

PREGLEDNI RAD

ZDENKA POPOVIĆ*, LUKA LAZAREVIĆ, MILICA MIĆIĆ, LJILJANA BRAJOVIĆ

RCF NEPRAVILNOSTI NA GLAVI ŠINE – SMERNICE ZA ODRŽAVANJE

RCF IRREGULARITIES ON THE RAIL HEAD – GUIDELINES FOR MAINTENANCE

UDK: 625+625.1/.5+656.2

REZIME:

Fokus rada je na definisanju jasnih smernica za identifikaciju, praćenje i upravljanje ovim fenomenima sa ciljem produženja životnog veka železničke infrastrukture i voznog parka, uz istovremeno poboljšanje ukupne efikasnosti sistema održavanja. Upravljanje defektima šina smatra se sastavnim delom sistema održavanja i gornjeg i donjeg stroja pruge. Za inspekciju šina preporučuju se savremene metode nedestruktivnog ispitivanja, uključujući ultrazvučno ispitivanje i tehnike vrtložnih struja, koje omogućavaju otkrivanje unutrašnjih i površinskih nedostataka bez oštećenja materijala. Kontrola razvoja defekata podrazumeva upotrebu brušenja, reprofilsanja glave šine, podmazivanje na deonicama u krivinama i blagovremenu zamenu šina u slučajevima kada rizik od loma postane kritičan. Posebna pažnja posvećena je opasnim kombinacijama nekoliko defekata usled zamora, koji mogu značajno povećati rizik od iznenadnog loma. Rad doprinosi unapređenju strategije predviđanja i preventivnog održavanja savremenih železničkih sistema.

Ključne reči: železnica, šine, zamor čelika šine, defekti šina, održavanje.

SUMMARY:

The focus of the paper is on defining clear guidelines for the identification, monitoring, and management of these phenomena with the goal of extending the service life of both railway infrastructure and rolling stock, while also improving the overall efficiency of the maintenance system. The management of rail defects is approached as an integral part of both track superstructure and substructure maintenance systems. Modern non-destructive testing methods are recommended for rail inspection, including ultrasonic and eddy current techniques, which allow for the detection of internal and surface flaws without damaging the material. Control of defect development involves the use of grinding, rail head reprofiling, lubrication on curved track sections, and timely rail replacement in cases where the risk of fracture becomes critical. Special attention is given to dangerous combinations of multiple fatigue-related defects, which can significantly increase the risk of sudden failure. The paper contributes to the advancement of predictive and preventive maintenance strategies in modern railway systems.

Keywords: Railway, Rails, Rail Steel Fatigue, Rail Defects, Maintenance.

* Prof. dr Zdenka Popović, Univerzitet u Beogradu - Građevinski facultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra, zdenka@grf.bg.ac.rs,

1. UVOD

Nepravilnosti kratkih talasnih dužina ($0 < \lambda \leq 1$ m) na površi glave šine u zoni kontakta točka i šine imaju značajan uticaj na smanjenje veka trajanja šine u koloseku. Upravljanje njihovim razvojem ostaje otvoreno pitanje, jer još uvek ne postoji jedinstvena strategija održavanja koju bi sproveli Upravljači infrastrukture (UI) na međunarodnom nivou. Preporuke Međunarodne železničke unije (UIC) [1] i evropski standardi [2,3] pružaju samo osnovne smernice za upravljanje razvojem površinskih nepravilnosti na glavama šina.

Autori ističu nedostatak dosledne terminologije u tehničkim propisima koji se odnose na defekte šina izazvane zamorom od kotrljanja (RCF) u zoni kontakta točka i šine. Ova nedoslednost može dovesti do nesporazuma i pogrešnih odluka UI tokom aktivnosti održavanja, što potencijalno može dovesti do povećanih troškova održavanja infrastrukture i voznog parka, kao i ugrožavanja bezbednosti železničkog saobraćaja. Primećena je neusklađenost u terminologiji između najnovijih preporuka UIC [1] i evropskih standarda [2,3]. Autori naglašavaju potrebu za standardizacijom nomenklature RCF defekata šina, uključujući upotrebu nedvosmislenog numeričkog kodiranja, bez prevođenja engleskih naziva defekata u nacionalne propise.

Ovaj rad ne uključuje analizu metoda inspekcije, jer su autori ovu temu posebno obrađivali u [4], predstavljajući savremene metode nedestruktivnog ispitivanja (NDT) koje su efikasne za inspekciju RCF defekata. Veliki broj studija izveštava o rezultatima istraživanja vezanim za upravljanje RCF defektima šina (Nemačka [5–9], Holandija [10–11], Švedska [12], Srbija [4, 13], Japan [14], itd.), ističući relevantnost i značaj ove teme.

RCF je proces zamora uzrokovan kotrljanjem i klizanjem u dodiru točkova i glave šine. Rezultat je cikličnog opterećenje šina i dovodi do oštećenja povezanih sa zamorom, koja se obično nazivaju RCF defekti šina. Efikasno upravljanje RCF-om i održavanje šina neophodno je za postizanje bezbednosti, pouzdanosti i dugovečnosti železničke infrastrukture. Jasnim definisanjem ciljeva, stra-

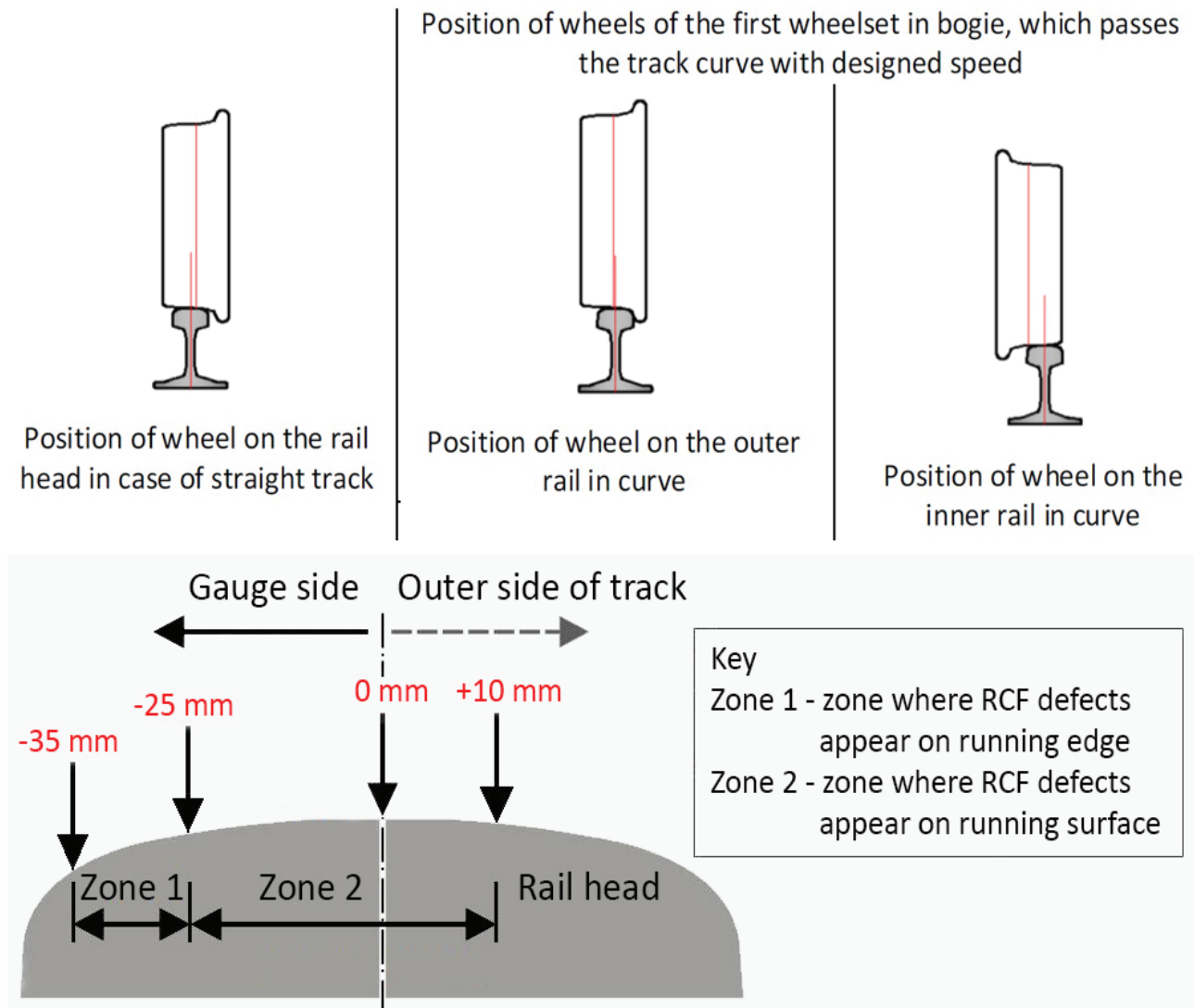
tegija i planova održavanja, UI mogu optimizovati korišćenje resursa, smanjiti troškove i smanjiti pojavu šinskih defekata, čime održavaju optimalne performanse pruge tokom njenog životnog veka. Održavanje šina podrazumeva kombinaciju tehničkih, administrativnih i upravljačkih aktivnosti koje se sprovode tokom životnog ciklusa šine, usmerenih na očuvanje ili obnavljanje njenog stanja kako bi se osiguralo da ona nastavi da obavlja svoju funkciju kao element gornjeg stroja. Štaviše, upravljanje održavanjem obuhvata sve upravljačke zadatke kojima se definišu ciljevi, strategije i odgovornosti u procesu održavanja i obezbeđuje njihova implementacija korišćenjem alata kao što su planiranje održavanja, kontrola i kontinuirano unapređenje efikasnosti i isplativosti održavanja. Ciljevi održavanja predstavljaju specifične ciljeve utvrđene i prihvaćene za aktivnosti održavanja. To može uključivati ciljeve kao što su dostupnost sredstava, smanjenje troškova, ekološka održivost i bezbednost.

2. RCF DEFEKTI ŠINA – SMERNICE ZA ODRŽAVANJE

RCF defekti šina uočavaju se na šinama u saobraćaju na železničkim mrežama širom sveta, uključujući: (a) konvencionalne i pruge, za velike brzine (b) pruge za teške terete, mešoviti saobraćaj i pruge za putnički saobraćaj, i (c) šine u kolosecima u zastoru od tucanika, kao i u kolosecima na čvrstoj podlozi. Ključna karakteristika u upravljanju nastankom i razvojem RCF defekata jeste da se oni razvijaju u zonama visokih i složenih kontaktnih naprezanja (Slika 1). Ovo omogućava predviđanje deonica pruge koje su posebno podložne RCF-u i omogućava preduzimanje preventivnih mera, sa ciljem odlaganja nastanka defekata i smanjenja njihove brzine razvoja.

Zamor šinskog čelika u zoni dodira točak/šina podrazumeva složen proces strukturne degradacije, pokrenut unutrašnjom mikro pukotinom u glavi šine koja može dovesti do loma šine pod cikličnim opterećenjem. Za efikasno upravljanje razvojem RCF defekata, izbor odgovarajućih NDT metoda za inspekciju šina unutar koloseka je neophodan za identifikovanje defekata u ranoj fazi razvoja [4].

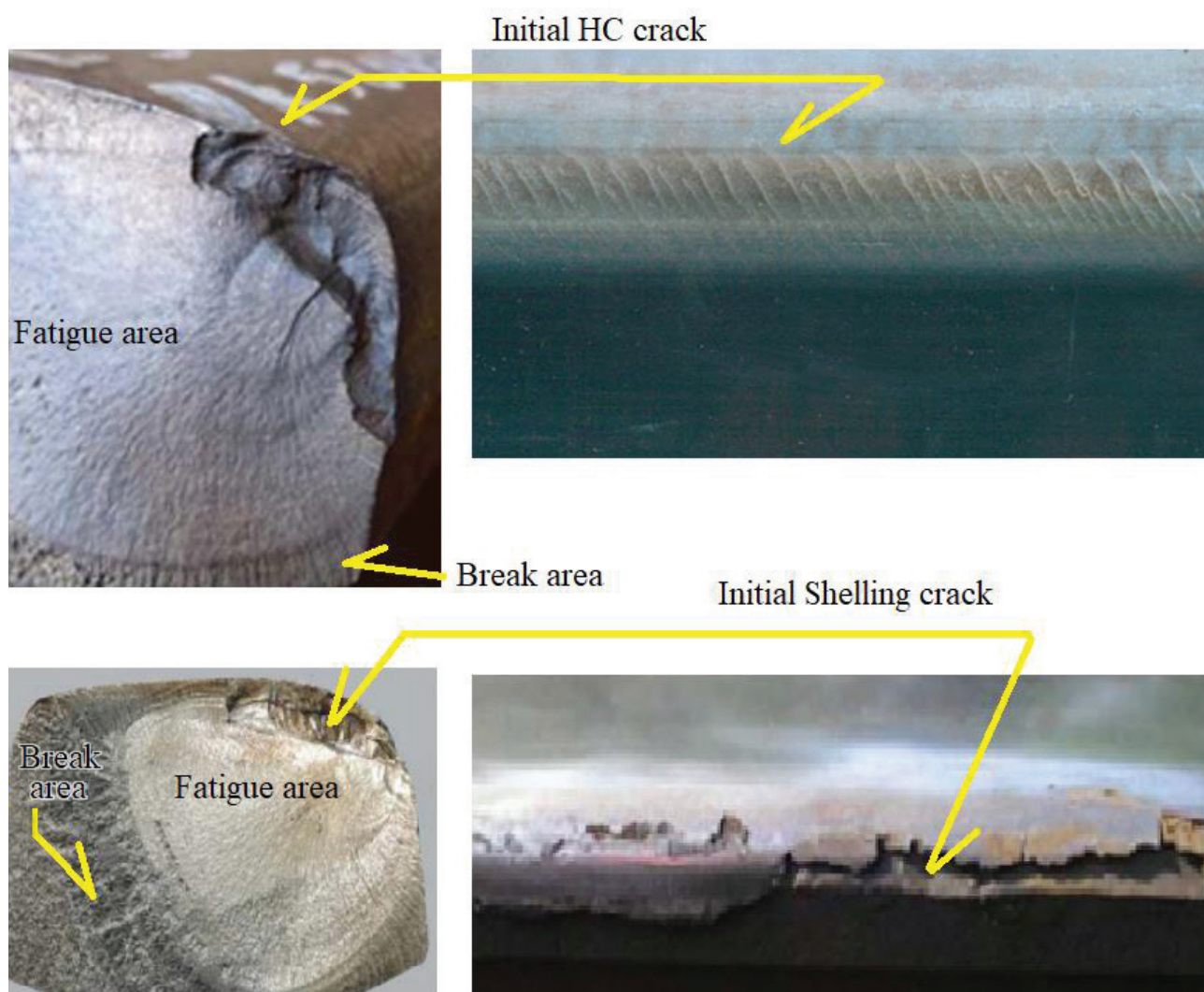
RCF nepravilnosti na glavi šine – smernice za održavanje



Slika 1. Dodir točak/šina duž koloseka i zone pojave RCF defekata

Završnu i nepoželjnu fazu razvoja RCF defekata predstavlja lom šine. Površina loma šine pokazuje karakteristične osobine kao što je prikazano na slici 2). Zona zamora po pravilu izgleda glatko i tamno, sa jasno vidljivom početnom pukotinom,

koja je povezana sa površinom glave šine, a koji je izložen kontaktu sa točkom. Ovakav specifičan izgled poprečnog preseka preloma šine omogućava jednostavnu vizuelnu identifikaciju RCF defekata (Slika 2).

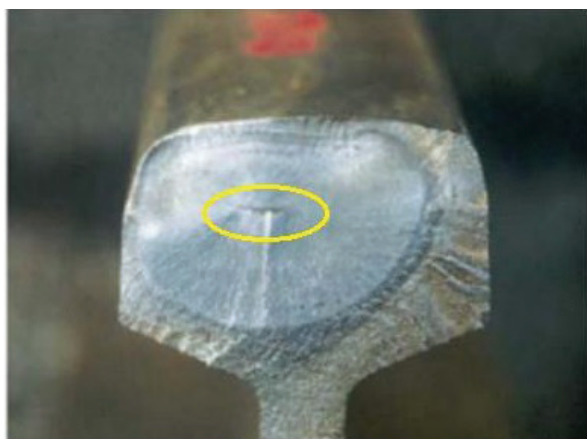


Slika 2. Površina čelika nakon loma izazvanog RCF defektima šine

Poređenja radi, na slici 3. prikazan je defekt koji je uzrokovan inkluzijama unetim tokom procesa proizvodnje šine. Očigledno je da se početna tačka razvoja nalazi unutar poprečnog preseka, u zoni zamora čelika, i nije povezana ni sa kakvim površinskim pukotinama. Ova vrsta defekta je izuzetno opasna i nepredvidlji-

va i javlja se nasumično na različitim mestima, pri čemu može da dovede do višestrukih uzastopnih lomova. Takvi defekti zahtevaju drugačiji pristup održavanju, uključujući hitno ultrazvučno ispitivanje cele zapremine šine, hitnu zamenu šine i, ako je potrebno, privremeno osiguravanje vezicama.

RCF nepravilnosti na glavi šine – smernice za održavanje



Central located initiation



Initiation from inside the gauge corner area

Slika 3. Prslina u obliku bubrega nastala usled zamora zbog greške u proizvodnji

Uobičajeni tipovi RCF defekata šina [13] uključuju¹: head checking (HC), squat, Belgrospi, flaking, spalling, lipping, side cutting i corrugation. Neslaganja u terminologiji, kodiranju i definicijama između IRS 70712 i evropskih standarda EN 13231-5 i EN 16729-3 mogu izazvati nesporazume i ugroziti bezbednost. Da bi se ovo sprečilo, UI treba da standardizuju terminologiju, poželjno usvajanjem IRS 70712, i da pripreme sveobuhvatni priručnik o defektima šina sa detaljnim opisom

lokacija, uzroka, metoda otkrivanja i načina održavanja u praksi. Posebna pažnja je potrebna za kombinovane RCF defekte (slike 4-7), na koje se uglavnom ne obraća dovoljno pažnje uprkos visokom riziku od pojave loma. Napori komisije CEN/TC 256 za harmonizaciju, u kombinaciji sa unapređenjem metoda inspekcije i obukom osoblja, neophodni su za obezbeđivanje dosledne i tačne identifikacije defekata na evropskim železničkim mrežama.



Slika 4. Kombinovani defekt (corrugation i Belgrospi) u zoni srca skretnice na železničkoj pruzi Beograd-Noví Sad

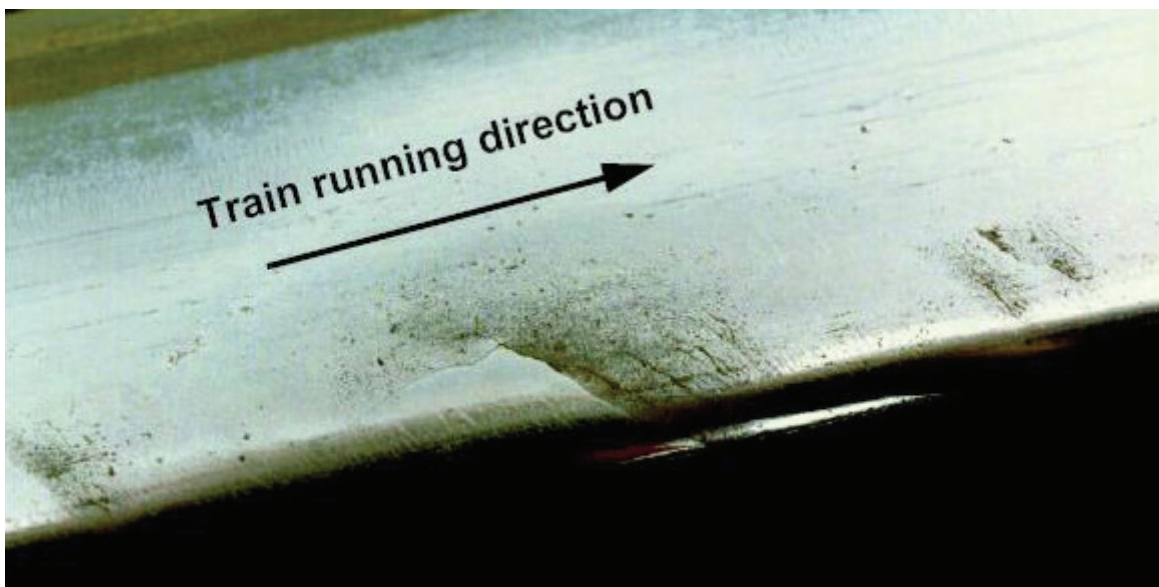
¹ U skladu sa preporukom, nazivi defekata su navedeni na engleskom jeziku.



Slika 5. Primer kombinovanog defekta koji uključuje corrugation, squat i squat seed



Slika 6. Prslina u squat defektu i lokalno udubljenje kod aluminotermijskog zavora



Slika 7. Squat defekt na voznoj ivici kombinovan sa HC defektom

RCF nepravilnosti na glavi šine – smernice za održavanje

Defekti se javljaju formiranjem naboranosti kratkih talasnih dužina dubine 0,03 mm. Ako se ova naboranost blagovremeno ne ukloni brušenjem, razvija se defekt Belgrospi koji može evoluirati u squat defekt. Autori ističu da dubina nabora od 0,03 mm na voznoj površi glave šine značajno povećava dinamičke sile koje deluju na šinama pruga za velike brzine. Iz tog razloga, ova vrednost je propisana kao donji prag za preduzimanje aktivnosti na brušenju glave šine. U urbanim sredinama, upravljanje razvojem ove kombinacije defekata povezano je sa uklanjanjem nabora radi smanjenja emisije buke i vibracija. Tokom vizuelnog pregleda defekata u stanici Pančevo Varoš, utvrđeno je prisustvo defekata tipa Belgrospi, koji se javljaju kao takozvano seme za razvoj squat defekata (Slika 5).

Lokalne heterogenosti u tvrdoći šine u zoni uticaja toplote aluminotermijskog zavarivanja mogu izazvati squat defekt šine (Slika 6). Pored vizuelnog pregleda, preporučuje se primena ultrazvučnog i ispitivanja vrtložnim strujama u zoni zavora.

Posebno opasna kombinacija je razvoj squat defekta na voznoj ivici šine sa HC defektom (Slika 7). Ova kombinacija može dovesti do spontanog loma šine ispod vozila koje prolazi. Kada se koristi podmazivanje šina u krivinama, posebna pažnja mora

se obratiti na sprečavanje pojave da kontaminacija maskira površine zahvaćene ovom opasnom kombinacijom defekata šina.

S obzirom na to da su šine osnovni element pruge, njihovi troškovi nabavke, ugradnje i održavanja značajno utiču na ukupne troškove životnog ciklusa (LCC) železničke infrastrukture. UI se sve više okreću na smanjenje troškova, čime uzimanje u obzir LCC-a predstavlja ključni deo tržišne strategije. Ovaj pristup doveo je do poboljšanja postojećih šinskih čelika i razvoja novih vrsta čelika.

Rezultati međunarodnog istraživačkog projekta [15] pokazuju korelaciju između zakrivljenosti koloseka i degradacije šina: habanje preovlađuje na krivinama sa radijusima do 1000 m, dok se RCF defekti javljaju na krivinama sa radijusima između 500 m i 5000 m. HC defekt je podrazumevan kao dominantni tip RCF defekta u ovom projektu.

U poređenju sa standardnom vrstom čelika R260, R350HT sa termički obrađenom tvrdom glavom šine pokazuje približno tri puta veću otpornost na habanje i najmanje dvostruko veću otpornost na RCF defekte [15]. Mnogi UI su odstupili od preporuka UIC iz 2005. godine i razvili sopstvene strategije izbora vrste čelika (Tabela 1).

Tabela 1. Pregled smernica za izbor vrste čelika na železničkim prugama sa mešovitim saobraćajem

Radius [m]	≤300	≤400	≤700	≤800	≤1500	≤3000	>3000
UIC	R350HT		R350HT / R260		R260		
DB	R350HT (≥ 30,000 t/d)				R260		
DB new	R350HT (≥ 50,000 t/d)					R260	
CH	R350LHT		R350LHT / R320Cr		R260		
AT	R350HT		R260				
SWE	R350HT		R260				
SWE (HH)	R350HT						R260
NOR	R350HT				R260		
UK	R260						
IT	R260						
BE, LUX	R350HT				R260		
NL	R350HT / R370CrHT		R370CrHT				R260
DK	R350HT				R260		
PL	R350HT				R260		
H	R350HT				R260		
RO	R350HT				R260		

Krutost šinskog oslonca ključni je faktor koji utiče i na nastanak i na razvoj RCF defekata. Ova korelacija je potvrđena inspekcijom squat defekata u stanici Pančevo Varoš, koju su izvršili autori.

Savremeno upravljanje razvojem RCF defekata prvenstveno se oslanja na reprofiling šina na pruzi. Različiti UI usvajaju različite strategije reprofilinga na osnovu svog iskustva, stručnosti i važećih tehničkih propisa. Reprofilisanje produžava vek trajanja šina, smanjuje troškove održavanja i unapređuje bezbednost.

3. ZAKLJUČAK

Ovaj rad ispituje ograničenja postojećih standarda i naglašava potrebu za usklađenom terminologijom. Predlaže se koncept jedinstvenog priručnika o šinskim defektima, koji je prilagođen operativnom okviru pojedinačnih UI. Dalje, analizira se uloga sistematskih inspekcija, primena naprednih tehnologija detekcije i implementacija reprofilinga šina kao primarne strategije održavanja.

Osnovni zaključci rada su sledeći:

- kombinovani defekti predstavljaju kritičan bezbednosni rizik zbog velike verovatnoće loma šina, ali nisu dovoljno obrađeni u važećim klasifikacijama;
- kvalitet čelika i krutost šinske podloge imaju odlučujući uticaj na nastanak i razvoj RCF defekata;
- povezivanje karakteristika defekata sa konstruktivnim i materijalnim svojstvima značajno unapređuje efikasnost u planiranju održavanja.

Usklađeni sistem klasifikacije i okvir za upravljanje defektima neophodni su za poboljšanje pouzdanosti i bezbednosti železničke infrastrukture. Usvajanje jedinstvenog priručnika za šinske defekte, koji je potkrepljen doslednom terminologijom, sistematskim inspekcijama i naprednim strategijama održavanja, obezbedio bi upravljačima železničke infrastrukture robusniji set alata za prevenciju i kontrolu RCF-a. Autori posebno predlažu:

- prikupljanje istorijskih i aktuelnih podataka o šinama unutar koloseka, uključujući konstruktivne karakteristike, evidenciju inspekcija i održavanja, kao i dokumentovane defekte;

- analizu ovih podataka radi procene trenutnog stanja šina i identifikacije potencijalnih problema unutar koloseka, uključujući donji stroj;
- razvoj intervencija, popravki ili preventivnih mera usmerenih na održavanje ili obnavljanje šina, celokupne konstrukcije koloseka i voznog parka.

Zaključke ovog rada trebalo bi implementirati u tehničke propise za održavanje železničke infrastrukture.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije kroz istraživački projekat br. 200092.

LITERATURA

- [1] International Union of Railways: IRS 70712, Rail defects – Track structure – Identification and classification of rail defects. (2018).
- [2] CEN: EN 13231-5, Railway applications - Track - Acceptance of works - Part 5: Procedures for rail reprofiling in plain line, switches, crossings and expansion devices. (2018).
- [3] CEN: EN 16729-3, Railway applications - infrastructure - non-destructive testing on rails in track - Part 3: Requirements for identifying internal and surface rail defects. (2018).
- [4] Mičić, M., Brajović, L., Lazarević, L., Popović, Z.: Inspection of RCF rail defects—Review of NDT methods. Mechanical Systems and Signal Processing 182, 109568 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109568>
- [5] Heyder, R., Brehmer, M.: Empirical studies of head check propagation on the DB network. Wear 314(1–2), 36–43 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.035>
- [6] Schoech, W., Heyder, R., Grohmann, H.D.: Contact geometry and surface fatigue – guidelines for appropriate rail maintenance. In: 7th Int. Conf. Contact Mech. Wear Rail/Wheel Syst (2006).
- [7] Dey, A., Casperson, R., Pohl, R., Thomas, H.M.: Die Klassifizierung von Oberflächenfehlern in Schienen mit der Wirbelstromprüfung. DG-

- ZfP-Jahrestagung, Münster (2009), 94.
- [8] Heyder, R., Girsch, G.: Testing of HSH® rails in high-speed tracks to minimize rail damage. *Wear* 258(7-8), 1014-1021 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.050>
- [9] Rohmann, H.D.: Beschädigungsarten an der Schiene - Verursacht durch den Betrieb. Internationales Symposium Schienenfehler, Brandenburg (2000), 27-38.
- [10] Zoeteman, A., Dollevoet, R., Li, Z.: Dutch research results on wheel/rail interface management: 2001–2013 and beyond. *Journal of Rail and Rapid Transit* 228(6), 642-651 (2014). <https://doi.org/10.1177/095440971452437>
- [11] Dollevoet, R. P. B. J.: Design of an anti-head checking profile based on stress relief. PhD Thesis, University of Twente (2010).
- [12] Krishna, V. V., Hossein-Nia, S., Casanueva, C., Stichel, S.: Long term rail surface damage considering maintenance interventions. *Wear* (460-461), 203462 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203462>
- [13] Popović, Z., Lazarević, L., Mičić, M., Brajović, L.: Critical analysis of RCF rail defects classification. *Transportation Research Procedia* 63, 2550-2561 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.294>
- [14] Ishida, M.: History of mitigating rolling contact fatigue and corrugation of railway rails in Japan - Review. *EPI International Journal of Engineering* 1(2), 13–24 (2018). <https://doi.org/10.25042/epi-ije.082018.02>
- [15] Innotrack: Definitive guidelines on the use of different rail grades. (2006). Available at: https://www.charmec.chalmers.se/innotrack/deliverables/sp4/d415-f3-railgrade_selection.pdf.