

Primljen / Received: 9.12.2019.

Ispravljen / Corrected: 3.5.2020.

Prihvaćen / Accepted: 22.8.2020.

Dostupno online / Available online: 10.3.2021.

Produljenje uporabljivosti tračnica u slučajevima oštećenja njihove glave

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Dmitry Ovchinnikov**, dipl.ing.građ.
Državno prometno sveučilište u Samari, Rusija
Odjel željezničkih i kolosiječnih postrojenja
sit@samgups.ru

Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Alexey Bondarenko**, dipl.ing.građ.
Državno prometno sveučilište u Dresdenu, Njemačka
Odjel željezničkih i kolosiječnih postrojenja
bondarenko@infotrans-logistic.ru



Mr.sc. **Lei Kou**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište u Dresdenu, Njemačka
Institut za željezničke sustave i javni prijevoz
kou.lei@tu-dresden.de



Izv.prof.dr.sc. **Mykola Sysyn**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište u Dresdenu, Njemačka
Institut za željezničke sustave i javni prijevoz
mykola.sysyn@tu-dresden.de

Prethodno priopćenje

Dmitry Ovchinnikov, Alexey Bondarenko, Lei Kou, Mykola Sysyn

Produljenje uporabljivosti tračnica u slučajevima oštećenja njihove glave

Tračnice su tijekom svoje uporabe izložene procesima trošenja, korozije i kontaktnog zamora uslijed savijanja. Kao posljedica tih procesa, na tračnicama dolazi do raznih oštećenja i neispravnosti. Nastavak uporabljivosti tračnica ovisi o veličini, položaju i smjeru oštećenja. U ovom su radu izračunane maksimalno dopuštene vrijednosti veličine pukotine metodom konačnih elemenata. Smjer ravnine pukotine analiziran je u odnosu na ravninu kontaktne površine kotač-tračnica. Utemeljena je ovisnost faktora veličine naprezanja o površini pukotine. To omogućuje daljnju upotrebu oštećenih tračnica i siguran nastavak rada na željezničkim prugama sa slabijom aktivnošću.

Ključne riječi:

željeznička pruga, oštećenja tračnice, metoda konačnih elemenata, pukotina

Research Paper

Dmitry Ovchinnikov, Alexey Bondarenko, Lei Kou, Mykola Sysyn

Extending service life of rails in the case of a rail head defect

Rails are subjected to the processes of wear, corrosion and contact and bending fatigue during their lifecycle. As a result of these processes, various types of damage and defects are formed in rails. The residual life of rails depends on the size, position, and orientation of defects. Maximum permissible crack-size values are calculated in this paper using the finite element method. The crack plane orientation relative to the contact surface plane is analysed. The dependence of the stress intensity factor on the crack area is established. This allows continued use of defective rails and safe operation on low-activity railways.

Key words:

railway track, rail defects, finite element method, crack

Vorherige Mitteilung

Dmitry Ovchinnikov, Alexey Bondarenko, Lei Kou, Mykola Sysyn

Verlängerung der Verwendbarkeit von Schienen bei Schäden des Schienenkopfes

Während ihrer Verwendung sind Schienen aufgrund von Biegung den Prozessen von Verschleiß, Korrosion und Kontaktermüdung ausgesetzt. Infolge dieser Prozesse treten verschiedene Schäden und Mängeln an den Schienen auf. Die weitere Verwendbarkeit der Schienen hängt von der Größe, Position und Richtung des Schadens ab. In dieser Arbeit werden die maximal zulässigen Werte der Rissgröße nach der Finite-Elemente-Methode berechnet. Die Richtung der Rissebene wurde in Bezug auf die Ebene der Rad-Schiene-Kontaktfläche analysiert. Die Abhängigkeit des Spannungsgrößenfaktors von der Rissoberfläche wurde bestimmt. Dies ermöglicht die weitere Verwendung beschädigter Schienen und die sichere Fortsetzung des Betriebs auf Eisenbahnschienen mit weniger Aktivität.

Schlüsselwörter:

Eisenbahnschiene, Schienenbeschädigung, Finite-Elemente-Methode, Riss

1. Uvod

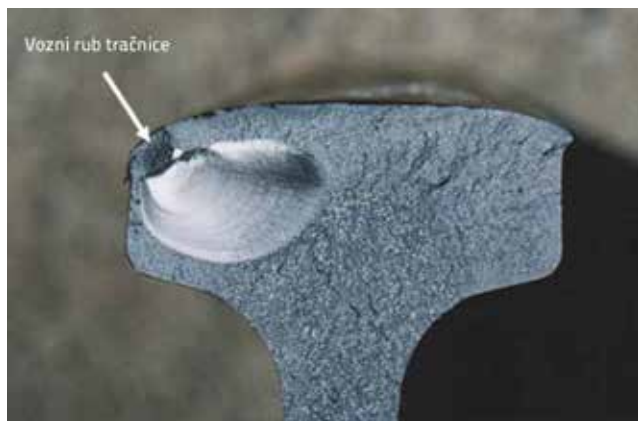
Željeznička pruga važan je dio infrastrukture, a njezino tehničko stanje osigurava opću sigurnost prometa. Stanje željezničkih komponenti određeno je njihovim kapacitetom nosivosti. Gornji ustroj pruge izložen je iznimno teškim uvjetima: prolasku vlakova, izloženosti vjetru, kiši i promjenama temperature. U tim bi uvjetima trebao zadržati dovoljnu čvrstoću i stabilnost i osigurati ekonomsku trajnost. Tračnice su glavni nosivi element gornjeg ustroja kolosijeka i na njih se primjenjuju sljedeći zahtjevi:

- tračnice bi trebale bez pojavljivanja puknuća ili oštećenja podnijeti dugotrajno opterećenje kotača vlakova
- prijenos opterećenja s kotača na podlogu tračnica uz raspodjelu opterećenja na dovoljno veliku površinu
- usmjeravanje kretanja kotača željezničkog vozila.

Tijekom uporabe dolazi do trošenja tračnica, plastičnog tečenja, korozije i zamora, uključujući proces kontaktnog savijanja i zamora uslijed korozije. Zbog tih procesa nastaju razna oštećenja i neispravnosti na tračnicama.

Oštećenje tračnice karakterizira odstupanje od njezinih geometrijskih parametara ili čvrstoće iz utvrđenih specifikacija, uz uvjet da tračnica funkcionira pod definiranim radnim uvjetima. Oštećenja tračnice uključuju: napuknuće, ljuštenje, lomljenje, udubljenja, pukotine, zamor zbog kontakta između kotača i tračnice, razne vrste habanja, plastične deformacije u obliku tečenja materijala glava tračnica, koroziju, mehanička oštećenja itd., ako njihova amplituda prelazi propisanu vrijednost. Otkazivanje tračnice klasificira se kao oštećenje ako dovodi do potrebe za zaustavljanjem vlaka (primjerice, potpuno otkazivanje s oštećenom tračnicom) ili potrebe za ograničavanjem brzine vlaka (djelomično otkazivanje poput oštećenja vozne površine glave tračnice) [1].

Česta su oštećenja glave tračnice poprečne pukotine u obliku svijetlih ili tamnih mrlja, nastale uslijed kontaktnog zamora metala, tako da čvrstoća metala nije dovoljna za formiranje unutarnjih ili vanjskih uzdužnih pukotina, i dovodi do otkazivanja nakon prolaska najveće dopuštene mase [2, 3] (slika 1.).



Slika 1. Prikaz oštećenja glave tračnice [8]

Oštećenje se inicira kad iz nakupina nemetalnih inkluzija, izduženih tijekom valjanja tračnice, nastane unutarnja uzdužna pukotina ili uzdužna pukotina na površini tračnice u obliku linije duž osi tračnice. Rast uzdužnih pukotina dovodi do ljuštenja ili poprečnih pukotina. Kad se razviju do veličine koja prelazi kritičnu (14-16 mm visine ili 25-30 % površine presjeka glave pri temperaturama iznad $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i od 15 % pri temperaturama ispod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), poprečne pukotine mogu dovesti do pucanja cijele tračnice [4]. Istraživanje karakterizacije rasta oštećenja u suvremenim čelicima za tračnice, koje je prikazano u radu [5], upućuje na veliki učinak toplinske obrade tračnica i nejednolikog hlađenja na ponašanje mikrostrukture i brzine rasta pukotina uzrokovanih zamorom. Dodatni uzroci zamora su radovi na održavanju tračnica, poput popravaka zavora koji povećavaju učinak zaostalog naprezanja na brzinu rasta pukotina, kako je prikazano u [6].

Faktor intenziteta naprezanja (eng. stress intensity factor - SIF) K upotrebljava se u mehanici loma za predviđanje stanja naprezanja u blizini vrha pukotine ili zarezata uzrokovanog vanjskim opterećenjem ili zaostalim naprezanjima [7, 8]. Definicija faktora K proizašla je iz razmatranja problema naprezanja unutar tijela s pukotinom. Veličina faktora K ovisi o geometriji uzorka, veličini i mjestu pukotine, kao i o veličini i raspodjeli opterećenja na materijal. Pretpostavlja se da bi se proizvoljno opterećenje moglo raspodijeliti na tri vrste linearno neovisnih oblika otvaranja pukotine. To su oblici I, II i III. Oblik I vlačni je oblik u kojem se površine pukotina izravno razdvajaju. Oblik II je oblik posmika u ravnini u kojoj površine pukotine klize jedna preko druge, okomito na prednji rub pukotine. Oblik III je oblik posmika cijepanje u kojem se površine pukotine pomiču jedna u odnosu na drugu, paralelno s prednjim rubom pukotine. Faktori intenziteta naprezanja K_I , K_{II} i K_{III} odgovaraju oblicima razvoja pukotine pod opterećenjem. Ti su faktori formalno definirani kako slijedi, prema [9]:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yx}(r, 0) \quad (1)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yz}(r, 0)$$

Ovdje, σ_{ij} -raspodjela komponentata opterećenja u blizini vrha pukotine u polarnim koordinatama r , θ s ishodištem na vrhu pukotine.

Polje naprezanja na ishodištima pukotina ima singularnost oblika $1/r^{0.5}$, u kojem je r udaljenost od ishodišta pukotine do točke u kojoj se naprezanje razmatra. Faktor intenziteta naprezanja mjera je singularnosti naprezanja u blizini pukotine. Dimenzija u SI sustavu jest $\text{Pa}\cdot\text{m}^{0.5}$. Predlaže se da se uvjet početka širenja pukotine može formulirati kao uvjet da naprezanja dosegnu kritične vrijednosti, čime se formulira kriterij sile za krti lom.

Mnogi su autori govorili o problemu nastanka i rasta zamora na kontaktu kotač-tračnica. Eksperimentalna istraživanja prikazana su u radovima o dugotrajnom praćenju i analizi rasta pukotina

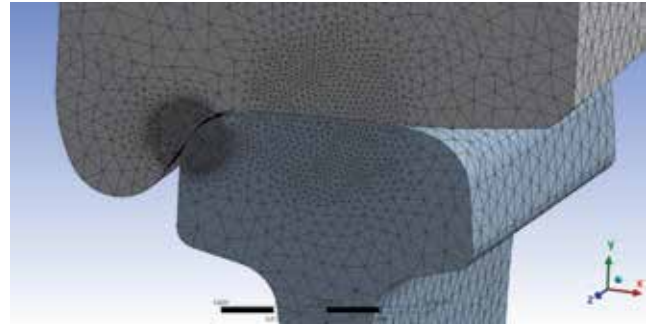
na površini tračnica upotrebom različitih tehničkih sredstava [10, 11]. Teorijske studije obično se temelje na Hertzovoj analitičkoj metodi rješavanja [12], poluanalitičkom FASTSIM algoritmu [13, 14] i simulacijama primjenom metode konačnih elemenata (MKE). Radovi [15-17] predstavljaju MKE simulaciju naprezanja u sustavu interakcije između kotača i tračnica. U radu [18] prikazuje se pristup za određivanje kritične veličine za zamor na kontaktu kotača i tračnice (eng. *Rail Contact Fatigue* - RCF) koji nastaje zbog oštećenja površine tračnice. Metodologija se temelji na procjeni naprezanja na oštećenjima pri tranzijentnom kotrljajućem kontaktu, a koja uzima u obzir model trenja kotrljanja. U radu [19] predstavljeno je predviđanje početka stvaranja RCF pukotine i utvrđivanje usmjerenja ravnine pukotine. Predviđanje se temelji na dinamičkom trodimenzionalnom MKE modelu i simulaciji ubrzanja osovinskih kućišta.

U ovom su radu razvijeni matematički modeli za proračun graničnog stanja i procjenu radnog vijeka tračnica uzimajući u obzir površinska oštećenja na mjestu kontakta glave tračnice i ispusta vijenca kotača. Matematički model omogućuje određivanje učestalosti otkazivanja tračnice s oštećenjima na mjestu kontakta kotač-tračnica opisujući polje naprezanja na vrhu pukotine. Sljedeći kriteriji koji se upotrebljavaju za procjenu kritičnih vrijednosti K, prema [4, 20]:

- rubovi pukotine pomaknuti su u normalnom smjeru prema ravnini pukotine
- rubovi pukotine normalno su pomaknuti u ravnini pukotine u odnosu na vrh pukotine
- rubovi pukotine pomaknuti su u ravnini pukotine paralelno s frontom širenja pukotine.

2. Numerički model za međusobno djelovanje kotača i tračnice

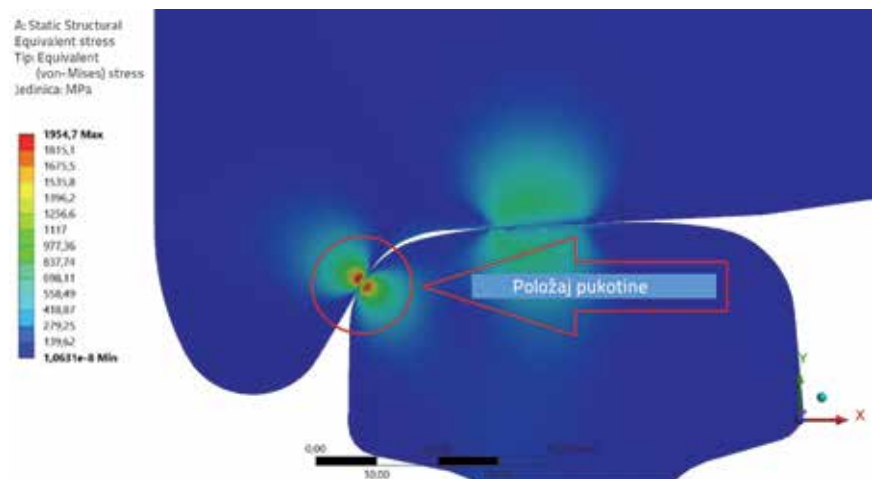
Za analizu koeficijenta intenziteta naprezanja u kontaktnoj zoni kotača i tračnice razvijen je prostorni model primjenom metode konačnih elemenata u računalnom programu ANSYS. Svojstva materijala identična su onima od čelika za tračnice, kao i kotača vagona. Svi su elementi modelirani s potpunom geometrijskom sličnošću stvarnim elementima. Veličina modela za statičku analizu iznosi oko 400 tisuća čvorova od 75 tisuća tetraedarskih elemenata. Svojstva simetrije modela upotrebljavaju se za značajno smanjenje broja konačnih elemenata. U kontaktnoj zoni, mreža elemenata značajno je detaljna (veličina elementa jest 0,5 mm) za najtočniji prikaz rezultata analize. Tako mala vrijednost elementa u kontaktnoj zoni omogućuje preciznu simulaciju geometrije stvarne kontaktne točke, kao i poboljšanje točnosti rezultata izračuna bez značajnog povećanja vremena provedenog na modeliranju (slika 2.).



Slika 2. Model konačnih elemenata za proračun u dvije kontaktne točke

Upotrijebljeni su sljedeći rubni uvjeti. Kruti kontakt modelira se duž površine nožice tračnice. Kontaktna površina kotača i osovine pomiče se s dvije točke dodira u okomitom i vodoravnom smjeru. Upotrebljavaju se i simetrični rubni uvjeti. Ostali elementi nisu fiksni. U simulaciji u obzir je uzet bočni pomak kotača u odnosu na tračnicu, a koji se smatra udaljenošću između osi simetrije presjeka tračnice i ravnine kruga kotrljanja kotača. Poprečni pomak jednak je nuli ako je linija kotrljajućeg kruga kotača na osi simetrije tračnice. U simulaciji su upotrijebljeni sljedeći parametri: profil tračnice R65 od čelika tračnice R350HT prema normi GOST R 51685-2013, kotač teretnog vagona prema normi GOST10791-2011 [21] s promjerom od 950 mm. Elastična svojstva materijala su $E = 210$ GPa i $\nu = 0,3$. Osovinska nosivost od 27 tona/osovina, bočna sila iznosi 10 tona, osovina kotača je u okomitom položaju, os nagiba tračnice je 1/20, a kontaktne površine odgovaraju navedenim profilima.

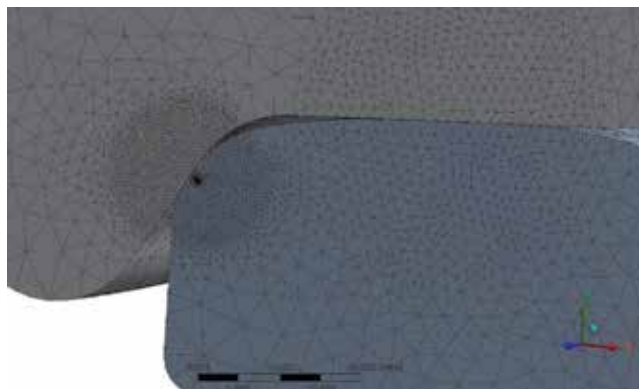
Polja naprezanja koja proizlaze iz ove interakcije kotača i tračnice prikazana su na slici 3. Kao što se može vidjeti, maksimalna naprezanja pojavljuju se u kontaktnoj zoni kotača i bočne strane glave tračnice. Očito je da će se najveći faktor intenziteta naprezanja uočiti kad se pukotina nalazi u zoni maksimalnih ekvivalentnih naprezanja (slika 3.).



Slika 3. Raspodjela naprezanja i mjesto pukotine

3. Analiza utjecaja veličine i usmjerenja pukotine na faktor intenziteta naprezanja

Za numeričku simulaciju i analizu odabrana su dva slučaja usmjerenja pukotine: paralelni i okomiti položaj na kotrljajuću površinu. Za ta dva slučaja izračunano je deset varijanti veličina pukotine s različitim duljinama, širinama i debljinama.

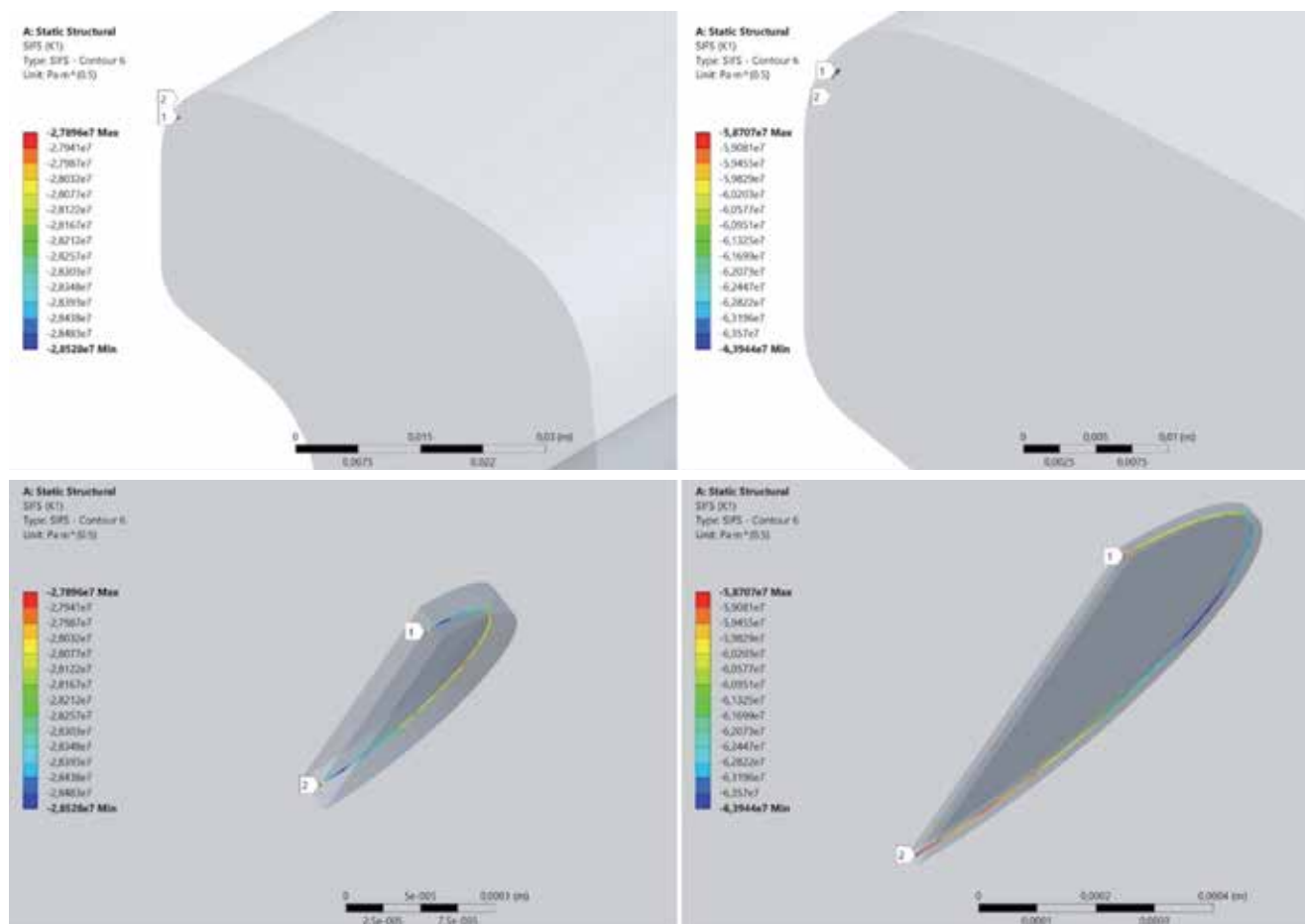


Slika 4. MKE mreža za kotač i tračnicu s pukotinom okomitom na kontakt kotač-tračnica

Model mreže za slučaj 1, u kojem je pukotina okomita na kontakt glave kotača i tračnice, prikazan je na slici 4. Na površini pukotine mreža postaje gušća i doseže veličinu komponente od 0,1 mm. Sama pukotina eliptičnog je oblika s debljinom od 0,01 mm u tračnici.

Rezultati procjene koeficijentata intenziteta naprezanja pri različitim geometrijskim parametrima eliptične pukotine prikazani su na slikama 5.a i 5.b. U početnim proučenim podacima maksimalna se vrijednost faktora intenziteta naprezanja postiže kad opterećenje uzrokuje pomicanje ruba pukotine u normalnom smjeru ravnine pukotine. Rezultati izračuna faktora intenziteta naprezanja za sve varijante slučaja 1 predstavljene su u tablici 1.

Približna procjena ovisnosti koeficijenta intenziteta naprezanja o površini pukotine prikazana je na slici 6. Slika prikazuje najintenzivniji razvoj faktora intenziteta naprezanja do površine oko 1 mm². Nakon toga, porast faktora intenziteta naprezanja gotovo je linearno proporcionalan povećanju površine pukotine. Prema normama [21], najveće dopuštene vrijednosti K za tračnice proizvedene u različitim zemljama prikazane su u tablici 2.



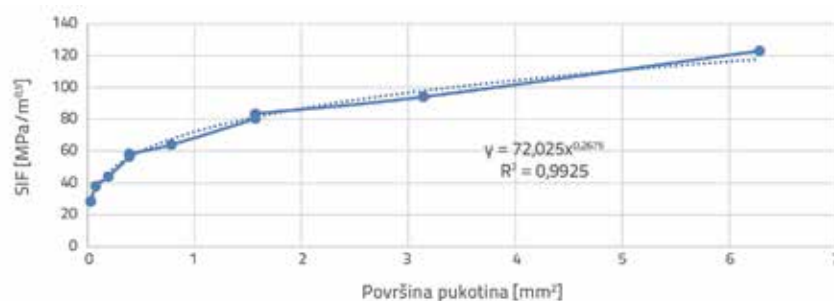
Slika 5. Faktor intenziteta naprezanja pukotine eliptičnog oblika koja je paralelna s kontaktnom površinom s osovinskim veličinama: 0,1 x 0,1 [mm] (lijevo); 0,5 x 0,5 [mm] (desno)

Tablica 1. Rezultati modeliranja faktora intenziteta naprezanja pukotine na dvije točke kontakta kotač-tračnica za pukotinu koja je paralelna s kontaktnom površinom

Veličina pukotine [mm]			K_{in} [MPa·m ^{0.5}]			Površina [mm ²]	Maksimalna vrijednost [MPa·m ^{0.5}]
Duljina	Širina	Debljina	K_I	K_{II}	K_{III}		
0,1	0,1	0,01	28,5	2,7	3,5	0,032	28,5
0,1	0,25	0,01	38	3,1	2	0,078	38
0,25	0,25	0,01	44,1	5,9	2,8	0,196	44,1
0,25	0,5	0,01	56,7	6,7	2	0,392	56,7
0,5	0,25	0,01	58,2	9,3	6,4	0,392	58,2
0,5	0,5	0,01	64	12,1	5,4	0,786	64
0,5	1	0,01	80,5	14,6	3,9	1,57	80,5
1	0,5	0,01	83,4	20,7	14,1	1,57	83,4
1	1	0,01	94,1	26,9	12,2	3,142	94,1
2	1	0,01	123	27,8	25,7	6,284	123

Tablica 2. Granica zamora čelika za tračnice punih profila i vrijednosti ciklične otpornosti na pukotine nakon rezultata cikličnih ispitivanja

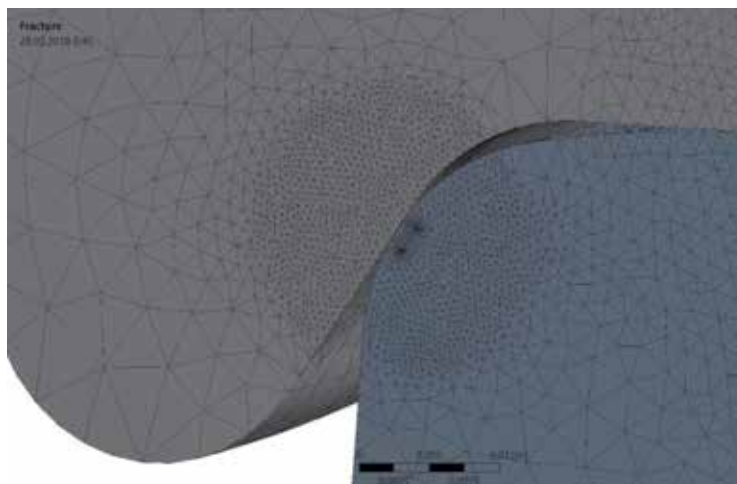
Zemlja proizvodnje	Granica zamora [MPa]	Otpornost na pukotine [MPa·m ^{0.5}]
Rusija, NKMK (T1)	400	41-59
Rusija, NTKM (T1)	407	46-56
Francuska	477	-
Japan, NS	430	26-38
Kanada	453	-
Austrija	423	25-36
Italija	366	25-29
Poljska	367	29-31


Slika 6. Ovisnost koeficijenta intenziteta naprezanja o površini pukotine

Dakle, kad je vrijednost K blizu granice izdržljivosti tračnice, amplituda rasta pukotina značajno se povećava, sve do razaranja tračnice. Matematičkim modeliranjem može se odrediti kritična površina pukotine-maksimalna površina grede, nakon čega će se ubrzati rast pukotine, što dovodi do daljnjeg razaranja tračnice. Za eliptičnu pukotinu okomitu na ravninu kontakta između kotača i tračnice, najveća dopuštena vrijednost ove površine iznosi 0,2 mm². U ovom radu procijenjen je utjecaj geometrijskih parametara pukotine i njezinog položaja u odnosu na reakciju na kontaktu kotača i tračnice. Iz slike 6 vidljivo je da se maksimalna dopuštena površina pukotina može povećati s pomoću smanjenja opterećenja. Činjenica se može iskoristiti za produljenje uporabljivosti tračnica zbog njihove reciklaže na manje opterećenim prugama.

Tablica 3. Rezultati modeliranja rasta pukotina na dvije točke kontakta kotač-tračnica za pukotinu koja je okomita na kontaktnu površinu

Veličina pukotine [mm ²]			K_{in} [MPa·m ^{0.5}]			Površina [mm ²]	Maksimalna vrijednost [MPa·m ^{0.5}]
Duljina	Širina	Debljina	K_I	K_{II}	K_{III}		
0,1	0,1	0,01	6,7	2	1,5	0,032	6,7
0,1	0,25	0,01	8,8	2,5	1,1	0,078	8,8
0,25	0,1	0,01	8,8	2,2	2,1	0,078	8,8
0,25	0,25	0,01	12,5	3,5	2,2	0,196	12,5
0,25	0,5	0,01	15,5	4,1	1,8	0,392	15,5
0,5	0,5	0,01	24,4	5,8	3,3	0,786	24,4
0,75	0,5	0,01	36,1	8,2	4,6	1,178	36,1
0,75	0,75	0,01	42,7	6,5	4,4	1,768	42,7
0,75	1	0,01	47	10	4	2,356	47



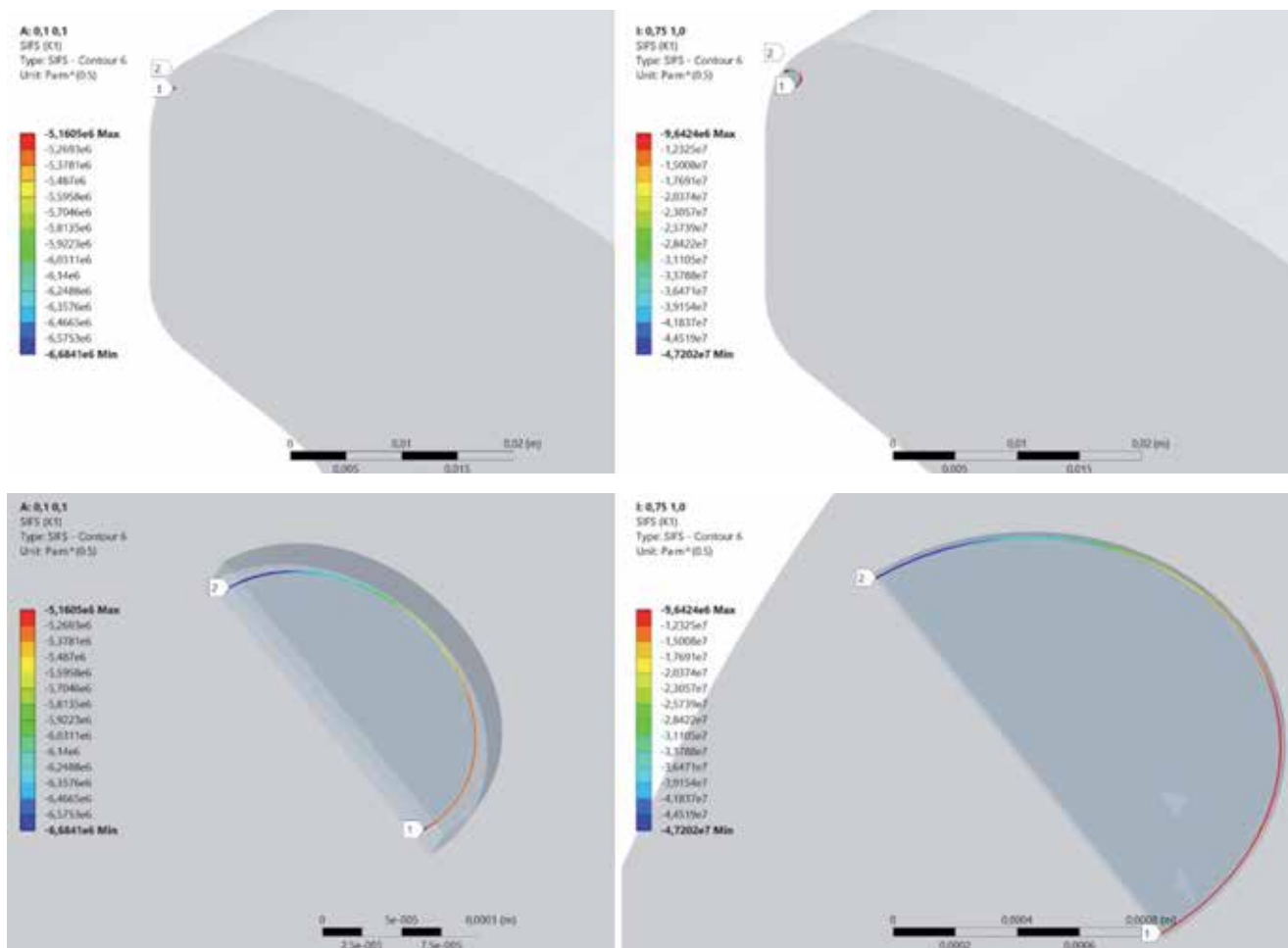
Slika 7. FE mreža u prisutnosti pukotine paralelne s normalnom reakcijom interakcije između kotača i tračnice

Model mreže za slučaj 2, u kojem je pukotina paralelna s kontaktom glave kotača i tračnice, prikazan je na slici 7. Na površini pukotine mreža je zgusnuta na veličinu 0,1 mm. Sama pukotina snop je eliptičnih oblika s debljinom kolosijeka od 0,01 mm.

Rezultati procjene koeficijentata intenziteta naprezanja pri različitim geometrijskim parametrima eliptične pukotine prikazani su na slici 8. Maksimalna vrijednost faktora intenziteta naprezanja javlja se za slučaj opterećenja u kojoj su rubovi pukotine pomaknuti u normalnom smjeru u odnosu na ravninu pukotine.

Za razliku od slučaja 1, odabrana je maksimalna veličina pukotine od 0,75 x 1,0 mm. Rezultati proračuna za 10 varijanti veličina pukotine prikazani su u tablici 3.

Rezultati proračuna pokazuju da postignuta kritična vrijednost faktora intenziteta naprezanja nije moguća kad je pukotina paralelna s ravninom kontakta kotač-



Slika 8. Faktor intenziteta naprezanja pukotine eliptičnog oblika koja je okomita na kontaktnu površinu s osovinskim veličinama: 0,1 x 0,1 [mm] (lijevo); 0,75 x 1,0 [mm] (desno)

tračnica u usporedbi s pukotinom koja je okomita na reakcijsku kontaktnu ravninu kotač-tračnica. Najveća dopuštena površina pukotine povećava se s 0,2 mm² na vrijednost od približno 2 mm². Stoga je rast pukotine paralelne s ravninom kontaktne reakcije krajnje neizgledan.

4. Zaključak

U radu je razvijen simulacijski model konačnih elemenata dvostrukog kontaktnog međudjelovanja tračnice i kotača. Modelom se uzima u obzir unutarnja koncentracija naprezanja zbog pukotina različite veličine i usmjerenja. Procijenjeno je polje naprezanja na vrhu pukotine s pomoću faktora

intenziteta naprezanja koje se upotrebljava za mjerenje točke koncentracije naprezanja u blizini pukotine. Analiziran je odnos između koeficijenta intenziteta naprezanja i površine pukotine te je dobiveno da najveća dopuštena površina eliptične pukotine okomite na reakcijsku kontaktnu ravninu kotača i tračnice iznosi 0,1 mm². Analizirano je usmjerenje pukotine paralelne s ravninom kontaktne interakcije kotača i tračnice. Rezultati pokazuju da paralelne pukotine na kontaktnoj reakcijskoj ravnini imaju mnogo manji utjecaj na faktor intenziteta naprezanja od okomitih. Uporabljivost tračnica s postojećim pukotinama može se znatno produljiti ako se ugradnja na kolosijeke s manjim osovinskim opterećenjima.

LITERATURA

- [1] Tselko, A.V.: The Defects in rails - classification, catalogue and parameters of defective and acute defective rails, October 23, 2014 No. 2499r, Vice-President of Russian Railways, Joint Stock Company "Russian Railways", Moscow, Russia.
- [2] UIC Code 712 Rail Defects, Fourth edition, International Union of Railways, pp. 111, 2002.
- [3] Rail Corp Engineering Manual Track: Rail Defects Handbook. ART Corporation, 2006
- [4] Abdurashitov, A., Yu., Ovchinnikov, D.V., Pockocki, V. A.: Development with application of methods of mathematical modeling of the profile of the tread surface of the wheel rim truck of the car adapted to the profile of the unworn surface of the rail R-65. Collection of works of scientists of JSC "VNIIZHT" (JSC "Scientific-research Institute of railway transport"), Moscow, pp. 30-59, 2017.
- [5] Jeong, D.Y., Woelke, P.B., Nied, H.F., DuPont, J.N., Kizildemir, S., Fletcher, F.B., Hutchinson, J.W.: Defect growth characterization in modern rail steels, Joint Rail Conference, Snowbird, Paper No.: JRC2019-1265, 2019.
- [6] Jun, H.K., Seo, J.W., Jeon, S., Lee, S.H., Chang, Y.S.: Fracture and fatigue crack growth analyses on a weld-repaired railway rail, Engineering Failure Analysis, 59 (2016), pp. 478-492, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.014>
- [7] Anderson, T.L.: Fracture mechanics: fundamentals and applications, Third edition, CRC Press, 2005.
- [8] Polevoi, E.V., Yunin, G.N., Smirnov, L.A.: Rail Quality Standards and Monitoring, Steel in Translation, 49 (2019) 7, pp. 496-498, <https://doi.org/10.3103/S096709121907009X>.
- [9] Suresh, S.: Fatigue of Materials. Cambridge University Press, (2004) ISBN 978-0-521-57046-6.
- [10] Zgutova, K., Neslusan, M., Sramek, J., Danisovic, P., Capek, J.: Monitoring of surface damage in rails after long term cyclic loading, Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 19 (2017) 2, pp. 153-158.
- [11] Sysyn, M., Gerber, U., Nabochenko, O., Gruen, D., Kluge, F.: Prediction of Rail Contact Fatigue on Crossings Using Image Processing and Machine Learning Methods, Urban Rail Transit, 5 (2019) 2, pp. 123-132, <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0105-0>
- [12] Meymand, S.Z., Keylin, A., Ahmadian, M.: A survey of wheel-rail contact models for rail vehicles, Vehicle System Dynamics, 54 (2016) 3, pp. 386-428, <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1137956>
- [13] Spiriyagin, M., Polach, O., Cole, C.: Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm. Vehicle System Dynamics, 51 (2013), pp. 1765-1783.
- [14] Vollebregt, E.A.H.: FASTSIM with Falling Friction and Friction Memory, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Volume 126 of the series "Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design", pp. 425-432, 2015.
- [15] Milošević, M., Miltenović, A., Banić, M., Tomić, M.: Determination of residual stress in the rail wheel during quenching process by FEM simulation, Mechanical Engineering, 15 (2017) 3, pp. 413-425, <https://doi.org/10.22190/FUME170206029M>
- [16] El-sayed, H.M., Lotfy, M., Zohny, E.H.N., Riad, H.S.: Prediction of fatigue crack initiation life in railheads using finite element analysis, Ain Shams Engineering Journal, 9 (2018) 4, pp. 2329-2342, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.06.003>
- [17] Muravev, V.V., Tapkov, K.A., Volkova, L.V., Platunov, A.V.: Strain stress model of the rail with crack in its head and estimation of its operational lifetime, Materials Science Forum, 970 (2019), pp. 177-186, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.177>
- [18] Li, Z., Zhao, X., Dollevoet, R.: An approach to determine a critical size for rolling contact fatigue initiating from rail surface defects, International Journal of Rail Transportation, 5 (2017) 1, pp. 16-37, <https://doi.org/10.1080/23248378.2016.1194775>
- [19] Martua, L., Ng, A.K., Sun, G.: Prediction of Rail Rolling Contact Fatigue Crack Initiation Life via Three-Dimensional Finite Element Analysis, 8th International Conference on Intelligent Rail Transportation, London, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018.8641633>
- [20] Romanowicz, P.: Numerical assessment of fatigue load capacity of cylindrical crane wheel using multiaxial high-cycle fatigue criteria, Archive of Applied Mechanics, 87 (2017) 10, pp. 1707-1726, <https://doi.org/10.1007/s00419-017-1281-6>
- [21] GOST 10791-2011, All-rolled wheels-specification, 2012. <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293800/4293800552.pdf>