

# UPRAVLJANJE ŠINSKIM DEFJEKTIMA USLED ZAMORA MATERIJALA

## MANAGEMENT OF RCF RAIL DEFECTS

UDK: 625.143.3:539.431

Pregledni rad

Prof. dr Zdenka POPOVIĆ, dipl. građ. inž.,<sup>1)</sup>

Doc. dr Luka LAZAREVIĆ, mater inž. građ.,<sup>2)</sup>

Milica VILOTIJEVIĆ, mater inž. građ.<sup>3)</sup>

### REZIME

*Za efikasno upravljanje životnim vekom šine, Upravljač infrastrukture treba da prati habanje šinskog čelika i razvoj defekata na voznoj površi glave šine tokom vremena. Na osnovu prikupljenih statističkih podataka o habanju i napredovanju prslina u funkciji akumuliranog saobraćajnog opterećenja, moguće je formiranje matematičkih modela trošenja šinskog čelika usled habanja, glodanja i brušenja na karakterističnim sekcijama koloseka. U radu je prikazan model vertikalnog trošenja šine 60E1 usled vertikalnog habanja i cikličnog brušenja. Na osnovu formiranog modela moguće je poređenje različitih strategija cikličnog brušenja šine sa stanovišta njenog životnog veka i uklapanja u cikluse integralnog održavanja koloseka sa betonskim pragovima u zastoru od tucanika. Pretpostavljene su dužine ciklusa održavanja elemenata konstrukcije gornjeg stroja prema iskustvima razvijenih evropskih železničkih uprava.*

**Gljučne reči:** železnička infrastruktura, šina, defekti, upravljanje, održavanje, glodanje, brušenje.

### SUMMARY

*Infrastructure Manager should monitor the wear of rail steel and development of defects on the running surface of rails in order to accomplish efficient lifecycle management of rails. According to the collected statistical data on wear as a function of accumulated load, it is possible to create mathematical models of rail steel wear and removal of surface defects by wear, milling and grinding of specific track sections. The paper presents the combined model of the vertical wear and cyclical grinding of the rail profile 60E1. Developed model provide the basis for comparison of different cyclical grinding strategies from the aspect of rail lifecycle and matching the cycles of integral maintenance of ballasted track. Length of maintenance cycle for each element of superstructure was assumed according to the experience of representative European railway managers.*

**Key words:** railway infrastructure, rail, defects, management, maintenance, milling, grinding.

## 1. UVOD

Prošlo je 180 godina od kada je čuveni Čarls Vinjol (Charles Blacker Vignoles) predložio primenu šine sa glavom, vratom i ravnom nožicom (pruga Birmingham – Croydon, 1836.-1839. godine). Danas se ovakav oblik šine smatra standardnim [1, 2] i u tehničkoj terminologiji poznat je kao "Vinjlova šina". Šine su neizostavni element konstrukcije koloseka koji ima veliki udeo u ukupnim troškovima građenja i održavanja železničke infrastrukture. U podsistemu "infrastruktura" [3], šine funkcionišu u teškim uslovima i imaju malu redundansu.

Vek šina u koloseku zavisi od velikog broja faktora, a naročito od:

- kvaliteta šinskog čelika i profila šine,
- akumuliranog saobraćajnog opterećenja (prevezeno bruto tona od polaganja šine u kolosek),
- dozvoljenog osovinskog opterećenja,
- projektovane i dozvoljene brzine, kao i strukture brzina vozila,
- tipova vozila (konstrukcija obrtnog postolja, tip točka) i stanja voznog parka,
- ostvarene klase kvaliteta geometrije koloseka prema [4],
- projektovanih parametara trase,
- primenjenog nagiba šina u poprečnom profilu i njegovog slaganja sa profilom točka,
- strategije održavanja šina,
- tretmana tokom transporta i polaganja šina,

Adrese autora: <sup>1), 2), 3)</sup> Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd.

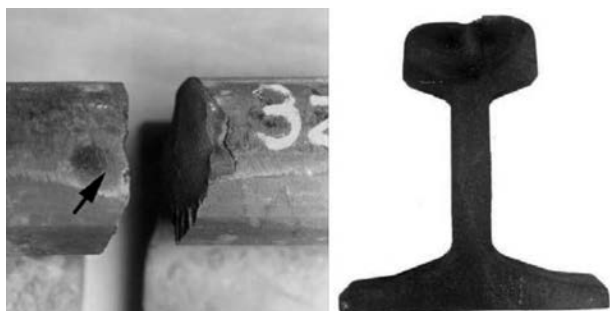
<sup>1)</sup> E-mail: zdenka@grf.bg.ac.rs

<sup>2)</sup> E-mail: llazarevic@grf.bg.ac.rs

<sup>3)</sup> E-mail: mvlotijevic@grf.bg.ac.rs

– klimatskih uslova i uticaja okruženja.

Habanje šina, kontaktni zamor pri kotrljanju točkova po glavi šine i plastično tečenje šinskog čelika u najvećoj meri doprinose propadanju šine, zavisno od uslova eksploatacije i vremenom dovode do pojave površinskih i potpovršinskih prslina u šinskom čeliku. Lom šine je poslednja faza procesa razvoja prslina i može da dovede do katastrofalnih iskliznuća vozila iz koloseka. Posledice mogu da uključe smrt, ranjavanje, materijalne troškove i gubitak poverenja javnosti. Pored toga, ovi događaji mogu imati razorne i dugotrajne efekte na privredu. Jedna od najpoznatijih nesreća usled zamora šinskog čelika dogodila se u Hatfield-u 17. oktobra 2000. godine [5]. Sukcesivni šinski lomovi su se javili na dužinu od 35 m sa 300 kritičnih head checking prslina (HC) (slika 1). Nesreća se dogodila kada je šinski lom izazvao iskliznuće ekspresnog putničkog voza (na relaciji London – Leeds) koji je saobraćao brzinom 117 km/h. Posle ove katastrofe EU je započela bezbednosne inspekcije kako bi se predupredili problemi koji nastaju usled zamora šinskog čelika. Ukoliko se dopusti nekontrolisan razvoj prslina usled zamora šinskog čelika, odnosno ako se na vreme ne sprovedu odgovarajuće mere održavanja, njen životni vek može da se redukuje na 2-3 godine.



Slika 1. Jedan od šinskih lomova u Hatfield-u usled zamora šinskog čelika [5]

Štaviše, u EU su troškovi inspekcije šina procenjeni na oko 70 miliona € godišnje (pod pretpostavkom da su godišnji ultrazvučni pregledi pomoću inspeksijskog vozila praćeni manuelnom proverom otkrivenih grešaka) [6].

Ovo istraživanje obuhvata fenomen, iskustva i inspekciju šinskih defekata usled kontaktnog zamora pri kotrljanju [7, 8-17]. Širom sveta, pa tako i na šinama u Srbiji, postoje dva osnovna tipa šinskih defekata usled zamora šinskog čelika pri kotrljanju točkova po glavi šine (RCF – Rolling Contact Fatigue): squat defekti i head checking defekti. Razmatranja u ovom radu su ograničena na ove dve glavne vrste RCF defekata.

U praktičnim okolnostima, životni vek spoljne šine u krivinama je ograničen usled HC defekta šine. Takođe, životni vek unutrašnje šine u krivinama je ograničen naboranošću dugačkih talasa (šinski defekt tipa 2202 prema [7]). Na kolosecima u pravcu česta je pojava defekta tipa squat, koji takođe nastaje usled zamora šinskog čelika. Šinski defekti usled zamora imaju ozbiljan uticaj na bezbednost saobraćaja. Nažalost, šinski defekti usled zamora čelika se uveliko uočavaju na prugama Srbije, bez odgovarajuće strategije održavanja.

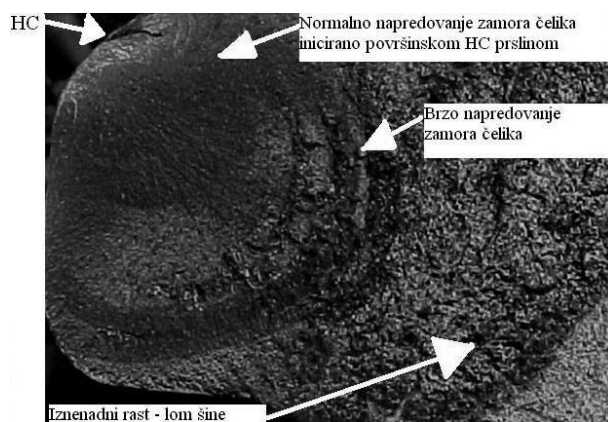
Cilj ovog istraživanja je da se definiše optimalna strategija održavanja šina, koja treba da omogući produženje životnog veka šine, smanji ukupne troškove održavanja šine i poboljša bezbednost železničkog saobraćaja.

## 2. DEFEKTI USLED ZAMORA ŠINSKOG ČELIKA

Šinski defekti usled zamora čelika u zonama velikih kontaktnih napona su izražen fenomen i problem na železnicama širom sveta. Ova pojava se uočava na konvencionalnim prugama (brzine do 200 km/h prema [3]), kao i na prugama za velike brzine.

Kada se točak teškog teretnog šinskog vozila osloni na glavu šine, oba tela u površi dodira dobijaju ugib. Formirana dodirna površina točka i šine je izuzetno mala i iznosi svega 1,5 – 3,0 cm<sup>2</sup>. Vremenom usled habanja, radijus glave šine postaje beskonačan, te dodirna površ postaje pravougaona a kontakti napon konstantan. Velika opterećenja od točka prenose se preko male dodirne površi na šinu, što stvara velike napone. Prekoračenjem granice elastičnosti, šinski čelik se istiskuje ka neopterećenoj okolini dodirne površi, remeti se njegova mikrostruktura i dolazi do plastične deformacije šine.

Zamor šinskog čelika predstavlja proces postepenog razaranja usled nastanka i razvoja inicijalne prslina, sve do loma šine u koloseku pod dejstvom promenljivog opterećenja od saobraćaja, koje se na šinu prenosi preko male površine dodira sa točkom vozila. Površina loma usled zamora materijala, u opštem slučaju, ima karakterističan izgled. Na njoj se uočavaju dve izrazito različite površine: zona zamora i zona nasilnog loma. Zona zamora je glatka i tamna površina na kojoj se uočavaju linije napredovanja zamorne prslina (slika 2).



Slika 2. Izgled defekta tipa HC na voznoj ivici glave šine (levo) i linije napredovanja prslina usled zamora šinskog čelika (desno)

Najvažniji faktori koji utiču na rast prslina su navedeni u [10]:

- statičko opterećenje šine od točka,
- dinamičko opterećenje šine od točka,
- režim kretanja vozila (vuča, kočenje, pokretanje, ubrzanje),
- profil šine,
- kvalitet šinskog čelika,

- vrsta defekta,
- temperaturna razlika u šini sa zavarenim sastavima (temperatura u šini u odnosu na neutralnu temperaturu šine bez napona),
- sopstveni naponi u šini (zaostali naponi),
- habanje glave šine (bočno i vertikalno),
- stanje geometrije koloseka,
- krutost šinske podloge.

U okviru projekta [18] sprovedena je analiza osetljivosti kako bi se predstavio uticaj različitih uslova saobraćaja i konstrukcije gornjeg stroja na rast prslina. Prslina se može pouzdano detektovati tek nakon dostizanja određene veličine. Potencijal razvoja prslina do detekcije (P) izrazito zavisi od primenjene metode za detektovanje. Najmanja veličina prslina pri detekciji predstavlja početnu veličinu od koje se prslina razvija sve do dostizanja kritične veličine, pri kojoj se može očekivati lom (O – otkaz usled loma). Za definisanje intervala od detekcije do loma (P-O) može se koristiti proteklo vreme ili akumulirano saobraćajno opterećenje (izraženo u milionima bruto tona) [14].

U zavisnosti od tipa defekta, brzina rasta prslina je veoma različita. Jednostavan matematički model rasta prslina može se izvesti samo za poprečnu prslinu u glavi šine [10]. U ovom radu se predstavlja i analizira pojava karakterističnih defekata šine usled zamora materijala, poznatih širom sveta pod nazivima: head checking i squat. Na osnovu preporuka iz istraživanja [8] nazivi šinskih defekata "head checking", "squat" i "belgrospi"

se koriste zvanično na svim jezicima sveta u naučnoj i stručnoj literaturi bez prevođenja (slika 3). Defekti head checking i squat su obuhvaćeni katalogom šinskih defekata prema UIC Code 712 [7] i predlogom metoda za inspekciju, praćenje i obradu defekata prema UIC Code 725 [10].

Domaća tehnička regulativa još uvek ne prati upravljanje šinskim defektima (savremene metode inspekcije i obrade defekata), uključujući i defekte nastale zamorom šinskog čelika, koji su pretnja bezbednosti železničkog saobraćaja.

Iako je standard EN 13231-3 [19] usvojen kao srpski standard, još uvek ne postoji obaveza njegove primene, jer nije povezan sa pravilnicima i uputstvima za održavanje konstrukcije gornjeg stroja u Republici Srbiji.

### 2.1. Defekt tipa 2223 (Head checking – HC)

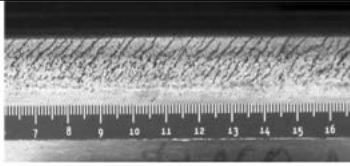


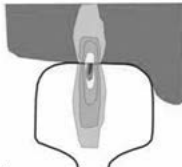

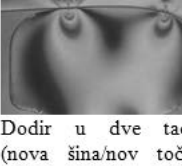
Ovaj defekt se javlja na spoljašnjoj šini u krivinama radijusa do 3000 m. Ipak, on se najčešće javlja pri radijusima krivina do 1500 m. Defekt se, takođe javlja na prelazu iz gornje površi na glavi šine (površina po kojoj se kotrlja točak šinskog vozila) u unutrašnju bočnu stranu glave. Defekt se uočava isključivo u kolosecima sa definisanim smerom vožnje (npr. dvokolosečna pruga) i sa velikim kvazi-statičkim opterećenjem po točku vozila. Orijentacija prslina zavisi od smera vožnje.

HC defekt se uočava u vidu finih, kratkih, kosih, površinskih prslina (fisure) na manje-više pravilnom rastojanju, koje najčešće iznosi 1-7 mm (ali i do nekoliko centimetara u zavisnosti od kvaliteta šinskog čelika). Pojava površinskih prslina ukazuje da ispod površine već postoje prslina, koje se prostiru do određene dubine i u određenom smeru unutar glave šine. Ukoliko se defekt ne otkloni na vreme, on napreduje dovodeći do odvajanja manjih ili većih delova vozne ivice na glavi šine. Razvijanjem prslina na dole, u krajnjem ishodu često dolazi do loma šine.

HC defekt se uočava u vidu finih, kratkih, kosih, površinskih prslina (fisure) na manje-više pravilnom rastojanju, koje najčešće iznosi 1-7 mm (ali i do nekoliko centimetara u zavisnosti od kvaliteta šinskog čelika). Pojava površinskih prslina ukazuje da ispod površine već postoje prslina, koje se prostiru do određene dubine i u određenom smeru unutar glave šine. Ukoliko se defekt ne otkloni na vreme, on napreduje dovodeći do odvajanja manjih ili većih delova vozne ivice na glavi šine. Razvijanjem prslina na dole, u krajnjem ishodu često dolazi do loma šine.

### 2.2. Defekt tipa 227 (Squat)

Defekt nastaje na šinama koloseka u pravcu, ili u krivinama radijusa  $R \geq 3000$  m usled delovanja dinamičkog opterećenja od saobraćaja, u zonama izrazitog kočenja i ubrzavanja vozila. Oko 75% squat defekata javlja se u zonama oko praga. Uočava se na gornjoj površi glave šine kao proširenje i lokalno ulegnuće u zoni dodira točak/šina i praćeno je tamnim mrljama i lučnim prslinama, ili

Tip	Izgled	Zona pojavljivanja	Oznaka prema UIC Code 712
Head checking	 Napomena: Izražen smer vožnje s leva u desno (Fotografija sa pruge Beograd - Zemun)	 Spoljna šina u krivini	Kod: 2223 Prva cifra: 2 (izvan krajeva šine) Druga cifra: 2 (površina na glavi šine) Treća cifra: 2 (ljudspanje) Četvrta cifra: 3 (fisure na voznoj ivici sa mogućim odvajanjem delova)
Squat	 (Fotografija sa stanice Pančevo Varoš)	 Šina na pravcu	Kod: 227 Prva: cifra 2 (izvan krajeva šine) Druga cifra: 2 (površina na glavi šine) Treća cifra: 7 (prslina i lokalna ulegnuća na površi kotrljanja točka po glavi šine)
Belgrospi	 (Fotografija sa pruge Podgorica – Bar)	 Dodir u dve tačke (nova šina/nov točak, pohabana šina/pohaban točak)	Nije obuhvaćen UIC kodom 712

Slika 3. Karakteristični RCF šinski defekti

prslinama u obliku latiničnog slova “v”. Zato se pored naziva squat u nemačkoj literaturi koristi i naziv “Schwarzer Fleck” (“crna mrlja”), jer se vizuelno uočava kao crna mrlja na sjajnoj ugllačanoj gornjoj površi glave šine.

Tokom vremena prslina se širi ka unutrašnjoj strani glave šine. Napredovanje prsline se najpre ostvaruje pod blagim uglom prema gornjoj površi glave. Nakon što prslina dostigne dubinu 3 do 5 mm, povija se u poprečnom pravcu na dole i može da prouzrokuje lom.

Defekt se često javlja u kombinaciji sa naboranošću gornje površi glave šine, ili je iniciran utiskivanjem stranih tela u gornju površ glave šine.

Ukoliko se defekt uoči u početnom stadijumu, može se ukloniti brušenjem i na taj način odložiti zamena šine. Samo u pojedinim slučajevima ovaj defekt se može sanirati navarivanjem. Ipak, najčešće se problem rešava zamenom šine.

### 2.3. Defekt tipa Belgrospi

Defekt je dobio ime prema prezimenima trojice ljudi, koji su prvi uočili ovaj fenomen na prugama za velike brzine u Nemačkoj: Belz (Belc), Grosmann (Grosman) i Spiegel (Špigel). Defekt se javlja na naboranoj šinskoj glavi u vidu tačkastih prslina akumuliranih na vršnim delovima naborane površi glave šine. Defekt se može opisati i kao mešavina nepravilno raspoređenih head checking defekata i minijaturnih defekata tipa squat. U početku je smatrano da je belgrospi karakterističan samo za pruge za velike brzine, ali se to ispostavilo netačnim (nažalost ima ga i na šinama železničke mreže Srbije).

## 3. INSPEKCIJA ŠINA

Neizostavni deo upravljanja RCF šinskim defektima je sprovođenje inspekcije. Efikasnost inspekcije šine zavisi od efikasnosti i tačnosti inspeksijskog metoda i neophodne opreme. Pored toga, efikasnost svakog inspeksijskog metoda zavisi od znanja, veštine, sposobnosti i iskustva vršilaca inspekcije, kao i od stvarnih uslova rada (temperatura, vidljivost, zaprljanost, itd.) i organizacije saobraćaja tokom sprovođenja inspekcije šina.

Optimalni metod detekcije za defekte tipa squat i HC treba da obezbedi rano otkrivanje oštećenja šine i pouzdane podatke o izmerenoj dužini, dubini i prostornom položaju prslina u glavi šine. Ovakva metoda za nedestruktivno testiranje šine u koloseku još uvek ne postoji. U praksi se kombinuje nekoliko metoda za detekciju u cilju povećanja mogućnosti ranog otkrivanja defekta. Lažne detekcije i neotkriveni šinski defekti u inspekciji još uvek su važno pitanje i njihovo smanjenje je veliki izazov.

Prema preporuci Međunarodne železničke unije UIC [10] potrebno je sprovesti vizuelnu inspekciju uz primenu optičkog sistema korišćenjem kamere, ultrazvučno testiranje pomoću vozila i ručno ultrazvučno ispitivanje, kao i testiranje primenom vrtložnih struja.

### 3.1. Vizuelna inspekcija

Železnička mreža treba da bude predmet vizuelne inspekcije dva puta godišnje (svakih šest meseci), uz

pomoć fotografija i video snimaka. Ovaj metod zahteva ogroman broj radnih sati i uključuje subjektivnost.

Informacije o RCF defektima, koji su uočeni tokom vizuelnog pregleda, se upisuju u formular u skladu sa [7] i čuvaju u bazi podataka (slika 4).

Pri vizuelnoj inspekciji se preporučuje podela deonica na dužine 50 metara, koje su klasifikovane u odnosu na maksimalnu dužinu prsline. Prema dužini površinskih HC prslina, defekt se klasifikuje kao lak (dužina prsline <10 mm), srednji (dužina prsline 10 – 20 mm), težak (dužina prsline 20 – 30 mm), izuzetno ozbiljan (dužina prsline preko 30 mm). Radi klasifikacije HC defekata, neophodno je odrediti i maksimalni broj prslina na dužini 1 cm (slika 5).

Prilikom inspekcije HC defekata posebna pažnja treba da se usmeri na spoljnu šinu u krivinama: obično u krivinama sa poluprečnikom  $R \leq 3000m$ , a najčešće u krivinama sa poluprečnikom  $R \leq 1500m$ . Pored toga, posebnu pažnju treba usmeriti na zavarene šinske spojeve, šine u skretnicama i dilatacionim spravama.

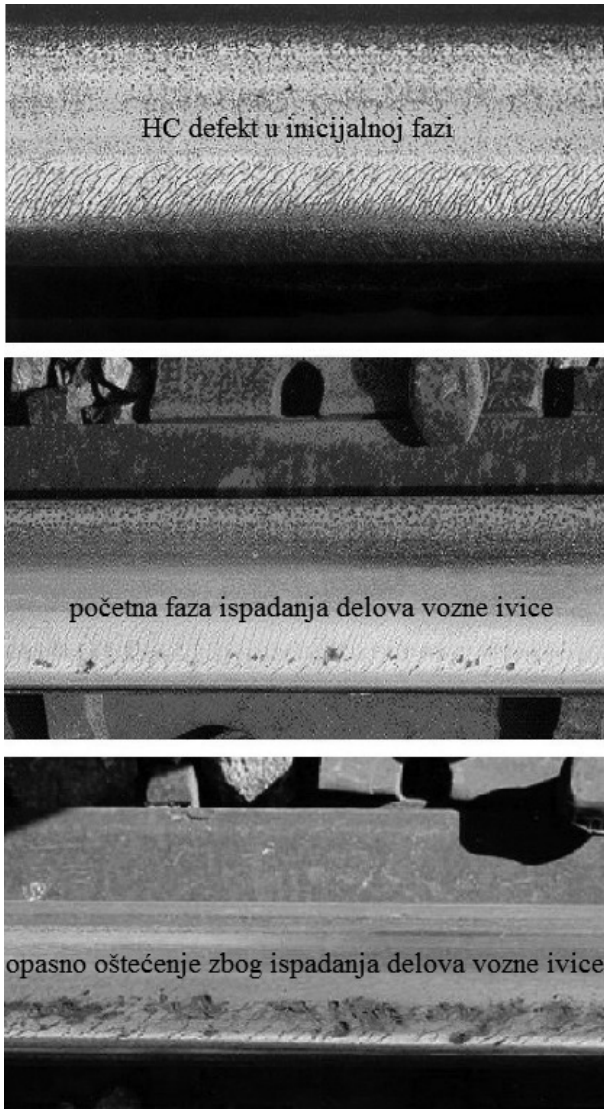
Pri vizuelnoj inspekciji defekata tipa squat posebno se pregledaju deonice u pravcu ispred predsignala i signala, kao i stanični koloseci. Moguća je pojava ovog defekta i u krivinama velikih radijusa (radijus 800-1600 m, najčešće na spoljnoj šini). Takođe, mogu da se pojave u prelaznim krivinama oštih krivina, kolosecima na strmim usponima (oko 10% i više) i na deonicama sa neregularnom geometrijom koloseka. Posebno treba pregledati zonu oko pragova i mesta sa promenom krutosti kolosečne podloge, kao i zone naborane šinske glave i zavarenih šinskih spojeva. Pri vizuelnoj inspekciji treba uzeti u obzir da srednji do ozbiljni squat defekti mogu nestručnom inspekcijom da se pomešaju sa “wheelburn” defektima (tip 225 prema [7], tragovi kočenja, pokretanja i ubrzanja). Za razliku od defekata squat, defekt 225 se uvek javlja na obe šine u koloseku u istom poprečnom preseku, što treba iskoristiti u slučaju dileme na terenu.

Vizuelna inspekcija se sprovodi u skladu sa vremenskim uslovima i organizacijom saobraćaja za vreme inspekcije šina. Metod se može unaprediti korišćenjem fluorescentnih penetrata, naročito u uslovima slabe vidljivosti u tunelima, ali površina šine mora biti čista. Nažalost, podmazivanje spoljne šine u krivini i zaprljana šina mogu negativno da utiču na efikasnost vizuelne inspekcije. Takođe, zaprljanost šine može da dovede do pogrešnih rezultata ultrazvučne inspekcije (US-ultrasound inspection), inspekcije pomoću video kamere i inspekcije uz pomoć vrtložnih struja (EC – eddy current inspection).

### 3.2. Inspekcija ultrazvukom

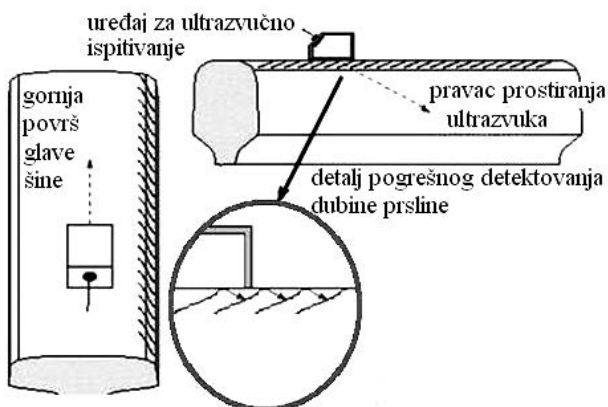
Ovaj metod nije primenljiv za inspekciju RCF površinskih prslina na malom rastojanju i pod malim uglom u odnosu na gornju površ glave šine. Takođe, ovaj metod ne može da pruži precizno merenje u uzanoj zoni vozne ivice na glavi šine. Kombinacija ultrazvučne inspekcije i inspekcije na bazi vrtložnih struja povećava verovatnoću ranog otkrivanja RCF defekata. To je način za otkrivanje većine, ali ne i svih RCF defekata. Slika 6 prikazuje uslove kada neke od dubljih HC prslina ostaju nedetektovane zbog ograničenja metode ultrazvučne inspekcije.





Slika 5. Faze razvoja HC defekta

Radi povećanja verovatnoće otkrivanja podpovršinskih šinskih defekata u praksi se kombinuju mogućnosti površinskog testiranja šine pomoću vrtložnih struja sa zapreminskim testiranjem pomoću ultrazvuka.



Slika 6. Nepouzdana merenje dubine HC defekata primenom ultrazvučne inspekcije [21]

### 3.3. Inspekcija pomoću vrtložnih struja

Procedura EC testiranja je zasnovana na elektromagnetnoj interakciji između magnetnog polja sonde za testiranje i struja indukovanih u metalu. Promene u raspodeli i intenzitetu vrtložnih struja nastaju usled nehomogenosti površine i potpovršine šinskog čelika. Ove promene se koriste za određivanje dubine prslina. EC inspekcija šine ima sledeće prednosti: rano otkrivanje inicijalnih prslina, (dubina 0,2 mm), detekcija prslina ispod površi glave šine, prenosivost uređaja za testiranje, nema potrošnog materijala, trenutno očitavanje izmerenih rezultata, moguća integracija uređaja u merna kola i brusni voz. Vozila su opremljena osmokalnim uređajima za ispitivanje šina pomoću vrtložnih struja (slika 7). U upotrebi su i ručni uređaji za ispitivanje RCF šinskih defekata pomoću vrtložnih struja.

Nije moguće merenje ugla napredovanja prsline u odnosu na gornju površ glave šine primenom EC metode.

Dubina defekta može da se sračuna samo indirektno merenjem dubine prsline i ugla napredovanja prsline, ili ugradnjom EC uređaja u brusni voz (slika 8). Ugao se može odrediti na probnom polju kombinovanjem brušenja i EC testiranja. Na osnovu dugog perioda istraživanja, za sračunavanje dubine HC defekta mogu se koristiti vrednosti ugla u širokom rasponu od 15° do 30°. Ovo je ozbiljan nedostatak EC metode inspekcije, jer se dubina defekta može meriti samo indirektno [21].

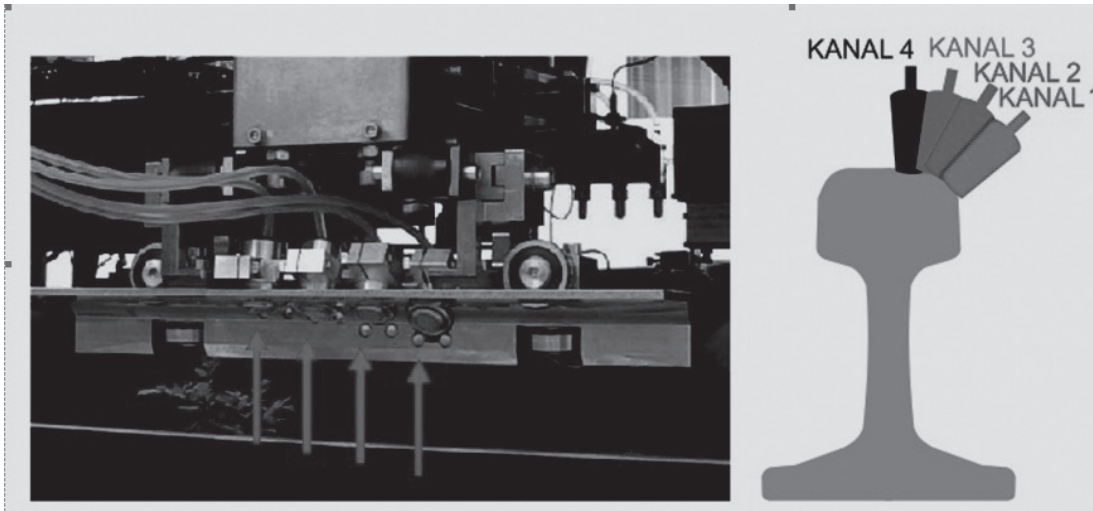
Testiranje pomoću vrtložnih struja može da otkrije bilo kakve nepravilnosti na površini šine, koje su izazvane promenama u čeliku. Moguće je dokazati većinu površinskih nedostataka koji imaju uticaj na bezbednost u saobraćaju. Međutim, teško je da se jasno filtrira EC signal zbog efekta preklapanja signala. Kombinacijom vizuelne detekcije, ultrazvučne metode i metode na bazi vrtložnih struja, kvalitet i pouzdanost informacija se povećava značajno.

### 4. BRUŠENJE ŠINE KAO DEO INTEGRALNOG ODRŽAVANJA

Savremeni pristup održavanju razmatra održavanje šina u sastavu ciklusa održavanja ostalih elemenata konstrukcije gornjeg stroja [12]. Cilj je da se minimiziraju ukupni troškovi održavanja gornjeg stroja usaglašavanjem ciklusa brušenja šina sa ciklusom podbijanja pragova i čišćenja zastorne prizme, uz produženje životnog veka šine (uklanjanjem defekata u inicijalnoj fazi pomoću brušenja) uz istovremeni najveći efekat vremenski usaglašenih aktivnosti održavanja (slika 9).

Upravljanje održavanjem šina uključuje optimalni izbor šina (kvalitet čelika i profil), inspekciju, negu (podmazivanje spoljne šine u krivinama, preventivno brušenje), ciklično i korektivno brušenje, zamenu i/ili reprofilaciju šina.

Analiza troškova tokom životnog veka šina, koji obuhvataju troškove nabavke, transporta, ugradnje i održavanja šine, sastavni je deo strategije savremenog održavanja. Pomoću analize troškova tokom životnog veka moguće je donošenje ispravne i transparentne odluke o izboru materijala, strategiji preventivnog i korektivnog održavanja i planovima zamene.

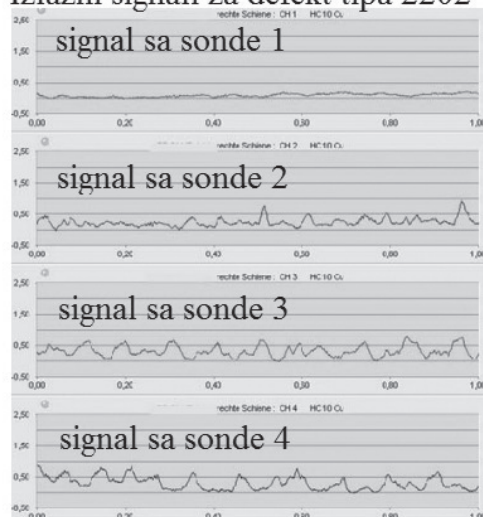


Uređaj za ispitivanje šine pomoću vrtložnih struja integrisan u vozilo za brušenje

Položaj sonde za ispitivanje



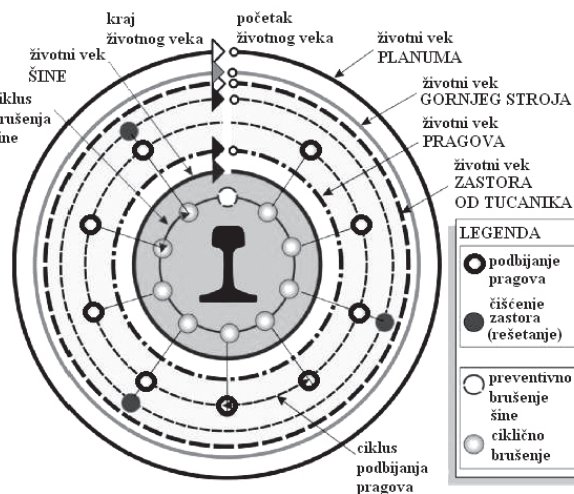
Izlazni signali za defekt tipa 2202



Slika 7. Inspeksijsko vozilo sa osmokanalnim uređajima na bazi vrtložnih struja [22]



Slika 8. Izgled brusnog vozila sa EC uređajima: u jednom smeru vozilo brusi, a u povratnoj vožnji vrši EC defektoskopiju



Slika 9. Primer usaglašavanja ciklusa održavanja šine, pragova i zastora od tucanika, uz produženje životnog veka šine [12]

Ovaj rad prikazuje mogućnost redukovanja troškova održavanja na osnovu "integralnog (sveobuhvatnog) pristupa" održavanju na savremenim konvencionalnim prugama za mešoviti saobraćaj. Integralni pristup podrazumeva usaglašavanje ciklusa održavanja komponenata gornjeg i donjeg stroja pruge.

Prema [23], približne vrednosti dužina uobičajenih ciklusa održavanja za komponente gornjeg i donjeg stroja, na tipičnim glavnim magistralnim prugama iznose:

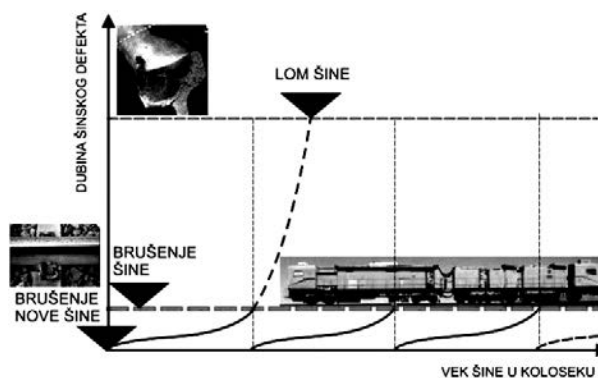
- 4-5 godina (40-70 miliona brt) za podbijanje pragova,
- 1-3 godine (20-30 miliona brt) za brušenje šina,
- 12-15 godina (150-300 miliona brt) za čišćenje zastora (rešetanje),
- 10-15 godina (300-1000 miliona brt) za zamenu šina,
- 20-30 godina (250-600 miliona brt) za zamenu drvenih pragova,
- 30-40 godina (350-700 miliona brt) za zamenu betonskih pragova,
- 10-30 godina (100-500 miliona brt) za zamenu sistema šinskog pričvršćenja,
- 20-30 godina (200-500 miliona brt) za zamenu tucanika u zastoru,
- > 40 godina (preko 500 miliona brt) za sanaciju donjeg stroja.

Integralno održavanje razmatra mogućnost jednovremene zamene obe šine i pragova, kao i usklađivanje termina brušenja šina sa ciklusom održavanja elemenata gornjeg i donjeg stroja na što dužoj deonici pruge. Ono pretpostavlja sveobuhvatno usaglašavanje ciklusa održavanja šine, pragova i zastora od tucanika, uključujući sanaciju donjeg stroja (ugradnja tampon i prelaznog sloja), uz produženje životnog veka šine. Moderna strategija održavanja šine uključuje negu (preventivno brušenje šina i podmazivanje unutrašnjeg boka glave spoljne šine u krivini), ciklično brušenje, i po potrebi korektivne aktivnosti brušenja između planiranih ciklusa (slika 10).

Preventivnim brušenjem se uklanjaju neregularosti geometrije gornje površi glave šine nastale tokom polaganja, uređenja geometrije i stabilizacije koloseka. Takođe, vrši se uklanjanje površinskog sloja sa niskim sadržajem ugljenika na glavi nove šine. Nemoguće je postići da se brušenjem novih šina nakon polaganja u kolosek u potpunosti isključi pojava oštećenja na gornjoj površini šine tokom eksploatacije.

Ciklično brušenje šina se sprovodi neposredno nakon uređenja geometrije koloseka (uređenje nivelete i smeru i stabilizacija koloseka), po mogućnosti u istom zatvoru koloseka. Korišćenjem zajedničkog zatvora koloseka redukuju se troškovi planiranja, troškovi pripreme za izvođenje (privremeno uklanjanje opreme koja može da se oštetiti tokom održavanja) i troškovi zbog ometanja saobraćaja.

Nekontrolisani razvoj šinskih defekata može da ugrozi bezbednost saobraćaja (ukoliko se prslina razvije do loma šine) i povećava troškove održavanja šina (može da dovede do prerane zamene šine usled njenog nepopravljivog oštećenja). Lom šine je poslednja faza razvoja pr-

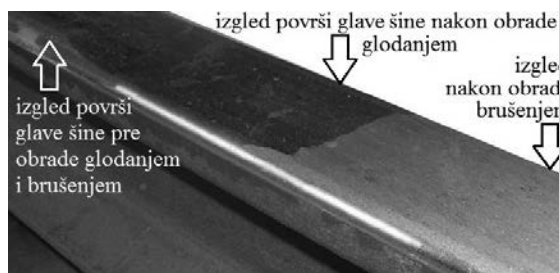


Slika 10. Princip produženja životnog veka šine primenom preventivnog i cikličnog brušenja [24]

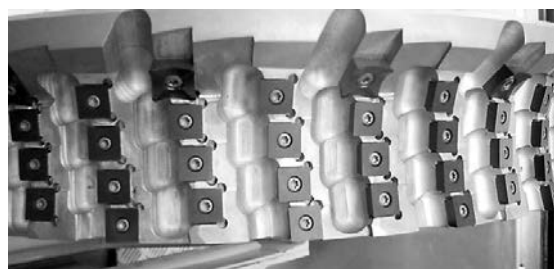
sline i može dovesti do iskliznuća vozila iz koloseka. Srećom, ne razvijaju se sve prsline do loma. Sama mogućnost ugrožavanja bezbednosti saobraćaja usled razvoja šinskih defekata ukazuje na ozbiljnost sprovođenja inspekcije šina primenom odgovarajućih savremenih postupaka.

Defekti na voznoj površini šine mogu prouzrokovati vibracije i dodatna dinamička naprezanja. Rezultat je brže propadanje geometrije koloseka i elemenata konstrukcije gornjeg i donjeg stroja. Ciklično brušenje uklanja površinski sloj čelika koji sadrži najviše šinskih defekata u ranoj fazi razvoja i redukuje ukupne troškove održavanja tokom životnog veka šine.

Pored tehnologije brušenja šina radi otklanjanja površinskih i potpovršinskih defekata usled zamora šinskog čelika, u upotrebi je i kombinovana tehnologija glodanja i brušenja šina (slika 11) [25]. Prednosti kombinovane tehnologije (glodanje sa završnim brušenjem gornje površi glave šine) u odnosu na tehnologiju brušenja šine su veći učinak u jednom prolazu mašine (glodanjem se uklanja 0,3-3 mm, slika 12), kraći zatvor koloseka,



Slika 11. Izgled gornje površi glave šine pre i nakon obrade glodanjem i brušenjem [25]



Slika 12. Izgled glave za glodanje šinskog čelika [25]



sakupljanje čelične strugotine nastale glodanjem u posebnoj košuradnoj mašini sa mogućnošću recikliranja (slika 13), izostajanje prašine koja je karakteristična za uklanjanje čelika brušenjem (prašina je opasna po zdravlje radnika i nepovoljno utiče na učinak kočnica koje rade na principu vrtložnih struja), isključenje opasnosti od nastajanja požara (nema varničenja tokom procesa glodanja, tako da nije potrebno kvašenje radnog prostora pre prolaska mašine).



Slika 13. Strugotina nastala glodanjem šinskog čelika [25]

## 5. ODREĐIVANJE DUŽINE CIKLUSA BRUŠENJA

Upravljač infrastrukture mora da razvija odgovarajuće modele rasta šinskih defekata za svaku karakterističnu deonicu pruge u skladu sa tipom šine i kvalitetom šinskog čelika, osovinskim i saobraćajnim opterećenjem na pruži, kao i strukturom brzina i karakteristikama vozila. Osnovna podela karakterističnih deonica bi se vršila prema tome da li je deonica u pravcu ili u krivini. Nakon toga vršila bi se podela prema usponu, odnosno padu deonice. Dalja podela bi uključila specifičnost kolosečne podloge (kolosek u zastoru od tucanika, kolosek na betonskoj podlozi, kolosek na asfaltnoj podlozi, kolosek na prelaznoj deonici sa promenljivom krutošću kolosečne podloge. Deonice u krivini bi se delile prema radijusu (krivina malog R do 450 m [26], krivine sa R do 1500 m, krivine sa R do 3000 m, krivine sa R preko 3000 m). Posebno bi se vršila analiza rasta šinskih defekata za spoljašnju i unutrašnju šinu u krivinama. Takođe, posebno bi se analizirale deonice na mostovima, u tunelima, kao i sa izraženim pokretanjem i zaustavljanjem vozila (deonice ispred signala i stanični koloseci).

Zbog velikog broja nedovoljno istraženih uticajnih faktora ne može se egzaktano prognozirati rast prslina na voznoj površi glave šine. Za razvoj modela trošenja šinskog čelika na voznoj površi glave šine, neophodno je pratiti akumulirano saobraćajno opterećenje koje se izražava u bruto tonama od trenutka polaganja nove šine u kolosek na karakterističnoj deonici. Modeli predstavljaju funkcije rasta određenog površinskog defekta u zavisnosti od akumuliranog saobraćajnog opterećenja. Ukupno napredovanje prslina i nepovratno trošenje šinskog čelika u dodiru sa točkom prikazuje slika 14.

Na Železnicama Srbije ne postoje merni podaci o napredovanju vertikalnog habanja glave šine u zavisnosti od akumuliranog opterećenja izraženog u bruto tonama. Na Nemačkim železnicama se koristi model za normal-



Slika 14. Razvoj površinskog defekta i vertikalnog habanja na glavi šine

no vertikalno habanje (nepovratno trošenje materijala) koji je jednostavna linearna zavisnost napredovanja vertikalnog habanja u odnosu na akumulirano saobraćajno opterećenje izraženo u milionima bruto tona. Najčešće se koristi odnos vertikalnog habanja i akumuliranog saobraćajnog opterećenja 1mm/100 mil. bruto tona [12].

Model napredovanja proizvoljne prslina usled zamora šinskog čelika u funkciji saobraćajnog opterećenja je nelinearan. Za svaki tip prslina i svaku karakterističnu deonicu u uslovima realnog saobraćaja potrebno je meriti razvoj prslina tokom vremena (bar tri godine, jer je očekivani ciklus brušenja 1-3 godina prema nemačkim iskustvima [23]), kako bi se iz rezultata merenja napravio statistički model prema izrazu (1).

$$y=f(x) \quad (1)$$

gde je:

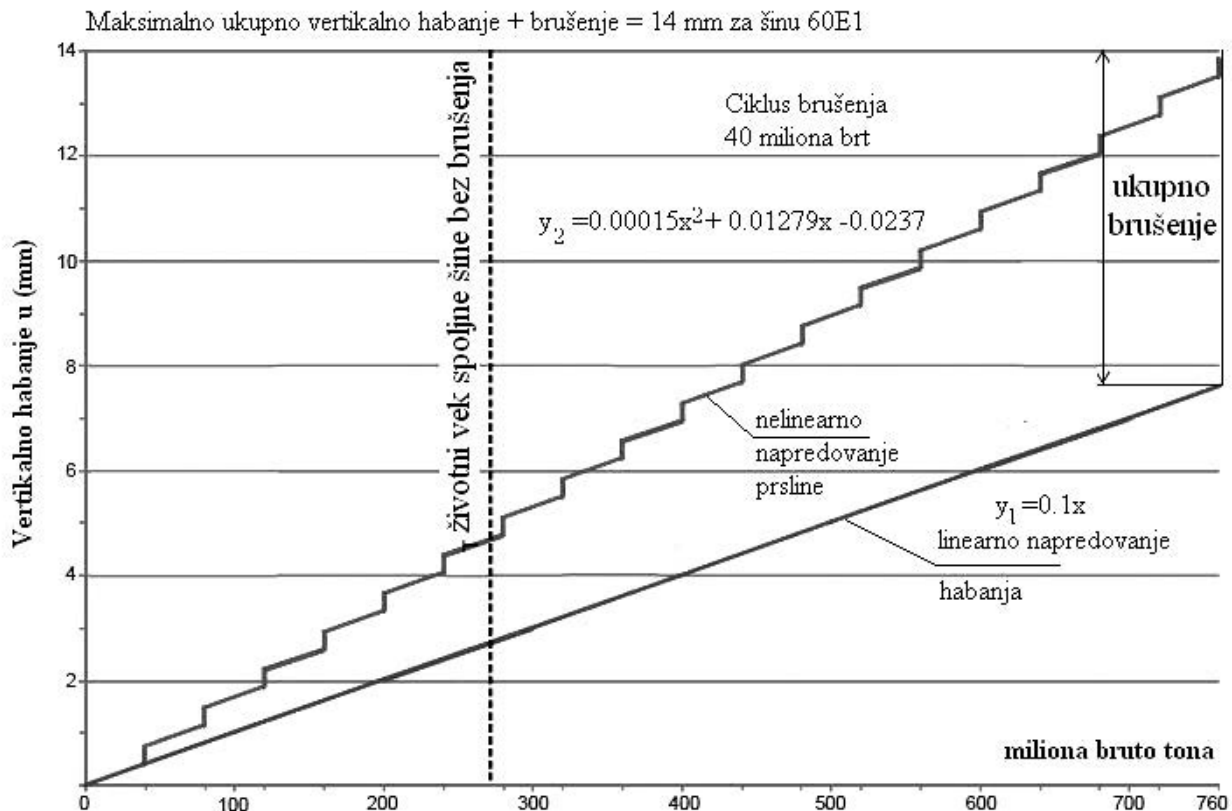
y – dubina napredovanja prslina izražena u milimetrima,  
x – akumulirano bruto opterećenje u milionima brt.

Slika 15 prikazuje produženje životnog veka šine tipa 60E1 u trajanju od 38 godina, pri bruto opterećenju 20 miliona brt/godišnje, u slučaju brušenja nakon pređenih 40 miliona brt (svake dve godine).

## 6. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Habanje šine, zamor šinskog čelika i plastično tečenje su glavni uzroci degradacije šine u zavisnosti od uslova saobraćaja na savremenim prugama za mešoviti saobraćaj. Ne dovode sve prslina do rizika iskliznuća, ali one su glavni uzrok degradacije šine i koloseka. Srećom, neki od šinskih defekata bivaju uklonjeni habanjem i brušenjem u početnoj fazi razvoja. Nekonrolisani razvoj šinskih defekata ugrožava bezbednost saobraćaja i povećava troškove održavanja šina.

Sa druge strane, defekti na površini šine mogu prouzrokovati vibracije i dodatna dinamička napreznja. Rezultat je brže propadanje geometrije i elemenata konstrukcije koloseka, kao i zastora i planuma. Ciklično brušenje uklanja površinski sloj čelika koji sadrži najviše šinskih defekata i redukuje ukupne troškove održavanja šina. Moderna strategija brušenja šine uključuje preventivne, ciklične i korektivne aktivnosti. U radu je brušenje šina prikazano kao deo integralne strategije održavanja koja omogućava simultanu zamenu šina i pragova i usklađivanje brušenja šina sa ciklusima održavanja gornjeg i donjeg stroja. Upravljač infrastrukture mora da razvija odgovarajuće modele rasta šinskih defekata za svaku ka-



Slika 15. Napredovanje vertikalnog habanja uz brušenje nakon svakih 20 miliona brt ( $y_1$  – vertikalno habanje,  $y_2$  – dubina prsline, odnosno dubina brušenja)

rakterističnu deonicu, kao osnovu za razvoj optimalne strategije brušenja koja je deo integrisanog održavanja konstrukcije gornjeg stroja.

## ZAHVALNICA

Rad je rezultat istraživanja na Tehnološkom projektu 36012 „Istraživanje tehničko-tehnološke, kadrovske i organizacione osposobljenosti Železnice Srbije sa aspekta sadašnjih i budućih zahteva Evropske unije“, koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] CEN, Railway applications – Track – Rail Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above, 2011.
- [2] CEN, Railway applications – Track – Rail – Part 4: Vignole railway rails from 27 kg/m to, but excluding 46 kg/m, 2009.
- [3] The European Commission, Technical specification for interoperability relating to the ‘infrastructure’ subsystem of the trans-European conventional rail system, Official Journal of the European Union, 2011.
- [4] CEN, Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 6: Characterisation of track geometry quality, 2014.

- [5] Office of Rail Regulation, Train Derailment at Hatfield: A Final Report by the Independent Investigation Board, London, pp. 245, 2006.
- [6] K. Saurabh: Study of Rail Breaks, Technical Report, Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå Railway Research Center (JVCT), Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2006.
- [7] International Union of Railways, UIC Code 712, Rail Defects, 4th edition, January 2002.
- [8] D. F. Cannon, H. Pradier: Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute, Wear, 191, pp. 1–13, 1996.
- [9] Z. Popović, Lj. Brajović, L. Lazarević, L. Milosavljević: Rail defects head checking on the Serbian Railways, Tehnički vjesnik, 21(1), pp. 147-153, 2014.
- [10] International Union of Railways, UIC Code 725, Treatment of rail defects, Paris, 1st edition, June 2007.
- [11] Z. Popović, V. Radović: Analysis of cracking on running surface of rails, Građevinar, 65.03, pp. 251-259, 2013.
- [12] Z. Popović, L. Lazarević, Lj. Brajović, P. Gladović: Managing rail service life, Metalurgija, 53(4), pp. 721-724, 2014.

- [13] Z. Popović, V. Radović, L. Lazarević, V. Vukadinović, G. Tepić: Rail inspection of RCF defects, *Metallurgija*, 52(4), pp. 537-540, 2013.
- [14] Z. Popović, L. Puzavac, L. Lazarević: Rail defects due to rolling contact fatigue, *Građevinski materijali i konstrukcije*, 54.2, pp. 17-29, 2011.
- [15] Australian Rail Track Corporation, *Rail Defects Handbook, Engineering Practices Manual Civil Engineering*, 2006.
- [16] V. Radović: Upravljanje defektima usljed zamora šinskog čelika, magistarski rad, Građevinski fakultet, Podgorica, 2012.
- [17] Project no. TIP5-CT-2006-0314150, INNOTRACK D4.2.4, Improved model for loading and subsequent deterioration due to squats and corrugation, TU Delf, 2009.
- [18] UIC/WEC Joint research project on Rail Defect Management: Analytical Modelling of Rail Defects and Its Applications to Rail Defect Management, U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts, 2003.
- [19] CEN, EN 13231-3 Railway applications – Track – Acceptance of works – Part 3: Acceptance of rail grinding, milling and planing work in track, 2006.
- [20] Z. Popović, L. Lazarević, Lj. Brajović, M. Vilotijević: The Importance of Rail Inspections in the Urban Area-Aspect of Head Checking Rail Defects, *Procedia Engineering*, 117, pp. 601-613, 2015.
- [21] R. Krull, H. Hintze, H. Thomas: Moderne Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung im Oberbau, Tagungsband, Internationales Symposium Schienenfehler, Brandenburg, S. 39-54, 2000.
- [22] A. Dey, R. Casperson, R. Pohl, H. M. Thomas: Die Klassifizierung von Oberflächenfehlern in Schienen mit der Wirbelstromprüfung, DGZfP-Jahrestagung, Münster, S. 9, 2009.
- [23] B. Lichtberger: Das System Gleis und seine Instandhaltung, *EI – Eisenbahningenieur*, 58.1, pp. 10-19, 2007.
- [24] Z. Popović, L. Lazarević, L. Puzavac: Primena metode ispitivanja čelika pomoću vrtložnih struja u oblasti održavanja šina, III Međunarodni simpozijum NOVI HORIZONTI SAOBRAĆAJA I KOMUNIKACIJA 2011., Doboj, Federacija Bosna i Hercegovina, pp. 434-439, 2011.
- [25] <http://www.linsinger.com/de/produkte/schientechnik/schienenfraes-technologie/2-18-21.htm#>
- [26] Z. Popović, L. Lazarević, N. Vatin: Analysis of Track Gauge Widening in Curves with Small Radius, *Applied Mechanics & Materials*, Vol. 740, pp. 967-973, 2014.