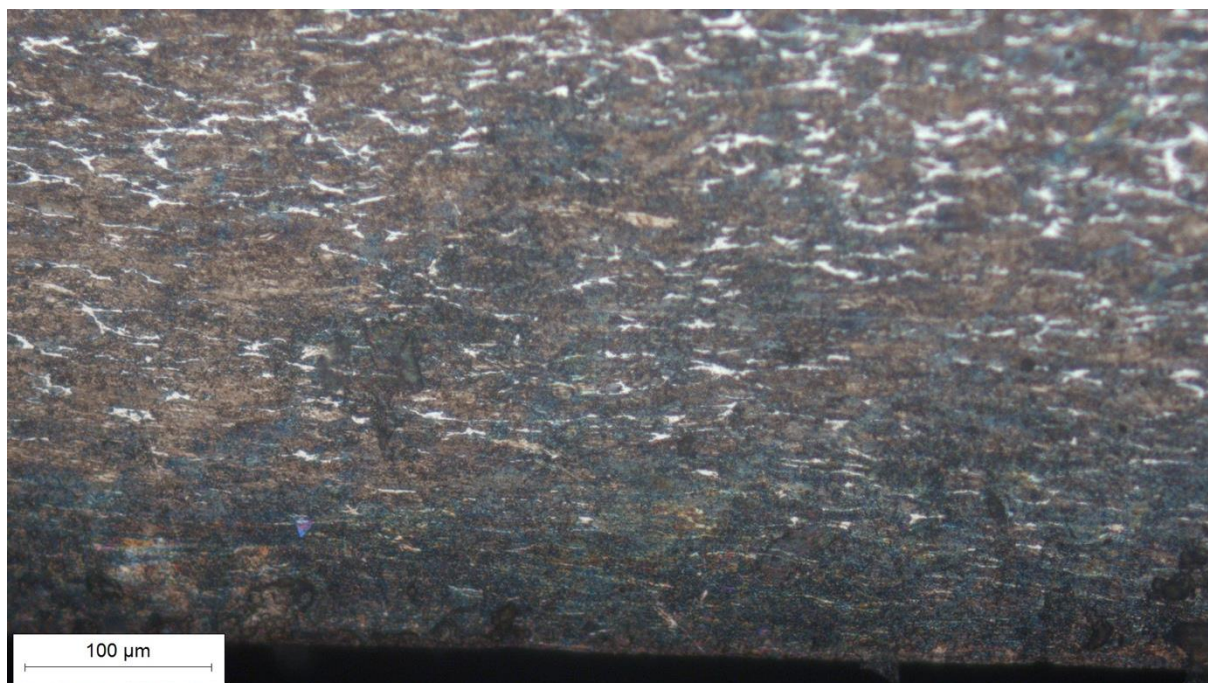
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
sredina, 500x-1.JPG	4366	10011.567	2.293	26.106	255

Slika 30. Volumni udio feritne faze u uzorku [25]

Na slici 31 i 32 prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka ruba gaznog dijela obruča kotača.



Slika 31. Rub uzorka, povećanje 200 x



Slika 32. Rub uzorka, povećanje 50 x

Na slikama 31 i 32 vidljiva je plastična deformacija u rubnom dijelu gazne površine, odnosno ugnječena mikrostruktura nastala stalnim kotrljanjem kotača. Plastičnom deformacijom

povećava se tvrdoća površine gazne površine čime se povećava i otpornost na abrazijsko trošenje, no time se ubrzava pojava procesa trošenja ljuskanjem (engl. *shelling*). [16]

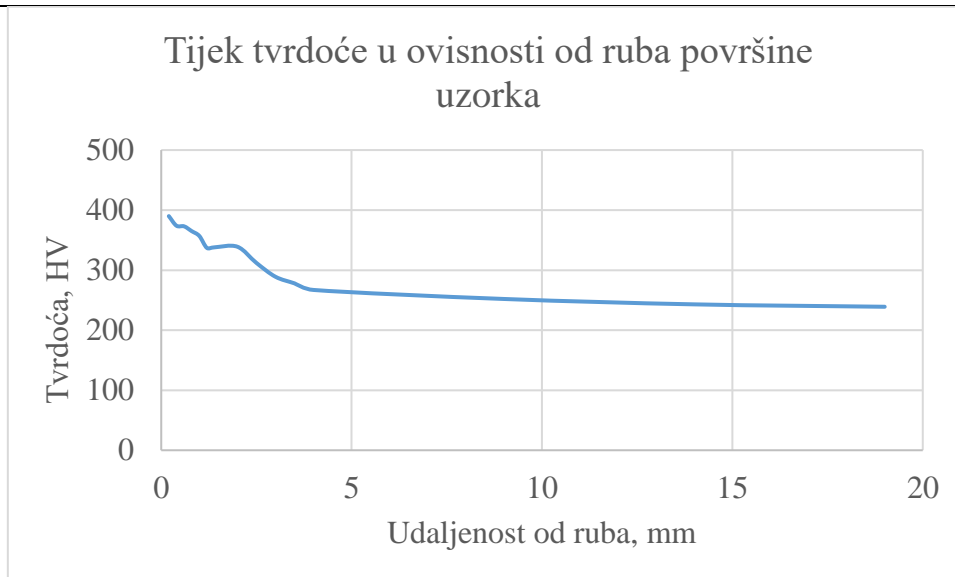
6.4. Analiza mjerenja tvrdoće uzorka

Ispitivanje tvrdoće provedeno je tvrdomerom PMT-3Y42. Pri ispitivanju se koristi se istostrana četverostrana dijamantna piramida kao penetratora. Mjerenje se provodi u trajanju od 15 sekundi. Rezultati mjerenja kada je penetrator opterećen silom 9,807 N prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće HV1

R.br.	UDALJENOST OD RUBA, mm	HV1
1	0,2	390
2	0,4	374
3	0,6	373
4	0,8	365
5	1,0	357
6	1,2	337
7	1,4	338
8	2,0	339
9	2,5	312
10	3,0	289
11	3,5	278
12	4,0	267
13	9,0	252
14	14,0	243
15	19,0	239

Na slici 33. prikazan je dijagram tijeka tvrdoće u ovisnosti od ruba površine ispitnog uzorka gaznog dijela obruča kotača tramvaja prema jezgri materijala.



Slika 33. Grafički prikaz tijeka pada tvrdoće ovisno o udaljenosti od ruba gazne površine

Prema podacima iz tablice 7 i dijagrama na slici 33 vrijednost tvrdoće na rubu uzorka viša je od tvrdoće jezgre ispitnog uzorka. Izmjerena vrijednost tvrdoće ruba ispitnog uzorka je 390 HV1 na udaljenosti 0,2 mm od ruba, a najmanja vrijednost tvrdoće je 239 HV1 na udaljenosti 19 mm od ruba uzorka što predstavlja povećanje od 63% vrijednosti tvrdoće jezgre. Za pretpostaviti je da je do povećanja vrijednosti tvrdoće u gaznom dijelu obruča kotača došlo zbog plastične deformacije pri kotrljanju kotača po pruži. Prema tijeku krivulje raspodjele tvrdoće u dijagramu na slici 33 povišene vrijednosti tvrdoće zadržavaju se do 4,5 mm od ruba poprečnog presjeka ispitnog uzorka.

Norma HRN EN 13262 propisuje da na udaljenosti od 15 mm od ruba gazne površine tvrdoća ne smije biti manja od 255 HB, odnosno 258 HV, što je prikazano u tablicama 2 i 3. Taj se uvjet odnosi za drugu kategoriju vozila (vozila koja postižu brzinu manju od 200 km/h) te za ER8. Budući materijal obruča kotača modela tramvaja TMK 2300 sadrži maseni udio ugljika 0,64% smješta se u razred čelika ER9. Za čelike ER9 ne postoji propisana donja granica tvrdoće za vozila koja postižu brzinu do 200 km/h, pa će se razmatrat kriteriji norme HRN EN 13262 o minimalnoj vlačnoj čvrstoći R_m za čelike ER9, koji je prikazan u tablici 8.

Tablica 8. Mehanička svojstva [9]

ČELIK	OBRUČ KOTAČA		
	R_{eH} , (N/mm ²)	R_m , (N/mm ²)	A_5 , %
ER6	≥500	780/900	≥15
ER7	≥520	820/940	≥14
ER8	≥540	860/980	≥13
ER9	≥580	900/1050	≥12

Prema istraživanju [24] vlačna čvrstoća obruča kotača tramvaja modela TMK 2300 je 945 N/mm² što ispunjava kriterij norme HRN EN 13262 da vlačna čvrstoća mora biti veća od 900 N/mm².

7. ZAKLJUČAK

Pri eksploataciji sve su konstrukcije podložne procesu trošenja, pa tako i obruč kotača tramvaja, odnosno njegova gazna površina. Primjenom interdisciplinarnog znanja tribologije produžuje se životni vijek kotača i povećava sigurnost u vožnji. Na temelju provedenih ispitivanja možemo zaključiti:

- Prevladavajuća vrsta trošenja u tribološkom paru kotač – tračnice je kotrljajuće trošenje.
- Zbog naglog kočenja, proklizavanja kotača u zavoju i zbog grešaka tijekom obrade dolazi do većeg trošenja profila kotača.
- Mikrostruktura uzorka kotača tramvaja modela TMK 2300 je perlitno – feritna s MnS uključcima. Volumni udio perlita je 74%, a ferita 26 %.
- Izmjerena vrijednost tvrdoće ruba ispitnog uzorka kotača je 390HV1, dok je izmjerena vrijednost tvrdoće jezgre 239HV1.
- Obruč kotača zadovoljava normu HRN EN 13262 za najmanju vlačnu čvrstoću koju mora postići čelik ER9.

Rezultati ukazuju na važnost kontinuiranog praćenja stanja kotača i redovitog održavanja kako bi se osigurala njihova dugotrajnost i sigurnost u vožnji.

LITERATURA

- [1] <https://www.trainhistory.net/railway-history/tram>, datum pristupa: 20.11.2024.
- [2] <https://www.throughouthistory.com/?p=4189>, datum pristupa: 20.11.2024.
- [3] <https://web.archive.org/web/20100130060221/http://www.zet.hr/tramvaj/povijest.aspx>, datum pristupa: 1.12.2024.
- [4] Walker J.: Human Transit: How Clearer Thinking about Public Transit Can Enrich Our Communities and Our Lives; Island Press; 2011.
- [5] <https://www.zagreb.hr/prvi-kratki-niskopodac/21039> , datum pristupa: 17.12.2024.
- [6] Glavaš Č., Gršković I., Križanović i., Kroflin D., Šalamon K.: Tehnički opis tramvajskog vozila TMK2300; Končar– Električna vozila d.d.; Zagreb, 2018.
- [7] <https://www.prometna-zona.com/kolni-slogovi/> , datum pristupa 27.12.2024.
- [8] <https://www.northernindmfg.com/axle-parts-manufacturing/> , datum pristupa: 27.12.2024.
- [9] Oprema za željeznice – Osovinski sklopovi i okretna postolja – Kotači, Zahtjevi za proizvod (EN 13262:2004+A2:2011); Hrvatski zavod za norme (HZN); Zagreb, 2011.
- [10] Perečinec I., Wheel tyre – forging, Končar – električna vozila, Zagreb, 2012.
- [11] Okagata, Y.: Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects; Osaka; 2013.
- [12] Chudzikiewicz A., Korzeb J.: Simulation study of wheels wear in low-floor tram with independently rotating wheels. Archive of Applied Mechanics; 2018.
- [13] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [14] Landek D.: Toplinska obrada, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2022.
- [15] Grilec K., Jakovljević S., Marić G., Trbiologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [16] Ł. Wojciechowski, B. Gapiński, M. Paczkowska, T.G. Mathia: Investigations of the complex wear mechanisms of tram wheel tyres, Wear, poglavlja 500-501; Elsevier, 2022.
- [17] Słowiński M. S., The characteristics of the selected types of wheel wear and their effect on the rail vehicle – track interaction, Rail Vehicles, Pozanj, 2022

- [18] Zhang Z., Yang X., Zhang Y., Miao C., Cui Y., Shen J., Wheel-rail wear characteristics of a modern tram passing curves with small radius. Archives of Transport, Rail Transit and Underground Space Research Institute, Shanghai, 2024
- [19] Staškiewicz, T., Firlik, B., Out-of-round tram wheels – current state and measurements, Poznan University of Technology, Poznań, 2018.
- [20] Michalska Cwiek J., Chwiek J., Assessment of tram wheels, Department of Transport and Aviation Engineering, Silesian University of Technology, Katowice, 2023.
- [21] <https://forgingday.com/forged-wheel-railway-system/what-material-are-train-wheels-made-from/> , posjećeno: 30.1.2025.
- [22] Pribić S., Perečinec K., Vinković N.: Trošenje kotača na zagrebačkom niskopodnom tramvaju; Končar – Električna vozila d.d., Zagreb, 2018.
- [23] Premužić S.: Mjerni list: Defektacija kotača – TMK 2303 LT, Končar – Električna vozila d.d., Zagreb, 2022.
- [24] Cvrtila T., Izvještaj o ispitivanju, Laboratorij za mehanička i tehnološka ispitivanja, Končar institut za elektrotehniku, Zagreb, 2014.
- [25] Softverski paket ImageJ