



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Viktors Ivanovs

ANALĪZE PAR SLIEŽU SLĪPĒŠANAS IETEKMI UZ TO STĀVOKLI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Transporta institūts

Viktors Ivanovs

Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**ANALĪZE PAR SLIEŽU SLĪPĒŠANAS IETEKMI
UZ TO STĀVOKLI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asoc. profesors *Dr. sc. ing.*
PĀVELS GAVRILOVS

Konsultants
Dr. sc. ing.
ALEKSANDRS BOIKO

RTU Izdevniecība

Rīga 2021

Ivanovs, V. Analīze par sliežu slīpēšanas ietekmi uz to stāvokli. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 54 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-22” 2021. gada 9. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 0403-9.16.1/3.

<https://doi.org/10.7250/9789934226434>
ISBN 978-9934-22-643-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNE DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 2. septembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 204. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesors *Dr. sc. ing.* Guntis Strautmanis,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Marijonas Bogdevičius,
Viļņas Ģedimīna universitāte, Lietuva

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Laurencas Raslavičius,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Viktors Ivanovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 92 attēli, 17 tabulu, trīs pielikumi, kopā 140 lappušu, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 65 nosaukumi.

SAĪSINĀJUMI

60 E1, R65 sliežu profilu tipi;

C – ogleklis;

Mn – mangāns;

Si – silīcijs;

V – vanādijs;

Cr – hroms;

P – fosfors;

S – sērs;

Al – alumīnijs;

Cu – varš;

Ni – niķelis;

Ti – titāns;

W – volframs;

Mo – molibdēns;

Co – kobalts;

Pb – svins;

Zr – cirkonijs;

HNO₃ – slāpekļskābes

R350HT, R350LHT, R260 – tērauda marka;

HB, HBW – cietības vērtības pēc Brunela;

X 10, 11, 17, 1-2 – sliedes galviņas ritvirsmas defektu kodi;

R – līknes rādiuss, m;

h – dziļums, mm;

a – platums, mm;

l – garums, mm;

milj. t., bruto – caurlaistā tonnāža;

E – elastības modulis;

M – mērogs;

PŠV (TU 3933-002-060632410-2012) – ceļa bīdmērs;

H_p – parādītais sliedes nodilums;

D – velšanās loka diametrs;

D_a – loka iekšējās virsmas diametrs no riteņa ārpusēs;

D_i – loka iekšējās virsmas diametrs no riteņa iekšpusēs;

B – riteņa loka platums;

h_u – uzmalas augstums;

D_{ra} – rumbas ārējās virsmas diametrs no riteņa ārpusēs;

D_{ri} – rumbas ārējās virsmas diametrs no riteņa iekšpusēs;

d – riteņa rumbas cauruma diametrs;

B_r – riteņa rumbas garums;

r – attālums no rumbas gala virsmas līdz loka sānu virsmai no riteņa iekšpusēs;

B_{dl} – diska biezums pie riteņa loka;
 B_{dr} – diska biezums pie riteņa rumbas;
 h – ārējās sliedes pacēlums mm;
 V – kravas vagona kustības ātrums, km/h;
 T – temperatūra;
 R_1 – riteņa rādiuss kontaktā ar sliedes iekšējo šķautni;
 ΔR_0 – riteņa rādiusa novirze sliedes ārējā profila divos kontaktos;
 $[kus]$ – stabilitātes koeficienta pieļaujamā vērtība kravas vagoniem;
 β – slīpuma leņķis, kuru veido riteņa uz mala ar horizontālo asi;
 μ – slīdes berzes koeficients neuzbraucošam ritenim uz sliedes galviņu;
 P_{v1} – uzbraucošā riteņa uz sliedes galviņu reakcijas spēku vertikālā komponente, tf, MPa;
 P_{v2} – neuzbraucošā riteņa uz sliedes galviņu reakcijas spēku vertikālā komponente, tf, MPa;
 P_h – uzbraucošā riteņa uz sliedes galviņu reakcijas spēku horizontālā komponente;
 $P_{st}(m)$ – vertikālā statiskā slodze, iedarbojas uz ass kakliņu, tf, MPa;
 $kd. s. \dot{s} = 0,25 \overline{Kd. v.}$ – sāniskās šūpošanās dinamikas koeficienta vidējā vērtība;
 $H_r = p_a \overline{Kd. h.}$ – rāmja spēka vidējā vērtība;
 p_a – ass slodze;
 $qr.p.$ – riteņpāra ar buksēm smaguma spēks;
 b – ratiņu asu skaita koeficients;
 δ – koeficients, atkarīgs no pakares elastības kravas vagoniem;
 v – vagona kustības ātrums, m/s;
 $2B_2$ – attālums starp riteņpāra ass kakliņu vidiem;
 a_1, a_2 – attālums no riteņa kontakta punktiem līdz ass kakliņu vidum;
 r – riteņa rādiuss;
 l – attālums starp riteņa kontakta punktiem ar sliedi;
TAP – tehniskās apkopes punkts.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbā pētīti sliežu tēraudi saskaņā ar standartiem *EN 13674-1:2011* un *GOST R 51685-2013*. IZanalizēti sliežu tērauda defekti un to rašanās iemesli. Detalizēti izpētīta un izanalizēta bojāto un ļoti bojāto sliežu statistika VAS “Latvijas dzelzceļš” 2011.–2019. gadā. Apkopota un izanalizēta sliežu slīpēšanas vilciena darba statistika VAS “Latvijas dzelzceļš” 2011.–2019. gadā. Veikta *60 E1* tipa sliežu ritvirsmas cietības, bojātās sliedes (kods X 10.1.) metāla ķīmiskā sastāva un struktūras izpēte. Apkopota un izanalizēta riteņpāru izbrāķēšanas statistika VAS “Latvijas dzelzceļš” tīklā 2016.–2019. gadā un riteņu loku defektu skaits “RŽD” Krievijas dzelzceļā. Izskatīti riteņpāru galvenie defekti. Izpētīti riteņa un sliedes faktiskie nodilumi Latvijas un uzrādītie Krievijas dzelzceļos. Iemodelēti remonta profili sliežu galviņas slīpēšanai Latvijas sliežu ceļiem un novērtēta to ietekme uz sānu nodilumu sliežu un riteņu virsmu mijiedarbības rezultātā. Veikts riteņu ar atloka leņķi $66,8^\circ$ nodilušo profilu noturības koeficienta aprēķins Latvijas sliežu ceļiem atbilstoši uzbraukšanas nosacījumiem uz sliežu profiliem, kas izstrādāti šajā promocijas darbā. Izstrādāta sliežu slīpēšanas metodika. Aprēķinātas riteņpāru remonta un sliežu slīpēšanas ekonomiskās izmaksas.

Piedāvātas rekomendācijas riteņu un sliežu sānu nodiluma mazināšanai.

SATURS

IEVADS	8
Tēmas aktualitāte.....	8
Darba mērķis un uzdevumi.....	8
Pētījumu metodes un metodika	9
Zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti	9
Darba praktiskais lietojums	10
Darba aprobācija.....	10
1. SLIEŽU UZDEVUMS, TĀM IZVIRZĪTĀS PARAMETRI.....	13
2. SLIEŽU DEFEKTU ANALĪZE VAS “LATVIJAS DZELZCEĻŠ”	16
2.1. Ļoti bojāto sliežu analīze VAS “Latvijas dzelzceļš”	18
2.2. Ļoti bojāto sliežu galviņu analīze VAS “Latvijas dzelzceļš”	19
2.3. Firmas “Speno” sliežu slīpēšanas vilciena darba statistiskā analīze VAS “Latvijas dzelzceļš”	20
3. 60 EI TIPA SLIEŽU RITVIRSMAS CIETĪBAS IZPĒTE, BOJĀTĀS SLIEDES AR KODU X 10.1 IZPĒTE.....	22
3.1. 60 EI tipa sliežu ritvirsmas cietības izpēte.....	22
3.2. Bojātās sliedes ar kodu X 10.1 izpēte.....	24
4. IZPĒTES UZDEVUMA NOSTĀDNE ATTIECĪBĀ UZ DZELZCEĻA RITEŅA UN SLIEDES MIJIEDARBĪBAS IETEKMES NOVĒRTĒJUMU, VEICOT ELEMENTU 3D MODELĒŠANU	30
4.1. Riteņa un sliedes nodilumi Latvijas un Krievijas dzelzceļos	30
4.2. Sliežu slīpēšanas veidi un periodiskums	32
4.3. Sliežu slīpēšanas zināmie profili un metodika	33
5. IZPĒTES REZULTĀTI	35
5.1. Riteņu un sliežu profila nodiluma faktiskā izpēte VAS “Latvijas dzelzceļš”	35
5.2. Aprēķinu modeļu apraksts, riteņa un sliedes noslogojuma režīmi	36
5.3. Aprēķina modeļa testēšana un simulācijas rezultātu precizitātes novērtēšana.....	38
5.4. Slīpēšanas profila izstrāde profilaktiskās atkārtotās slīpēšanas veikšanai.....	40
5.5. Slīpēšanas profilu ietekmes novērtējums uz sliedes un riteņa savienojuma sprieguma stāvokli	42
5.6. Pēc uzmalas ieripināšanas uz sliedes nosacījumiem piedāvātā slīpēšanas profila ekspluatācijas drošības pārbaude	44
5.7. Izstrādātā sliedes slīpēšanas metodika.....	46
5.8. Sliežu slīpēšanas un riteņpāra atjaunošanas remontdarbu ekonomiskais salīdzinājums.....	47
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	49
KOPSAVILKUMA LITERATŪRAS SARAKSTS	52

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Dzelzceļa sliežu ceļu dārgākie un svarīgākie elementi, kuru stāvoklis pirmām kārtām nosaka nepārtrauktu un drošu vilcienu kustību, ir sliedes un riteņpāri. Lai uzturētu sliežu un vagonu saimniecību darbderīgā stāvoklī, ik gadu nepieciešams vairāk nekā 3020 tonnas jaunu sliežu un 700 riteņpāru. Katru gadu VAS "Latvijas dzelzceļš" astoņos defektoskopijas cehos vidēji tiek atklātas vairāk nekā 15 848 bojātas un 277 ļoti bojātas sliedes. Apkopes punktos un vagonu depo ik gadu vidēji tiek atklāts vairāk nekā 521 bojāts riteņpāris. Savlaicīgi neatklāts riteņpāra bojājums un ļoti bojātas sliedes var izraisīt riteņa vai sliedes lūzumus, un tā rezultātā riteņpāra (ratiņu) vai ritošā sastāva nobraukšana. Perspektīvs virziens šīs problēmas risināšanai ir sliežu slīpēšanas tehnoloģija, izmantojot sliežu slīpēšanas vilcienus, kas ļauj veikt sliežu galviņas mehānisko apstrādi bez to demontāžas sliežu ceļu apstākļos. Sliežu likvidējamo defektu saraksts, veicot slīpēšanu ar šo tehnoloģiju, ir pietiekami plašs. Tajā iekļauti: viļņveida nodilumi; mehāniskie bojājumi; metāla saplacināšanās un atslāņošana. Viens no galvenajiem slīpēšanas mērķiem ir sliežu šķērsprofila veidošana. Riteņa un sliedes slīpēšanas profila periodiska saskaņota koriģēšana ļaus nodrošināt labāku riteņa kontaktu ar sliedi, vienmērīgi sadalīt iekšējos spriegumus pa riteņa un sliedes virsmām, paildzinot ekspluatācijas resursus par 15 % ... 20 %. Sliežu ekspluatācijas īpašības tiek noteiktas ar pret darbību plaisu veidošanās procesam attīstībai, kontakta noguruma defektu un nodiluma, kuru rašanās lielā mērā ir atkarīga no sliedes galviņas un riteņa velšanās virsmas profilēšanas kvalitātes.

Darba mērķis un uzdevumi

Mērķis

60E1 un R-65 tipa sliežu slīpēšanas ar sliežu slīpēšanas vilcienu efektivitātes izpēte VAS "Latvijas dzelzceļš" sliežu ceļu līklīnijās un taisnajos iecirkņos. Izstrādāt saskaņotu metodiku sliežu remonta un asimetrisku profilu slīpēšanai, lai mazinātu sliedes galviņas sānu un vertikālo nodilumu, kā arī riteņu apvirpošanas daudzumu VAS "Latvijas dzelzceļš".

Uzdevumi

1. Izskatīt sliežu tērauda tehniskos parametrus pēc to nozīmes, ķīmiskā sastāva un cietības.
2. Pētīt un analizēt sliežu tērauda defektus.
3. Apkopot un izanalizēt sliežu bojājumu statistiku VAS "Latvijas dzelzceļš" pēdējos deviņos gados, noskaidrot biežāk atklātos defektus, veikt to novērtēšanu un atšifrēšanu pēc defektu kodiem.
4. Apkopot un izanalizēt sliežu slīpēšanas vilciena darba statistiku VAS "Latvijas dzelzceļš" pēdējos deviņos gados.

5. Veikt cietības uz 60 EI tipa sliežu ritvirsmas un bojātās sliedes ar kodu X 10.1 izpēti, salīdzināt testēšanas rezultātus.
6. Izpētīt dzelzceļa riteņa un sliedes mijiedarbības ietekmes, gala rezultātā veicot elementu 3D modelēšanu.
7. Veikt riteņu un sliežu profila nodilumu faktisko izpēti VAS “Latvijas dzelzceļš”.
8. Izstrādāt slīpēšanas profilus profilaktiskajai atkārtotajai sliedes galviņas slīpēšanai.
9. Veikt slīpēšanas profila ietekmes uz sliežu un riteņu savienojumu nospriegotā stāvoklī novērtējumu.
10. Veikt piedāvātā slīpēšanas profila pēc uzmalas ierīpināšanas uz sliedes nosacījumiem ekspluatācijas drošības pārbaudi.
11. Aprēķināt ekonomisko salīdzinājumu starp sliežu slīpēšanas un riteņpāra atjaunošanas remonta darbu vai nomaiņu.

Izstrādāt rekomendācijas

1. Izstrādāt sliežu slīpēšanas metodiku riteņu un sliežu sānu nodiluma samazināšanai VAS “Latvijas dzelzceļš”.

Pētījumu metodes un metodika

Pētījumos izmantotas eksperimentālās un analītiskās metodes bojātā un ļoti bojātā sliežu tērauda cietības, ķīmiskā sastāva un materiāla struktūras noteikšanai. Veicot elementu 3D modelēšanu programmā *Solid Works Simulation Professional*, izmantojot materiālus un VAS “Latvijas dzelzceļš” ekspluatācijas nosacījumus, projicēti modeļi attiecībā uz riteņpāru mijiedarbību: jauna sliede ar jaunu riteņi; jauna sliede ar nodilušu riteņi; nodilusi sliede ar jaunu riteņi; nodilusi sliede ar nodilušu riteņi; slīpēta sliede ar jaunu riteņi; slīpēta sliede ar nodilušu riteņi. Informācija iegūta, balstoties faktiskajā izpētē, analizējot ražošanas dokumentāciju un citu autoru literatūras avotus, izmantojot analīzes un salīdzināšanas metodi, kā arī ņemot vērā atskaišu, tehnoloģisko karšu, tabulu un grafiku datus.

Zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti

1. Izstrādāta metodika remontu profilu izveidošanai sliežu galviņas slīpēšanai, kas bāzēta uz reālu riteņu izdilušo profilu izmantošanu. Tas ļauj: palielināt sliežu remonta profilu slīpēšanas precizitāti; precīzāk modelēt vienkāršu kontaktu taisnajā sliežu ceļā vai divpunktu kontaktu līknēs, tādā veidā samazinot riteņa uzmalas defektu skaitu dažādos dzelzceļa sliežu ceļu iecirkņos VAS “Latvijas dzelzceļš”.
2. Veikta 3Dmodelēšana riteņa mijiedarbībai ar sliedi, izmantojot izstrādāto sliežu profilu, kas ļauj novērtēt sliežu slīpēšanas ietekmi uz sprieguma līmeni pārī ritenis-sliede.
3. Izstrādāti rekomendējamie profili sliežu slīpēšanai – sliedes asimetriskie profili ar mazāko riteņa mijiedarbību ar sliedi un mazāko slīpēšanas skaitu. Slīpēšanas

pamatleņķi asimetrisko profilu virsmām sasniedz no 2,68° līdz 2,41° ārējai sliedei un no 2,36° līdz 4,61° iekšējai sliedei.

4. Sliedes slīpēšanas leņķa izmaiņas ļauj palielināt kontakta zonu, tā rezultātā samazināt spriegumu uz ārējo sliedi līdz 18 % un novirzīt daļu slodzes no riteņu malas nodiluma zonas uz riteņu uzmalas pamatu. Nobīde sasniedz no 5 mm līdz 30 mm, riteņu rādiusu starpība – 5,60 mm vienā riteņpārī, kas uzlabo riteņpāru iekļaušanos četras reizes.
5. Ekonomiskā analīze apstiprina nepieciešamību izmantot izstrādātus jaunus un remonta sliežu profilus, veicot slīpēšanu, lai izvairītos no bojāto riteņpāru remonta izdevumiem.

Darba praktiskais lietojums

Pamatojoties uz izstrādāto metodiku un veikto izpēti, var ievērojami pagarināt sliežu un riteņpāru kalpošanas termiņu, ievērojami samazināt vagonu atkabināšanās skaitu no vilcieniem. Rezultātā samazināt daļu virsējo un iekšējo defektu sliedes galviņai, uzlabot ritošā sastāva iekļaušanos līknēs, novērst līkņu iekšējā sliežu pavediena bojājumus, ja notiek riteņa ar maldīgu uzmalu caurbraukšana, vilcienu kustības laidenumu, sliežu ceļu ātrgaitas iecirkņos – palielināt vilcienu kustības ātrumu, kā arī palielināt kalpošanas laiku sliežu ceļu virsbūves elementiem un ritošā sastāva gaitas daļai.

Darba aprobācija

Par darba rezultātiem ir ziņots, un tie ir apspriesti vairākās zinātniskās konferencēs.

Latvijā

1. 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. 24/05/2017–26/05/2017 – Latvija, Jelgava. Latvia University of Agriculture.
2. 17th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. 23/05/2018–25/05/2018 – Latvija, Jelgava Latvia University of Life Sciences and Technologies.
3. ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018). 14/01/2019–14/01/2019 – Procedia Computer Science.
4. 18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. 22/05/2019–24/05/2019 – Latvija, Jelgava. Latvia University of Agriculture.
5. ICTE in Transportation and Logistics 2019. 26/01/2020–26/01/2020 – Springer, Cham. Online.
6. 19th International Scientific Conference “Economic Science for Rural Development”. 20/05/2020–22/05/2020 – Latvija, Jelgava. Latvia University of Life Sciences and Technologies.

Ārvalstīs

1. IX International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS. 28/06/2017–30/06/2017 – Poland, Katowice-Sulejów. Silesian University of Technology Faculty of Transport.
2. Международную научно-практическую конференцию “IX Торайгыровские чтения”. 17/11/2017–17/11/2017 – Казахстан, Павлодар. Павлодарский государственный университетим. С. Торайгырова.
3. 8th International Scientific Conference “Rural Development 2017: Bioeconomy Challenges”. 23/11/2017–24/11/2017 – Lietuva, Kaunas. Aleksandras Stulginskis University.
4. Международная междисциплинарная конференция “Инновационное развитие и современные образовательные технологии в системе физико-математического образования”. 19/04/2018–20/04/2018 – Krievija, Maskava. ИИУ МГОУ.
5. Transport Means 2019. 02/10/2019–04/10/2019 – Lietuva, Palanga. Kaunas University of Technology.

Publikācijas

Tēzes, rekomendācijas un secinājumi ir atspoguļotas vairākās zinātniskajās publikācijās, tai skaitā *Scopus* datubāzē.

1. P. Gavrilovs, V. Ivanovs. Defect Analysis on Latvian Railway, Research on Defective Rail. 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, ISSN 1691-5976. 24.–26. maijs, Latvija, Jelgava 2017. pp. 1377–1382.
2. P. Gavrilovs, V. Ivanovs. Research of the Defective Frog Wing of 1/11 Mark. Transport Problems, ISSN 1896-0596. e-ISSN 2300-861X. Poland, Katowice 2017. pp. 119–126.
3. П. Гаврилов, В. Иванов, Р. Зарипов. Анализ твердости металла рельса 60 E1. Вестник КазАТК No.1, ISSN 1609-1817. Республика Казахстан, г. Алматы 2017. 23–29 стр.
4. P. Gavrilovs, V. Ivanovs. Research of a Highly Defective Frog Core of Grade 1/9. Rural Development 2017: Bioeconomy Challenges: The 8th International Scientific Conference: Conference Proceedingse – ISBN 978-609-449-128-3. ISSN 1822-3230. e-ISSN 2345-0916. 23.–24. novembris, 2017. Aleksandras Stulginskis University, Lietuva, Kaunas 2018. pp. 266–271.
5. Иванов В. Р., Гаврилов П. Л. Исследование свариваемости рельсов Р65 Тагильского и Азовского завода машиной ПРСМ. Сборник научных статей по итогам Международной междисциплинарной конференции. Инновационное развитие и современные образовательные технологии в системе физико – математического образования: актуальные вопросы теории, методики и практики, Москва: ИИУ МГОУ, 19–20 апреля, 2018. ISBN 978-5-7017-2945-0. Россия, Москва 2018. 29–33 стр.

6. P. Gavrilovs, V. Ivanovs. Analysis of Rail Profile 60 E1 Joints Welded by Means of a Mobile Rail Welding Machine. 17th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” Proceedings ISSN 1691-5976. 23.–25. maijs, 2018. Latvia University of Life Sciences and Technologies, Latvija, Jelgava 2018. pp. 1969–1977.
7. P. Gavrilovs, V. Ivanovs, A. Rumjancevs. The Cross Wing Rail Cladding Layer of the Type 1/11 DO, 60 E1 Investigation. *Procedia Computer Science*, Vol. 149. ISSN 1877-0509. 2019. pp. 336–343.
8. P. Gavrilovs, V. Ivanovs. Comparative Analysis of P-65 (A, T) Type Weld Joint Metal Structure. *Procedia Computer Science Lietuva*, ISSN 1877-0509. 1. janvāris, 2019. UK: Elsevier B. V., 2019. pp. 314–318.
9. P. Gavrilovs, V. Ivanovs. Study of xothermic welded joint grinding by “Speno” railgrinders. 18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Vol. 18. ISSN 1691-5976. Latvija, Jelgava 2019. pp. 1013–1021.
10. P. Gavrilovs, V. Ivanovs. Research of Weldability of Rail Profile 60 E1 Manufactured in Factory “Arcelor Mittal”. *Transport Means* 2019. ISSN 2351-7034. 02.10.2019.–04.10.2019. Kaunas University of Technology. Lietuva, Palanga 2019. pp. 945–949.
11. P. Gavrilovs, V. Ivanovs, P. Stankevics, F. Mihailovs. Analysis of Highly Defective Rails with Horizontal Splitting in the Head. *ICTE in Transportation and Logistics* 2019. 26.01.2020 Springer, Cham. Online ISBN 978-3-030-39688-6. 2020. pp. 196–202.
12. V. Ivanovs, P. Gavrilovs, A. Boiko, I. Vaicis. Estimating Influence of Rail Profile Shape on Lateral Wear of Rail and Wheel after Grinding of 60e1 and R65 Rails. 19th International Scientific Conference “Economic Science for Rural Development”. DOI:10.22616/ERDev.2020.19.TF137. 20.–22.05.2020. Latvia University of Life Sciences and Technologies. Latvija, Jelgava 2020. pp. 614–624.

1. SLIEŽU UZDEVUMS, TĀM IZVIRZĪTĀS PARAMETRI

Sliežu ceļu virsbūves galvenais nesošais elements ir sliedes. Sliede sastāv no speciālo šķērsgriezumu tērauda sijām, pa kurām kustas ritošais sastāvs. Standarta un vispārpieņemtās sliedes visiem pasaules sliežu ceļiem ir platpēdas sliedes. VAS "Latvijas dzelzceļš" un Eiropā tiek lietots standarts *EN 13674-1:2011* [6], sliedes, kas paredzētas posmu un vienlaidu dzelzceļa sliežu ceļiem, kā arī pārmiju pārvedu ražošanai. Krievijas dzelzceļos daļēji tiek izmantots standarts *GOST R 51685-2013*, kas tiek lietots arī Latvijā (pieņemšanas un nosūtīšanas ceļiem, daļēji galvenajiem ceļiem), Kazahstānā, Baltkrievijā, Ukrainā un citās valstīs.

Sliedes ir sliežu ceļa virsbūves galvenais elements. Tās paredzētas:

- lai izveidotu virsmu ar vismazāko pretestību ritošā sastāva riteņu kustībai;
- lai tieši uzņemt un elastīgi nodotu spēka iedarbību no riteņa uz balstiem (gulšņiem, brusām);
- lai novirzītu kustībā ritošā sastāva riteņus;
- iecirkņos ar autobloķēšanu sliežu pavedieni kalpo kā signālstrāvas vadītājs;
- iecirkņos ar elektrisko vilci – vilces pretstrāva.

Sliedēm jābūt šādām īpašībām:

- nodilumizturība;
- noguruma stiprība;
- augstai pretestībai trauslam lūzumam;
- labai metināmībai;
- augstai tērauda tīrībai;
- labai apstrādājamībai;
- zemiem termiskiem spriegumiem;
- precīzai ģeometrijai un taisnvirzieniskie
- ilgam kalpošanas laikam.

Sliedes ir viena no sliežu ceļu virsbūves neatņemamām sastāvdaļām, augstās sliežu ekspluatācijas prasības liecina par to nozīmību dzelzceļa ritošā sastāva drošā pārvadāšanas procesā.

Sliežu materiāls, ķīmiskais sastāvs un sliežu tērauda cietība

Sliežu tērauds ir oglekļa legētais tērauds, kas tiek legēts ar silīciju un mangānu. Sakausējuma fāzes struktūras pamatā ir sīkadatāināis perlīts. Metāla izkausēšanai izmanto martenkrāsnis, konvertera un elektriskās krāsnis.

Sliežu tērauda markas var iedalīt divās grupās atkarībā no izmantotā dezoksidanta veida

1. Pirmajā grupā ietilpst tērauds, kas dezoksidēts ar feromangānu vai ferosilīciju.
2. Otrā iekļauts tērauds ar dezoksidantu uz alumīnija bāzes.

Priekšrocība tiek dota otrās grupas metālam, jo tas satur mazāku procentu nemetālu piemaisījumu.

Sliežu ķīmisko sastāvu pilnībā regulē Krievijas standarts *GOST R 51685-2013* [61].

Mūsdienās sliedes velmē tikai no tērauda lietņiem. Tēraudu izgatavo konverteros pēc Besemera paņēmiena vai martenkrāsnīs. Besemera tēraudu iegūst izkausētā čuguna caurpūšanas ar skābekli rezultātā (15–18 min). Tā rezultātā izdeg ogleklis un daļa piemaisījumu. Martentēraudu vāra no čuguna un tērauda lūžņiem lielās krāsnīs (tilpums no 200 t līdz 1500 t) dažas stundas. Šis tērauds ir tīrāks un mazāk aukstlūzens nekā Besemera. Smagā tipa (*R65* un *R75*) sliedes velmē tikai no martentērauda. Sliežu tērauda kvalitāte tiek noteikta pēc tā ķīmiskā sastāva, mikro un makro struktūrām [19].

60 EI tipa sliežu tērauda ķīmiskā sastāva galveno rādītāju vērtības saskaņā ar Eiropas standartu *EN 13674-1:2011* redzamas 1.1. tabulā [7].

1.1. tabula

60 EI tipa sliežu tērauda ķīmiskā sastāva galveno rādītāju vērtības saskaņā ar Eiropas standartu *EN 13674-1:2011*

Tērauda marka	Elementu masas daļa, %				
	C	Si	Mn	P	S
<i>R350HT, R350LHT</i>	0,72–0,80	0,15–0,58	0,70–1,20	0,020	0,025
<i>R260</i>	0,62–0,80	0,15–0,58	0,70–1,20	0,025	0,025

Piezīmes: *R350HT* – sliedes no termiski apstrādāta oglekļmangāniskā (C-Mn) tērauda; *R350LHT, R260* – sliedes no termiski nestiprināta mazlēģētā tērauda.

Termostiprināto sliežu *R50, R65* un *R75* tipa galviņā tērauda cietības vērtībai jāatbilst *GOST R 51685-2013*[61] standarta normām, 60 EI tipa sliedēm – Eiropas standarta *EN 13674-1:2011* [6] normām, kas redzamas 1.2. tabulā.

1.2. tabula

60 EI tipa termostiprinātas sliedes cietības vērtības pēc Eiropas standarta *EN 13674-1:2011*

Tērauda marka	Cietības diapazons, HB
<i>R350HT, R350LHT</i>	350–390
<i>R260</i>	260–300

Krievijas dzelzceļā tiek izmantotas pēc raksturojuma un nozīmes dažādu veidu tēraudu markas (*GOST R 51685-2013*). Taču pēc ķīmiskā sastāva un cietības tās ir līdzīgas Eiropas standartam *EN 13674-1:2011*.

Sliežu tērauda defekti

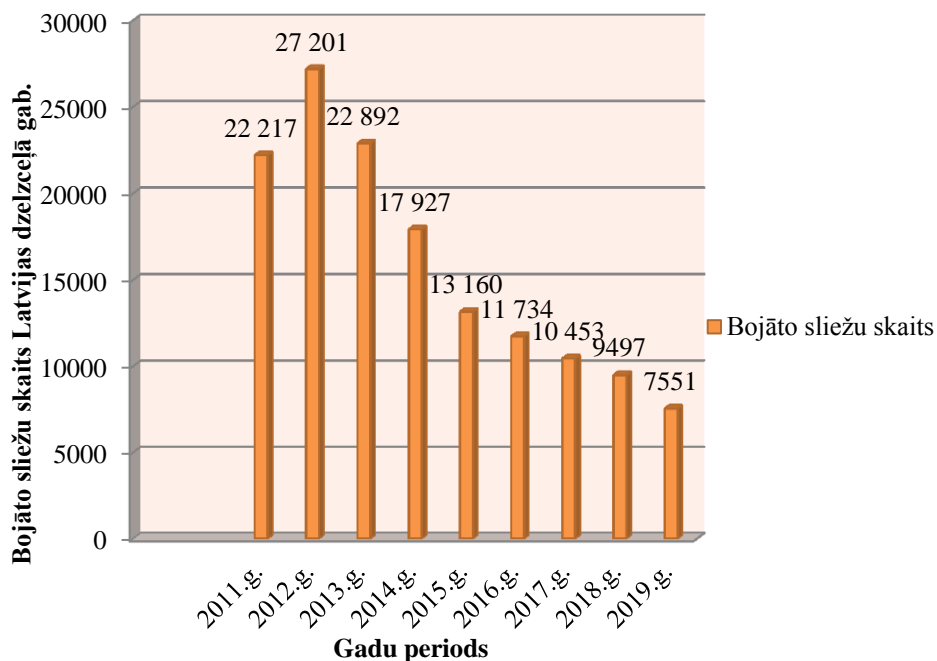
Pirmsvelmējuma karsēšana un velmēšana nav mazāk svarīga kvalitāti formējoša tehnoloģiskā operācija parizkausēšanu un tērauda izliešanu. Karsēšanas stadijā, ietekmējoties no metalurģiskajiem faktoriem, notiek nepieciešamā plastiskuma veidošanās (spēja deformēties bez sairšanas) un tērauda pretestības plastiskajai deformācijai mazināšana. Karsēšanas galvenie negatīvie faktori ir: intensīva karstuma iedarbība no sakarsēto krāšņu gāzēm uz aukstu sagatavi, veicot tās iekraušanu krāsnī, un tērauda atrašanās ilgums augst temperatūras zonā (900–1250 °C). Velmēšanas laikā notiek metāla plastiskā deformācija. Šajā procesā liela nozīme ir temperatūras režīmam, saspiešanas režīmam un veltnīšu kalibrēšanai. No to racionālas izvēles ir atkarīga vairākumu defektu, kas radušies tēraudliešanas rezultātā, evolūcija. Piemēram, var rasties iekšējās plaisas, tās var parādīties virspusē, oksidēties un izraisīt sliežu virsmas deformāciju vai arī brūvēties plastiskās deformācijas rezultātā, saglabājot augstas metāla mehāniskās īpašības bijušajā defekta zonā. Papildus esošo defektu pārveidošanai velmētava ir arī savu defektu avots, no kuriem lielākā daļa ir virsmas defekti.

Karsēšanas defekti ir: plaisas, oksidēšanās, virnojums, iedobes un plāvas [22]. Vieni no būtiskākajiem defektiem sliežu tēraudam ir velmējuma defekti: deformācijas ierāvumi, velmējuma atlobīšanās, atradzis, aizvelmējums, rise (ieskrambājums), nospiedumi (iespiedumi), krunka, sprieguma plaisa, sīkplaisas, dobums, gāzes pūslītis.

Metāla struktūras pamatdefekti, kasattiecas uz galviņas ritvirsmu, ir virsmas izdrupšana un mehāniskie bojājumi.

2. SLIEŽU DEFEKTU ANALĪZE VAS “LATVIJAS DZELZCEĻŠ”

Apkopota informācija par bojātajām sliedēm VAS “Latvijas dzelzceļš” 2011.–2019. gadā (2.1. att.) un veikta tās statistiskā analīze [1].



2.1. att. Bojāto sliežu kopējā skaita statistika VAS “Latvijas dzelzceļš” no 2011. līdz 2019. gadam.

Ņemot vērā 8.1. attēlā redzamos datus, var secināt, ka no 2011. līdz 2019. gadam VAS “Latvijas dzelzceļš” ievērojami samazinājies bojāto sliežu skaits – no 27 201 līdz 7 551. Šajā laikā vislielākais bojāto sliežu skaits – 27 201 – bijis 2012. gadā. Savukārt 2013. gadā defektu skaits samazinājās līdz 22 892. No 2014. līdz 2019. gadam defektu skaits ievērojami samazinājies – no 17 927 līdz 7 551 defektiem, liecinot par to, ka VAS “Latvijas dzelzceļš” prioritāte ir droša un nepārtraukta vilcienu kustība noteiktajā kustības ātrumā. Tomēr, neskatoties uz bojāto sliežu skaita samazināšanos, VAS “Latvijas dzelzceļš” problēma ir aktuāla. Galvenie pirmās grupas defekti ir: metāla atslāņošanās un izdrupšana uz ritvirsmas [1].

Uz sliedes galviņas ritvirsmas visizplatītākie ir šādi defekti:

- X 10.1-2 – metāla atslāņošanās un izdrupšana uz ritvirsmas;
- X 11.1-2 – izdrupšana galviņas darba veidgriezumā metāla kontakta noguruma stiprības nepietiekamības dēļ;
- X 17.1-2 – metāla izdrupšana un atslāņošanās uz sliedes galviņas rūdītā slāņa virsmas.

Metāla atslāņošanās un izdrupšanas plaisas uz ritvirsmas (defekta kods – X 10.1-2) parasti rodas, ja nav ievērota sliežu izgatavošanas tehnoloģija (aizvelmējums, sīkplaisas, atlobījums u. c.) [2]. Šādus bojājumus var labi redzēt vizuālās apskates laikā (2.2. att.).



2.2. att. Atklātais defekts sliežu ceļa posmā Menta–Daudzeva 256 km 6 piketā.

Šis defekts tiek kontrolēts ar mēraparātiem – lineālu, bīdmēru ar dziļummērītāju, kā arī ultraskaņas defektoskopiju, kas ir galvenā un perspektīvākā metode, lai atklātu un kontrolētu šo defektu.

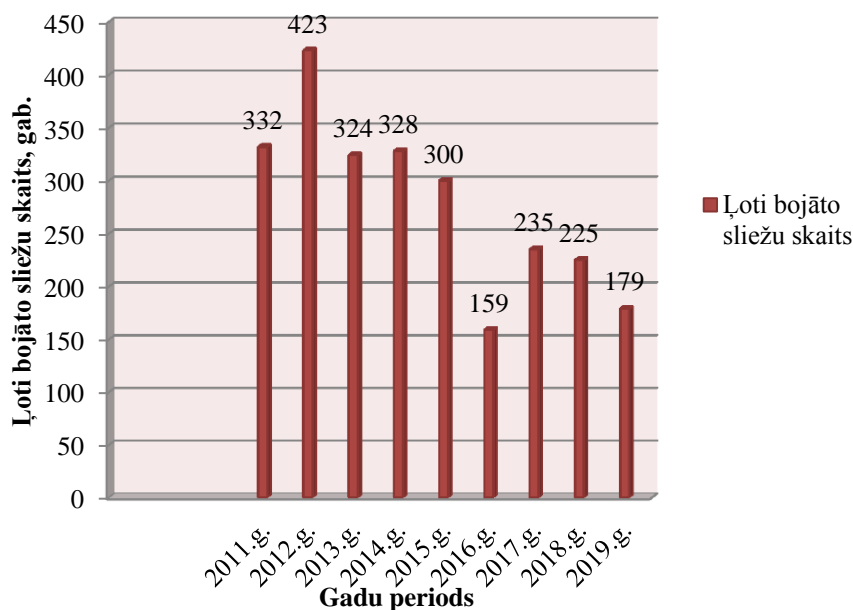
Defekts ar kodu X 11.1-2 plaisas, metāla atslāņojumi vai izdrupumi uz sliežu galviņas darba virsmas sānu noapaļojuma vai galviņas vidusdaļas, kuru cēloņi var būt lokāla iekšēju nemetālisku iekļāvumu koncentrācijas sliedes galviņā, kas celiņu veidā stiepijas sliedes velmēšanas virzienā vai arī sliežu metāla nepietiekama kontakta noguruma izturība [2], – ir galvenais problemātiskais defekts gan VAS“Latvijas dzelzceļš”, gan arī dzelzceļa transportā pasaulē.

Rašanās un attīstības iemesli

Sliežu tērauda metalurģiskās kvalitātes trūkumi (vietējo nemetālisko ieslēgumu, kas izstiepti gar velmēšanas virzienu, sakrāšanās) nosaka metāla nepietiekamo kontakta noguruma stiprību. Visbiežāk tiek bojāta ārējo pavedienu darba šķautne sliežu ceļu līkņu iecirkņos ($R = 400\text{--}1000\text{ m}$) (2.3. att.). Izdrupšana sākas ar kontakta noguruma iekšējo garenisko plaisu veidošanos un attīstību sliedes galviņas darba veidgriezuma zonā. Kontakta noguruma plaisas veidojas arī no ritvirsmas uz sliedes galviņas vidējo daļu, pakāpeniski iedziļinoties zem ritvirsmas, veidojot izstieptas horizontālas kontakta noguruma plaisas. Bieži defekts rodas uz ārējo sliežu darba šķautņu veidgriezuma līknēs ar mazu rādiusu, var būt arī sānu nodilums. No nav dziļam kontakta noguruma virsējām paralēlām plaisām dažreiz rodas gareniska plaisa, kas kļūst dziļāka visā attīstības laikā [23].



2.3. att. Atklātais defekts līknē $R = 708\text{ m}$ Vecumnieku stacijas 1. galvenajā ceļā.



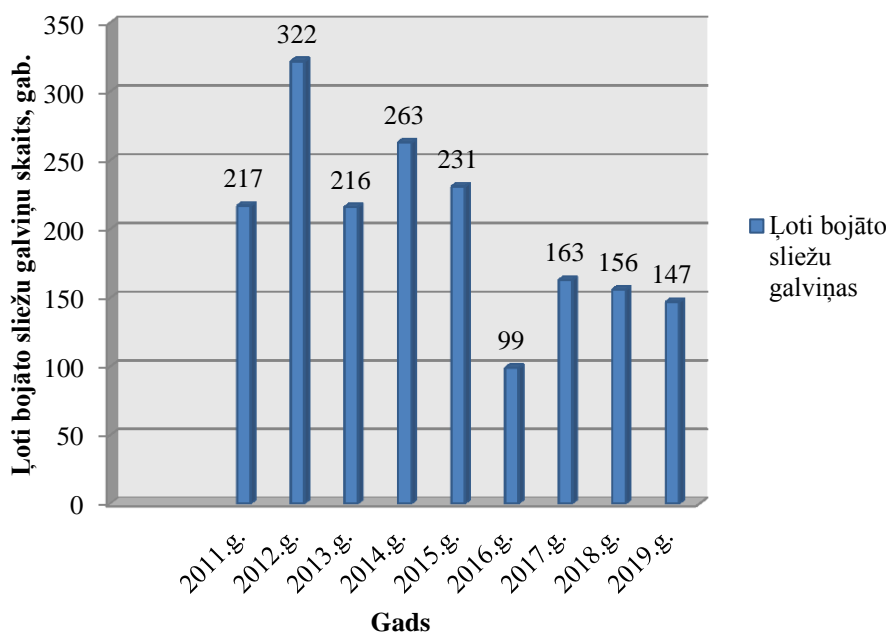
2.5. att. Ļoti bojāto sliežu kopīgā skaita statistika VAS “Latvijas dzelzceļš” no 2011. līdz 2019. gadam.

Diagrammā redzams, ka no 2011. līdz 2019. gadam tika atklātas 2495 ļoti bojātas sliedes, kas apdraud ritošā sastāva kustību [1]. No tām vislielākais skaits ļoti bojātu sliežu tika piefiksēts 2012. gadā – 423 gab. 2013. gadā ļoti bojāto sliežu skaits bija 324 gab., savukārt 2014. gadā šis skaitlis nedaudz palielinājās – 328 gab. No 2015. līdz 2016. gadam atklāto ļoti bojāto sliežu skaits strauji samazinājās – no 300 līdz 159 defektiem. 2017. gadā ļoti bojāto sliežu skaits palielinājās līdz 235 gab. 2018. gadā ļoti bojāto sliežu skaits, kas tika atklāts defektoskopijas cehos, bija 225 gab., un tas ir par 10 ļoti bojāto sliežu gadījumu mazāk nekā 2017. gadā. 2019. gadā ļoti bojāto sliežu skaits samazinājās līdz 179 gab.

Šī statistiskā analīze liecina, ka ļoti bojāto sliežu problēma VAS “Latvijas dzelzceļš” ir aktuāla.

2.2. Ļoti bojāto sliežu galviņu analīze VAS “Latvijas dzelzceļš”

Slīdes galviņa ir viens no svarīgākajiem slīdes konstrukcijas elementiem, tās virsējā daļa tieši uzņem ritošā sastāva riteņpāru spiedienu. Slīdes galviņa virza arī riteņu kustību, kuriem ir bandāža ar speciālu uznavu no slīdes galviņas iekšējās darba puses. Ļoti bojātu sliežu galviņu atklāšana ir defektoskopijas cehu darbinieku pirmais uzdevums. 2.6. attēlā redzama ļoti bojāto sliežu galviņu skaita diagramma no 2011. līdz 2019. gadam [1].



2.6. att. Ļoti bojāto sliežu galviņu kopējā skaita statistika VAS “Latvijas dzelzceļš” no 2011. līdz 2019. gadam.

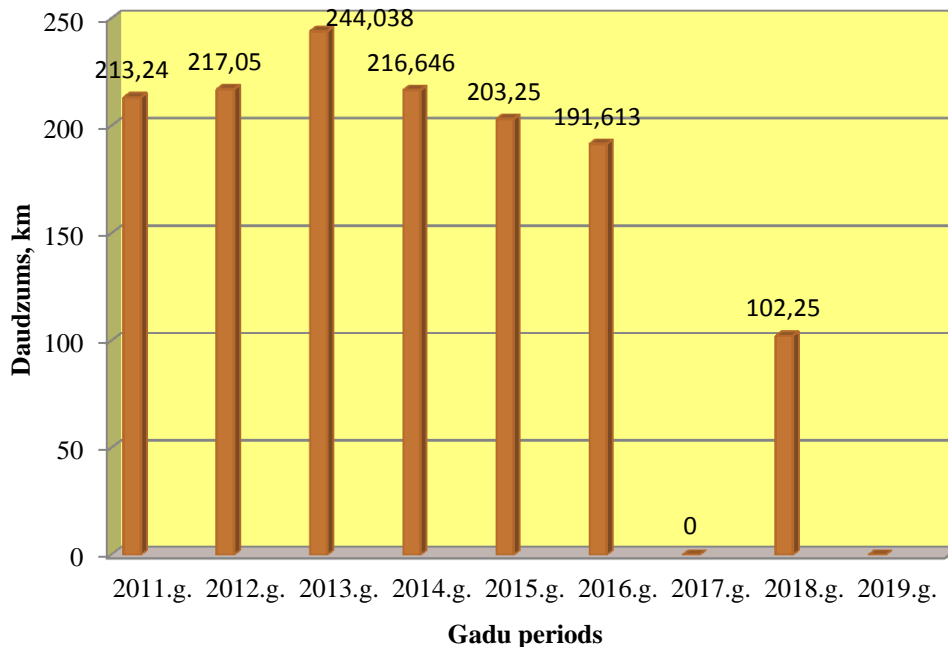
Sliežu galviņā attīstās vairāk nekā 21 defekta veida, kas ieņem pirmo vietu ļoti bojāto sliežu tēraudu atklāšanā VAS “Latvijas dzelzceļš”. 2.6. attēla diagrammā redzams, ka ļoti bojāto sliežu galviņu atklātais skaits no 2011. līdz 2019. gadam bija 1814 gab. [1], t. i., 68,10 % no atklāto ļoti bojāto sliežu galviņu kopējā skaita. Vislielākais skaits atklāto ļoti bojāto sliežu galviņu bija 2012. gadā – 322 gab. 2013. gadā ļoti bojāto sliežu galviņu skaits samazinājās līdz 216 gab. Savukārt 2014. gadā atklāto ļoti bojāto sliežu galviņu skaits pieauga par 47 gadījumiem un bija 263. No 2015. līdz 2016. gadam atklāto ļoti bojāto sliežu galviņu skaits ievērojami samazinājās – no 231 gadījuma līdz 99, t. i., par vairāk nekā 132 gadījumiem. Atklāto ļoti bojāto galviņu skaits no 2016. līdz 2017. gadam palielinājās par 64 gab. un bija 163. 2018. gadā ļoti bojāto sliežu galviņu skaits samazinājās līdz 156 gab. 2019. gadā atklāto ļoti bojāto sliežu galviņu skaits bija 147 gab.

Izpētītā statistika par ļoti bojāto sliežu galviņām pierāda, ka ir liels atklāto ļoti bojāto defekta vietu skaits galviņām, ar to apliecinot, ka ir nepieciešams veikt papildu kontroli (vizuālā apskate, defektoskopēšana) par sliežu galviņu stāvokli. Lai paildzinātu sliedes galviņas kalpošanas laiku, jāveic plānoti piesardzības pasākumi, piemēram, sliežu frēzēšana vai slīpēšana ar sliežu slīpēšanas vilcienu. Nākamajās nodaļās apskatītie galvenie ļoti bojāto sliežu defekti, kas ir aktuāli VAS “Latvijas dzelzceļš”.

2.3. Firmas “*Speno*” sliežu slīpēšanas vilciena darba statistiskā analīze VAS “Latvijas dzelzceļš”

Lai pagarinātu sliedes galviņas kalpošanas laiku, kā arī lai novērstu viļņveida nodilumus, mehāniskos bojājumus, metāla saspiedumus un atslāņojumus, VAS “Latvijas dzelzceļš” izmanto firmas “*Speno*” sliežu slīpēšanas vilcienu. Viens no galvenajiem slīpēšanas mērķiem

ir sliežu šķērsprofila veidošana. Profila periodiska koriģēšana ar slīpēšanu ļauj nodrošināt labāku riteņa un sliedes kontaktu, vienmērīgi sadalīt iekšējos spriegumus pa sliedes virsmu un tādā veidā pagarināt tā ekspluatācijas resursus par 15 % ... 20 %. 2.7. attēlā redzama statistikas diagramma par firmas “Speno” sliežu slīpēšanas vilciena darbu VAS “Latvijas dzelzceļš” [8].



2.7. att. Kvantitātes (km) statistika par firmas “Speno” sliežu slīpēšanas vilciena darbu VAS “Latvijas dzelzceļš” no 2011. līdz 2019. gadam.

2.7. attēla diagrammā redzams, ka noslīpēto sliežu kopējais skaits no 2011. līdz 2019. gadam ir 1388,087 km/(sliežu ceļu). No 2011. līdz 2013. gadam VAS “Latvijas dzelzceļš” pakāpeniski palielinājās slīpēto sliežu skaits – no 213,24 km/(sliežu ceļu) līdz 244,038 km/(sliežu ceļu). Savukārt no 2014. līdz 2016. gadam sliežu slīpēšana pakāpeniski samazinājās – no 216,646 km/(sliežu ceļu) līdz 191,613 km/(sliežu ceļu). 2017. gadā sliežu slīpēšana VAS “Latvijas dzelzceļš” netika veikta. 2018. gadā tika noslīpēti 102,25 km/(sliežu ceļu), savukārt 2019. gadā sliežu slīpēšana netika veikta.

Šī statistika liecina par sliežu slīpēšanas vilciena izmantošanas VAS “Latvijas dzelzceļā” gan sliežu kalpošanas laika saglabāšanai, gan arī paildzināšanai [9].

3. 60 E1 TIPA SLIEŽU RITVIRSMAS CIETĪBAS IZPĒTE, BOJĀTĀS SLIEDES AR KODU X 10.1 IZPĒTE

3.1. 60 E1 tipa sliežu ritvirsmas cietības izpēte

Sākot no 2013. gada, VAS “Latvijas dzelzceļš” plaši tiek izmantotas Anglijas firmas “Arcelor Mittal” sliedes ar tērauda marku *R350HT* un sliežu tipu *ENSIDESA 60 E1* (3.1. att.). Šīs sliedes liktas gan uz galvenajiem, gan arī uz pieņemšanas un nosūtīšanas sliežu ceļiem. Sliedēm jāatbilst Eiropas standartam *EN 13674-1 2011 (XA)* [6].

Kā zināms, mehāniskās īpašības ir cietība, stiprība, triecienstīgrība, plastiskums.

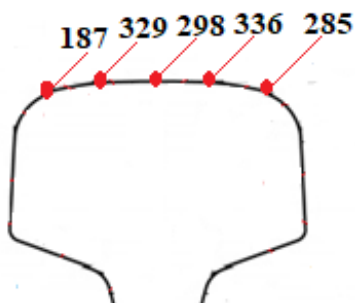
Metālu un sakausējumu cietība – primārā strukturālā īpašība, tā ir materiāla īpašība radīt pretestību, kad cits ķermenis iespiežas tā virsmas slāņos, ko nedeformē vai nesalauž papildu slodzes (indentors).

Lai noteiktu sliedes galviņas metāla cietību, tika izvēlēts VAS “Latvijas dzelzceļš” sliežu ceļu posms Vecumnieki – Misa. Šajā sliežu ceļu posmā 2015. gadā tika veikts sliežu ceļu kapitālais remonts, uzliekot jaunas Anglijas firmas “Arcelor Mittal” *ENSIDESA 02 14 60 E1* garslides. Sliežu nosaukuma atšifrējums: *ENSIDESA* – izgatavotājrūpnīca, *02* – izgatavošanas mēnesis, *14* – izgatavošanas gads, *60 E1* – sliežu tips.

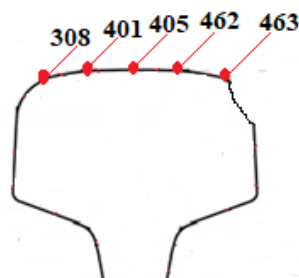
Pēc jauno garsliežu likšanas tika veikta sliežu galviņas ritvirsmas slīpēšana ar Šveices firmas “Speno” sliežu slīpēšanas vilcienu *URR-112*.

2017. gadā pa šo sliežu ceļu posmu caurlaistā tonnāža bija 47,4 milj. t, bruto. Cietības mērīšana tika veikta ar pārnēsājamo cietības mērītāju “Krautkramer”. 3.1. attēlā redzami metāla cietības mērījumi uz slīpētās sliedes ritvirsmas taisnajā sliežu ceļu iecirknī. 3.2. attēlā parādīti metāla cietības mērījumi uz slīpētās sliedes ritvirsmas līknē $R = 1307$ m. Izpētes brīdī galviņas darba šķautnes sānu nodilums bija 3 mm, vertikālais nodilums – 1 mm.

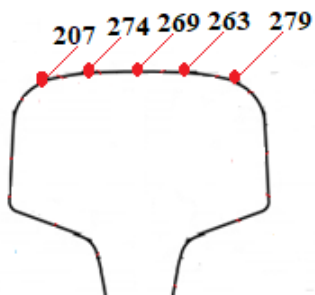
Lai salīdzinātu ritvirsmu cietību, tika veikti mērījumi jaunajām sliedēm bez tonnāžas caurlaišanas, kas tika liktas kārtējās uzturēšanas procesā sliežu ceļu posmā Vecumnieki–Lāčplēsis, 219 km pirmajā piketā 2017. gada 12. septembrī. Tādas sliedes tika liktas tajā ceļa posmā Anglijas firmā “Arcelor Mittal” ražotās *ENSIDESA 02 13 60 E1* un *01 16 60 E1*. 3.3. attēlā redzami metāla cietības mērījumi uz jaunās *ENSIDESA 01 16 60 E1* sliedes ritvirsmas sliežu ceļu taisnajā iecirknī.



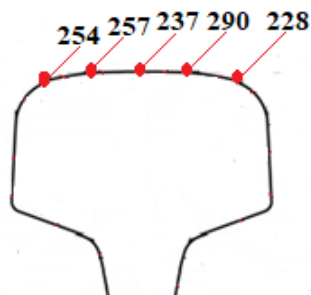
3.1. att. Metāla cietības mērījumi (taisnajā iecirknī) uz slīpētās sliedes *ENSIDESA 02 14 60 E1* ritvirsmas.



3.2. att. Metāla cietības mērījumi (līknē $R = 1307$ m) uz slīpētās sliedes *ENSIDESA 02 14 60 E1* ritvirsmas.



3.3. att. Metāla cietības mērījumi uz jaunās sliedes *ENSIDESA 01 16 60 E1* ritvirsmas.



3.4. att. Metāla cietības mērījumi (līknē $R = 956$ m) uz jaunās sliedes *ENSIDESA 05 13 60 E1* ritvirsmas.

3.4. attēlā parādīti metāla cietības mērījumi uz jaunās sliedes ritvirsmas sliežu ceļu līknes iecirknī $R = 956$ m.

Pamatojoties uz iegūtajiem datiem, izveidota tabula un veikti salīdzinājumi ar izgatavotājrūpnīcas pases datiem. Iegūtie rezultāti apkopoti 3.1. tabulā.

3.1. tabula

60 E1 ENSIDESA tipa sliedes ritvirsmas, *R350HT* markas tērauda salīdzinājums ar izgatavotājrūpnīcas datiem

Cietības noteikšanas vieta	Sliedes <i>R350HT</i> cietības marka				
	Izgatavotājrūpnīcas cietība, <i>HB</i>	Vidējā cietība (<i>60 E1 ENSIDESA</i> sliedes), <i>HB</i>			
		Slīpēta sliede <i>ENSIDESA 02 14 60 E1, HB</i>	Jauna sliede <i>ENSIDESA 01 16 60 E1, HB</i>	Slīpēta sliede līknē <i>ENSIDESA 02 14 60 E1, HB</i>	Jauna sliede līknē <i>ENSIDESA 05 13 60 E1, HB</i>
1	2	3	4	5	6
Galviņas ritvirsmas, <i>HB</i>	357	287	258	408	253

60 E1 ENSIDESA sliedes galviņas vidējā cietība uz ritvirsmas neatbilst izgatavotājrūpnīcas pases datiem, izņemot slīpēto sliedi līknē ar rādiusu $R = 1307$ m. Pēc cietības izpētes rezultātiem tā ir 408 *HB*, kas ir par 51 *HB* augstāks par pases vērtību. Cietības palielināšanās uz ritvirsmas līknes iecirkņos var izskaidrot ar paaugstinātu riteņpāra bandāžas mijiedarbību ar sliežu galviņas ritvirsmu.

Pēc izpētes rezultātiem var secināt, ka metāla cietība slīpētai sliedei ir par 29 *HB* augstāka nekā neslīpētai. Salīdzinot iegūto metāla cietību jaunajai sliedei ar izgatavotājrūpnīcas pases datiem, redzams, ka sliedes galviņas metāla cietība ir par 104 *HB* zemāka. Pazemināta cietība uz sliedes ritvirsmas var izraisīt intensīvu sliedes galviņas vertikālā un sānu nodilumu sliežu ceļu līkņu iecirkņos un ātru defektu attīstību sliedes galviņā sliežu ceļu taisnajos iecirkņos.

3.2. Bojātās sliedes ar kodu X 10.1 izpēte

Viens no visizplatītākajiem defektiem VAS “Latvijas dzelzceļš” ir defekts ar kodu X 10.1-2. Šis defekts ir metāla plaisas un izdrupumi uz galviņas ritvirsmas sliedes izgatavošanas tehnoloģijas neievērošanas dēļ (aizvelmējumiem, sīkplaisām, atlobījumiem u. c.) [2] (3.5. att.). Ir pieņemts šāds defekta atrašanās vietas apzīmējums ar ciparu (defekta koda trešais cipars):

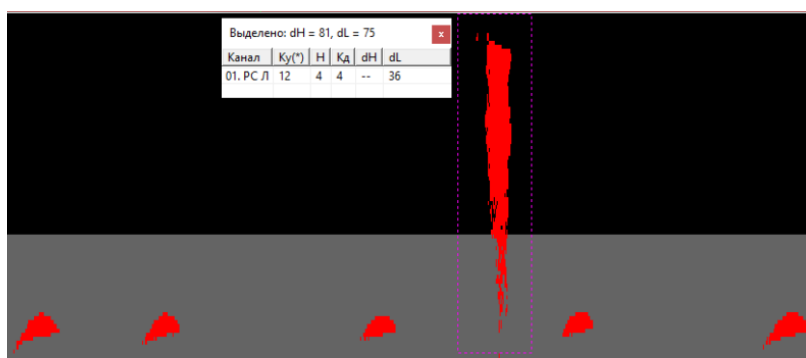
- 0 – defekts atrodas visā sliedes garumā;
- 1 – defekts atrodas sliežu salaidne (līdz 750 mm attālumā no sliedes gala);
- 2 – defekts atrodas ārpus sliežu salaidnes (vairāk par 750 mm no sliedes gala).



3.5. att. Defekts ar kodu X 10.1, atklāts sliežu ceļa posmā Vecumnieki–Lāčplēsis.

Bojātās sliedes izpēte

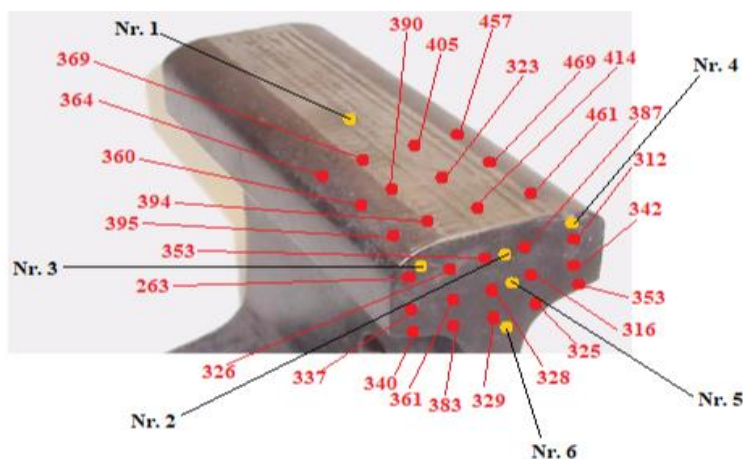
Parbojātās sliedes ar kodu 10.1 izpētes paraugu tika ņemts atklātais defekts sliežu ceļu posmā Vecumnieki–Lāčplēsis 221 km 6 piketā, izmantojot mūsdienīgu “RDM-24” tipa ultraskaņas defektoskopu (3.6. att.).



3.6. att. Defekta ar kodu X10.1 atšifrējums, izmantojot specializēto 1.4.8. modeļa defektoskopijas programmu.

Piezīmes: 2011. gadā tika veikta sākotnējā sliežu slīpēšana, izmantojot firmas “Speno” sliežu slīpēšanas vilcienu. Līdz šim caurlaistā tonnāža līdz defekta atklāšanai bija 302 milj. t., bruto ar vidējo kravas spriegumu šajā iecirknī 35 milj. t., bruto gadā.

Ekspluatācijas procesā šis defekts tika izgriezts un nogādāts RTU Transporta institūta Dzelzceļa inženierijas katedrā Metālagrafiska laboratorijā, kur tika veikta defekta sazāģēšana un slīpēšana. Pēc tam, izmantojot mūsdienīgu “*Tinius O Olsen*” “*FikrmwareVersion 1.07, FH-31 Series*” cietības mērītāju, tika veikta sliedes galviņas cietības noteikšana pēc Brunela skalas. Izpētes rezultāti redzami 3.7. attēlā.



3.7. att. Bojātās Tagilas sliedes *T VI 08* cietības noteikšana pa punktiem.

Tālāk, pamatojoties uz iegūtajiem datiem, tika izveidota 3.2. tabula, kurā redzamas cietības vidēji noteiktās vērtības pēc noteikšanas vietas (1.–6. punkts).

3.2. tabula

Tabula par izgatavotājrūpnīcas un vidēji noteikto cietības vērtību

Cietības noteikšanas vieta	<i>R350HT</i> sliedes cietības marka	
	Izgatavotājrūpnīcas cietība, <i>HB</i>	Vidēji noteiktā cietība, <i>HB</i>
Uz galviņas ritvirsmas (1. punkts) <i>HB</i> :	350–390	400
10 mm dziļumā no galviņas ritvirsmas (2. punkts), ne mazāk kā <i>HB</i>	341	328
10 mm dziļumā no sliedes veidgriezuma virsmas (3. un 4. punkts), ne mazāk kā <i>HB</i>		
22 mm dziļumā no sliedes galviņas ritvirsmas (5. punkts), ne mazāk kā <i>HB</i>	321	336
35 mm dziļumā sliedes galviņas pārejas kakliņā vietā (6. punkts) <i>HB</i>	–	346

Veiktā izpēte liecina par cietības neatbilstību 10 mm dziļumā 2., 3. un 4. punktā (3.7. att.). Vidēji noteiktā cietība 2. un 3. punktā ir 328 *HB*, kas ir par 13 *HB* zemāka nekā izgatavotājrūpnīcas norādītā cietība. Cietības samazināšanās šajos punktos liecina arī par defekta izvietojumu, plaisu 8,1 mm dziļumā un 7,5 mm garumā.

Turpmākajā pētījuma gaitā, izmantojot “*PMI-Master PRO*” ķīmisko analizatoru (3.8. att.), tika noteikts pilns ķīmiskais sastāvs *R350HT* tērauda sliedei [7]. Ķīmiskā sastāva rezultāti apkopoti 3.3. tabulā.



3.8. att. Ķīmiskā sastāva noteikšana, izmantojot “PMI-Master PRO” ķīmisko analizatoru.

3.3. tabula

Izpētītā defekta ar kodu X10.1 ķīmiskais sastāvs

Vērtības	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Maks./min.	–	0,550 0,650	1,00 1,30	0,700 1,10	0,0000 0,0600	0,180 0,250	0,0000 0,200	0,0000 0,100	0,0000 0,200
1	97,70	0,667	0,346	0,948	0,0080	0,0265	0,0218	0,0030	0,0400
2	97,40	0,756	0,346	0,838	0,0050	0,0264	0,0153	0,0030	0,0499
3	97,80	0,698	0,385	0,902	0,0050	0,0050	0,0201	0,0030	0,0419
Vidējā, %	97,60	0,707	0,359	0,896	0,0060	0,0193	0,0190	0,0030	0,0439
Vērtības	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Zr
Maks./min.	0,0000 0,100	0,0000 0,100	0,0000 0,400	0,0000 0,0700	0,0000 0,0500	0,0000 0,100	0,0000 0,100	0,150 0,350	–
1	0,0020	0,0362	0,0091	0,0030	0,0020	0,0401	0,0250	0,0100	0,0030
2	0,0020	0,0448	0,0085	0,0110	0,0030	0,0406	0,0250	0,0100	0,0030
3	0,0020	0,0374	0,0055	0,0030	0,0020	0,0380	0,0250	0,0100	0,0030
Vidējā, %	0,0020	0,0395	0,0077	0,0056	0,0023	0,0396	0,0250	0,0100	0,0030

Tērauda defekta X10.1 ķīmiskā sastāva noteikšanas procesā RTU Transporta institūta

Dzelzceļa inženierijas katedrā Metālagrafiska laboratorijā, tika atklātas vairākas atšķirības. Izgatavotājrūpnīcas pases datos nebija norādīti šādi ķīmiskie elementi: (Mo) molibdēns, (Co) kobalts, (Nb) niobijs, (Ti) titāns, (W) volframs, (Pb) svins, (Zr) cirkonijs.

(Al) alumīnija saturs ir mazāks par 0,0006 % un ir 0,0020. (Cr) hroma saturs atbilst standartam un ir 0,0190 %. Ķīmiskais elements kā (N) slāpekļis izpētes gaitā netika atklāts. (V) vanādijs – paaugstina cietību un stiprību. Palielina tērauda blīvumu, jo tas ir labs deoksidētājs un ir vienāds ar 0,0396 %.

Ķīmiskā sastāva galveno izpētīto vidējo statistisko datu salīdzinājums ar izgatavotājrūpnīcas norādītajiem datiem dots 3.4. tabulā.

Tabula par ķīmiskā sastāva galveno elementu salīdzinājumu ar Eiropas standartu *NE 13674-1: 2011*

Vērtība	C	Si	Mn	P	S
Pēc <i>NE 13674-1:2011</i> standarta	0,746–0,786	0,34–0,38	0,913–1,013	0,016	0,015
Vidēji noteiktie	0,707	0,359	0,896	0,060	0,0193
Starpība, %	<0,039	Atbilst	<0,017	>0,044	>0,0043

Salīdzinot ķīmiskā sastāva galvenās vērtības, var secināt: oglekļa saturs par 0,039 % mazāks, silīcijs atbilst standartam, mangāna saturs par 0,017 % mazāks, fosfora saturs par 0,044 % lielāks, sēra saturs par 0,0043 % lielāks. Kā zināms, (C) oglekļa saturs paaugstina sliežu tērauda cietību un nodilumizturību. (Mn) mangāns palielina tērauda cietību un nodilumizturību, nodrošinot tam pietiekamu viskozitāti.

(P, S) fosfors un sērs ir kaitīgie piemaisījumi, kastēraudam piedod trauslumu: ja ir liels fosfora saturs, sliedes kļūst aukstlūzenas, ja ir liels sēra daudzums – sarkanlūzenas.

Pēc ķīmiskā sastāva izpētes, izmantojot stacionāro griešanas mašīnu “*MECATOME T 255/300*” ar eļļas dzesēšanu, sliedes galviņas fragments ar defektutika sagriezts trīs daļās.

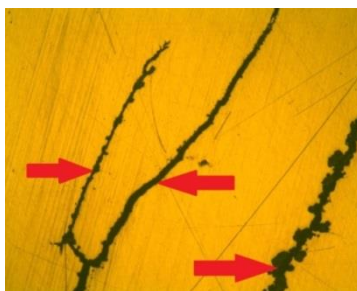
Pēc tam sliedes fragmenti tika ievietoti mūsdienīgās “*Mecapress II*” preses karstās iepresēšanas sekcijā.

Pēc gatavā šablona presēšanas, izmantojot “*Mecatech 334*” sistēmas slīpēšanas un pulēšanas mašīnu ar ūdens dzesēšanu, tika veikta šablona slīpēšana un pulēšana (3.9. att.).



3.9. att. Bojātas sliedes galviņas šablons pēc slīpēšanas.

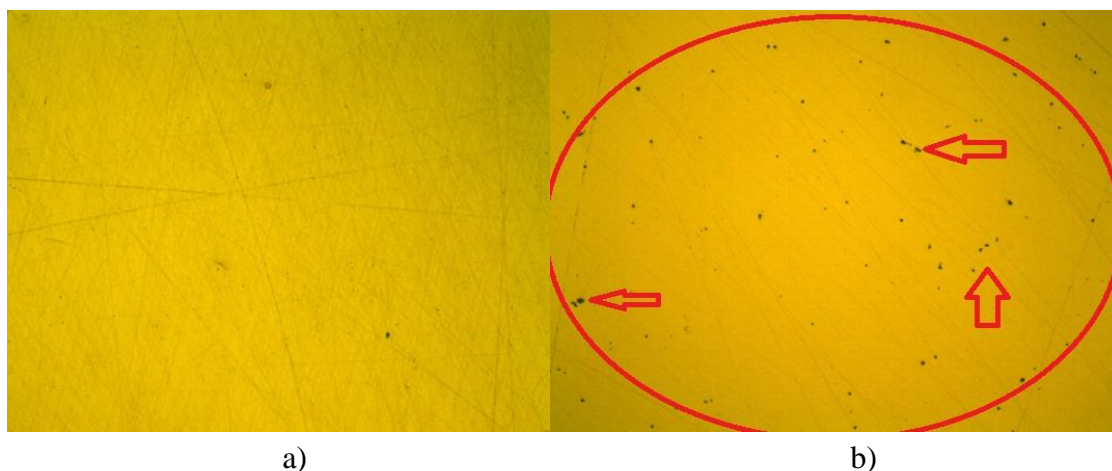
Pēc šablona slīpēšanas un pulēšanas, izmantojot “*Carl Zeiss Axiovert 40 MAT*” ciparu mikroskopu ar 50× palielinājumu, tika noteikta sliedes galviņas defekta vietas metāla struktūra (3.10. att.).



3.10. att. *T VI 08 60 EI* bojātās sliedes metāla struktūra ar 50× palielinājumu.

50× palielinājumā skaidri redzami sliedes galviņas slāņošanās melnu joslu veidā. Tāds sazarojums var izraisīt bīstamāku ļoti stipru bojājumu ar kodu XX 30.1 – horizontālai sliedes galvas atslāņošanai.

Lai salīdzinātu metāla struktūru, RTU Transporta institūta Dzelzceļa inženierijas katedrā Metālagrafiska laboratorijā tika izpētītas slīpētas un neslīpētas *60 EI* tipa sliedes mikroskopā 50× palielinājumā (3.11. a un b att.).



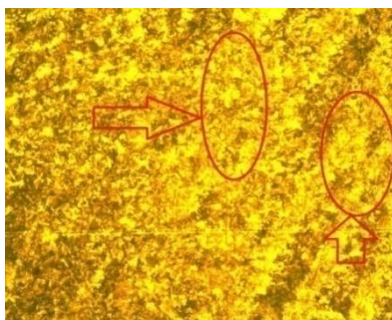
a)

b)

3.11. att. *60 EI* tipa sliedes metāla struktūra ar 50× palielinājumu: a) slīpēta ar slīpēšanas vilcienu; b) neslīpēta sliede.

Kā redzams 3.11. a attēlā, slīpētas sliedes metāla struktūra ir tīra, bez iekļāvumiem un piemaisījumiem. Neslīpētas sliedes (3.11. b att.) struktūrā ir daudz melnu punktiņu, kas parādīti ar sarkanajām bultiņām aplī. Tas liecina, ka metāla struktūra nav īpaši labā stāvoklī, un, ja netiks veikti pasākumi tās uzlabošanai, piemēram, sliedes nepārtrauktas galviņas virsmas slīpēšanas ar sliežu slīpēšanas vilciena palīdzību, var rasties virsmas defekti, kas ar caurlaistu tonnāžu pazeminās sliedes kalpošanas laiku.

Turpmāk apskatīta sliedes mikrostruktūra. Izmantojot 5 % slāpekļskābes šķīdumu HNO_3 , tika veikta defekta parauga šablona kodināšana [17]. Pēc tam šis paraugs tika apskatīts mikroskopā 200× palielinājumā (3.12. att.).



3.12. att. Defekta X10.1 mikrostruktūra 200× palielinājumā.

R350HT tērauda mikrostruktūra ir ferīta-perlīta. 3.12. attēlā redzams liels perlīta sakopojums (parādīts ar sarkanām bultām), kas aizņem vairāk par pusi no kopējā apjoma. Par to liecina arī paaugstināts oglekļa saturs, salīdzinot ar standartu, – vairāk nekā 0,039 %.

Veiktie pētījumi ļauj noteikt sliežu tērauda cietību, tērauda ķīmisko sastāvu, konstatēt metāla elementu masas daļu, metāla struktūru un mikrostruktūru, kā arī sniegt atbildes uz jautājumiem, piemēram, sliedes lūzuma vai plaisu veidošanās gadījumā. Promocijas darba pētījumā bojātajai sliedei (X 10.1) pēc ķīmiskā sastāva cietības tika atklātas šādas nesakritības: 10 mm dziļumā no galviņas ritvirsmas metāla cietība bija 328 *HB*, kas ir par 13 *HB* mazāka par norādīto. Arī datiem par ķīmisko sastāvu bija nesakritības: (C) oglekļa saturs ir par 0,039 % mazāks nekā norādīts, (Mn) mangāns – par 0,017 % mazāks, (P) fosfors – par 0,044 % lielāks, (S) sērs – par 0,0043 % lielāks. Metāla struktūrā labi redzama galviņas slāņošanās horizontālo plaisu veidā. Metāla struktūra ferīta-perlīta. Pētījumi pārbaudīti sertificētā testēšanas laboratorijā *KIWA AS “Inspecta Latvia”*. Testēšanas rezultāti atbilst veiktajiem pētījumiem RTU Transporta institūta Dzelzceļa inženierijas katedrā Metālagrafiska laboratorijā.

4. IZPĒTES UZDEVUMA NOSTĀDNE ATTIECĪBĀ UZ DZELZCEĻA RITEŅA UN SLIEDES MIJIEDARBĪBAS IETEKMES NOVĒRTĒJUMU, VEICOT ELEMENTU 3D MODELĒŠANU

Viena no svarīgākajām problēmām, kas saistīta ar dzelzceļa sastāvu kustības drošību un efektivitāti, ir sistēmas ritenis-sliede mehāniskās darbības precīzs apraksts. Lai paildzinātu riteņu un sliežu kalpošanas laiku, kā arī uzlabotu vilcienu kustības parametrus (ātrums, ekonomiskums), nepieciešams ar augstu precizitāti modelēt un izpētīt intensīvi deformētu stāvokli sistēmā ritenis-sliede riteņu loku mijiedarbībā ar dažādiem profiliem: jauna sliede un jauns riteņpāra loks, nodilusi sliede (sānu un vertikālais nodilums) un jauns riteņpāra loks, nodilis riteņpāra loks un jauna sliede, nodilis riteņpāra loks un nodilusi sliede (sānu un vertikālais nodilums), jauns riteņpāru loks un slīpēta sliedes galviņa, nodilis riteņpāra loks un slīpēta sliedes galviņa.

4.1. Riteņa un sliedes nodilumi Latvijas un Krievijas dzelzceļos

Riteņa un sliedes mijiedarbība ir viena no riteņa kustības problēmām attiecībā pret sliedi. Konstrukcijas materiāliem jābūt ar pietiekamu stiprību, lai nodrošinātu pretestību vertikālajiem spēkiem, kas rodas augsto slodžu dēļ un dinamiskās slodzes riteņa un sliedes mijiedarbībā izraisītiem ar ritošā sastāva elementu vertikālajiem un šķērseniskajiem paātrinājumiem, konosacīti rada sliežu ceļu negludumi un riteņu nepilnības.

Mijiedarbībai sistēmā ritenis-sliede vienmēr rodas nodilums, problēma ir mijiedarbības intensitāte, metāla zaudēšanas ātrums no riteņu uzmalu darba virsmas un sliežu sānu virsmas.

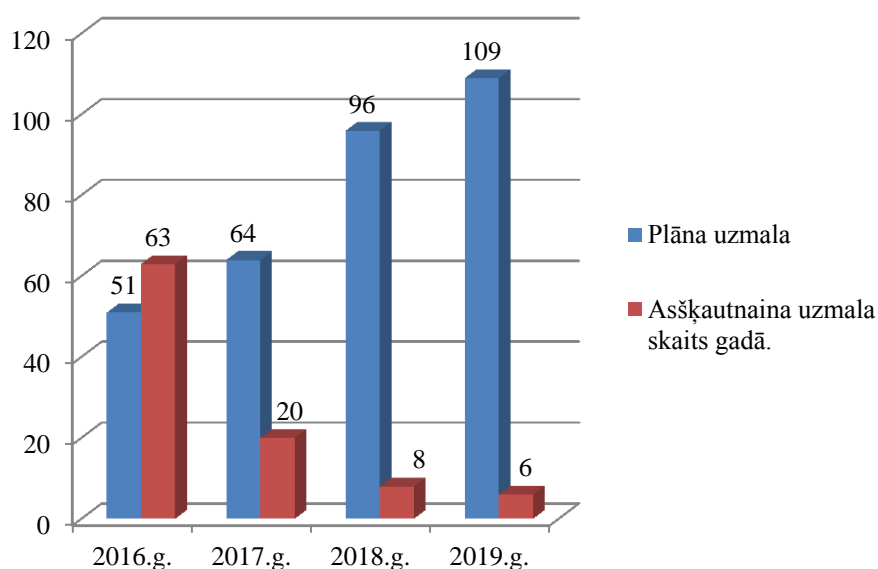
VAS "Latvijas dzelzceļš" sliežu ceļu taisno iecirkņu garums nav liels, un tā rezultātā vagonu kustība galvenolārt notiek pa maģistrālo sliežu ceļu ar rādiusu $R = 800$ m. Rezultātā horizontālo spēku ietekme uz riteņiem un sliedi ir ievērojama. Riteņpāru velšanās profiliem ir dažādi pārejas rādiusi no velšanās virsmas pie uzmalas [20]. Vmetāla atslāņošanās un izdrupšana uz ritvirsmas; AS "Latvijas dzelzceļš" R65 sliedes gandrīz visas ir nomainītas uz EN 60E1 [16], un rādiuss no sliedes galviņas sānu šķautnes pie darba virsmas ir mainījies un atbilstoši ir 15 mm uz 13 mm. Piestrādes laiks lietotajiemriteņiem ar sliedi saīsinājies, izraisot slodzes daļas pārdevi uz uzmalu (divpunktu kontakts). Visbiežāk atkārtotie riteņu defekti VAS "Latvijas dzelzceļš" apkopoti 4.1. tabulā.

VAS "Latvijas dzelzceļš" riteņpāru galvenā problēma ir izdrupumi, uzmetinājumi un izrāvumi, kā arī plānā uzmalā un asšķautnains uzvelmējums, kas rodas divpunktu kontakta ritenis-sliede gadījumā.

4.1. attēlā apkopota statistika par riteņpāru brāķēšanu VAS "Latvijas dzelzceļš" no 2016. līdz 2019. gadam [9]. Par pamatu izmantojot 4.1. tabulas datus, tika izveidots grafisksattēls par riteņpāru galvenajiem defektiem, kas ietekmē sliedes galviņas nodilumu (4.1. att.).

Statistika par riteņpāru brākēšanu VAS “Latvijas dzelzceļš” tīklā no 2016. līdz 2019. gadam

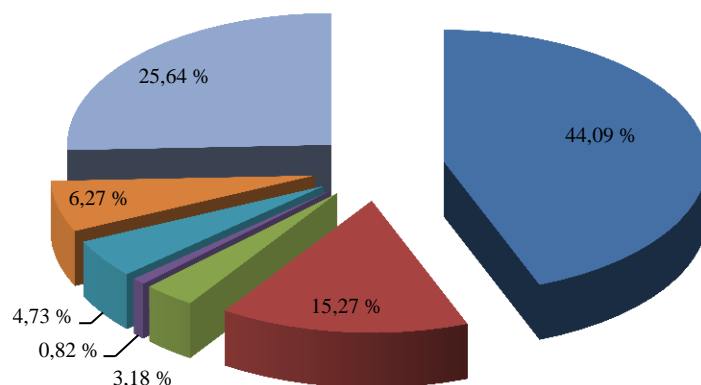
Galvenie riteņa defekti	2016. gads	2017. gads	2018. gads	2019. gads
Asšķautnains uzmalas uzvelmējums	63	20	8	6
Izdrupumi	155	172	257	249
Uzmetinājums un izrāvumi	158	145	315	218
Plāna uz mala	51	64	96	109
Kopējais skaits	427	401	676	582



4.1. att. Statistika par riteņpāriem ar asšķautnainu un plānu uzmalu defektiem VAS “Latvijas dzelzceļš” no 2016. līdz 2019. gadam.

4.1. attēla diagrammā redzams, ka galvenais defekts 2016. gadā bija asšķautnains uzmalas uzvelmējums – 63 defekti. 2017. gadā šo defektu veida skaits pazeminājās līdz 20 defektiem. Arī turpmākajos gados, no 2018. līdz 2019. gadam, šo defektu skaits pazeminājās no astoņiem līdz sešiem. Savukārt plānās uzmalas defektu skaits palielinājās. 2016. gadā tas bija 51, savukārt 2017. gadā – jau 64. 2018. gadā plānās uzmalas defektu skaits pieauga līdz 96, un jau 2019. gadā tika atlāti 109 šādā veida defekti.

Pēc literatūras avotu (publikācijas, zinātniskie raksti, žurnāli un grāmatas) analīzes un apkopotajiem statistikas datiem var secināt, ka šī problēma par riteņpāru un sliedes galviņu nodilumu ir aktuāla arī citās valstīs, piemēram, ASV, Ukraina, Baltkrievija, Krievija [9]. Parpiemēru tika ņemts riteņpāru un sliedes galviņas nodiluma defektu statistikas salīdzinājums Krievijas dzelzceļā. 4.2. attēlā redzamas kaitliskā diagramma par riteņpāru loku bojājumiem dažādu defektu veidu dēļ.

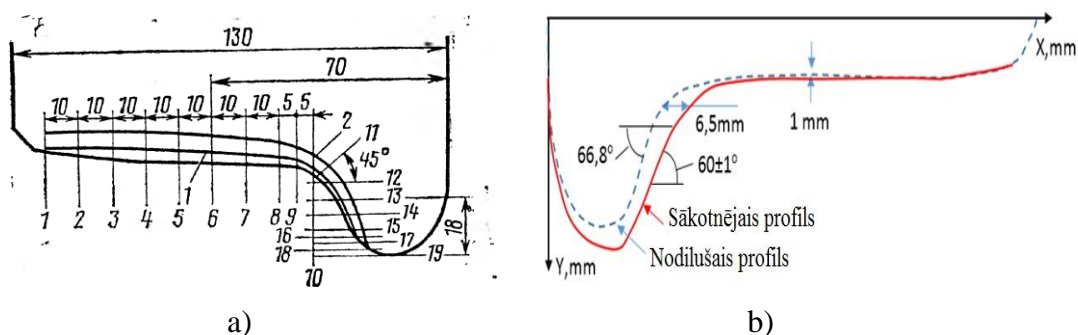


4.2. att. Riteņpāru loku defektu skaits Krievijas dzelzceļā [9] (%).

Kā redzams no 4.2. attēla, visbiežāk sastopamie riteņpāru bojājumu iemesli:

- riteņpāru uzmalas maksimālais nodilums – 44,09 %;
- loka diametru pieļaujamo starpību pārsniegšana – 25,64 %;
- bandāžas sēžas atslābšana – 6,27 %;
- vertikāls uzmalas nogriezum – 15,27 %;
- metāla uzplūdums uz ārējās šķautnes – 4,73 %;
- izrāvumi – 3,18 %;
- citi iemesli – 0,82 %.

Kā redzams 4.2. attēla grafikā, riteņpāru loka galvenais nodilums Krievijas dzelzceļā ir riteņpāra uzmalas nodilums [42]. 4.3. a, b att. attēlots riteņpāra loka nodiluma profils, raksturīgs Krievijas un Latvijas dzelzceļiem.



4.3. att. a) Riteņpāru loku – vidēji nodiluša (1) un maksimāli nodiluša (2) – profili OAO (RŽD) “Krievijas dzelzceļa” tīklā: 1–19 loka šķērs griezumi [18];
b) tipisks riteņu nodilums VAS “Latvijas dzelzceļā”.

4.3. b attēlā redzamā Latvijas dzelzceļa profilā riteņu protektora nodilums sasniedz tikai 1–2 mm, riteņu plānu uzmalu nodilums – 6,50 mm, kas atbilst statistikas rezultātiem (4.1. att.).

4.2. Sliežu slīpēšanas veidi un periodiskums

Viens no sliežu kalpošanas laika pagarināšanas paņēmieniem ir sliežu slīpēšana, izmantojot sliežu slīpēšanas vilcienu.

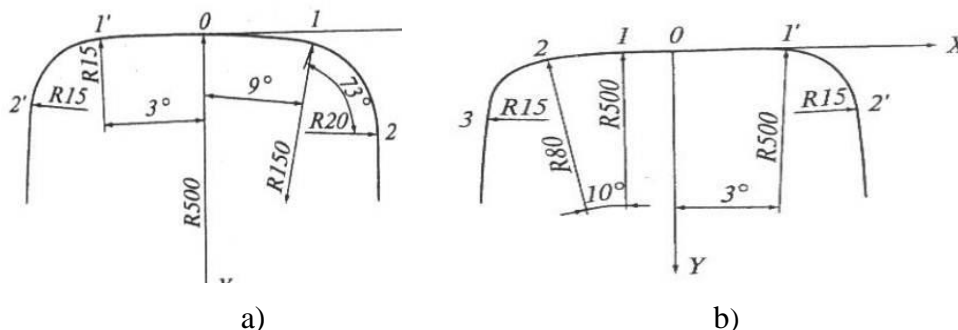
Sliežu slīpēšanas veidi:

- sliežu sākotnējā vienlaidu slīpēšana pēc sliežu likšanas ceļā likvidē metāla bezoglekļa slāni uz jaunajām sliedēm, kuru virsma, pēc rūdīšanas, zaudē oglekli un pretestību mehāniskiem bojājumiem, tiek novērsti arī izgatavošanas negludumi un mikroplaisas;
- profilaktiskā slīpēšana, kas paredz metāla visvairāk bojātā slāņa regulāru noņemšanu negludumu un virsmas plaisu lēnas augšanas stadijā, kas ļauj novērst to paātrinātu attīstību;
- profila slīpēšana, kad sliedes galviņa tiek slīpēta pa visu perimetru ar mērķi novērst ievērojamus virsmas defektus un uzstādīto profilu atjaunošanu.

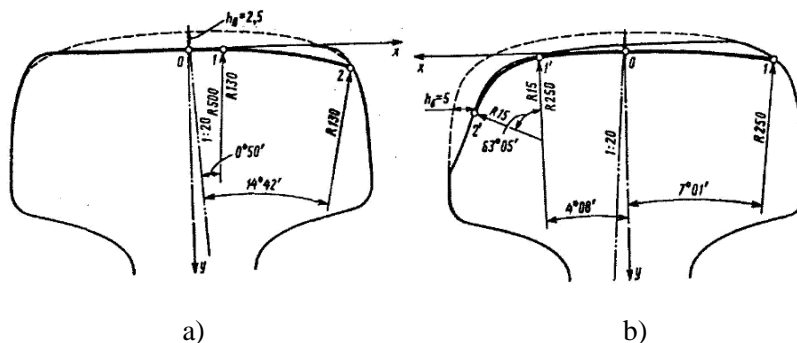
Profila slīpēšana šobrīd ir viena no prioritārajiem virzieniem.

4.3. Sliežu slīpēšanas zināmie profili un metodika

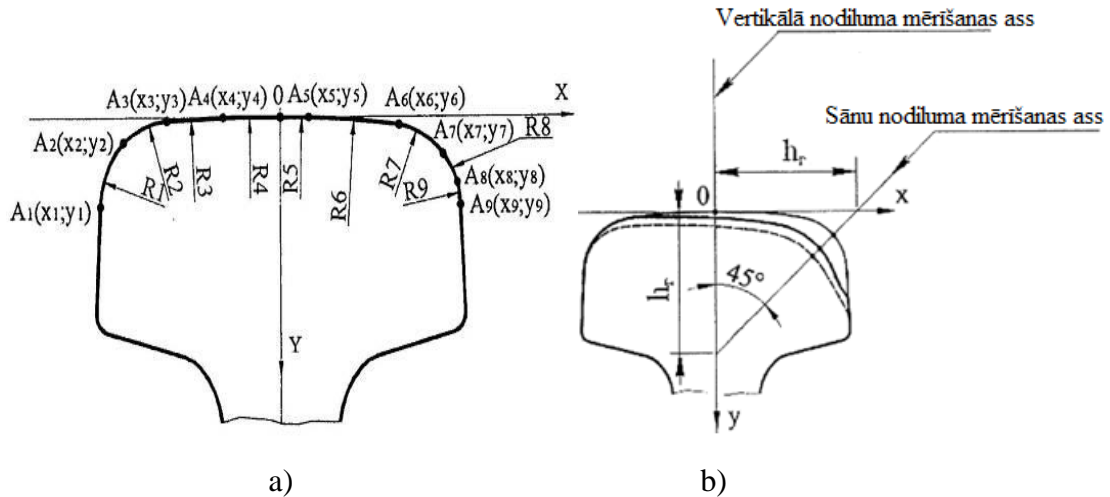
Defektu novēršanai veic sliežu slīpēšanu saskaņā ar sliežu slīpēšanas vilcienu tehnoloģisko procesu “Speno”, remonta profili tiecas atkārtot jaunas sliedes profilu (4.3. att.), ņemot vērā slīpējamās sliedes nodilumu, ar soli 3–4 mm [26]. Normatīvā dokumentācija rekomendē veikt slīpēšanu pa remonta asimetriskajiem profiliem iekšējai un ārējai sliedei, ņemot vērā sliedes sānu nodilumu ar soli 5 mm (4.5. att.). Zināmi paņēmieni precīzākam remonta profila aprakstam, iekļaujot papildu punktus remonta profilā (4.6. att.). Ir zināmi arī paņēmieni [11]–[13] ritošā sastāva dinamiskajai modelēšanai, analizējot riteņa un sliedes kontaktpēkus.



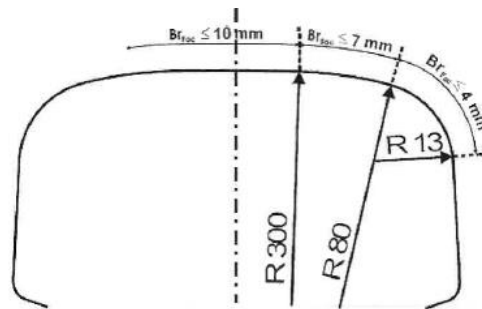
4.4. att. Sliežu remonta profils ar vertikālo nodilumu 1–4 mm un caurlaisto tonnāžu 150 milj. t. līdz 500 milj. t., bruto līknēs $R = 800–1000$ m: a) ārējais pavediens, b) iekšējais pavediens [23].



4.5. att. Remonta asimetriskais profils R65 sliedēm ar nodilumu līknēs: a) iekšējā sliede ar vertikālo nodilumu 2,50 mm; b) ārējā sliede ar sānu nodilumu 5 mm [23].



4.6. att. Sliežu remonta profila shēmas: a) sliežu remonta profila raksturīgo punktu un rādus izvietojuma shēma; b) sliedes vertikālā un sānu diluma mērīšanas shēma [23].



4.7. att. 60E1 tipa sliežu slīpēšanai pieļaujamās vērtības [23].

Iepriekš minētie paņēmieni un pieejas sliežu galviņas profila atjaunošanai, veicot slīpēšanu, bāzējas uz sliedes jauno profilu atkārtošānu. Galvenie kritēriji 60 E1 tipa sliežu remonta profila atjaunošanai redzami (4.7. att.). Veicot 60 E1 tipa sliežu profila slīpēšanu, pamatmetāla noņemšana nedrīkst pārsniegt: uz sānu virsmas – 4 mm, pārejas zonā – 7 mm; uz ritvirsmas – 10 mm [3].

5. IZPĒTES REZULTĀTI

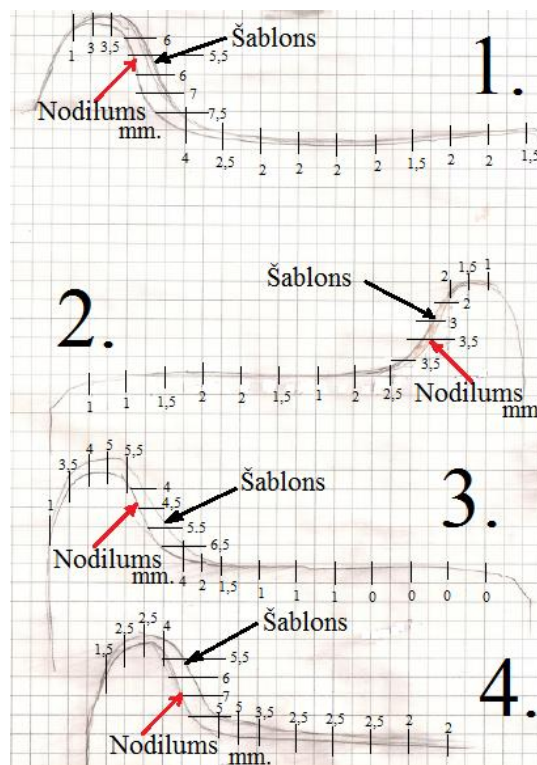
5.1. Riteņu un sliežu profila nodiluma faktiskā izpēte VAS “Latvijas dzelzceļš”

Riteņpāru loku nodiluma novērtēšanai VAS “Latvijas dzelzceļš” tika veiktas faktiskās izpētes informācijas vākšana par kravas vagonu riteņpāru loku raksturīgākajiem nodilumiem. Izpētes rezultātā tika izgatavoti no riteņpāru loku nodilumiem atveidojumi, kas bieži izplātas VAS “Latvijas dzelzceļā” (5.1. att.).



5.1. att. Kravas vilcienu riteņa velšanās virsmas raksturīgā nodiluma atveidojums, kas bieži izplātas VAS “Latvijas dzelzceļš”.

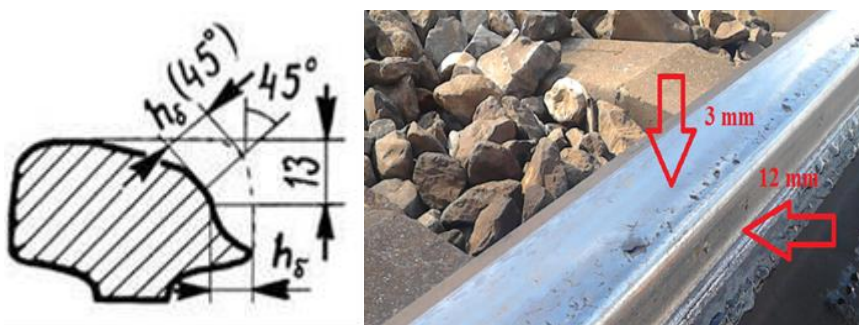
Pēc atveidojuma izgatavošanas tika veikti kravas vilcienu riteņpāru loku nodilumu mērījumi un noteiktas VAS “Latvijas dzelzceļa” tīklā biežāk sastopamie. Mērogā 1:1 tika uzzīmēti riteņpāru loku nodilumi ar kravas vagonu riteņa nodiluma sadalījumu pa punktiem (5.2. att.).



5.2. att. Kravas vagonu riteņpāru loku (1, 2, 3, 4) raksturīgākie nodilumi VAS “Latvijas dzelzceļš”.

5.2. attēlā redzams, ka riteņpāra loka vislielākais nodilums ir pirmā loka uzmalas daļā, un tas ir 7,50 mm. Savukārt otrā loka nodilums ir 3,50 mm. Trešajam un ceturtajam lokam uzmalas daļas nodilums svārstās 7,00–5,50 mm. Nodilumi uz riteņa loka atrodas zonā 1–3,50 mm. Ņemot vērā veiktās izpētes rezultātus, var teikt, ka kravas vagonu riteņpāru uzmalas daļas nodilums VAS “Latvijas dzelzceļš” ir aktuāls. To apstiprina arī defektu statistika par riteņpāru asšķautnaino uzmalas uzvelmējumu un plāno uzmalu.

Riteņpāra nodiluma sekas parasti ir sliedes galviņas nodilums, kas radies riteņa un sliedes kontakta rezultātā. Lai noteiktu vidējo statistisko sliedes galviņas nodilumu Latvijas dzelzceļa tīklā, tika veikta izpēte, izmantojot PŠV (TU 3933-002-060632410-2012) tipa ceļu bīdmēru, apkopoti vidējie statistikas rādītāji. 5.3. attēlā redzams viens no šīs izpētes fragmentiem.



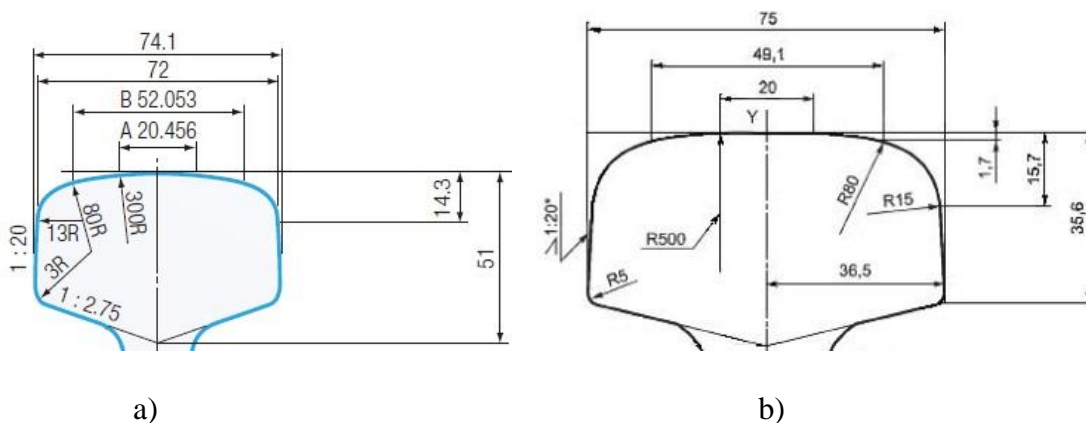
5.3. att. 60 EI sliedes nodilums līknē ar $R = 708$ m Vecumnieku stacijā [9].

60 EI sliedes vertikālais nodilums ir 3 mm, sliedes galviņas sānu nodilums, kas rodas uz ārējām sliedēm sliežu ceļu līkņu iecirkņos berzes rezultātā starp sliedes darba šķautni un riteņa uzmalu, tiek mērīts 13 mm zemāk par sliedes galviņas līmeni un ir 12 mm.

Tādā veidā riteņu un sliedes nodilums ietekmēs to mijiedarbību.

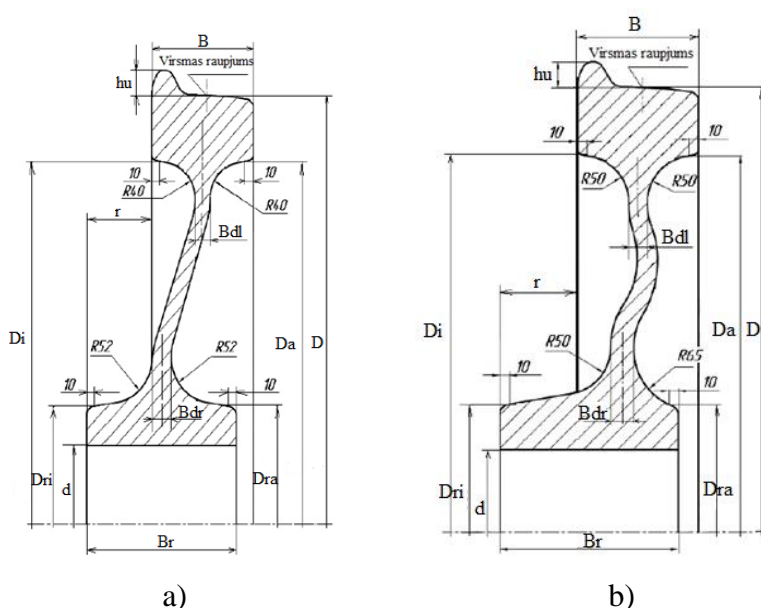
5.2. Aprēķinu modeļu apraksts, riteņa un sliedes noslogojuma režīmi

Izpētes objekti ir 60 EI un R65 (sliedes profils saskaņā ar [3], [21], 5.4. att.) tipa sliedēm un kravas vagona riteņpāra vienlaidu velmēts ritenis (riteņa profils ir plakani koniska vai līklīnijas diska forma saskaņā ar [24], 5.5. att.).



5.4. att. a) 60 EI; b) R65 tipa sliežu galviņu profili [3], [21].

Riteņi, ko izmanto ekspluatācijā virs kravas vagoniem, tiek izgatavoti no 2 vai *T* marku tērauda, un tiem ir plakani koniska vai līklīnijas diska forma. Riteņu konstrukcijas un galvenie izmēri redzami 5.5. a un b attēlā.



5.5. att. Riteņu konstrukcijas un galvenie izmēri: a) ar plakani konisku disku; b) ar līklīnijas disku (*GOST 10791*) [24].

Ņemot vērā norādītos profilus, tika veikta sliedes un riteņa (ģeometrijas) 3D modelēšana *Solidworks* programmā. Sliedes saspringtā stāvokļa kontakta ar riteņi novērtējums tika veikts *Solidworks Simulation* programmā. Lai pārbaudītu izveidoto modeļu precizitāti, sākumposmā tika veikts salīdzinājums ar atbilstošām pielaidēm (berze kontaktā netiek ņemta vērā) ar Herca teoriju. Pēc tam tika veikti spriegumu sadalījumu līmeņa un rakstura novērtējuma aprēķini jaunajai sliedei un sliedei ar nodilumu, kas raksturīga VAS “Latvijas dzelzceļš”. Lai novērtētu sliežu slīpēšanas ietekmi, tika veikti slīpētās sliedes ar jaunu un nodilušu riteņi aprēķini. Aprēķinu novērtējumu saspringtajam stāvoklim sliežu ceļa taisnajam iecirknim un līknēs ar rādiusu 800 m (visbiežāk sastopamais maģistrālā dzelzceļa sliežu ceļu līkumos VAS “Latvijas dzelzceļš”) var ierindot šādā secībā:

- jauna sliede ar jaunu riteņi;
- jauna sliede ar nodilušu riteņi;
- nodilusi sliede ar jaunu riteņi;
- nodilusi sliede ar nodilušu riteņi;
- slīpēta sliede ar jaunu riteņi;
- slīpēta sliede ar nodilušu riteņi.

Turpmāk aprakstīti pieņemtie sākuma dati.

Materiāli

Sliedes tērauds – *R350HT* ar augstu oglekli un rūdītu virsmu. Plūstamības robeža = 763 MPa, stiprības robeža = 1210 MPa. Riteņa materiāls – tērauds 2 vai *T*. Plūstamības robeža = 990 MPa. Stiprības robeža = 1110 MPa. Materiāls tiek pieņemts kā viendabīgs.

Elastības modulis un Puasona koeficients atbilstoši tiek pieņemts: $E = 210\,000$ MPa, $m = 0,28$, sliedes blīvums $p = 7800$ kg/m³.

Riteņa-sliedes mijiedarbības modeļa izveides nosacījumi

- Ārējās sliedes pacēlums $h = 60\text{--}65$ mm, pieņemam, ka 60 mm.
- Kravas vagona kustības ātrums $V = 90$ km/h.
- Ceļš: *Swetrak* tipa dzelzsbetona gulšņi, balasts – granīta šķembas.
- Maksimālā slodze uz riteņpāra asi tiek ieņemta – 25 t (saskaņā ar [12]). Tāpēc aprēķinam izvēlamies kravas vagonu ar 4 riteņpariem, kura masa ir 100 t.

Lai novērtētu riteņa profilu nodiluma ietekmi uz sliedes saspriegto stāvokli, aprēķinos tika izmantoti nodilušo riteņu profili, kas atrodas ekspluatācijā VAS “Latvijas dzelzceļš” un OAO (RŽD) “Krievijas dzelzceļā”. Sliedes galviņas maksimālais sānu nodilums –14 mm, sliedes vertikālais nodilums – 3 mm.

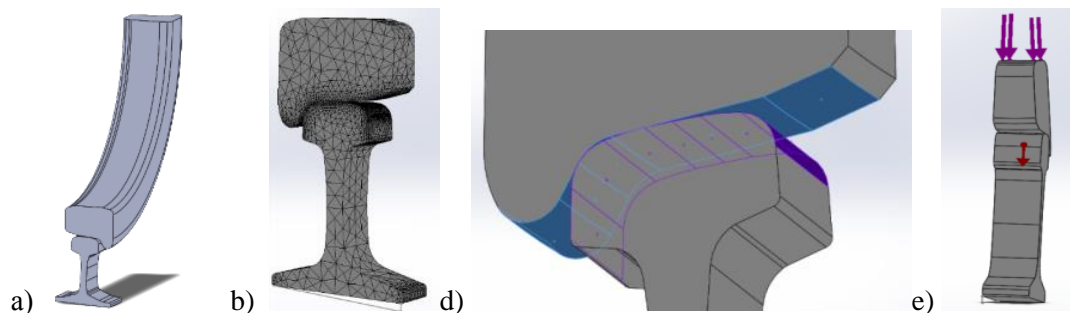
Pieņemtās pielaides

- Slīpēšanas aprēķini tika veikti iepriekš atrastajiem jaunu un nodilušu sliežu vienpunkta kontaktiem.
- Aprēķini tiek veikti normālos laika apstākļos: $T = 0$ °C, $T = +25$ °C, $T = -20$ °C.
- Nostiprinot sliedes pēdu stingri vertikālajā un horizontālajā virzienā, gulšņu (ceļa) cietības izmaiņas netiek ņemtas vērā.
- Aprēķina modeļos netiek ņemtas vērā materiāla plastiskās deformācijas.

Pāriesim pie aprēķina modeļa testēšanas, salīdzinot to ar dotajiem riteņu un sliežu kritērijiem programmatūras simulācijā.

5.3. Aprēķina modeļa testēšana un simulācijas rezultātu precizitātes novērtēšana

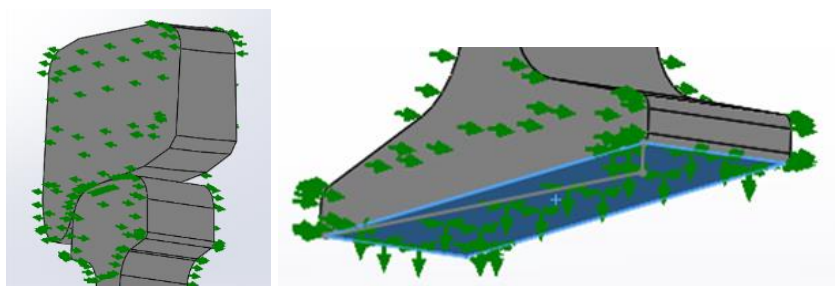
Izpētes objekti ir *60E1* [4] un kravas vagona ar masu 100 tonnas riteņpāra viengabala velmējuma ritenis *GOST-10791* [20] (5.5. att.). Modelim ir simetrijas ass, tāpēc iespējams izskatīt ceturtdaļu riteņa. Ekspluatācijā kontakta zonas izmērs ir 13–16 mm [14], kontaktēšanās zonas ar uzmalu atkarībā no riteņa leņķa pret sliedi uzbraukšanas leņķis pārvietojas uz priekšu [15]. Lai sāsinātu apstrādes laiku, no riteņa modeļa aizvācam riteņa rumbu un disku. Taisnā ceļa aprēķiniem izmantojam riteņa modeli 90 grādu sektora formā ar 50 mm garu sliedi. Aprēķiniem uz izliekta sliežu ceļa tika izmantots sliežu modeli, kura garums ir 80 mm (5.6. att.) Optimizācijas rezultātā gala elementu tīkla modelī gala elementu izmēri pārejas zonās vienādi ar 1,40 mm kontakta virsmām, savukārt regulārajās zonās tiek pieņemts – 9 mm (5.6. b att.).



5.6. att. Riteņa un sliedes aprēķina modelis: a) taisnajā sliežu ceļā; b) gala elementu tīkls; d) virsmas kontakts bez sākuma saskares; e) pieliktās slodzes, modeļa fragmenti.

Modeļa darbības ierobežojumi

Sliedes pamatne stingri nostiprināta. Uz sliedes šķērsgriezuma virsmas tiek ierobežota pārvietošanās virzienā uz sliedes garenisko asi. Uz riteņa šķērsgriezumam tiek ierobežota pārvietošanās perpendikulārā virzienā kā ass simetrija. Uz diska griezumam virsējās virsmas un riteņa rumbas tiek ierobežota pārvietošanās riteņa horizontālajā šķērseniskajā asī riteņa virzienā. Ja nenotiek kustība līknē, riteņa virsējai virsmai tiek ierobežota pārvietošanās gareniskā virzienā uz riteņa asi (5.7. att.).

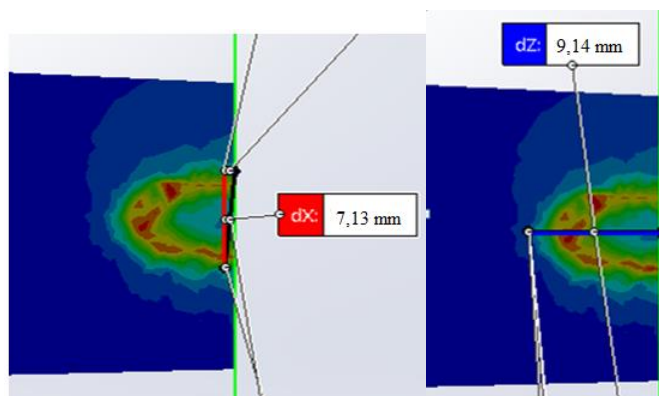


5.7. att. Modeļa ierobežojumi.

Modeļa slodzes

Modelim tiek pievienota vertikālā slodze, kas vienāda ar 1/8 no vagona svara. Pēc tam slodze tiek pārrēķināta katram riteņa sektoram ar 90° leņķi. Nevienmērīgā slodze no vagona svara pievienojas riteņa sektora virsējai virsmai, saskaņā ar likumu par slodzes sadalījumu no riteņpāra ass uz riteņa rumbas caurumu. Tiek ņemts vērā riteņa un sliedes materiālu blīvums. Veicot riteņa braukšanas izpēti līknēs ar rādiusiem, sānu slodze tāpat tiek pievienota riteņa šķērseniskajā virzienā pie riteņa ārējās virsmas (5.6. e att.).

Lai novērtētu izveidoto testa modeļu precizitāti, veikti kontakta laukumu izmēru salīdzinājumi riteņa *GOST-10791* [24] un *R65* sliedes kontakta laukumiem (5.8. att.).



5.8. att. Sliedes ritvirsmas kontakta laukuma aprēķinātie izmēri.

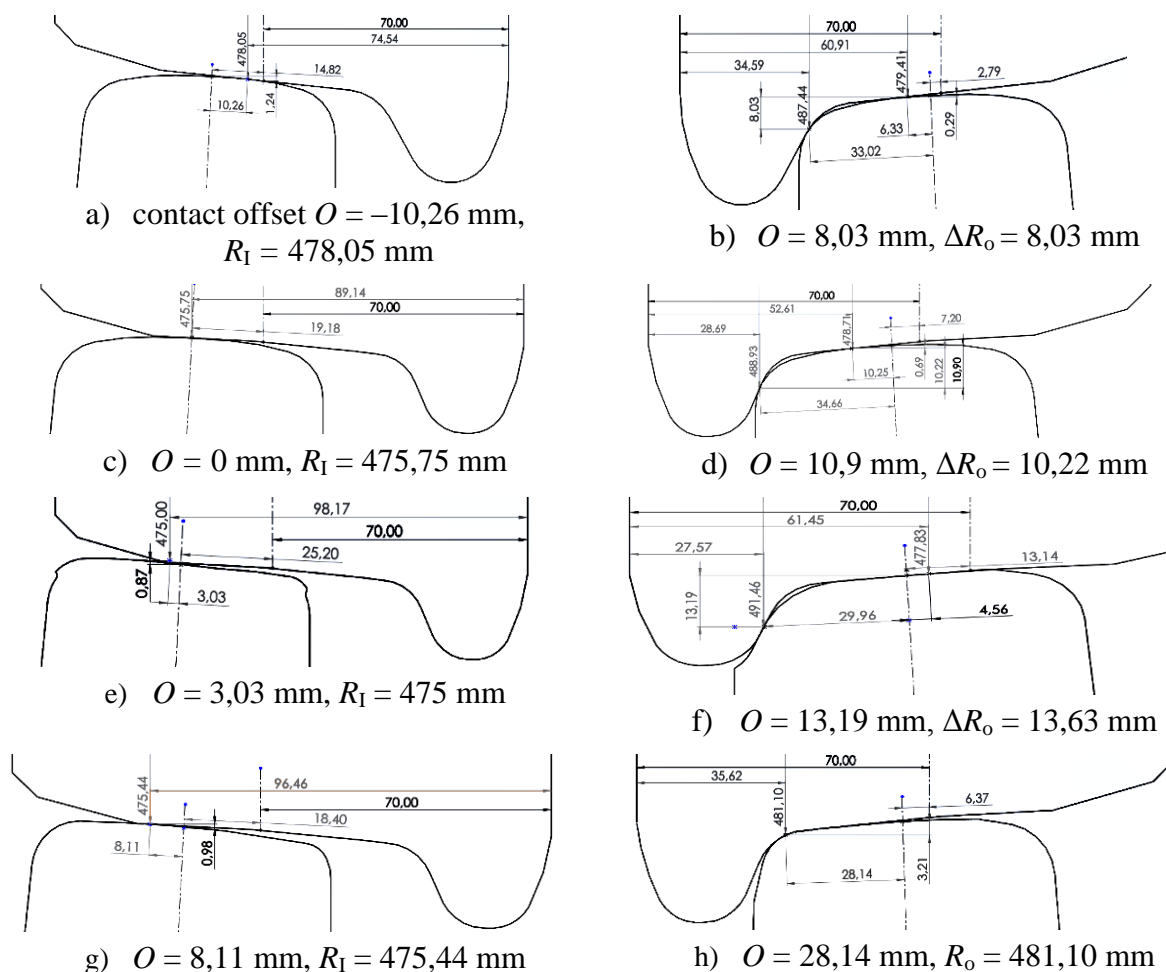
Aprēķina modeļa ritenis-sliede kontakta laukuma izmēri 14,26–18,28 mm, kas iegūti modelējot, labi saskaņojas ar iegūtajiem 14,80 mm pēc Herca teorijas [14] un ekspluatācijas datiem – 13–16 mm [14]. Spriegumu un kontakta spiedienu līmeņi izstrādātajos aprēķina modeļos ritenis-sliede uz lineāri elastīgā materiāla modeļa bāzes tiek variēti no 700 MPa līdz 2400 MPa. Tie saskaņojas arī ar citu autoru rezultātiem [10], [14], [16], [25], pārsniedzot līmeni par 10–12 % uz materiāla nelineārā modeļa bāzes.

Šīs modelēšanas galvenais mērķis ir slīpēšanas ietekmes uz relatīvi jaunām un nodilušām sliedēm un riteņiem, kas ir ekspluatācijā VAS “Latvijas dzelzceļš”, salīdzinošā analīze.

5.4. Slīpēšanas profila izstrāde profilaktiskās atkārtotās slīpēšanas veikšanai

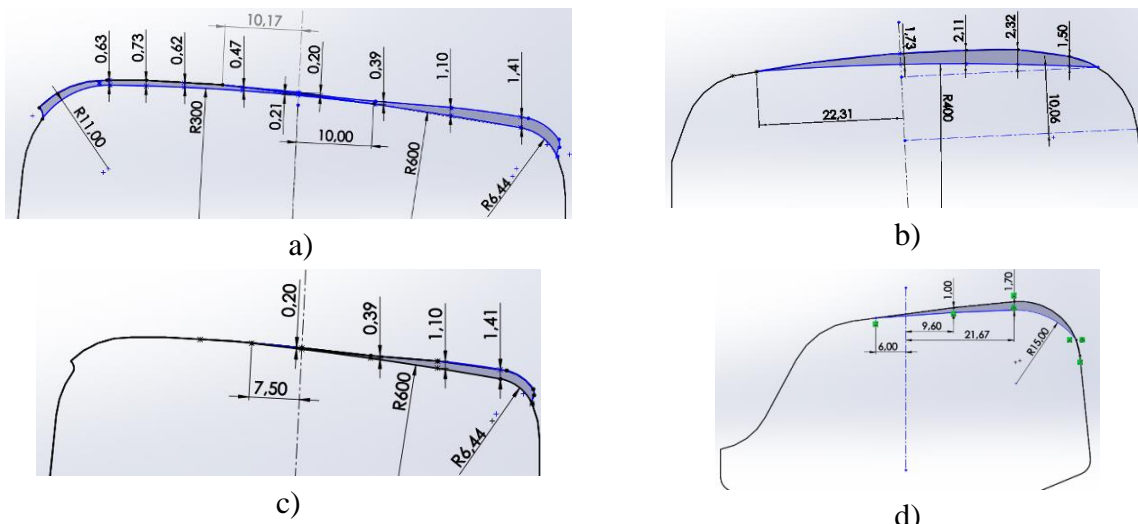
Pamatojoties uz apkopotajiem datiem par riteņa (5.2. att.) un sliedes (5.3. att.) nodilumiem, tika novērtēta to kontakta mijiedarbība ģeometriski. Tika veikta 3D riteņa *GOST-10791*, [20] un *60 E1* [4] sliedes modelēšana *SolidWorks* programmā. Kontakta formas novērtējums tika modelēts jaunām un nodilušām sliedēm un riteņiem dažādās kombinācijās. Visbīstamākie kontakta tipi, kas pakļauti turpmākam sasprīgtā stāvokļa novērtējumam, redzami 5.9. attēlā sliežu ceļu taisnajos iecirkņos un līkņu iecirkņos ar 800 m rādiusu.

Modelēšanas rezultātā atklāts, ka sliežu ceļa taisnajos iecirkņos pārsvarā ir kontakts riteņa un sliedes vidējā zonā, kas nerada uzmalas dilšanu – vienpunkta kontakts. Līknēs veidojas divpunktu kontakts, kas stimulē plānās uzmalas veidošanos. Tādēļ, ņemot vērā riteņa un sliedes kontakta virsmu mijiedarbības izvietojuma zonas rezultātus, sliežu ceļiem ar 800 m rādiusiem izstrādāti asimetriskie profili sliedes slīpēšanai, ņemot vērā riteņa profilu, kam ir raksturīgs nodilums VAS “Latvijas dzelzceļš”.



5.9. att. 60 EI sliežu un riteņa GOST-10791 profilu mijiedarbības kontakta veidi: līkņu iecirkņos: a), b) jauna sliede (slīpēšanas sliedes uz jaunu) un jauns ritenis; c), d) jauna sliede un riteņa sānu nodilums 6,50 mm; e), f) iekšējās sliedes vertikālais nodilums – 2,50 mm, ārējās sliedes sānu nodilums – 6 mm, vertikālais – 1,50 mm un riteņa nodilums – 6,50 mm; g), h) izstrādātais sliedes slīpēšanas profils ar riteņa nodilumu 6,50 mm.
a), c), e), g) R_1 – riteņa rādiuss kontaktā ar sliedes iekšējo šķautni; b), d), f), h) ΔR_0 – riteņa rādiusa novirze sliedes ārējā profila divos kontaktos.

Dažādu sliežu slīpēšanas profilu ietekmes uz pāra ritenis-sliede berzes mijiedarbību novērtējuma rezultātā apstiprināta sliežu slīpēšanas profilu efektivitāte (5.9. g, h att.). Riteņa un sliedes kontakta zonas nobīdās uz sliežu ceļu līknes centru, pie tam nobīde uz iekšējo sliedi ir no 5 mm līdz 18 mm un riteņu rādiuss samazinās par 0,44–2,60 mm, uz ārējo sliedi – no 18 mm līdz 32 mm, riteņu rādiuss palielinās no 1,69 mm līdz 3,27 mm. Riteņa iekšējo un ārējo rādiusu starpība izmantojamajiem profiliem mainās no 1,36 mm līdz 2,96 mm, savukārt lielākā vērtība 5,66 mm tiek sasniegta sliežu profiliem, kas izstrādāti šajā darbā [9]. Rādiusu starpības palielināšanās ļauj uzlabot ritenpāra iekļaušanos četrasreizes, turklāt vienpunkta kontakts neskar uzmalas zonu modelējamajās līknēs ar rādiusu 800 metrim.

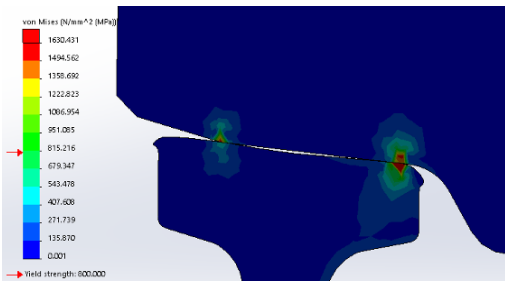


5.10 . att. Izstrādātie remonta profili sliežu slīpēšanai sliežu ceļu taisnēs un līknēs ar rādiusu 800 m: a) nodilušajam dzelzceļa sliežu profilam VAS “Latvijas dzelzceļš” sliežu ceļu taisnajā iecirknī; līknē b), d) nodilušam ārējam sliežu profilam 5.2. (3). att. ar sānu nodilumu, c) jaunam un nodilušam profilam 2,50 mm iekšējai sliedei.

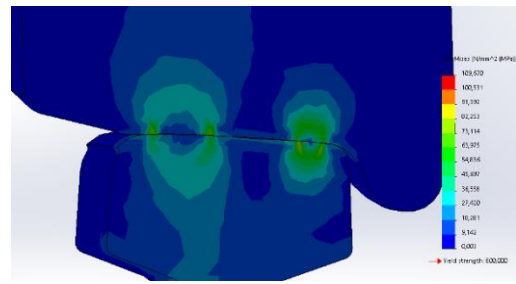
5.10. attēlā redzami ieprojektētie asimetriskie slīpēšanas profili iekšējai un ārējai sliedei. Starp tiem par rekomendējamiem profiliem sliedes slīpēšanai tika noteikts sliežu asimetrisko profilu pāris ar mazāku riteņa un sliedes mijiedarbību un mazāku slīpēšanu skaitu. Salīdzinot ar sliedes iekšējo profilu, sliedes ārējā profila slīpēšanas diapazons ir lielāks, un tā slīpēšanas zonas sadalītas pa sliedes pusi un sliedes galviņas augšējo daļu. Iekšējais sliedes profils galvenokārt noslīpēs sliedes augšas lokālajā zonā. Asimetrisko profilu virsmu slīpēšanas galvenie leņķi sasnieguši no $2,68^\circ$ līdz $2,41^\circ$ ārējai sliedei un no $2,36^\circ$ līdz $4,61^\circ$ iekšējai sliedei [9]. Sliedes slīpēšanas ietekmes novērtējumam tika veikta 3D modelēšana pāra ritenis-sliede mijiedarbībai, izmantojot izstrādāto sliežu profilu. Kontakta spriegumu līmenis novērtēts, izmantojot *Solidworks Simulation* programmu.

5.5. Slīpēšanas profilu ietekmes novērtējums uz sliedes un riteņa savienojuma sprieguma stāvokli

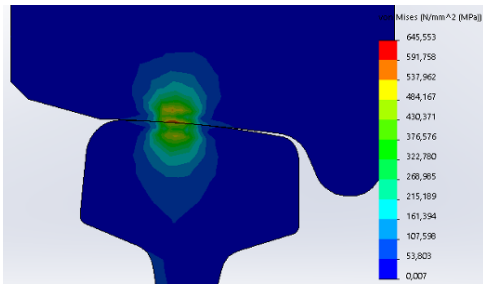
Ņemot vērā kontakta zonas ģeometriskās modelēšanas rezultātus, tika aprēķināts riteņa un sliedes kontakta spriegums sliežu ceļu taisnēs un līknēs ar rādiusu 800 m. Tika izvēlēts 60E1 tipa sliedes jaunais profils, nodilušo un no jauna modelēto asimetrisko sliežu remonta (slīpēšanas) profils (5.10. att.). Ritenis *GOST-10791* [24] izvēlēts ar VAS “Latvijas dzelzceļš” raksturīgo nodilumu (5.2. (3) att.). Aprēķina rezultāti redzami 5.11. un 5.12. attēlā.



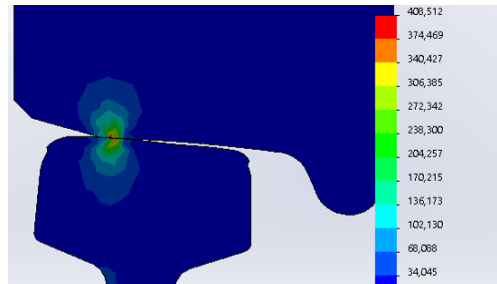
a) sliedes ass nobīde – 5 mm



b) sliedes ass maksimālā nobīde – 2,50 mm

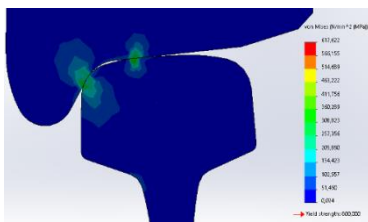


c) sliedes ass nominālā nobīde – 4 mm

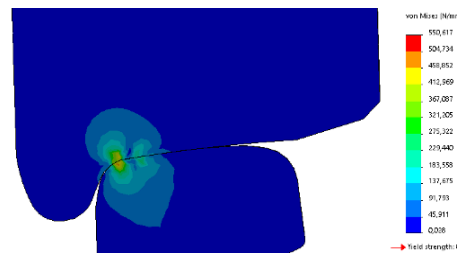


d) sliedes ass nobīde – 6,40 mm

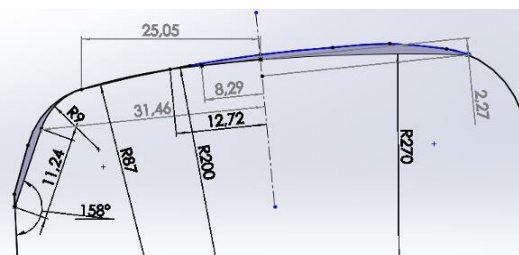
5.11. att. Fon Mizesa spriegums nodilušiem riteņa un sliedes profiliem VAS “Latvijas dzelzceļš”: taisnos sliežu ceļa posmo: a) maksimālais sliežu profila nodilums, b) sliežu nodilums 2,50 mm, c) aprēķinātais sliežu profils 5.10. a att. iekšējā sliede līknē, d) ieprojektētais sliežu profils 5.10. c att.



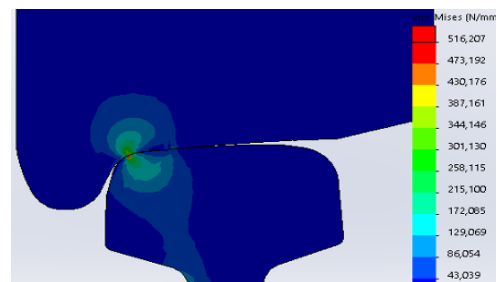
a)



b)



c)



d)

5.12. att. Fon Mizesa spriegumi nodilušiem riteņu profiliem VAS “Latvijas dzelzceļš” un ārējās sliedes sliežu ceļu līknēs: a) spriegumi jaunas sliedes ārējā profilā; b) spriegumi uzmalas resgaļa zonā sliedes nodilumam 2,50 mm; c) ieprojektētais sliedes profils, pielāgots slīpēšanai rādiusu zonā; d) sprieguma zonas nobīde no uzmalas, izmantojot izstrādāto ārējās sliedes profilu (5.10. b un 5.12. c att.).

Sliežu ceļu taisnēs, mijiedarbojoties nodilušo riteņa un sliežu profiliem, spriegumu līmenis 1630 MPa pārsniedz materiāla plūstamības robežu (5.11. att.). Izmantojot izstrādāto sliedes profilu (5.10. a att.), spriegumi samazinās līdz 640 MPa. Riteņa un sliedes mijiedarbībā sliežu ceļu līknēs spriegumu līmenis uz ārējās sliedes bija 1770 MPa, esot vienvienpunkta kontaktā, un 620 MPa divpunktu kontaktā (5.12. a un 5.12. b att.). Pēc sliedes koriģējošās slīpēšanas spriegumi samazinājās līdz 510 MPa darba rādiusa zonā (5.12. c un 5.12. d att.). Ārējā sliedē spriegumi sasniedz 450 MPa (5.11. d att.), izmantojot izstrādāto sliedes profilu (5.10. c att.).

Kā redzams 5.11. c attēlā, izstrādāto profilu izmantošana (5.10. a un c att.) ļaus sliežu ceļu taisnē nobīdīt kontakta zonu no sliežu ceļa ārpusē uz zonu ar mazāku riteņa un sliedes nodilumu (5.2. (3) un 5.11. a att.). Šis risinājums stimulēs sliežu un riteņu profilu vienmērīgāku nodilumu. Kā parādīts 5.12. d attēlā, izstrādātā profila (5.10. b att.) izmantošana un koriģējošā slīpēšana profilam (5.12. c att.) ļaus līknēs izslēgt ārējās sliedes ar riteņa uzmalas virsmu kontakta zonu. Veicot slīpēšanu pa šiem profiliem, var izveidoties vienvienpunkta kontakts ar lielāku laukumu nekā lietojamajiem sliežu slīpēšanas profiliem. Turklāt iespējama arī divpunktu kontakta veidošanās, piemēram, (5.12. b att.), arniecīgām spraugām 1,00–1,20 mm uzmalas pamata rādiusa zonā. Pēc ārējās sliedes un riteņa virsmu piestrādes sliedes un riteņa profili pāries ērta (komfōrmālā) stāvoklī ar spraugām 0,40–0,60 mm pie uzmalas pamata.

5.6. Pēc uzmalas ieripināšanas uz sliedes nosacījumiem piedāvātā slīpēšanas profila ekspluatācijas drošības pārbaude

Veicot kustību pa sliežu ceļu, iespējams tāds riteņpāra stāvoklis, pie kura viens no riteņiem uzbrauc ar uzmalu uz sliedes. Vagonu ratiņu priekšējie riteņi, kustoties pa līknēm, bet bieži arī sliežu ceļu taisnajos iecirkņos, uzbrauc ar uzmalām uz sliedes galviņu sānu šķautnēm. Uzbraukšanas leņķis var sasniegt $0,573^\circ$ un pat nedaudz vairāk (straujās līknēs). Tad ritenis tiecas uziet uz sliedes pa slīdēšanas plakni ar uzmalas pieskares ārējo virsmu, veidojot leņķi β ar horizontālo asi (uzmalas slīpuma leņķis). Uzmalas kontakta vieta ar sliedes galviņu atrodas priekšā no riteņa vertikālā rādiusa, kas rada iepriekšēju saskaršanos.

Saskaņā ar normām riteņa stabilitātes novērtēšanai pret noiešanu no sliedēm tiek aprēķināts stabilitātes koeficients, prasot ievērot šādus nosacījumus:

$$kus = \varepsilon \frac{P_{v1}}{P_h} \geq [kus], \quad (5.1.)$$

kur

$[kus]$ = 1,50 – stabilitātes koeficienta pieļaujamā vērtība kravas vagoniem;

ε – koeficients, ko aprēķina pēc formulas:

$$\varepsilon = \frac{\tan \beta - 0,25}{1 + 0,25 \tan \beta} = \frac{\tan 66,83^\circ - 0,25}{1 + 0,25 \tan 66,83^\circ} = 1,317, \quad (5.2.)$$

kur

β – slīpuma leņķis, koveido riteņa uzmalā ar horizontālo asi, kas standarta ritenim vienāds ar 60° , ritenim, kas izstrādāts Viskrievijas Dzelzceļa transporta pētniecības institūts

“VNIIZT” – 65°, ritenim, kas izstrādāts Dzelzceļa Sadarbības Organizēšana “OSŽD” speciāli saviem dzelzceļiem, – 70° (bez minētajiem riteņiem var izmantot arī citus riteņus ar speciāliem profiliem), šajā pētījumā pieņemtais slīpuma leņķis $\beta = 66.83^\circ = 2.34$;
 μ – slīdes berzes koeficients neuzbraucošam ritenim uz slīdes galviņu, $\mu = 0,25$;
 P_{v1} – uzbraucošā riteņa uz slīdes galviņu reakcijas spēku vertikālā komponente, tf, MPa;
 P_{v2} – neuzbraucošā riteņa uz slīdes galviņu reakcijas spēku vertikālā komponente, tf, MPa;
 P_h – uzbraucošā riteņa uz slīdes galviņu reakcijas spēku horizontālā komponente, kas funkcionē vienlaikus ar P_{v1} un P_{v2} , tf, MPa.

Spēki P_{v1} , P_{v2} , P_h tiek noteikti pēc formulas:

$$P_{v1} = 2P_{st}(m) \left[\frac{b_2 - a_2}{l} (1 - kd.v_1) - \frac{b_2}{l} kd.s.š \right] + H_r \frac{r}{l} + qr.p. \frac{b_2 - a_2}{l}; \quad (5.3.)$$

$$P_{v2} = 2P_{st}(m) \left[\frac{b_2 - a_1}{l} (1 - kd.v_1) - \frac{b_2}{l} kd.s.š \right] + H_r \frac{r}{l} + qr.p. \frac{b_2 - a_1}{l}; \quad (5.4.)$$

$$P_h = H_r + \mu P_{v2}, \quad (5.5.)$$

kur

$P_{st}(m)$ – vertikālā statiskā slodze, iedarbojas uz ass kakliņu, tf, MPa;

$kd.s.š = 0,25\overline{Kd.v}$ – sāniskās šūpošanās dinamikas koeficienta vidējā vērtība;

$H_r = p_a \overline{Kd.h}$ – rāmja spēka vidējā vērtība, aprēķināma pēc horizontālās dinamikas koeficienta vidējās vērtības.

p_a – ass slodze, $p_a = 25 \text{ tf} = 2452 \text{ MPa}$;

$qr.p.$ – riteņpāra ar buksēm smaguma spēks, $qr.p. = 1,4 \text{ tf} = 137,30 \text{ MPa}$;

Riteņpāra horizontālās dinamikas koeficienta vidējā vērtība aprēķināta pēc 5.6. formulas:

$$\overline{Kd.h.} = b\delta(5 + v), \quad (5.6.)$$

kur

b – ratiņu asu skaita koeficients, $b = 1$ [27];

δ – koeficients, atkarīgs no pakares elastības kravas vagoniem $\delta = 0,003$ [27];

v – vagona kustības ātrums, m/s; $v = 25 \text{ m/s}$;

$$\overline{Kd.h.} = 0,003 \cdot 1(5 + 25) = 0,09,$$

$2B_2$ – attālums starp riteņpāra ass kakliņu viduspunktiem, $2B_2 = 2,036 \text{ m}$;

a_1, a_2 – attālums no riteņa kontakta punktiem līdz ass kakliņu vidum, $a_1 = 0,217 \text{ m}$, $a_2 = 0,264 \text{ m}$;

r – riteņa rādiuss;

l – attālums starp riteņa kontakta punktiem ar sliedi, pieņemts vienādu ar 1,555 m.

Nomainot 5.3. un 5.4. formulās.

$$2P_{st}(m) = p_a - qr.p., \quad (5.7.)$$

$$2P_{st}(m) = 25 - 1,4 = 23,50 \text{ tf} = 2305 \text{ MPa},$$

kā arī ieliekot skaitliskās vērtības lineārajos lielumos un nominālo riteņa rādiusu $r = 0,475$ m, pēc pārveidošanas tiek iegūtas šādas vienkāršotas izteiksmes P_{v1} un P_{v2} :

$$\begin{aligned} P_{v1} &= p_a(0,485 - 0,528\overline{Kd.v.} + 0,289\overline{Kd.h.}) + 0,528\overline{Kd.v.} \cdot qr \cdot p. = \\ &= 23,5(0,485 - 0,528 \cdot 0,23 + 0,289 \cdot 0,09) + 0,528 \cdot 0,165 \cdot 1,4 = \\ &= 9,27 \text{ tf} = 909,10 \text{ MPa}, \end{aligned} \quad (5.8.)$$

$$\begin{aligned} P_{v2} &= p_a(0,515 - 0,222\overline{Kd.v.} - 0,289\overline{Kd.h.}) + 0,222\overline{Kd.v.} \cdot qr \cdot p. = \\ &= 25(0,515 - 0,222 \cdot 0,23 - 0,289 \cdot 0,09) + 0,222 \cdot 0,23 \cdot 1,4 = \\ &= 11,01 \text{ tf} = 1089 \text{ MPa}, \end{aligned} \quad (5.9.)$$

$$H_r = 23,5 \cdot 0,09 = 2,11 \text{ tf} = 206,90 \text{ MPa},$$

$$P_h = 2,12 + 0,25 \cdot 11,01 = 4,86 \text{ tf} = 476,60 \text{ MPa},$$

$$kus = 1,317 \frac{9,27}{4,86} = 1,317 \frac{909,10}{476,60} = 2,51 > [kus] = 1,50.$$

Aprēķinātais koeficients ir 2,51, kas pārsniedz minimāli pieļaujamo vērtību 1,50 kravas vagoniem un apstiprina stabilitātes un ekspluatācijas drošības rezerves, tas ir, uzmalas šļūkšana uz sliedes galviņas tiek novērsta [9].

5.7. Izstrādātā sliedes slīpēšanas metodika

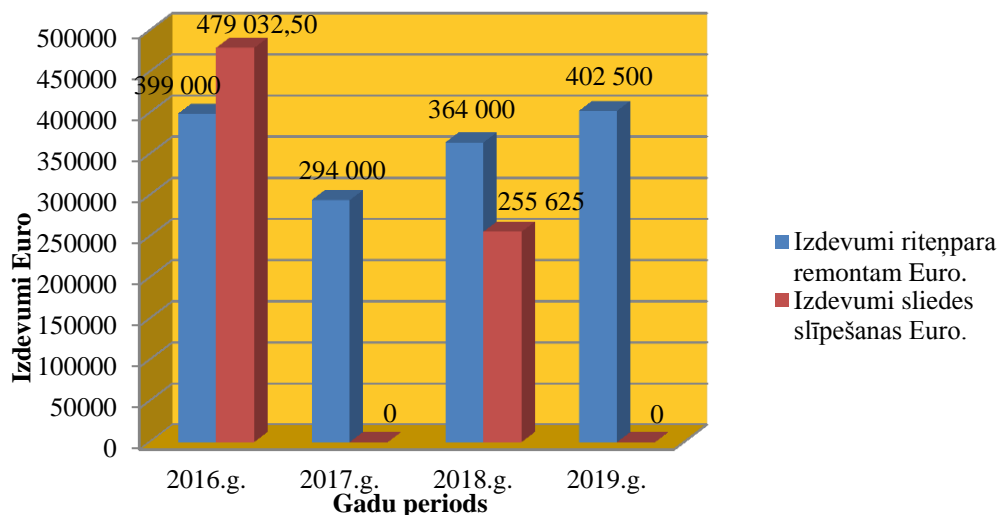
Nemot vērā veiktospētījumus, izstrādāta metodika, kas ļaus samazināt riteņa un sliedes nodilumus, veicot saskaņotu riteņa un sliedes slīpēšanu. Berzes pāri ritenis-sliede rodas kontakta virsmu savstarpējs nodilums, tāpēc tiek piedāvāts meklēt remonta profila formu sliežu slīpēšanai, ņemot vērā riteņa nodiluma profilu. Protams, uzdevums ir sarežģīts daudzveidīgo riteņu profilu dēļ, kas ir ieviesti ekspluatācijā. Turklāt, ja riteņu profilu protektora nodilums ir 1–2 mm, mainās riteņa protektora slīpums, kontakta punkti nobīdās horizontāli relatīvi sliedei, kontakta tips un nodiluma raksturs atbilstoši mainās. Turklāt ar šo neievērotu riteņu profilu rādiusi vienā riteņpārī mēdz būt vienādi, kas ir īpaši nepieņemami līkumainos sliežu ceļu iecirkņos. Tāpēc tiek piedāvāts apkopot statistikas datus par riteņu jauno profilu galvenokārt, ņemt vērā arī riteņu profilu galvenās nodiluma formas. Informāciju ir jāšķiro pēc riteņu profilu formas un nodiluma rakstura VAS “Latvijas dzelzceļš” kopumā vai pa kustības iecirkņiem. Tādā veidā tiks noteikti atsevišķi iecirkņi ar līdzīgu sliežu nodilumu. Turpmāk būs iespējams risināt uzdevumu izveidot sliedes profilus slīpēšanai, kas ir saskaņoti ar riteņu profiliem. Liela skaita sliežu profilu izstrāde profilaktiskās un remonta slīpēšanas veikšanai ar mazāku diskretumu vertikālajam un horizontālajam savstarpējam riteņa un sliedes nodilumam ļaus samazināt no sliedes noņemamā metāla daudzumu un samazināt slīpēšanas laiku.

5.8. Sliežu slīpēšanas un riteņpāra atjaunošanas remontdarbu ekonomiskais salīdzinājums

Apskatīsim ekonomiskos izdevumus un salīdzināsim tos ar gada izdevumiem sliežu ceļu slīpēšanai ar izdevumiem remonta darbiem riteņpāru atjaunošanai vai nomaiņai.

Šobrīd, ņemot vērā VAS “Latvijas dzelzceļš” grāmatvedības datus, 1 km sliežu ceļa slīpēšanai Latvijā nepieciešams aptuveni 2500 EUR, tāpēc sliežu uzturēšanas statistikas datu (par sliežu nodilumu) apkopošana, sliežu saimniecības stāvokļa apstrāde un analīze ir Ceļu pārvaldes pirmā prioritāte. Izdevumi par sliežu ceļu stāvokļa statistikas datu apkopošanu, izveidojot ekonomisko salīdzinošo grafiku, netiek ieskaitīti un pieņemti 2500 EUR par 1 km sliežu ceļa slīpēšanu.

Ritošā sastāva tehniskās apkopes punktos (TAP) VAS “Latvijas dzelzceļš”, ņemot vērā remonta ceļu grāmatvedības datus, viena riteņpāra cena ir 2500–2700 EUR. Turpretī jauna vai remonta uzņēmumā izremontēta riteņpāra cena – 3100–3200 EUR (ieskaitot izvelšanu, demontāžu, apvirpošanu, pilnu revīziju, montāžu, pievelšanu). Ņemot vērā 4.1. attēlā redzamo statistiku par riteņpāru defektiem, asšķautnainā uzvelmējuma un plānās uzmalas, tie ir galvenie defekti riteņa mijiedarbībā ar sliedi VAS “Latvijas dzelzceļš”. Šo defektu skaits, izstrādājot ekonomisko grafiku, tiks summēts. Lai veiktu ekonomisko salīdzinājumu, aplūkosim noslīpēto sliežu un atklāto asšķautnaino uzvelmējumu un plāno uzmalu defektu statistiku no 2016. līdz 2019. gadam. Šim nolūkam *Microsoft Excel* programmā tika izveidots grafiks (5.13. att.).



5.13. att. Ekonomisko izdevumu grafiks riteņpāru defektu remontam un sliežu slīpēšanai.

5.13. attēla grafikā redzams, ka 2016. gadā riteņpāru defektu remontam VAS “Latvijas dzelzceļš” iztērējis 399 000 EUR, sliežu slīpēšanai – 479 032,50 EUR. 2017. gadā izdevumi riteņpāru defektu remontam samazinājās līdz 294 000 eiro. Sliežu slīpēšanas izdevumi bija 0 EUR. Ārpusplāna riteņpāru defektu remontam 2018. gadā izdevumi bija 364 000 EUR, sliežu slīpēšanai – 255 625 EUR. 2019. gadā izdevumi riteņpāru remontam pieauga līdz 402 500 EUR. Sliežu slīpēšana 2019. gadā VAS “Latvijas dzelzceļš” netika veikta un

atbilstoši izdevumi arī bija 0 EUR. 5.1. tabulā redzami izdevumi riteņpāru remontam un sliežu slīpēšanai.

5.1. tabula

VAS "Latvijas dzelzceļš" izdevumi riteņpāru remontam un sliežu slīpēšanai

Izdevumi riteņpāru remontam no 2016. līdz 2019. gadam, EUR	Izdevumi sliežu slīpēšanai no 2016. līdz 2019. gadam, EUR	Kopējie izdevumi VAS "Latvijas dzelzceļš" no 2016. līdz 2019. gadam riteņpāru remontam un sliežu slīpēšanai, EUR
1 459 500	734 657,50	2 194 157,50

Kopējie izdevumi VAS "Latvijas dzelzceļš" riteņpāru remontam un sliežu slīpēšanai no 2016. līdz 2019. gadam bija 2 194 157,50 EUR, no tiem riteņpāru defektu remontam, t. sk. arī neplānotajam – 1 459 500 EUR, sliežu slīpēšanai – 734 657,50 EUR.

Ņemot vērā ekonomisko analīzi par izlietotajiem līdzekļiem riteņpāru remontam un sliežu slīpēšanai, var secināt, kariteņa nesaskaņošana ar sliedi rada lielus ekonomiskos izdevumus.

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Apkopojot paveiktā darba rezultātus, var izdarīt vairākus secinājumus.

1. Slides ir neaizstājama sliežu ceļa konstrukcijas daļa to augstās prasības, raksturlielumi un īpašības liecina par to nozīmi dzelzceļa ritošā sastāva drošā transportēšanas procesā. Dzelzceļa tērauda veido daudzi ķīmiskie elementi, no kuriem galvenie ir ogleklis, silīcijs, mangāns un kaitīgie piemaisījumi, piemēram, fosfors un sērs. Sliežu tērauda cietība ir viens no svarīgākajiem ritošā sastāva ekspluatācijas uzticamības rādītājiem kam jāatbilst piemērojamajiem standartiem un noteikumiem (*EN 13674-1:2011, GOST R 51685-2013*), kas noteikti valstī, kurā tas tiek izmantots.
2. Dzelzceļa tērauda defektu analīze liecina, ka sildīšanas defektus izraisa augsta temperatūra un dzelzceļa tērauda pārkaršana, bet velmēšanas defektus izraisa nepareiza metāla velmēšana un izvelmēšana. Sliede arī nav pareizi kalibrēta attiecībā uz mehānismiem, kas saistīti ar slides velmēšanu un izvelmēšanu. Šīs defektu sērijas rašanās sekas ir nepareiza attīrīšana (riski), skrāpējumi uz nolietotu stieģrojuma stieņu velmētās virsmas, nolietotas veidnes, nepietiekama lietņu karsēšana, kausēšanas un liešanas tehnoloģiskie pārkāpumi. Metāla struktūras defektus parasti izraisa nepareiza metināšana un sliežu tērauda termiskā apstrāde pēc metināšanas procesa.
3. Ņemot vērā kopējot bojāto un ļoti bojāto sliežu defektu analīzi VAS “Latvijas dzelzceļš”, var izdarīt šādus secinājumus:
 - ļoti bojāto sliežu defektu skaits no 2011. līdz 2019. gadam bija 2495;
 - atklāto ļoti bojāto sliežu defektu skaits sliežu galviņā no 2011. līdz 2019. gadam bija 1814.Šī statistika liecina par nepieciešamību veikt tehniskos un plāna piesardzības pasākumus sliežu galviņu kalpošanas laika saglabāšanai un pagarināšanai. Viens no šādiem risinājumiem var būt sliežu slīpēšana ar sliežu slīpēšanas vilcienu.
4. Analizējot firmas “*Speno*” sliežu slīpēšanas vilciena izmantošanu VAS “Latvijas dzelzceļš”, var secināt, ka, lai saglabātu un pagarinātu sliežu kalpošanas ilgumu, sliežu slīpēšanas vilciena izmantošana VAS “Latvijas dzelzceļš” ir aktuāla. No 2011. līdz 2019. gadam VAS “Latvijas dzelzceļš” noslīpēti 1388,087 km/ceļu.
5. Cietības pārbaude pēc Brunela skalas (*HB*) parādīja, ka slīpēto sliežu metāla cietība ir par 29 *HB* augstāka nekā neslīpētām sliedēm. Slīpēšanas paņēmiens paaugstina virsmas cietību 1,2 reizes. To stimulē pārtraukumainu ripu pielietošana, kas pazemina apstrādājamās virsmas temperatūru, papildus deformē materiālu un palielina tā stiprināšanas līmeni. Salīdzinot iegūto metāla cietību jaunai slidei ar izgatavotājrūpnīcas pases datiem, novērojamas atšķirības – slides metāla cietība zemāka par 104 *HB*. Viens no paņēmieniem slides galviņas kalpošanas laika pagarināšanai ir sliežu sākotnējā un periodiskā slīpēšana atkarībā no caurlaides tonnāžas un ekspluatācijas režīmiem.
6. Izplatītākais defekts VAS “Latvijas dzelzceļš” ir defekts ar kodu X10.1. Izpētes gaitā noteikts, ka galvenais šī defekta parādīšanās iemesls ir trūkumi izgatavošanas tehnoloģijā, un to dēļ uz slides veidojas mazas plaisas un sīkplaisas, kas tālākā

ekspluatācijas procesā ritošā sastāva iedarbības un milj. t, brutto tonnāžas izstrādes rezultātā izraisa metāla atlobīšanos un izdrupšanu uz sliežu galviņas ritvirsmas. Sliežu tērauda defektu cietības noteikšanas dati liecina par pazeminātu metāla cietību 10 mm un 35 mm dziļumā no galviņas ritvirsmas, no 341 *HB* līdz 328 *HB* 10 mm dziļumā un no 362 *HB* līdz 346 *HB* 35 mm dziļumā. Dati par ķīmisko sastāvu norāda par ķīmisko elementu (Mn, C, P, S) neatbilstību *EN 13674-1:2011* standartam. Mangāna saturs ir par 0,017 % mazāks, oglekļa – par 0,039 % mazāks, fosfora saturs par 0,044 % lielāks, sēra saturs – par 0,0043 % lielāks. Mazākamangāna un hroma saturs dēļ samazinās sliežu tērauda triecienstīgrība, stiprība, nodilumizturība un cietība. Lielāka fosfora un sēra saturs dēļ paaugstinās sliežu tērauda trauslums un nosliece uz plaisu veidošanos. Mikroskopā aplūkotā metāla struktūra arī apstiprina plaisu un sīkplaisu esamību bojātas sliedes galviņā. Neslīpētas sliedes mikrostruktūra zem mikroskopa parādīja iekļāvumus un piemaisījumus, kas negatīvi ietekmē sliedes galviņas virsmas stāvokli, un var būt par virsmas defektu rašanās un attīstības cēloni. RTU Transporta institūta Dzelzceļa inženierijas katedrā Metālagrafiska laboratorijā veiktās bojātas sliedes ar kodu X 10.1 izpētes rezultātus apliecina sertificēta testēšanas laboratorija *KIWA AS “Inspecta Latvia”*, kas liecina par testēšanas rezultātu atbilstību.

7. Iemodelēti remonta profili sliežu galviņas slīpēšanai VAS “Latvijas dzelzceļš” sliežu ceļiem un novērtēta to ietekme uz sliežu un riteņu mijiedarbojošos virsmu sānu nodilumu. Pētījuma galā rezultāts ir nodilušo riteņu profilu iekļaut jaunā remonta profila izveidošanā sliežu slīpēšanai metodikā kā galvenais faktors (sliedes un riteņa profili pāries ērta (komformālā) stāvoklī).

Ņemot vērā pētījuma rezultātus un 3D modelēšanu, var rezumēt, ka:

1. izstrādāta metodika remontu profilu izveidošanai sliežu galviņas slīpēšanai, kas bāzēta uz reālu riteņu izdilušo profilu izmantošanu; tas ļauj palielināt sliežu remonta profilu slīpēšanas precizitāti; precīzāk modelēt vienpunkta kontaktu taisnajā sliežu ceļā vai divpunktu kontaktu līknēs un tādā veidā samazināt riteņa uzmalas defektu skaitu dažādos dzelzceļa sliežu ceļu iecirkņos VAS “Latvijas dzelzceļš”;
2. veikta 3D modelēšana riteņa mijiedarbībai ar sliedi, izmantojot izstrādāto sliežu profilu, kas ļauj novērtēt sliežu slīpēšanas ietekmi uz sprieguma līmeni pārī ritenisliede;
3. kā rekomendējamie profili sliežu slīpēšanai izstrādāti sliedes asimetriskie profili ar mazāku riteņa mijiedarbību ar sliedi un mazāku slīpēšanas skaitu; slīpēšanas pamatleņķi asimetrisko profilu virsmām sasniedz no 2,68° līdz 2,41° ārējai sliedei un no 2,36° līdz 4,61° iekšējai sliedei; ņemot vērā izstrādāto sliežu profilu slīpēšanas leņķus, autors piedāvā izpētītā rādiusa līknēs samazināt ārējās sliedes slīpumu līdz 1,9° un attiecīgi palielināt iekšējās sliedes slīpumu;
4. sliedes slīpēšanas leņķa izmaiņas ļauj palielināt kontakta zonu, samazinot spriegumu uz ārējo sliedi līknē līdz 18 % un novirzot daļu slodzes no riteņu malas nodiluma zonas uz riteņu uzmalas pamata; nobīde sasniedz no 5 mm līdz 30 mm, riteņu rādiusu

starpība sasniedz 5,6 mm vienā riteņpārī, kas uzlabo riteņpāru iekļaušanos četras reizes;

5. veikts stabilitātes koeficienta aprēķins riteņu nodilušajiem profiliem ar atloka leņķi $66,8^\circ$ VAS "Latvijas dzelzceļā" atbilstoši uzbaukšanas nosacījumiem uz sliežu profiliem, kas izstrādāti šajā promocijas darbā; aprēķina koeficients ir 2,51, kas paaugstina minimāli pieļaujamo vērtību 1,5 kravas vagoniem un apstiprina stabilitātes un ekspluatācijas drošības rezerves;
6. ekonomiskā analīze apstiprina nepieciešamību izmantot izstrādātos jaunus un remontētos sliežu profilus, veicot slīpēšanu, lai izvairītos no riteņpāru defektu remonta izdevumiem.

Izpētes rezultāti apstiprina izstrādātās metodikas efektivitāti remonta profilu izveidē sliedes galviņas slīpēšanai un izstrādāto asimetrisko sliežu profiliem. To izmantošana ļaus samazināt sliedes sānu nodilumu, kā arī samazināt riteņu apvirpošanas skaitu VAS "Latvijas dzelzceļš".

KOPSAVILKUMA LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Glotovs V., Makedons V. "Ceļu distances Defektoskopijas līdzekļu darba analīze 2011.–2019. gadā". Valsts akciju sabiedrība "Latvijas Dzelzceļš". Latvija, Jelgava: 2019. – 1.–104. lpp.
2. Jagodkins M. Instrukcija C-010 Sliežu defekti, to pazīmes, klasifikācija, katalogs, marķēšana, un vilcienu kustības nosacījumi pa defektīvām un ļoti defektīvām sliedēm. Valsts Akciju Sabiedrība "Latvijas Dzelzceļš" Rīga: 2017. – 1.–68. lpp.
3. EN 13231-3:2012 Railway applications Track Acceptance of works Part 3: Acceptance of reprofiling rails in track.
4. European Standard. Railway applications. Track. Rail. 10 December 2010. EN 13674-1:2003+A1:2007.
5. EN 13262:2009 Railway applications – wheelsets and bogies – wheels – product Italia 2009.
6. EVRAZ. Form 3. Export. СДС ОПЖТ RU.B.0020 24.08.2011 g. Quality Certificate Nr. 3094. Rails type 60 E1 Section class Y. Straightness B. EN 13674-1:2011, TC 00186269-189-2012.
7. Ivanovs V., Gavrilovs P. Research of the Defective Frog Wing of 1/11 Mark. Transport Problems. ISSN 1896-0596. e-ISSN 2300-861X. doi:10.20858/tp.2017.12.4.12. 2017. – 119.–126. p.
8. Ivanovs V., Gavrilovs P. Study of Exothermic Welded Joint Grinding by "Speno" Rail Grinders. No: *18th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development»*, Latvija, Jelgava, 22.–24. maijs, 2019. Jelgava: Latvia University of Agriculture, ISSN 1691-5976., doi:10.22616/ERDev2019.18.N132. 2019. – 1013.–1021. p.
9. Ivanovs V., Gavrilovs P., Boiko A., Vaicis I. Estimating Influence of Rail Profile Shape on Lateral Wear of Rail and Wheel after Grinding of 60e1 and R65 Rails. No: *19th International Scientific Conference "Economic Science for Rural Development": Proceedings. Vol. 19*, Latvija, Jelgava, 20.–22. maijs, 2020. Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies, ISSN-1691-5976. doi:10.22616/ERDev2020.19.TF137. 2020. – 614.–624. p.
10. Olofsson U., Telliskivi T. Contact mechanics analysis of measured wheel-rail profiles using finite element method. Proceedings Inst Mech Eng Part F, Journal of Rail and Rapid transit, Vol. 215 (2), <https://doi.org/10.1243/0954409011531404>. Sweden: 2001. – 65.–72. p.
11. Smitirupa P., Arun K., Samantaray A. Recursive Wheel Wear and Vehicle Dynamic Performance Evolution Computational Model for Rail Vehicles with Tread Brakes. Journal Vehicles, doi: 10.3390/vehicles1010006, vol. 1, 17 April India: 2019. – 88.–115. p.
12. Wei Z. Yue Y., Wen-Sheng Q., Huan X., Su-Chao X. Optimization of the target profile for asymmetrical rail grinding in sharp-radius curves for high-speed railways.

- Advances in Mechanical Engineering. DOI:10.1177/1687814016687196. journals.sagepub.com/home/ade Vol. 9 (2), China: 2017. – 1.–12. p.
13. Yongjie L., Zongyu G., Jianxi W. Study on Influence of Diversified Parameters of Vehicle and Track on Wheel Hollow Wear. Journal Shock and Vibration, Vol. 2018, Article ID 8972615, <https://doi.org/10.1155/2018/8972615>. China: 2018. – 11. p.
 14. Арсеньев И. Д., Шевченко Д. В., Боровков А. И. Конечно-элементное моделирование и исследование эволюции контактных напряжений при страгивании железнодорожного колеса. Вестник пермского государственного технического университета. Механика, Номер 2, УДК: 539.3, ISSN: 2078-6603, Санкт-Петербург: 2011. – 5–13 с.
 15. Воробьев А. А. Контактное взаимодействие колеса и рельса. Вестник ИргТУ №3 (39), УДК 629.4.027 Санкт-Петербург: 2009. – 42–47 с.
 16. Иванов И. А., Кушнер В. С., Воробьев А. А., Шадрин Н. Ю., Сорокин П. Г. К вопросу о перспективах использования бандажных колесных пар повышенной твердости. ПГУПС, Санкт-Петербург, РФ; ОмГТУ, г. Омск, РФ. 2000. – 1–2 с.
 17. Коростелев П. П. Реактивы для технического анализа. Москва: 1988. – 104 с.
 18. Марков Д. П. Трибологические аспекты повышения износостойкости и контактно-усталостной выносливости колес подвижного состава: Дисс. на соиск. уч. степ. д-ра. техн. наук. Москва: ВНИИЖТ, 1996. – 386 с.
 19. Машеков С. А., Абсадыков Б. Н., Алимкулов М. М. Влияние химического состава стали 76Ф на качество рельсов. Журнал Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2 (часть 2). Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева. УДК 621.771.25/.26:669.1. Казахстан, Алматы, 2015. – 1–8 с.
 20. Открытое акционерное общество “Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта” (ОАО “ВНИИЖТ”) Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524 мм). РЖД ВНИИЖТ Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества (протокол от “19-20” октября 2017 г. № 67, Москва: 2017. – 25–38 с.
 21. ОАО “Российские Железные Дороги” Утверждены распоряжением ОАО “РЖД” от 20 мая 2013 г. № 1133р. Рельсы железнодорожные типа Р65 импортного производства категории ВС250АВ, сваренные электроконтактным способом. Технические условия ТУ 0921-290-01124323-2012. Вице-президент ОАО “РЖД” А. В. Целько. Москва: 2013. – р1–7 с.
 22. Правосудович В. В., Сокуренок В. П., Данченко В. Н. и др. Дефекты стальных слитков и проката. Москва: Интернет Инжиниринг, 2006. – 384 с.
 23. Разработано совещанием экспертов Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу. Каталог дефектов и повреждений рельсов. Приложение Р 736 “Перечень дефектов рельсов и их кодирование”. Комитет ОСЖД, Республика Польша, г. Варшава, 2015. – 3–36 с.

24. Разработан открытым акционерным обществом “Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ОАО “ВНИИЖТ”), открытым акционерным обществом “Уральский институт металлов” (ОАО “УИМ”), открытым акционерным обществом “Научно-исследовательский институт вагоностроения”, Институтом черной металлургии НАН Украины. ГОСТ 10791-2011 Колеса цельнокатаные. Технические условия (с Поправкой). Межгосударственный стандарт колеса цельнокатные. Технические условия, Москва: 2012. – 6–48 с.
25. Сладковский А. К вопросу механики контактного взаимодействия колеса и рельса. Сборник Национального горного университета, Нр. 19, том (4), УДК 593.374:625.1.03. Днепропетровск, 2004. – 3–8 с.
26. Утверждена распоряжением ОАО “РЖД” 29.12.2014 № 3185. Инструкция по шлифовке и фрезерованию рельсов в пути и стационарных условиях, Москва: 2014. – 6–40 с.
27. Бороненко Ю. П., Кутуков А. А. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (Несамоходных). Москва: 1996. – 7–92 с.