

Željko Stojanović^{1*}, Božidar Matijević²,
Sanja Stanisavljević³, Spasoje Erić⁴

¹"Šinvoz" d.o.o., Zrenjanin, Srbija, ²Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, ³Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, Srbija, ⁴Visoka tehnička škola strukovnih studija, Zrenjanin, Srbija

Pregledni rad

ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585

UDC:677.052.93::629.431:539.422.24

doi: 10.5937/zasmat2101051S



Zastita Materijala 62 (1)

51 - 62 (2021)

Istraživanje mehanizama loma železničkih osovina

IZVOD

U radu je dat sistematizovan pregled literaturnih izvora koji razmatraju uticaje kritičnih oštećenja mehaničke, korozivne i termičke prirode koja se mogu pojaviti na železničkim osovinama u toku eksploatacije i koja mogu biti uzročnici njihovog loma. Predstavljeni su rezultati istraživanja mehanizama koji svojom pojavom i delovanjem uzrokuju nastajanje pukotina, širenje pukotina i konačni prelom osovine železničkog vozila, kao što su zamor materijala i pojava lokalizovanih zarezata nastalih odvajanjem farbe (premaza), oštećenjima od udara balasta i piting korozijom. Analiziran je uticaj visokih temperatura i pregrevanja na osovine i dat je izvod iz istraživanja objavljen u okviru jednog istraživačkog izveštaja. Istaknuti su neki značajni predlozi za optimizaciju konstrukcije osovina koji bi uzimali u obzir analizu vremenski promenljivih naprezanja osovine, spektar naprezanja u eksploataciji, toleranciju osovine na oštećenja i postojanje zaostalih površinskih naprezanja. Prikazani su i objašnjeni reljefi prelomnih površina osovine nakon železničkih incidenata i iskliznuća šinskog vozila iz šina.

Ključne reči: osovina, železničko vozilo, zamor materijala, železnički incidenti, korozija

1. UVOD

Osovine su zajedno sa točkovima delovi šinskih vozila od kojih najviše zavisi bezbednost saobraćaja. Osovine železničkih vozila jedna su od najkritičnijih komponenti u železničkim vozilima, jer njihovi otkazi mogu dovesti do iskliznuća vozila iz šina i, potencijalno, do velikih bezbednosnih problema [1]. Železnički saobraćaj poslednjih godina značajno je porastao. Duže garniture vozova, masivniji tereti i veći broj vozova na prugama delimično pokazuju ponovni uspon železničkog saobraćaja, jer je železnička industrija stvorila dobre ekonomske argumente za prevoz tereta. Sa preporodom železničkog saobraćaja došlo je do porasta defekata u vozovima zbog povećanog zamora materijala [2].

Prema Pokorný i grupi autora [3], železničke osovine su podvrgnute opterećenju promenljive amplitude. Varijabilnost je uzrokovana mnogim različitim režimima rada vozova. Prema navodima ovih autora u časopisu *Procedia Engineering* u 2014.

godini, dominantno opterećenje je uzrokovano masom vozila koja generiše rotaciono savijanje tokom kretanja vozova. Ipak, postoje dodatne sile koje se generišu kada voz prolazi kroz zakrivljeni kolosek, preko železničkih prelaza, skretnica, sastava šina itd.

Veliki deo svih incidenata u železničkoj industriji koji su povezani sa otkazima opreme voza nastaju usled širenja zamornih pukotina u osovina. Osovina je jedan od najvažnijih sastavnih delova šinskog vozila koja prenosi masu vozila na točkove, prenosi vertikalna i horizontalna opterećenja nastala tokom statičkog i dinamičkog kretanja i nosi vožni i kočni moment [4]. Kada je osovina izložena snažnom mehaničkom naprezanju, to može da dovede do loma osovine. Promenljivo naprezanje komponente može da uzrokuje pojavu takozvanih zamornih prslina koje se često javljaju na zasecima (lokalnim udubljenjima, zarezima) mašinskih delova [5].

Zamorne prsline mogu biti prouzrokovane prelaznim radiusima, nemetalnim uključcima, udarcima kamena (balasta) ili korozijom. Takve prsline mogu usled mehaničkog naprezanja pri vožnji početi da rastu i konačno dovesti do loma. Na osovinama, prsline se mogu očekivati u radijalnom pravcu na osu, naročito na mestima

*Autor za korespondenciju: Željko Stojanović

E-mail: zeljkoelemer@gmail.com

Rad primljen: 20. 11. 2020.

Rad prihvaćen: 09. 01. 2021.

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

sedišta i njihovim radiusima. Radijalna prslina može nastati i na rukavcu osovine.

Stepen zamornog oštećenja osovina je jedan od ograničavajućih faktora sigurnosti železničkih vozila. Ovo je glavni razlog za razvoj novih koncepata konstrukcije osovine sa većom otpornošću na pokretanje i širenje zamornih pukotina. Kao prilog tome, Fajkoš i grupa autora [6] prijavljuju da se korišćenjem indukcionog kaljenja u pod-površinskim slojevima osovine uvode visoka pritisna naprezanja što sprečava širenje kratkih zamornih pukotina. Oni dalje navode da se prelom može, nakon dugog vremena u radu, pokrenuti pod značajno nižom amplitudom naprezanja od dinamičke čvrstoće definisane za 10^7 ciklusa, ističući da koncept dinamičke čvrstoće mora uvek biti dopunjen tolerancijom zamornog oštećenja kako bi se garantovala sigurnost osovine.

Zerbst i grupa autora [7] smatraju da se procena bezbednosti železničkih osovina zasniva na dvostepenom pristupu: projektovanje granice izdržljivosti i redovnih pregleda koji se, u smislu opšte bezbednosne filozofije, odnose na koncepte sigurnog veka trajanja i tolerancije oštećenja. Rinaldi i grupa autora [8] toleranciju oštećenja vide kao sposobnost strukture da nosi predviđena opterećenja u prisustvu agresivnog delovanja okoline, zamora materijala, i slučajnih oštećenja sve do uočavanja oštećenja (bilo tokom redovnih ili vanrednih pregleda) i njihovog saniranja. Isti autori trajnost vide kao sposobnost strukture da izdrži degradaciju materijala usled zamora, slučajnih oštećenja i agresivnog delovanja okoline do te mere da se može držati pod kontrolom različitim, ekonomski isplativim, programima inspekcije i održavanja.

Imajući u vidu izrazitu kompleksnost problema, cilj ovog rada je da analizira i objasni mehanizme otkaza osovina železničkih vozila koji se javljaju u vreme njihove eksploatacije kao posledica mehaničkih, korozivnih i termičkih naprezanja, ali i da bliže rasvetli uticajne faktore čija pojava inicira mikropukotine, njihov rast i propagaciju.

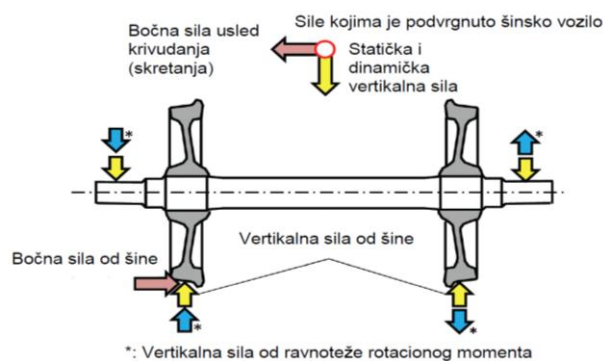
2. EFEKAT RADNIH OPTEREĆENJA NA OSOVINE

2.1. Osovinski sklop kao element trčećeg stroja

Zbog sve veće potražnje za bržim i sigurnijim železničkim prevozom, potrebni su pouzdani putnički i teretni osovinski slogovi. Železnička vozila sastoje se od mnogo različitih elemenata, od kojih su neki kritični sa stanovišta sigurnosti. Osovinski slogovi su jedna od najvažnijih komponenti u železničkim vozilima, kako u vagonima, tako i u lokomotivama, jer njihovi otkazi mogu dovesti do iskliznuća iz šina i, potencijalno, do velikih

bezbednosnih problema, uključujući i gubitak ljudskih života [1]. Osovinski slogovi vozova sastoje se od tri glavne komponente, točkova, osovine i ležajeva. Veliki deo svih incidenata u železničkoj industriji povezan sa otkazima osovinskih slogova je usled širenja pukotina u osovinama. Predviđanje zamornog loma osovina igra važnu ulogu u njegovom sprečavanju. Za predviđanje ponašanja osovine pod radnim naprezanjima, potrebno je proceniti zamornu čvrstoću u kritičnim područjima osovine. [9] Različita opterećenja na komponentama dovode do kumulativnog otkaza mehanizma.

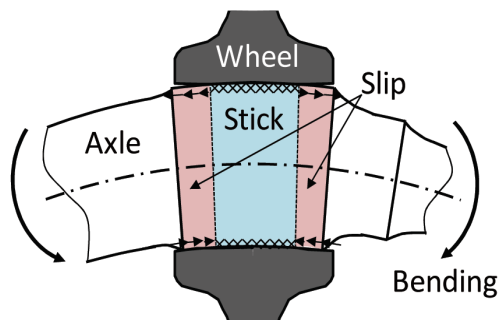
Osovina prima sva opterećenja od sanduka kola, sile koje nastaju usled dodira točkova sa šinom, kao i opterećenja prilikom dejstva kočnica. Vertikalne i horizontalne sile opterećuju osovinu na savijanje [10,11]. Sile kojima je podvrgnut sklop točka i osovine prikazane su na slici 1.



Slika 1. Sile kojima je podvrgnut sklop točka i osovine [12]

Figure 1. Forces subjected to a wheel-axle assembly [12]

Slika 1 pokazuje spoljašnje sile koje deluju na osovinski sklop. Kao što je prikazano, vertikalna sila deluje blizu svakog kraja osovine preko ležaja, dok reakciona sila (takođe u vertikalnom smeru) deluje na površinu kontakta između osovine (točka) i šine. Pored toga, u zakrivljenom delu železničke pruge (koloseka), lateralna (bočna) sila koja nastaje kontaktom između točka i šine deluje prema spoljnoj šini. U ovom trenutku, osovinski sklop je podvrgnut tipičnom naprezanju na rotaciono savijanje [12]. Kada nisu pod opterećenjem, osovina i napresovani točkovi izgledaju kao potpuno čvrsta celina. Međutim, kada su podvrgnuti naprezanju na rotaciono savijanje, kao što je prikazano na slici 2, deformacija točka ne uspeva da prati u potpunosti savojnu deformaciju osovine i, kao rezultat toga, pri kraju presovanog dela sklopa javlja se relativno klizanje prouzrokovano razlikom u deformaciji.



Slika 2. Šematska ilustracija savojne deformacije presovanog spoja osovine [12]

Figure 2. Schematic illustration of bending deformation at press-fitted part of an axle [12]

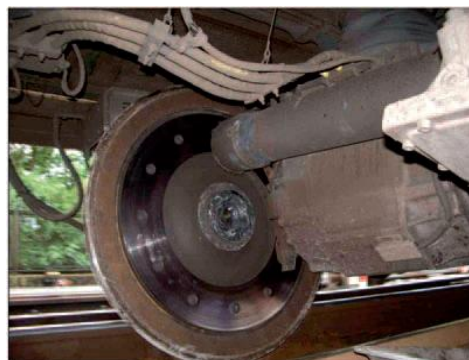
2.2. Metodi optimizacije konstrukcije

Hirakawa i grupa autora [13] analizirali su uzroke otkaza na železničkim osovina da bi pokazali kako su rezultati primenjeni za poboljšanje proizvodnje osovine. U radu su uporedili osovine koje se koriste u Evropi i Japanu u smislu njihove strategije projektovanja zamora. Dedmon i grupa autora [14] predstavili su rezultate kalkulacija analize napona koje su rađene za različite konstrukcije severnoameričkih osovine za teretne vagona. U tom radu predloženo je da severnoamerička industrija teretnih železnica usvoji standardnu metodu analize napona osovine za nove konstrukcije osovine.

Beretta i grupa autora [15] naglašavaju da se uprkos kritičnosti osovine, savremeni pristupi nisu koristili u rešavanju kritičnog ispravljanja tradicionalne konstrukcije. U ovom radu oni su proučavali efekte skale u dinamičkoj čvrstoći i brzini rasta pukotina kod čelika visoke čvrstoće koji se koristi za železničke osovine koje saobraćaju velikim brzinama. Ispitivanja dinamičke izdržljivosti na uzorcima sa mikro urezima dovela su do određivanja pragova zamora za male pukotine ispitivanog čelika. To im je omogućilo da uspešno analiziraju „efekat skale“ i zamornu čvrstoću punih osovine u smislu praga naprezanja za kratke pukotine nastale usled malih nemetalnih uključaka. Iznoseći zaključke, oni naglašavaju da se procena zamora železničkih osovine trenutno zasniva na vrlo jednostavnim inženjerskim pristupima zasnovanim na dozvoljenim zamornim naprezanjima preuzetim iz tehničkih preporuka i standarda. Međutim, prema njima, ove metode nisu u stanju da podrže primenu novih materijala visoke čvrstoće i tehnike integriteta konstrukcija zasnovane na eksperimentima na laboratorijskim uzorcima zamora.

Autori Grubisic i Fischer [16] razmatrali su u svom radu uticaj pristupa projektovanju osovine

voza i nedostatke trenutno korišćenih postupaka za validaciju zamorne čvrstoće. Nedavne procene uzroka otkaza osovine tokom eksploatacije pokazale su da tzv. pristup “projektovana dinamička izdržljivost” koji je do danas usvojen ne uzima u potpunosti u obzir uslove stvarne operativne upotrebe. Postupak predložen u postojećim standardima pretpostavlja dinamičku izdržljivost koja nije realno primenljiva na stvarne uslove rada i oni ne uzimaju u obzir stvarna naprezanja na koja se nailazi u stvarnoj eksploataciji. O problemima stvorenim takvim pristupom diskutovali su koristeći primere stvarnih otkaza osovine putničkog voza u Nemačkoj. Dozvoljena naprezanja zasnivaju se na zamornoj čvrstoći na 10^7 ciklusa. Nijedan od ovih standarda ne zadovoljava zahteve koji se odnose na potreban vek trajanja osovine. Za osovinu ICE voza sa prečnikom točka od 0,9 m i pređenom udaljenošću od 500.000 km godišnje, svakim danom upotrebe generiše se ukupno 484.000 okretaja ili ciklusa osovine; s toga se za oko 21 dan rada postiže 10^7 ciklusa. Ovaj broj ciklusa dovodi do kontinuiranog smanjenja zamorne čvrstoće.



Slika 3. Polomljena osovina IC518 ICE3 voza u glavnoj železničkoj stanici u Kelnu, 09.07.2008. godine [17]

Figure 3. Broken axle of IC518 ICE3 train at the main train station in Cologne, 09.07.2008. [17]

Radna opterećenja vozova pri povećanim brzinama ili sa prilagodljivim odzivom šasije na karakteristike koloseka (npr. tehnika naginjanja) premašuju vrednosti pretpostavljene u Evropskim standardima. Ako su radna naprezanja veća od zamorne čvrstoće, stvaraju se početne pukotine koje se šire ako se ne otkriju na vreme i mogu prouzrokovati totalni prelom osovine. To je bio slučaj u Nemačkoj kod brzih vozova ICE 3 (slika 3), ICE T (brzi nagibni voz), ICE TD (nagibni vozovi VT 611 i 612) i lokalnih vozova (S i podzemni vozovi).

Uticaj ovih otkaza na rad vozova i visoki troškovi za kontrolu problema ili zamenu osovine

sa novim i jačim osovinama, stvorili su troškove od nekoliko milijardi evra. Treba napomenuti da ovaj problem nije ograničen samo na putničke vozove: nesreća teretnog voza u Vijaređu, u Italiji (slika 4), mora se smatrati rezultatom neadekvatne konstrukcije osovine [16].

Zato su oni za validaciju čvrstoće u eksploataciji predložili postupak koji je povezan sa praksom. Ovaj postupak uključuje spektar napre-

zanja i zamornu čvrstoću osovina koji su povezani sa eksploatacijom. Da bi se potvrdila konstrukcija osovine, oni smatraju da se moraju uzeti u obzir vremenski promenljiva naprezanja u pojedinačnim kritičnim oblastima osovine [9], predstavljena njihovim spektrima naprezanja. Dozvoljeni nivoi naprezanja u pojedinačnim oblastima osovine zavise i od zamorne čvrstoće i od spektra radnih naprezanja.



Slika 4. Polomljena osovina koja je izazvala nesreću u stanici Viareggio, Italija, (levo); uvećana površina preloma, (desno) [1]

Figure 4. Broken axle that caused an accident at Viareggio station, Italy, (left); increased fracture area, (right) [1]

Znanje o preostalom radnom veku železničkih osovina je veoma važno za bezbedan rad vozova. Železničke osovine mogu sadržati neke nedostatke poput pukotina, ogrebotina ili nehomogenosti koje bi mogle doprineti pokretanju zamornih pukotina i, u završnoj fazi, otkazu osovine. Metode ispitivanja bez razaranja nisu pouzdane za otkrivanje relativno kratkih (oko 1-2 [mm]) ali opasnih pukotina. Za konzervativnu procenu preostalog radnog veka treba uzeti u razmatranje železničku osovina koja sadrži početnu pukotinu. Preostali radni vek je dat brojem ciklusa opterećenja za rast zamorne pukotine od početne veličine pukotine do kritične veličine sa posledničnim zamornim otkazom železničke osovine [18]. Jedan ciklus opterećenja osovine predstavlja jedan obrtaj točka [18].

Prema Hutař i grupi autora [19] pouzdan postupak procene preostalog radnog veka treba da uzme u obzir stvarnu geometriju osovine, karakteristike materijala i opterećenje železničke osovine. U svom radu, oni prikazuju metodologiju za određivanje preostalog radnog veka zasnovanu na pristupu mehanike loma, uzimajući u obzir stvarni spektar ciklusa opterećenja, postojanje napresovanih točkova i površinska zaostala naprezanja stvorena termo-mehaničkom površinskom

obradom železničke osovine. Rezultati su pokazali da je efekat zaostalih naprezanja značajan i da se ne sme zanemariti u numeričkoj proceni preostalog radnog veka osovine.

Zhu i grupa autora [20] u svom radu istraživali su otkaz železničke osovine pogonske lokomotive koja je u Kini saobraćala tri miliona kilometara. Rezultati su pokazali da je došlo do oštećenja različitog obima (tarnog oštećenja, zamornih pukotina i korozije) usled interferencije sklopa sedišta točkova, sedišta zupčanika i sedišta ležajeva bez bilo kakvih materijalnih defekata. Obilne pukotine raspoređene na sedištu točka pojavile su se u podpovršini i pokazivale su višestruke karakteristike, koje su uzrokovale tarni zamorni otkaz usled interferencije (uzajamnog uticaja) sklopa pod naizmeničnim opterećenjima rotacije i savijanja. Glavni razlog nastanka zamorne pukotine bio je taj što je došlo do brojnih isprepletanih i nagomilanih dislokacija u podpovršini sedišta točka što je rezultovalo koncentracijom napona na granici zrna i granici faze, a kada je premašila granicu čvrstoće materijala, inicirala bi se i širila mikropukotina. Da bi se smanjila kon-

centracija napona u delu sedišta točka, oni preporučuju da strukturu osovine treba dodatno optimizovati, a površinu ojačati što je takođe presudno za odupiranje tarnim oštećenjima. Projekat EURAXLES koji finansira Evropska Unija uspešan je u uvođenju revidiranih koncepata projektovanja osovine uzimajući u obzir uslove stvarnih radnih opterećenja i eksperimentalno određene dinamičke čvrstoće, uključujući nove materijale i metode u cilju predviđanja "verovatnoće otkaza" [21].

3. EFEKAT MEHANIČKIH I KOROZIONIH OŠTEĆENJA NA OSOVINE

3.1. Napomene pre analize

Prelom osovine ili osovinskog rukavca usled zamora često je pokrenut mehaničkom ogrebotinom, nedostatkom u materijalu osovine ili nastankom korozije usled mehaničkog oštećenja zaštitnog sloja na osovini. Pokretanje pukotine je sporo i teško uočljivo ukoliko ne postoji vidljiv uzrok. Jednom kada pukotina naraste do veličine koja se lako može otkriti ispitnom opremom, dalji rast može biti prilično brz. Otkrivanje i popravljavanje mogućih mesta nastanka pukotina su s toga od suštinske važnosti. Povećana upotreba materijala visoke čvrstoće može smanjiti verovatnoću nastanka pukotine [22].

Pitanja integriteta konstrukcije osovine obično su povezana sa opštom ili piting korozijom, a ređe sa zamorom uzrokovanim stohastičkim opterećenjima savijanjem i visokim nivoima vibracija, kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju ovog rada. Prema autoru Arash [23] piting korozija se može opisati kao ekstremno lokalizovani oblik korozije gde se male jamice razvijaju na površini metala. Struja će se proizvoditi unutar šupljine koja postaje anodna, dok će deo metala izložen atmosferi postati katoda. Kao rezultat, pokrenuće se korozija.

Korozione jamice mogu delovati kao sredstvo za povećanje naprezanja, pa se, prema tome, iz njih mogu inicirati, a potom širiti, zamorne pukotine. Ako se piting korozija i pukotine povezane sa njom ne otkriju na vreme, pukotina će dostići kritičnu veličinu uzrokujući prelom osovine i otuda iskliznuće iz šina. Aksijalne i radijalne pukotine mogu nastati usled zamornog opterećenja tokom vremena eksploatacije. Zamornim pukotinama biće potrebno mnogo manje vremena da se prošire do kritične ozbiljnosti nego što je bilo potrebno za iniciranje.

3.2. Radni uslovi značajni za pokretanje i širenje lomnih pukotina

Istražujući toleranciju osovine na oštećenja, Zerbst, Schödel i Beier [24] izveštavaju da je površinska obrada od najvećeg značaja za pokretanje pukotina, budući da se maksimalno naprezanje na savijanje pojavljuje na površini osovine. U svom radu oni dalje navode da ponekad, ali prilično retko, udar balasta izaziva lokalne ureze koji naknadno deluju kao pokretači pukotina. Oni se pozivaju na istraživanja autora Benyon i Watson iz 2001. godine koji u svom radu, analizirajući statistiku otkaza, izveštavaju o korozionim jamicama koje igraju glavnu ulogu kao mesta pokretanja pukotina. U cilju izbegavanja ovoga, na osovine se nanose premazi. Međutim, ako je premaz na osovini lokalno oštećen, korozija se može pojaviti kao mnogo teži lokalni problem. Nadalje, oni se pozivaju na rad Beretta i grupe autora iz 2008. godine koji su pokazali da čak i blago korozivna supstanca, poput kišnice, može biti štetna u pogledu širenja zamornih pukotina u materijalu osovine.

Treba imati na umu da zamorna čvrstoća nije svojstvo materijala i/ili komponenata utvrđeno jednom zauvek, ali može se smanjiti tokom veka trajanja komponente. Za sadašnja istraživanja, pretpostavljeno je da je tipična početna pukotina na železničkim osovina polukružna, dubine 2[mm], iako neki autori pretpostavljaju da je pukotina dubine 5[mm] najmanja pukotina koja se može otkriti ultrazvučnim metodama. Treba imati na umu da specifikacija početne veličine pukotine odgovara određenoj verovatnoći otkrivanja pukotine primenjenom tehnikom ispitivanja bez razaranja. Treba znati da i verovatnoća otkrivanja u odnosu na karakteristike dubine pukotine vrlo zavisi od primenjene tehnike ispitivanja bez razaranja.

Najbolji rezultati se dobijaju pregledom magnetnim česticama, čija primena, međutim, zahteva otvoren pristup površini osovine, tj. točkovi se moraju demontirati sa svojih sedišta na osovini. S druge strane, s obzirom da se mala oštećenja mogu pronaći s velikom verovatnoćom, mogući su relativno veliki intervali pregleda koji bi mogli omogućiti kombinaciju pregleda sa redovnim remontom osovinskih slogova, pa bi se na ovaj način uštedeli troškovi remontera. Slika 5 prikazuje neke primere zareza koji se mogu razviti u zamorne pukotine. Mehaničko oštećenje (kao oštećenje od udara balasta) može da se pojavi u bilo koje vreme tokom eksploatacije osovine.



Slika 5. Primeri oštećenja osovina železničkih vozila tokom eksploatacije. a: odvajanje farbe; b: rupičasta (pitting) korozija; c: oštećenje od udara balasta [1]

Figure 5. Examples of in-service railway axle damage. a: paint detachment; b: corrosion pits; c: damage from ballast impact [1]

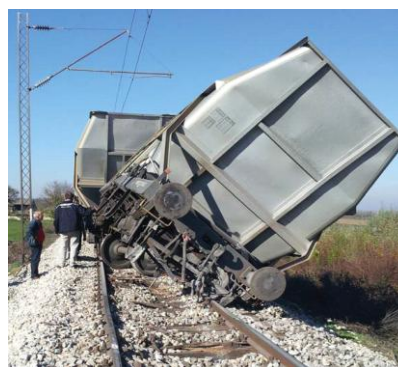
Autor Haddinott [25] objašnjava delovanje ovih faktora na primeru iskliznuća teretnog voza u Rickerscote-u, marta 1996. godine. U svom radu, on prijavljuje da je to bio potpuni prelom osovine i posledično iskliznuće dvoosovinskog teretnog vagona koji je prevozio tečni ugljendioksid (slika 6).



Slika 6. Prelomljena osovina iz teretnog vagona koji je učestvovao u incidentu u Rickerscote-u [25]

Figure 5. Broken axle from the freight wagon involved in the accident at Rickerscote [25]

Kada je slomljena osovina ispitana, postalo je jasno da je piting (rupičasta) korozija povećala lokalno naprezanje u osovini što je iniciralo zamornu pukotinu. Na srednjem delu osovine, gde se farba odlepila sa površine, nalazile su se korozione jamice uglavnom duboke oko 0,03[mm], dok je jedna bila duboka 0,05[mm]. Verovatno je da je pukotina koja se pokrenula iz jedne od ovih jamica, porasla i dovela do loma osovine na dva dela. Otkazi osovina na teretnim vagonima za prevoz uglja su relativno česta pojava zbog velike opterećenosti u smislu visokog broja radnih sati teretnih vagona u eksploataciji. Na slici 7 prikazan je izgled havariisanog vagona kod kojeg se havarija desila pri kretanju brzinom od 70[km/h].



Slika 7. Izgled havariisanog teretnog vagona za prevoz uglja [26]

Figure 7. Appearance of a damaged freight wagon for transporting coal [26]

Momčilović i grupa autora [26] u svojoj monografiji pozivaju se na istraživanja Ristivojevića i grupe autora u kojima su razmatrani razlozi za prelom osovine teretnog železničkog vagona za transport uglja.



Slika 8. Izgled prelomne površine vagonске osovine [26]

Figure 8. Appearance of the fracture surface of the wagon axle [26]

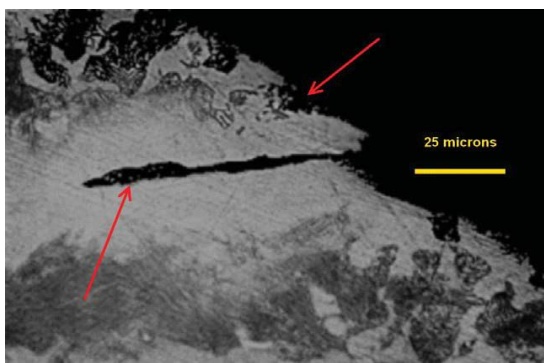
U toku eksploatacije osovine su opterećene isključivo na savijanje. Raspoloživi podaci pokazali su da je osovina kod ovog vagona bila periodično pregledana i remontovana. Bez obzira na redovan pregled, do loma osovine je došlo na prelaznom radijusu. Izgled prelomne površine je prikazan na slici 8, a na slici 9 dat je detalj prelaznog radijusa sa korozionim jamicama.



Slika 9. Detalj prelaznog radijusa na vagonskoj osovini sa višestrukim korozionim jamicama, vidljivim nakon uklanjanja rđe brušenjem [26]

Figure 9. Detail of the transition radius on the wagon axle with multiple corrosion pits, visible after rust removal by grinding [26]

Ristivojević i grupa autora nedvosmisleno dokazuju da su mesta iniciranja zamornih prslina zapravo bile korozione jamice na prelaznom radijusu, prikazane na slici 10.



Slika 10. Koroziona jamica sa prslinom koja se spojila sa sulfidnim nemetalnim uključkom na feritnoj traci na prelaznom radijusu vagonске osovine [26]

Figure 10. A corrosion pit with a crack connected to a sulphide non-metallic inclusion on the ferrite strip at the transition radius of the wagon axle [26]

Slično prethodnom istraživanju, autor Odanović [27] u svom radu analizirao je polomljenu osovину iz gorenavedenog slučaja, iz železničkog teretnog vagona za transport uglja od rudnika uglja do termoelektrane. Železnička osovina bila je u

eksploataciji tokom poslednjih 35 godina. Da bi razjasnio uzrok kvara, izvršio je detaljnu analizu mehaničkih svojstava, makro i mikrostrukture materijala osovine. Prema njegovim rečima, ova studija je pokušaj sa ciljem da se poboljša kontrola i održavanje osovina u eksploataciji i da se izbegnu buduće nesreće. Na osnovu rezultata istraživanja i analize hemijskog sastava utvrdio je da je čelik koji se koristio za izradu slomljene osovine u skladu sa standardnim zahtevima. Međutim, mehaničke osobine primenjenog materijala su bile ispod zahteva definisanih u standardu EN 13261:2010, što se ogledalo u niskim vrednostima lomne žilavosti (K_{Ic}), posebno u transverzalnom smeru, koje su ukazivale na malu otpornost na širenje inicijalnih pukotina sa površine osovine. Niske vrednosti ispitivanih mehaničkih osobina objasnio je neadekvatnom stopom redukcije u procesu vrućeg valjanja/kovanja tokom proizvodnje osovine ili neadekvatnim procesom termičke obrade posle vruće obrade plastičnim deformisanjem.

Najvažniji zaključak njegovog rada bio je da je korozija koja je pokrenuta sa oštećenog premaza osovine i ispod premaza, prema celoj površini kritičnog radijusa, stvorila uslove za formiranje jamica. Inicijalna pukotina uzrokovana je korozionim jamicama na površini kritičnog radijusa osovine. Zbog slabosti materijala, ove pukotine su propagirale, stvarajući zubaste pukotine i šireći se mehanizmom zamora sve dok osovina nije mogla da izdrži naprezanja koja su proisticala iz uslova eksploatacije. Prema ovom autoru, ove okolnosti dovele su do konačnog loma osovine. Na kraju svog rada, navodeći preventivne mere za sprečavanje budućih otkaza, Odanović ističe da je potrebno poboljšati kontrolu zaštite od korozije i pregled osovine sa aspekta početnih pukotina tokom redovnog održavanja.

4. UTICAJ VISOKIH TEMPERATURA NA OTKAZ OSOVINE

Na osnovu zbirnog izveštaja i baze podataka o incidentima iskliznuća iz šina projekta D-RAIL [28], iskliznuća osovina iz šina su obično povezana sa prelomom osovine u šinskom vozilu, uglavnom pod uslovima visokog dinamičkog opterećenja. Međutim, otkazi povezani sa visokom temperaturom, odnosno pregrevanjem glavna su kategorija otkaza osovina usled pregrevanja ležajeva uzrokujući "sagorevanje" osovine. Faktori koji doprinose tome uključuju (ali nisu ograničeni na) visoke nivoe opterećenja usled lošeg ogibljenja ili problema sa ramom okretnog postolja, pregrevanje ležajeva itd. Otkazi osovina lokomotiva usled otkaza ležajeva prilično su česti u železničkoj industriji i bili su primećeni pre više od sto godina. Zbog toga, takvi

otkazi se obično dijagnostikuju samo vizuelnim pregledom oštećenja. Istražujući otkaze osovina na lokomotivama uzrokovane pregrejanim ležajevima vučnog motora, George Vander Voort [29] prijavljuje da je možda najraniji primer dokumentovan 1914. godine i predstavlja otkaz osovine sa Krupove železnice u Nemačkoj. Studija je otkrila prilično kompleksnu formu pukotina, dokazuje o izloženosti veoma visokim temperaturama i prelom u regionu pregrevanja. U regionu napuknute površine primećena je ležajna bronza, a ležajni metal je bio rastopljen kada je prodreo u osovinu.

On navodi da je 1944. godine autor Williams objavio rad u kojem daje pregled otkaza osovina železničkih vagona usled apsorpcije rastopljenog bakra. Većina otkaza osovinskih rukavaca dogodila se u blizini glavčine točka, oblasti visokih naprezanja i temperatura. Od površine prema unutra, prelomna površina je bila hrapava što je ukazivalo na dubinu prodora bakra. Centralni deo je bio gladak, što je ukazivalo na zamorni lom koji je na kraju doveo do otkaza. Mikrografije u boji otkrile su bakarnu fazu sa žutim granicama zrna. Istaknuto je da je potrebno odgovarajuće podmazivanje da bi se radna temperatura kontaktne površine održala ispod tačke topljenja materijala ležaja.

U izveštaju Filijale za istraživanje železničkih nesreća pri Odeljenju za transport Vlade Velike Britanije [30], objavljenom januara 2012. godine, istraživano je isključivo iz šina putničkog voza u Lesterširu, 2010. godine. Sedam vagona dizel putničkog voza "Meridian" iskliznuo je iz šina dok je saobraćao linijom Midland Main u blizini Istočnog Langtona. Voz je putovao brzinom od 151[km/h] kada je došlo do iskliznuća iz šina, a zatim je naknadno trčao još 3,2[km] pre nego što se zaustavio. Neposredni uzrok iskliznuća iz šina bio je potpuni prelom pogonske vučne osovine vodećeg postolja na četvrtom vozilu.



Slika 11. Pogled izbliza na plastično deformisane valjke ležaja [30]

Figure 11. A close-up view of the plastic deformed bearing rollers [30]

Prelom se dogodio usled zaribavanja ležaja (slika 11) tako da više nije mogao normalno da se okreće. Kada se to dogodilo, osovinu se okretala u sklopu unutrašnje staze kotrljanja ležaja na koju je normalno i čvrsto postavljena. Posledično stvaranje velike količine toplote usled trenja između osovine i ležaja rezultiralo je time da se osovinu lokalno zagreje na visoku temperaturu i oslabi do te mere da više nije mogla da nosi normalno opterećenje (slika 12).



Slika 12. Lice preloma osovine [30]

Figure 12. Axle fracture face [30]

5. IZBOR I POBOLJŠANJE MATERIJALA PRESOVANOG OSOVINSKOG SKLOPA

5.1. Načelni razlozi za istraživanja

Evropska železnička mreža ima za cilj značajno širenje putničkog i teretnog saobraćaja do 2020. godine. Da bi se to postiglo, neophodna je povećana pouzdanost i raspoloživost vozničkih sredstava, uz istovremeno održavanje istog ili boljeg nivoa sigurnosti. Vek trajanja osovine je presudan deo i bezbednosnih i ekonomskih performansi vozila, a osovinu propada tokom svog veka trajanja usled zamornih i korozivnih mehanizama. Periodični pregled se koristi kako bi se osiguralo da ovi mehanizmi nisu ugrozili sigurnost osovine, međutim, pregled koji isključuje vozilo iz upotrebe utiče na ekonomske aspekte rada vozila. [31] Prema standardu EN 13261 čelik EA1N i EA4T smatraju se standardnim materijalima železničkih osovina. Prvi od njih je ugljenični čelik male čvrstoće sa 0,4[%] ugljenika. EA4T je nisko legirani čelik prilično visoke čvrstoće. Osobine zamora čelika za železničke osovine još uvek nisu detaljno proučene iako su brojni otkazi osovine nesumnjivo usled kombinovanih efekata korozije i zamora [32].

Opterećenje železničkih osovina je dugotrajne prirode, te s toga postoji stvarni rizik od zamornog otkaza. Ovaj otkaz mogao bi dovesti do iskliznuća sa koloseka čitavog voza sa ozbiljnim posledicama.

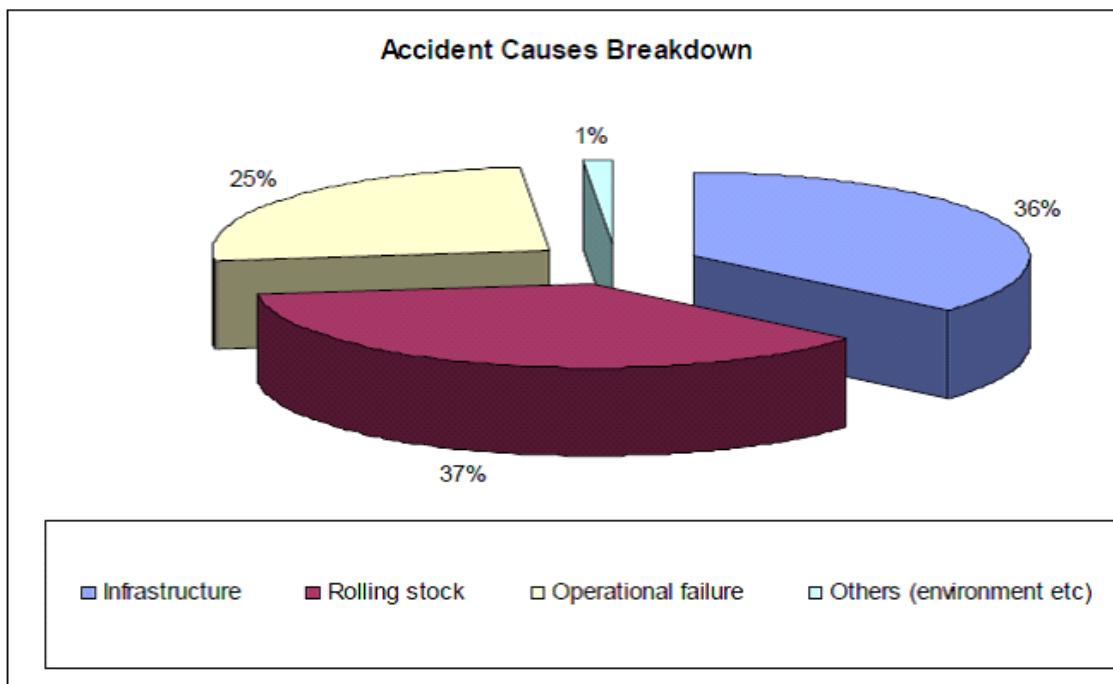
[33] Železničke osovine su bile jedna od prvih komponenti koje su morale biti podvrgnute velikom broju ponavljanih ciklusa. Zbog geometrije opterećenja, osovina se nalazi u savijanju u otprilike 4 tačke, a svaki put kada se osovina okreće, element materijala na površini osovine prelazi iz pritisknog stanja u stanje zatezanja jednake veličine [34].

5.2. Učestalost pojave otkaza osovina

Tokom XX veka, broj otkaza železničkih osovina drastično je smanjen zbog poboljšanih čelika i koncepata procene. Otkazi železničkih osovina usled zamora su retki. Dikmen i grupa autora [35] navode izveštaj autora Benyon i Watson iz 2001. godine, u kojima oni govore o jednom do dva otkaza godišnje na železničkoj mreži Velike Britanije. Isti autori se pozivaju na izveštaj autora Smith iz 2000. godine, u kojem on

prijavljuje prosek od 1,6 osovina godišnje tokom poslednjih 25 godina od populacije od 18000 osovina.

Autori Hirakawa i Kubota [36] izjavljuju da je 1993. godine otpisano 6800 osovina zbog pronađenih mana u ukupnom broju od oko 2200000 ili 2500000 osovina koje su se koristile u Rusiji. Statistike koje se mogu pronaći u izveštaju ERA (European Railway Agency) o učincima bezbednosti železnica u Evropskoj Uniji za 2014. godinu, pokazuju da je 52 osovine polomljeno 2010. godine, 33 osovine 2011. godine i 62 osovine 2012. godine [37]. Za područje Republike Srbije, autor Rajković [38] izveštava o lomovima osovina na elektro lokomotivama serije 441, 461 i 444 ističući da se lom desio na svakoj 24. lokomotivi ili na 4[%] lokomotiva, odnosno na 1 od 129 osovina.

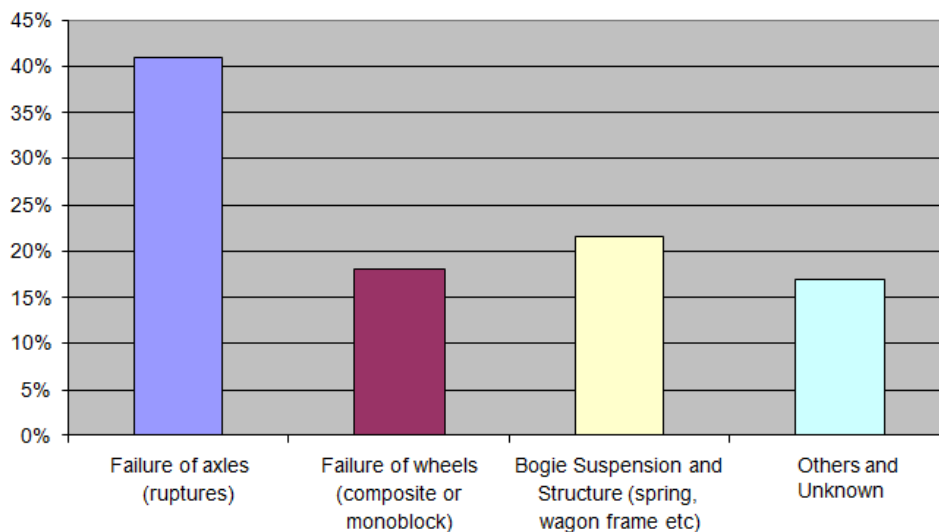


Slika 13. Uzroci železničkih nesreća razmatrani u D-RAIL FP7 projektu [39]

Figure 13. Railway accidents considered in the D-RAIL FP7 project by cause [39]

Prema izveštajima grupe autora [39] u nedavnoj studiji projekta D-RAIL FP7 razmatrane su železničke nesreće koje su u prethodnim godinama prijavljene u 23 države. Studija je pokazala da je od 700 razmatranih nesreća, 37[%] (slika 13) nesreća posledica otkaza na železničkom vozilu.

Štaviše, 84[%] svih nesreća koje su povezane sa železničkim vozilom prouzrokovano je defektima na osovinskim slogovima i na okretnim postoljima (slika 14). Pored toga, projekat D-RAIL FP7 pokazao je da je 41[%] svih nesreća železničkih vozila prouzrokovano otkazom osovine, što uključuje i otkaze osovinskih ležajeva i osovina.

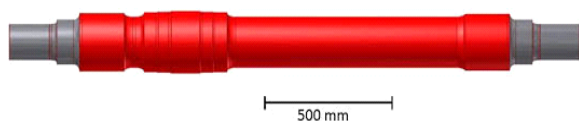


Slika 14. Uzroci nesreća povezani sa železničkim vozilima [39]

Figure 14. Rolling stock related accidents by cause [39]

5.3. Uticaj indukcionog kaljenja na poboljšanje svojstava materijala

Da bi se održala sigurnost železničkih sistema, sproveden je veliki broj istraživanja i eksperimenata i učinjena su mnoga poboljšanja u materijalu, proizvodnji, termičkoj obradi, načinu projektovanja i tehnikama ispitivanja. Hirakawa i grupa autora [13] navode da su osovine Japanskih brzih železnica indukciono kaljene radi povećanja zamorne čvrstoće. U tu svrhu ističe da je 1963. godine primenjeno indukciono kaljenje cele dužine osovine između oba sedišta točka na svim osovinama. Na ovaj način proizvedeno je dve hiljade osovina do 1970. godine, a nisu zabeleženi nikakvi otkazi osovina usled trenja. Isti autor, međutim, napominje da indukciono kaljene osovine mogu biti osetljivije na termičko pucanje. Površina koja je indukciono kaljena prikazana je na slici 15.



Slika 15. Crvena boja ukazuje na područja osovine koja su indukciono kaljena [6]

Figure 15. The red color indicates the areas of the shaft that are induction hardened [6]

Potvrdu njegovih navoda možemo pronaći u literaturi [12] u kojoj su autori Makino i Sakai objavili da je, sa stanovišta sprečavanja oštećenja usled trenja, indukciono kaljenje vrlo efikasno, jer povećava tvrdoću osovine i stvara u njoj velika pritisna zaostala naprezanja. Pritisna zaostala naprezanja posebno pomažu u obuzdavanju širenja zamornih pukotina usled trenja, spreča-

vajući ih da se otvore. Oni su ispitivali indukciono otvrdnute osovine na zamor pod 1,5 puta većim naprežanjem od dozvoljenog naprežanja za konstrukciju. Nakon ispitivanja nisu primetili ni prelome ni indikacije koje bi nastale usled ispitivanja metodom magnetnih čestica. Opisujući ovo trenje, autor Ekberg [40] ga definiše kao trenje usled zamora koje se može pojaviti u presovanom sklopu između točka i osovine i u vezi između osovine i zupčanika ili kočionih diskova, navodeći da savijanje opterećene osovine prouzrokuje relativno kretanje i bočno naprežanje između osovine i glavčine točka, uzrokujući trenje usled zamora [12, 20].

Autori Smith i Hillmansen [41] sa Imperijalnog Koledža u Londonu, UK, navodeći Japansku praksu indukcionog kaljenja područja sedišta točkova, potvrđuju navode o postizanju lokalnog povećanja otpornosti na zamor uvođenjem zaostalih pritisnih naprežanja. Procena preostalog veka trajanja oštećenih železničkih osovina je važna tema pre svega zbog prolongiranja intervala održavanja. Međutim, otpornost na zamor površinski kaljenih materijala izuzetno je izazovna zbog gradijentno raspoređene mikrostrukture, zateznih svojstava i zaostalih naprežanja na osovini. Razjašnjavajući ponašanje zamornog pucanja indukciono kaljenog S38C čelika za osovine, Hu i grupa autora [42] dobili su rezultate koji pokazuju da je u prisustvu 4[mm] duboke pukotine preostali vek trajanja oštećene osovine sa pritisnim zaostalim naprežanjima više od tri puta veći od osovine bez zaostalih pritisnih naprežanja. Ovi rezultati mogu poslužiti kao referenca za optimizaciju i prolongiranje intervala pregleda indukciono kaljenih S38C železničkih osovina.

6. ZAKLJUČAK

Istraživanje u ovom radu pomoglo je da se donesu zaključci o faktorima koji utiču na bezbedan rad osovina. Železničke osovine su bezbednosno važni elementi, jer njihov otkaz uključuje rizik od iskliznuća iz šina. Osnovni razlog promene amplitude opterećenja osovina je posledica mase vozila koja uzrokuje rotaciono savijanje tokom kretanja, ali i stvaranja dodatnih sila prilikom prelaska osovina preko železničkih prepreka. Da bi se predvidelo ponašanje osovine u eksploatacionim uslovima rada, potrebno je proceniti dinamičku izdržljivost kritičnih područja osovine na kojima vladaju velika naprezanja. Važeći koncepti procene dinamičke izdržljivosti osovina zasnivaju se na preporukama iz standarda koji ne razmatraju stvarna opterećenja na koja šinska vozila nailaze u stvarnim radnim uslovima.

Problem nastaje kada radna opterećenja prevaziđu projektovanu dinamičku izdržljivost čime se stvaraju inicijalne pukotine koje se šire usled rotacionog savijanja osovine. Revizija standarda odnosila bi se na njihovo usaglašavanje sa rezultatima praktičnih istraživanja. Za validaciju konstrukcije osovine, potrebno je uzeti u obzir vremenski promenljiva naprezanja u pojedinačnim oblastima osovine kritičnim za bezbednost koja su predstavljena njihovim spektrima naprezanja. Pokretanje rupičaste korozije označava se kao najčešći način za povećanje naprezanja iz kojeg se mogu razviti i širiti zamorne pukotine. Za zaštitu površine osovine od mehanizama propadanja, potrebno raditi na poboljšanju zaštite od korozije i na vizuelnom i magnetnom pregledu osovine u skladu sa preporukama standarda iz te oblasti. Po potrebi, primena indukcionog kaljenja može ojačati i revitalizovati površinske slojeve osovine, čime se povećava i njihova dinamička izdržljivost.

7. LITERATURA

- [1] M.M.A.Hassan (2018) Continuous health monitoring of railway axles using vibration measurements, Doctoral dissertation, Politecnico di Milano.
- [2] P.Dunnwald (2010) Simplify with Magnetic Particle Inspection (<https://www.qualitymag.com/articles/89530-simplify-with-magnetic-particle-inspection>, 02. 11. 2020.)
- [3] P.Pokorný, L.Náhlík, P.Hutař (2014) Comparison of different load spectra on residual fatigue lifetime of railway axle, *Procedia Engineering*, 74, 313-316.
- [4] B.Meral, T.Necati, G.Rahmi (2010) Reliability and fatigue life evaluation of railway axles, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(3), 671-679.
- [5] Ispitivanje magnetnim česticama, Nivo 1 i 2. NDT Pro trening centar Beograd, Srbija.
- [6] R.Fajkoš, B.Strnadl, R.Zima (2014) 23. Metal, Brno, Czech Republic, knjiga radova, p.1-6.
- [7] U.Zerbst, C.Klinger, D.Klingbeil (2013) Structural assessment of railway axles-A critical review, *Engineering Failure Analysis*, 35, 54-65.
- [8] A.Rinaldi, D.Krajčinović, S.Mastilović (2007) Statistička mehanika oštećenja i teorija ekstremnih vrednosti, *Tehnika-Naše građevinarstvo*, 61(5), 7-17.
- [9] M.Novosad, R.Fajkoš, B.Řeha, R.Řezníček (2010) Fatigue tests of railway axles, *Procedia Engineering*, 2, 2259-2268.
- [10] J.Šarić (1996) Vučena vozila, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, knjiga, Beograd.
- [11] V.Vuković (2013) Technical and technological feasibility and economic indicators of wreath surfacing of monoblock wheels, quality ER7 for the speed of railway up to 120 km/h, Doctoral dissertation, University of Novi Sad, Technical faculty „M.Pupin“ Zrenjanin.
- [12] T.Makino, H.Sakai (2013) Fatigue property of railway axles for Shinkansen vehicles, Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 105, Tokyo, p.56-62.
- [13] K.Hirakawa, K.Toyama, M.Kubota (1998) The analysis and prevention of failure in railway axles, *Int. journal of fatigue*, 20(2), 135-144.
- [14] S.L.Dedmon, J.M.Pilch, C.P.Lonsdale (2001) New York, USA, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, p.11-16.
- [15] S.Beretta, A.Ghidini, F.Lombardo (2005) Fracture mechanics and scale effects in the fatigue of railway axles, *Engineering Fracture Mechanics*, 72, 195-208.
- [16] V.Grubisic, G.Fischer (2012) Railway axle failures and durability validation, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(5), 518-52.
- [17] C.Klinger (2010) Failure analysis on a broken ICE3 railway axle-interdisciplinary approach, Federal Institute for Materials Research and Testing.
- [18] P.Pokorný, P.Hutař, L.Náhlík (2016) Residual fatigue lifetime estimation of railway axles for various loading spectra, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 82, 25-32.
- [19] P.Hutař, P.Pokorný, J.Poduška, R.Fajkoš, L.Náhlík (2017) Effect of residual stresses on the fatigue lifetime of railway axle, *Procedia Structural Integrity*, 4, 42-47.
- [20] C.Zhu, J.He, J.Peng, Y.Ren, X.Lin, M.Zhu (2019) Failure mechanism analysis on railway wheel shaft of power locomotive, *Engineering failure analysis*, 104, 25-38.
- [21] M.Filippini, M.Luke, I.Varfolomeev, D.Regazzi, S.Beretta (2017) Fatigue strength assessment of railway axles considering small-scale tests and damage calculations, *Procedia Structural Integrity*, 4, 11-18.
- [22] Assessment of freight train derailment risk reduction measures: Part A Final Report, Report for European Railway Agency, Report No: BA000777/01, Rev: 01, 2011.
- [23] A.Arash (2016) Online condition monitoring of railway wheelsets, Doctoral dissertation, The University of Birmingham, Great Britain.
- [24] U.Zerbst, M.Schödel, H.Th.Beier (2011) Parameters affecting the damage tolerance behaviour of railway axles, *Engineering Fracture Mechanics*, 78(5), 793-809.

- [25] D.S.Haddinott (2004) Railway axle failure investigations and fatigue crack growth monitoring of an axle, Proc. Instn. Mech. Engrs, 218, 283-292.
- [26] D.Momčilović, R.Mitrović, I.Atanasovska (2016) Koncentracija napona i zamor materijala-savremeni pristup proračunu mašinskih elemenata i konstrukcija, Monografija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija.
- [27] Z.Odanović (2017) Analysis of the railway freight car axle fracture, Procedia Structural Integrity, 4, 56-63.
- [28] Development of the Future Rail Freight System to Reduce the Occurrences and Impact of Derailment, Project no. SCP1-GA-2011-285162, D-RAIL, Summary report and database of derailments incidents, 2012.
- [29] G.Vander Voort (1986) Failures of Locomotive Axles, knjiga ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention, Izdavač ASM Handbook Committee, Ohio, p. 715-727.
- [30] Rail Accident Report, Passenger train derailment near East Langton, Rail Accident Investigation Branch, Department of Transport, 2012.
- [31] J.Rudlin, D.Panggabean, A.Loconte, A.Raude (2012) Conference BiNDT, Daventry, England, knjiga radova, p.1-7.
- [32] S.Beretta, M.Carboni, G.Fiore, A.Lo Conte (2010) Corrosion-fatigue of A1N railway axle steel exposed to rainwater, Internat. Journ. of Fatig., 32(6), 952-961.
- [33] L.Náhlík, P.Pokorný, M.Ševčík, R.Fajkoš, P.Matušek, P.Hutař (2017) Fatigue lifetime estimation of railway axles, Engineering Failure Analysis, 73, 139-157.
- [34] S.Hillmansen, R.A.Smith (2005) Assessing fatigue crack growth in railway axles, Railway Research Group, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London SW7 2AZ, UK
- [35] F.Dikmen, M.Bayraktar, R.Guclu (2012) Railway Axle Analyses: Fatigue Damage and Life Analysis of Rail Vehicle Axle, Strojniški vestnik, 58(9), 545-552.
- [36] K.Hirakawa, M.Kubota (2001) On the fatigue design method for high-speed railway axles, Proc. Instn. Mech. Engrs., 215, 73-82.
- [37] Railway Safety Performance in the European Union, European Union Agency for Railways, 2014.
- [38] D.Rajković (2010) XIV RAILCON, Niš, Srbija, knjiga radova, p.193-196.
- [39] M.Papaelias, Z.Huang, A.Amini, P.Vallely, N.Day, R.Sharma, Y.Kerkyras, S.Kerkyras (2014) 11. ECNDT, Prague, Czech Republic, knjiga radova, p.1-13.
- [40] A.Ekberg (2004) Fretting fatigue of railway axles-a review of predictive methods and an outline of a finite element model, Proc. Instn. Mech. Engrs., 218, 299-316.
- [41] R.A.Smith, S.Hillmansen (2004) A brief historical overview of the fatigue of railway axles, Proc. Instn. Mech. Engrs., 218, 267-277.
- [42] Y.Hu, Q.Qin, S.Wu, X.Zhao, W.Wang (2021) Fatigue resistance and remaining life assessment of induction-hardened S38C steel railway axles, International Journal of Fatigue, 144, 231-243.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FRACTURES MECHANISMS OF RAILWAY AXLES

The paper gives a systematic overview of literature sources who consider impacts critical damage of mechanical, corrosive and thermal nature which may occur on railway axles during operation and which may be the causes of their fracture. The results of the research of the mechanisms that cause cracks, crack propagation and final fracture of the railway vehicle axle, such as material fatigue and the appearance of localized notches caused by paint (coating) separation, damage from ballast impact and pitting corrosion are presented. The influence of high temperatures and overheating on the axles was analyzed and an excerpt from the research published in one research report was given. Some significant suggestions for optimizing the design of the axles are highlighted which would take into account the analysis of time-varying axle stresses, stress spectrum in operation, axle tolerance to damage and the existence of residual surface stresses. The reliefs of the fracture surfaces of the axle after the railway incidents and the derailment of the rail vehicle from the rails are presented and explained.

Keywords: axle, railway vehicle, material fatigue, railway incidents, corrosion

Review paper

Paper received: 20. 11. 2020.

Paper accepted: 09. 01. 2021.

Paper is available on the website: www.idk.org.rs/journal