

Cisternvagona rāmja bojājumu rašanās cēloņu un remonta kvalitātes analīze pamatsijas un pulkas sijas savienojumā

Alexander Boyko¹, Pēteris Balckars²
^{1,2}Rīgas Tehniskā universitāte

Kopsavilkums. Darbā analizēti naftas pārvadājumiem paredzētu cisternvagonu rāmju bojājumi – plaisas. Novērtēta remonta kvalitāte pamatsijas un pulkas sijas savienojumā un stiprinājumu plākšņu efektivitāte. Izmantojot ar galīgo elementu metodi izveidotu cisternvagona rāmja modeli, veikta spriegumu stāvokļa analīze un atrasti bojājumu iemesli minētajās zonās. Pēc dažiem aprēķina eksperimentiem apstiprināta izremontēto pamatsijas un pulkas sijas savienojumu nepietiekama stiprība un remonta kvalitāte. Izstrādāti ieteikumi stiprības palielināšanai un cisternvagona rāmja remonta uzlabošanai pētāmajās zonās.

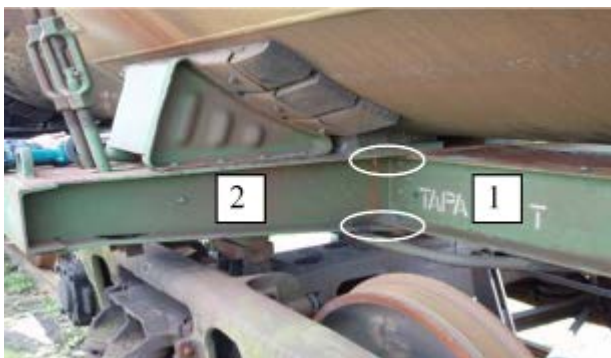
Atslēgas vārdi: aprēķina modelis, plaisas, rāmja stiprība, sprieguma stāvoklis, stiprinājuma plākšne.

I. IEVADS

Rakstā analizēti naftas pārvadājumiem paredzētu cisternvagonu rāmju bojājumi (plaisas). Novērtēta remonta kvalitāte pamatsijas un pulkas sijas savienojumā (1. att.) un esošo stiprinājumu plākšņu efektivitāte (2. un 3. att.).



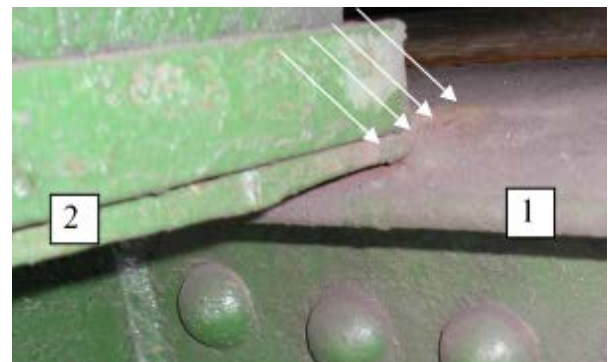
a)



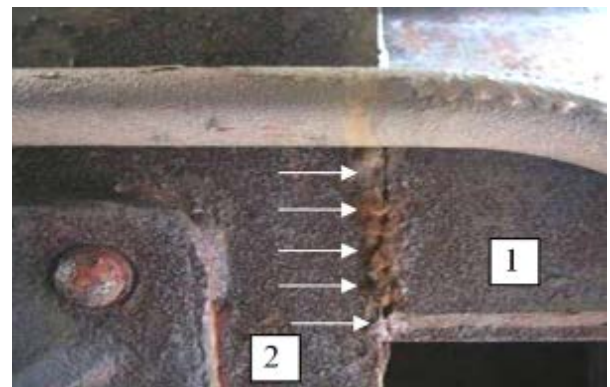
b)

1. att. Cisternvagona (a) pamatsijas (1) un pulkas sijas (2) savienojums (b).

Plaisas izveidojas pamatsijas augšējo un apakšējo plauktu savienojumos (2. att.), kā arī pulkas sijas vertikālajā loksņē (3. att.).

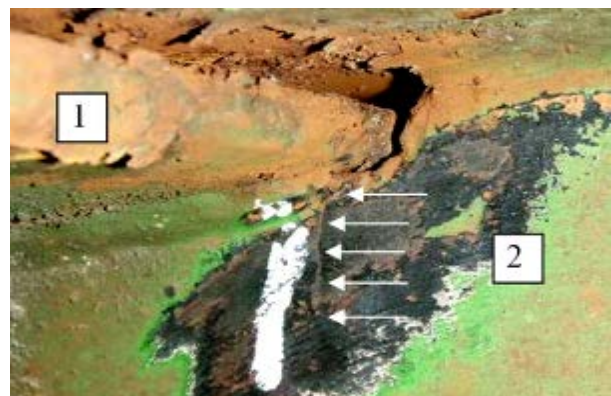


a)



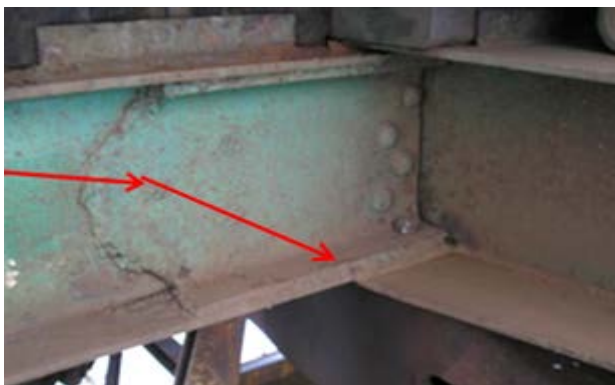
b)

2. att. Plaisas rāmja garsijas (1) un šķērssijas (2) augšējo (a) un apakšējo (b) plauktu savienojumos.



3. att. Plaisas pulkas sijas vertikālajā loksņē.

Saskaņā ar Instrukciju par kravas vagonu metināšanu un uzkausēšanu remonta laikā [1], plaisas jāaizmetina visā to garumā vai jāaizmetina ar plaisas zonas pārklāšanu ar stiprinājuma plāksni (4. att.). Pašlaik remontdarbiem tiek izmantotas dažādas formas un biezuma stiprinājuma plāksnes (5. att.). Tomēr ekspluatācijas laikā izremontētā vagonā ar aizmetinātām plaisām un stiprinājuma plāksnēm plaisas rodas atkal no jauna (4. un 5. att.).



4. att. Stiprinājuma plāksnes (saskaņā ar remonta Instrukciju [1]) un no jauna radušās plaisas.



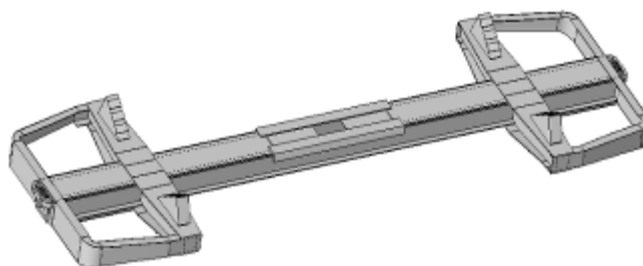
5. att. Stiprinājuma plāksnes un no jauna radušās plaisas.

Lai novērtētu plaisu aizmetināšanas un stiprinājuma plākšņu ietekmi uz spriegumu samazināšanu un pārdalīšanu pamatsijas un pulkas sijas savienojumā, tika izveidots cisternvagona rāmja galīgo elementu modelis un tika veikti variantu aprēķini ar normatīvām slodzēm.

II. APRĒĶINA MODELIS

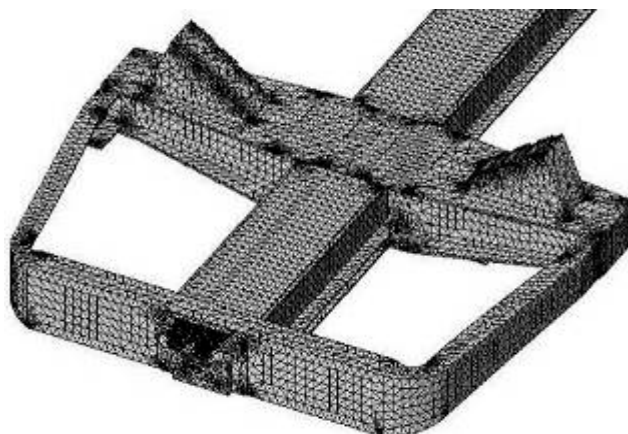
Aprēķina modelis (6. att.) izveidots ar programmas *SolidWorks*® palīdzību. Stiprības aprēķini veikti, izmantojot galīgo elementu programmu *COSMOSWorks*®.

Aprēķina modelī rāmja pārvietojumi ierobežoti vertikālajā virzienā un šķērsvirzienā pēdu balstu zonā, kā arī garenvirzienā – aizmugures atbalstu zonā. Precīzākam spriegumu deformācijas stāvokļa aprēķinam aprēķina modelī tika detalizēti ievērotas šādas rāmja ģeometriskās īpatnības: triecienrozetes, priekšējie un aizmugures atbalsti, pamatsijas un pulkas sijas savienojums, pēdu balsts, rāmja nekustīgie balsti, sānsijas un bufersijas, un citi elementi – spriegumu koncentratori.



6. att. Cisternvagona aprēķina modelis.

Lai izveidotu aprēķinu modeļa galīgo elementu tīklu, izmantoti telpiskie cietķermeņa otrās kārtas elementi – tetraedri. Izmantotajiem galīgajiem elementiem katrā mezglā ir sešas brīvības pakāpes. Zonās blakus spriegumu koncentratoriem tīkla elementu izmēri ir samazināti (7. att.). Vidēji cisternvagona rāmja galīgo elementu modelim ir 208 000 mezglu un 400 000 elementu.

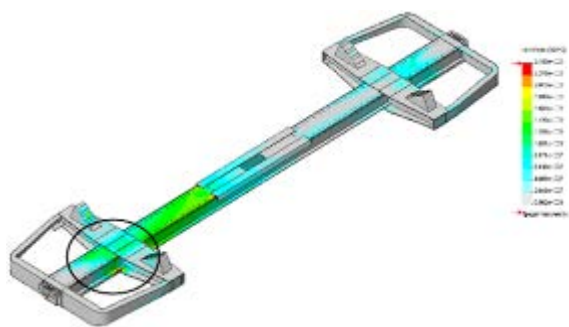


7. att. Aprēķinu modeļa galīgo elementu tīkls.

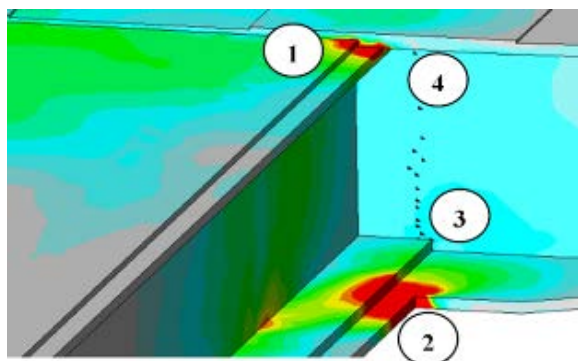
III. CISTERNVAGONA STIPRĪBAS APRĒĶINS PAMATSIJAS UN PULKAS SIJAS SAVIENOJUMA ZONĀ

Stiprības aprēķini veikti tā saucamajam pirmajam normatīvajam režīmam (spiedes režīms), kas saskaņā ar Normām [2] iekļauj maksimālās garenslodzes. Cisternvagona stiprības aprēķinā pēc pirmā normatīvā režīma konstrukcijas paliekošās deformācijas nav pieļautas. Aprēķina spriegumi nedrīkst pārsniegt materiāla tecēšanas robežu $R_{eH} = 245$ MPa. Cisternvagona rāmja stiprības aprēķina rezultāti parādīja, ka ekvivalentie spriegumi (*von Mises*) pamatsijas un pulkas sijas savienojuma zonā nepārsniedz materiāla tecēšanas robežu (8.a att.). Maksimālie spriegumi (200–220 MPa) novērojami rāmja konsoles daļā pamatsijas un pulkas sijas augšējo un apakšējo lokšņu savienojumu zonās (8.b att.).

Kā redzams, spriegumi ir tuvi tecēšanas robežai. Tomēr, kad šajās zonās izveidojas bojājumi (nesakusumi, iegriezumi, iespaidumi) un spriegumu koncentrācijas koeficients ir 3,5, tad spriegumi var sasniegt 770 MPa (9. att.). Šajās zonās var izveidoties plaisas pamatsijas augšējos un apakšējos plauktos blakus savienojumam ar pulkas siju.

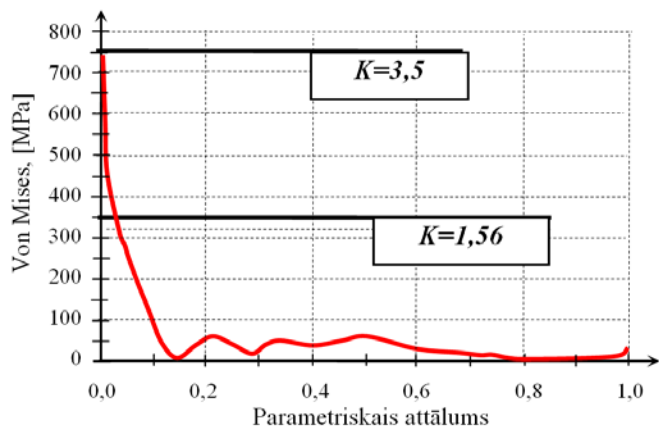


a)



b)

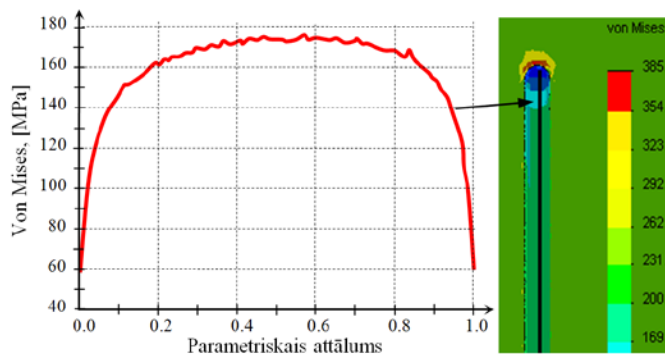
8. att. a) Ekvivalentie spriegumi (*von Mises*) cisternvagona rāmī (pirmais normatīvais režīms); b) rāmja fragments (skats no augšas): 1, 2, 3, 4 – bojājumu zonas.



9. att. Pamatsijas apakšējā plaukta spriegumi (8. att., 2. zona), K – spriegumu koncentrācijas koeficienti.

Arī metināto šuvju beigu daļa ir spriegumu koncentrators. Kad spriegumi pārsniedz pieļaujamo vērtību, tie izraisa plaisu rašanos. Jāņem arī vērā, ka atkārtota metināšana pazemina metāla stiprību termiskās ietekmes zonā. Lai novērtētu metināto šuvju izpildes ietekmi uz spriegumu stāvokli, tika realizēts salīdzinošs tests izstieptā loksne. Tika noteikts, ka spriegumi var palielināties no 30 līdz 56 % (10. att.) un sasniegt 343 MPa, kas pārsniedz pieļaujamo spriegumu lielumu.

Pulkas sijas vertikālās loksnes savienojuma zonā ar apakšējo un augšējo pamatsijas plauktu (8. att., 3. un 4. zona),



10. att. Metinātās šuves ietekmes uz sprieguma stāvokli novērtējums.

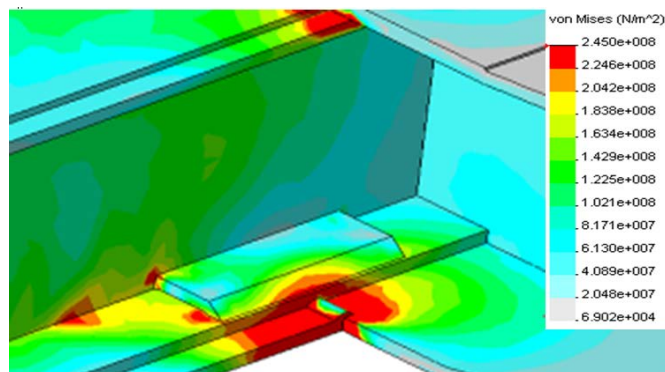
kur arī izveidojas plaisas, spriegumi sasniedz 70–90 MPa. Tāda līmeņa spriegumi nevar izraisīt bojājumus. Noguruma plaisas arī nevar veidoties, jo maksimālo spiedes spēku darbības frekvence pirmajā normatīvajā režīmā ir neliela (142 cikli, II.1.1. tabula [2]) vienā ekspluatācijas gadā vai 4544 cikli visā cisternvagona kalpošanas laikā.

Sliežu ceļa garenisko nelīdzenumu dēļ sānspēks izraisa vagona sānu šūpošanos ar vidējo frekvenci 1,25 Hz. Tāpēc 3. un 4. zonai (8. att.) jāveic noguruma stiprības aprēķins no sānu šūpošanās. Vagona rāmja noguruma stiprības aprēķina [3] rezultāti rāda, ka pie amplitūdas sprieguma 42,5 MPa ar norādīto frekvenci kalpošanas laiks 3. un 4. zonā būs tikai 18,6 gadi, nevis normatīvais kalpošanas laiks – 32 gadi. Aprēķins apstiprina plaisu izveidošanās iespējamību šajās zonās.

Veicot aprēķinus pēc citiem normatīvajiem režīmiem, spriegumi šajās zonās ir mazāki. Ievērojot metinātās šuves beigu daļas ietekmi, spriegumi var palielināties līdz 140 MPa. Ja šajās zonās papildus izveidojas dobumi vai iegriezumi ar spriegumu koncentrācijas koeficientu no 2,5 līdz 3,0, tad spriegumi var pārsniegt materiāla tecēšanas robežu.

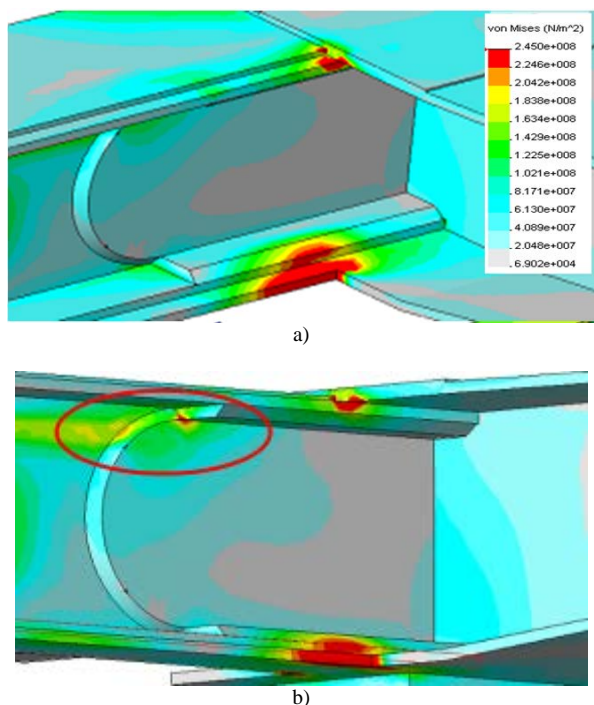
IV. CISTERNAVAGONA REMONTA STIPRINĀJUMU EFEKTIVITĀTES NOVĒRTĒJUMS

Tika novērtēta esošo stiprinājuma plāksņu (4. att.) efektivitāte, veicot spriegumu stāvokļa aprēķinu pirmajam normatīvajam spiedes režīmam, ņemot vērā stiprinājuma plāksni, kas pastiprina pamatsijas apakšējo plauktu ar



11. att. Ekvivalentie spriegumi (*von Mises*) pamatsijas ar stiprinājuma plāksni apakšējā plauktā (8. att., 2. zona).

aizmetinātām plaisām. Aprēķina rezultāti parādīja nelielu spriegumu samazinājumu pamatsijas un pulkas sijas apakšējās plauktos 2. zonā – līdz 216 MPa (11. att.). Spriegumu līmenis sasniedz ievērojamu lielumu spriegumu koncentratora zonā (plaisu zonās). Pat neliela defekta (dziļas plaisas, uzsitumi, atlauzumi) parādīšanās šajā zonā radīs spriegumu ievērojamu palielināšanos. Secinām, ka šajā gadījumā konstrukcijas stiprība ar tāda veida stiprinājuma plāksni nebūs pietiekama. Stiprinājuma plāksnes izmantošana U-profila sijas veidā (12. att.), ko piestiprina pie pulkas sijas U-profila sijas, dod labākus rezultātus, proti, pastiprina uzreiz divas zonas (8.b att., 1. un 2. zona). Spriegumi samazinās līdz 200 MPa, tomēr stiprinājuma plāksnes beigās zonā pie vagona rāmja savienojuma izveidojas zona ar spriegumu koncentrācijas koeficientu, kas vienāds ar 3,0 (12.b att.). Tas arī var radīt spriegumu ievērojamu palielināšanos gadījumā, ja šajā zonā izveidojies kaut neliels bojājums.

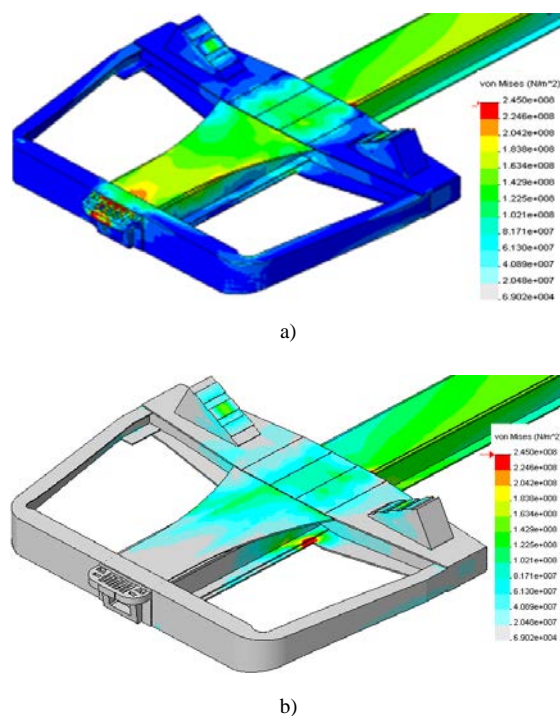


12. att. Pamatsijas apakšējā plaukta ekvivalentie spriegumi (*von Mises*) ar stiprinājuma U-profila sijas plāksni (saskaņā ar Instrukciju [1]), (8. att., 1. un 2. zona).

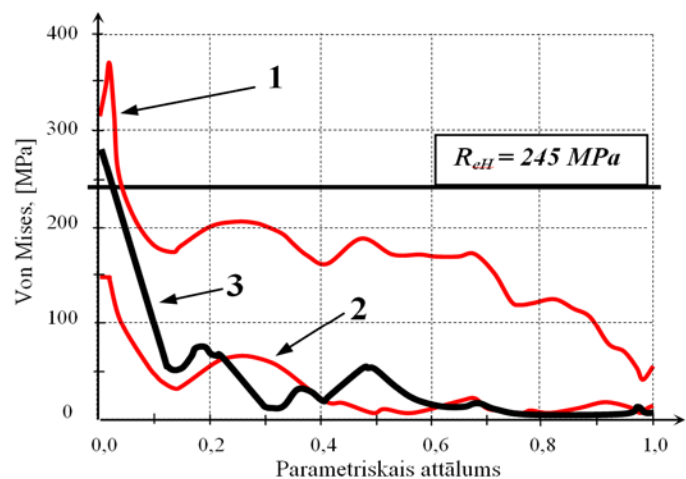
Tātad, stiprinājuma plāksnes, ko piestiprina šajā rāmja zonā remonta laikā (5. att., 11. att.), kā arī plāksnes, kuras rekomendē Instrukcija [1] (4. att., 12. att.) par kravas vagonu metināšanu un uzkausēšanu remonta laikā, nav pietiekami efektīvas. Esošās stiprinājuma plāksnes faktiski pastiprina tikai plaisas beigu daļas zonu un novērš to tālāko izplatīšanos, bet plaisas rašanās zona paliek nenostiprināta. Tāpēc tādā veidā izremontētos vagonu rāmjos atkārtotas plaisas tika atklātas 1–2 ekspluatācijas gadu laikā, nevis normatīvajā periodā starp remontiem – 3 gadu laikā. Tāpēc, lai novērstu plaisas rašanos pamatsijas un sānsijas savienojumos, aprēķina laikā deformējamā modeli precīzāk jānovērtē darbojošos spēku ievirze, kā arī jāizmanto tādas formas un biezuma stiprinājuma plāksnes un tādās vietās, lai neveidotos jaunas

zonas ar stingruma lēcieniem (sprieguma koncentratori), bet maksimāli tiktu nogludināti spriegumi esošajos sprieguma koncentratoros.

Tika veikti rāmja stiprības variantu aprēķini [4] dažādas formas un biezuma stiprinājuma plāksnēm, kā arī dažāda veida metināšanas šuvēm. Aprēķinu rezultātā secināts: lai novērstu plaisu rašanos rāmja siju savienojumā, katra stiprinājuma plāksne jāizgatavo trīsstūra veidā ar pamatni 270 mm pie pulkas sijas un ar biezumu, kas vienāds ar pamatelementu biezumu. Modelētā stiprinājuma plāksne parādīta 13. attēlā.



13. att. Pamatsijas ekvivalentie spriegumi (*von Mises*) ar optimizēto stiprinājuma plāksni (8. att., 1. un 2. zona) pirmajā normatīvajā spiedes režīmā: a) ar garenslodzes nodošanu caur triecienrozēti (ar bojāto triecienlāpētāju); b) ar garenslodzes nodošanu aizmugures atbalstu zonā.



14. att. Stiprinājuma plāksņu dažādu variantu salīdzinājums: 1 – esošās formas stiprinājuma plāksne; 2, 3 – optimizētās formas stiprinājuma plāksne.

Izmantojot stiprinājuma plāksnes ar optimizēto formu augšējo plauktu savienojumos, spriegumu līmenis samazinās un

sasniedz 150 MPa pirmajā normatīvajā spiedes režīmā ar garenslodzes nodošanu caur triecienrozeti (ar bojāto triecienslāpētāju) (13.a att., 14. att. 2. līkne). Zonas ar maksimāliem spriegumiem pārvietotas no siju šķērsošanas vietām uz mazāk noslogotām siju daļām. Pirmajā normatīvajā spiedes režīmā ar garenslodzes nodošanu aizmugures atbalstu zonā spriegumi apakšējos plauktos sasniedz 270 MPa, kas pārsniedz materiāla tecēšanas robežu (13.b att., 14. att. 3. līkne). Var secināt, ka jāuzlabo arī apakšējo plauktu savienojuma stiprinājuma plāksne.

V. SLĒDZIENS

Četrstu cisternvagonu bojājumu analīzes rezultātā tika noteiktas pamata zonas pamatsijas un pulkas sijas savienojumā, kur izveidojas plaisas:

- pamatsijas un pulkas sijas augšējo un apakšējo plauktu savienojums;
- pulkas sijas vertikālo lokšņu savienojums ar pulkas sijas augšējiem un apakšējiem plauktiem.

Variantu stiprības aprēķinu rezultātā noteikts, ka plaisu izveidošanas zonas ir spriegumu koncentratori. Aprēķinātie spriegumi savienojumos nepārsniedz pieļaujamus lielumus pie maksimālām spiedes slodzēm pirmajā normatīvajā režīmā. Defektu (dziļas plaisas, uzsitumi, atlauzumi) veidošanās šajās zonās rada spriegumu palielināšanos 2,7–3,5 reizes. Rezultātā spriegumi var pārsniegt materiāla tecēšanas robežu.

Nekvalitatīva metināšana remonta laikā, ja metināšanas šuvju beigas atrodas spriegumu koncentrācijas zonās, rada spriegumu palielināšanos līdz 53 %. Neoptimāla stiprinājuma plākšņu forma un biezums, kā arī nepareizs plākšņu izvietojums noved pie tā, ka spriegumus samazina neefektīvi, bet plākšņu beigu daļā spriegumi palielinās 3...5 reizes ar jaunu spriegumu koncentrācijas zonu izveidi.

Piedāvātā aprēķinātā nošķeltas formas stiprinājuma plāksne samazina spriegumus 2 reizes pamatsijas un pulkas sijas augšējo plauktu zonā un neizveido jaunas spriegumu koncentrācijas zonas. Tomēr modelētas stiprinājuma plāksnes lietošana augšējo plauktu zonā nav pietiekama un arī apakšējo plauktu savienojumam jāizstrādā stiprinājuma plāksne. Pulkas sijas vertikālo lokšņu savienojuma zonā ar pulkas sijas plauktiem plaisas izveidojas, ja spriegumi ir nelieli. Tāpēc tālākos pētījumos šai zonai jāveic noguruma stiprības novērtējums, turklāt aprēķins jāveic sānu šūpošanas režīmam.

Alexander Boyko, **Peteris Balckars**, Evaluation of the effectiveness of the repairs strengthening in the zone of shaped body support of the tank car

In this work, the frequently detected damages (cracks) of the tank car for oil transportation are analyzed. The effectiveness of the repairs strengthening in the zone of shaped body support of the tank car is evaluated. During the analysis of the damages of 4-axis tank wagon frames, the key areas of cracking were identified: welding seams of manhole hatch, welding seams of shaped pads, welding seams of discharging device, welding seams of the barrel shell near supports, and welding seams of dome. The finite element model of the tank car was elaborated using CAE programme *COSMOSWorks*®. During calculations, using the FEM model, the loads and reasons that cause cracks in the researched zones were defined. The variant structural calculations showed that the zones of cracking are zones of stress concentrators. The calculated equivalent (*von Mises*) stresses in the these zones did not exceed the maximum permissible values of the first extraordinary loading mode; however, if the defects (cavities, cracks, etc.) are formed in the researched areas, the stresses decrease 2,7–3,5 times and may exceed the yield strength of the material. A low-quality repair welding leads to stress increase up to 53 %. After few numerical experiments, the insufficient strength and quality of repaired joints in the zone of shaped body support and its joining with the center sill of tank car were confirmed. A proposal for increasing the strength and quality of repair works (as well as for correction of poor repair) of the tank car in the indicated zones was elaborated. As a result, a new design for the strengthening plate with a truncated form was proposed. The use of the new strengthening plate allows reducing stresses up to two times in the researched zone and does not create new stress concentrators.

PATEICĪBA

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projekta „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai” ietvaros.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. *Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов: ЦВ-201-98*: Утв. Департаментом вагон. хоз-ва МПС России 10.03.1998, Москва: Транспорт, 1999. 254 стр.
2. *Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*, ГосНИИВ – ВНИИЖТ Москва. 1996.
3. Boyko, A., Derkach, B., Vuchetich, I. Evaluation of Service Life of Tank Car Frame Under Repeated Loading (Rolling). In: *the international conference Strength of Materials and Structure Elements*, Kiev, Ukraine, 28–30 Sept., 2010. Abstracts. vol. 2, pp 224–225.
4. Auziņš, J., Boiko, A., Januševskis, A., et al. Mehānisko sistēmu modelēšanas, identifikācijas un daudzkritēriālās optimizācijas metožu un līdzekļu izstrāde mašīnu un mehānismu dinamikas laboratorijā. *RTU 147. Jubilejas zinātnisko rakstu krājums* (2009), RTU Izdevniecība, lpp. 19–26.

Alexander Boyko, *Dr. sc. ing.*, born in Potsdam, Germany, in 1972. In 1994, A. Boyko graduated from the RTU Faculty of Power Engineering and Electrical Engineering and received the qualification of an engineer-mechanic in the railway car specialization. In 2002, he defended the dissertation "Analysis and Optimization of Dynamics of Railway Rolling-Stock Equipped with Multi-Action Plastic Shock Absorbers".

From 1994 to 1996, A. Boyko worked as a technologist at the Riga Railway Car Factory. Since 1997, he has been working as a researcher in the Research Laboratory for Machine and Mechanism Dynamics of the RTU Faculty of Mechanical Engineering (nowadays Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Aeronautics). His scientific work is chiefly concerned with the modeling of longitudinal railway dynamics, shock-absorber design and the optimization of the railway movement processes, as well as with software development. A. Boyko is an author of more than 30 scientific publications, he has participated in several international conferences.

Address: 6 Ezermalas iela, Rīga, LV-1006, Latvia. Phone +371 67089396; E-mail: aleksandrs.boiko@rtu.lv

Peteris Balckars, *Dr. sc. ing.*, 1942–2011. In 1968, P. Balckars graduated from the Leningrad Institute of Railway Transport Engineers and received the qualification of an engineer-mechanic. In 1992, he defended the dissertation in the field of Machinery and Machinery Building.

From 1975 to 1991, he worked as an Assistant Professor at the Department of Machines and Mechanisms Theory and Machine Elements of the Riga branch of the Leningrad Institute of Railway Transport Engineers. From 1991 to 1998, P. Balckars worked as an assistant professor in a group of railway transport professors of the RTU Institute of Railway Transport. Later, at the same Institute, he was an associate professor from 1998 to 2002, and a professor and director from 2002 to 2011. He is an author of many scientific publications and four published study materials, he participated in international conferences and was a member of the editorial board of two scientific journals (Poland and Latvia).