

EVALUATION OF STRENGTH OF TANK CAR UNDER REPEATED LOADING

CISTERNVAGONA STIPRĪBAS NOVĒRTĒJUMS PIE DAUDZCIKLU
SLOGOJUMA

Alexander Boyko, researcher, Dr. sc. ing.
Riga Technical University, Institute of Mechanics
Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia
Phone +371 67089396
E-mail: aleksandrs.boiko@rtu.lv

Janis Auzins, leading research associate, Dr. sc. ing.
Riga Technical University, Institute of Mechanics
Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia
Phone +371 67089396
E-mail: auzinsjp@latnet.lv

Janis Janushevskis, doctoral student, Mg. sc. comp.
Riga Technical University, Institute of Mechanics
Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia
Phone +371 67089396
E-mail: janisj@latnet.lv

Atslēgas vārdi: stiprības novērtējums, nogurumizturība, sāns spēka daudzciklu slogojums, cisternvagoni

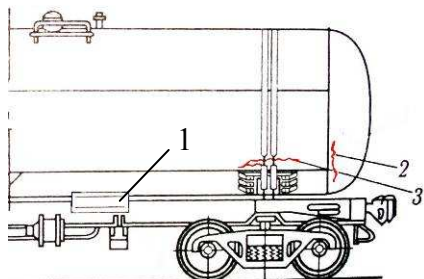
1. Ievads

Šajā darbā ir izpildīts cisternvagona katla un rāmja nogurumizturības novērtējums. Aprēķini tika veikti ar galīgo elementu metodi. Dotā uzdevuma sarežģītības dēļ cisternvagona katls un rāmis tika aprēķināti atsevišķi. Cisternvagona katla kalpošanas laiks tika novērtēts, ievērojot vertikālo un garenisko dinamisko slodžu iedarbību pie dažādiem balstīšanas apstākļiem uz vagona rāmja. Cisternvagona rāmja nogurumizturība tika novērtēta sliežu ceļa garenisko nelīdzenumu izraisītajā sānu šūpošanās (pie pārkraušanas) režīmā.

2. Katla aprēķins

Rāmja iekšējo (apakšējo) nekustīgo balstu ieliekšanās dēļ cisternvagonu ekspluatācijā bieži tiek atklātas spraugas katla apakšējās (pastiprinātas) loksnes un rāmja nekustīgo balstu savienojumos. Tā rezultātā katls balstās tikai uz ārējiem (augšējiem) rāmja nekustīgajiem balstiem. Bez tam tiek atklāti ievērojami katla apakšējās (pastiprinātas) loksnes nobezumi rāmja nekustīgo balstu zonā garenvirzienā un šķērsvirzienā, kur vēlāk parādās plaisas.

Dotajā darbā cisternvagona katla nogurumizturības novērtējums tika izpildīts, balstoties uz stiprības aprēķinu. Tika noteikts pamatslodžu mainīšanās raksturs laikā un to ietekme uz katla noguruma plaisu rašanos 2. zonā – katla dibena un cilindriskās daļas vertikālo metinājumu šuvju zonā un 3. zonā – apakšējo (pastiprināto) un sānu lokšņu horizontālo metinājumu šuvju



1. attēls. Cisternvagona galvenie bojājumi

(GE) tetraedru veidā ar sešām brīvības



2. attēls. Sānu un apakšējo katla lokšņu metinājumu šuvju zona virs nekustīgajiem balstiem

zonā virs nekustīgajiem balstiem (1. attēls, 2., 3. zona).

Nogurumizturības aprēķins tika izpildīts cisternvagona modelim 15-II863, kuru ekspluatē Latvijas dzelzceļā. Atbilstoši [1] katls ir izgatavots no tērauda Bcr3, tecēšanas robeža $\sigma_T = 245$ MPa, stiprības robeža $\sigma_B = 370$ MPa, ilgizturības robeža $\sigma_{-1} = 170$ MPa. Vagona nominālais kalpošanas laiks – 32 gadi.

Aprēķins tika izpildīts ar galīgo elementu modeli, izmantojot telpiskus cietķermeņu galīgos elementus pakāpēm katrā mezglā. Galīgo elementu skaldnes ir aprakstītas ar paraboliskas funkcijas palīdzību. Galīgo elementu tīklojuma izmēri ir 30 mm un 50 mm ar reducēšanu pie sprieguma koncentratoriem. Galīgo elementu modelis sastāv no 260409 galīgajiem elementiem. Modelī ir iekļautas arī fasonķepas un ieejas lūkas apmale. Pie visām aprēķinu slodžu kombinācijām katls tika radiāli nostiprināts nekustīgo balstu zonās. Fasonķepu zonās 1 (1.attēls) tika ierobežota pārvietošanās garenvirzienā un šķērsvirzienā attiecībā pret vagona garenasi.

Katla stiprības aprēķins tika veikts, ievērojot atsevišķo spēku iedarbību, lai nepārkāptu noteikto drošības līmeni atbilstoši [2]. Pie tam, stingrākām prasībām tika noteikta augstāka prioritāte.

Stiprības aprēķinu rezultātā tika konstatēts, ka maksimālie ekvivalentie spriegumi (1) parādās pie cilindriskās daļas apakšējās loksnes (3. zona) un katla dibena, blakus nekustīgajiem balstiem (2. zona).

Ekvivalentie spriegumi (Von Mises) tika aprēķināti, no spriegumu sešām komponentēm, pēc formulas:

$$\sigma_{EQ} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}{2}}, \quad (1)$$

kur $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – normālie spriegumi,

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – tangenciālie spriegumi.

Lai novērtētu katla nogurumizturību, tika izvēlēti tikai tādi slogojuma veidi, pie kuriem izpildās noteikumi (2). T.i., ja slodzes ciklu daudzums n_i ir mazs vagona kalpošanas laikā un ja ekvivalentie spriegumi nepārsniedz materiāla izturības robežu $[\sigma_{-1}]$, tad nogurumizturības aprēķins pie tādas slodzes nav lietderīgs.

$$\sum \frac{n_i}{[N]} \leq 1, \quad \frac{\sigma_{eq}}{[\sigma_{-1}]} \leq 1. \quad (2)$$

Ekspluatācijas apstākļos cisternvagens atrodas kompleksā sprieguma stāvoklī, tāpēc aprēķinot ir nepieciešams slogot katlu ar slodžu kombinācijām, kuras apmierina noteikumu (2) un ir sakomponētas pēc darbības virzieniem:

vertikāli - dinamiskās slodzes no katla un kravas smaguma spēkiem;

gareniskā virzienā – slodzes no šķidruma hidrotrieciena un katla inerces spēka, kas radās pie sadursmēs;

šķērsvirzienā – slodzes no katla un kravas inerces spēkiem (pie vagona rotāciju pret savu garenasi un vagona kustības pa sliežu ceļu ar līku trajektoriju). Šķērsvirziena slodzes ir nelielas un neatbilst noteikumiem (2). Tāpēc tās aprēķinos netiek ievērotas.

Saskaņā ar [2] spiedes un stiepes 1000 KN spēka rašanās relatīvais biežums kustībā ir 0.289 un 0.269, bet ciklu daudzums ir 5058 un 2018 attiecīgi 1 ekspluatācijas gada laikā.

Nogurumizturības aprēķins tika veikts ar *S-N* Vēlera noguruma līknes palīdzību oglekļa tēraudam Bcr3.

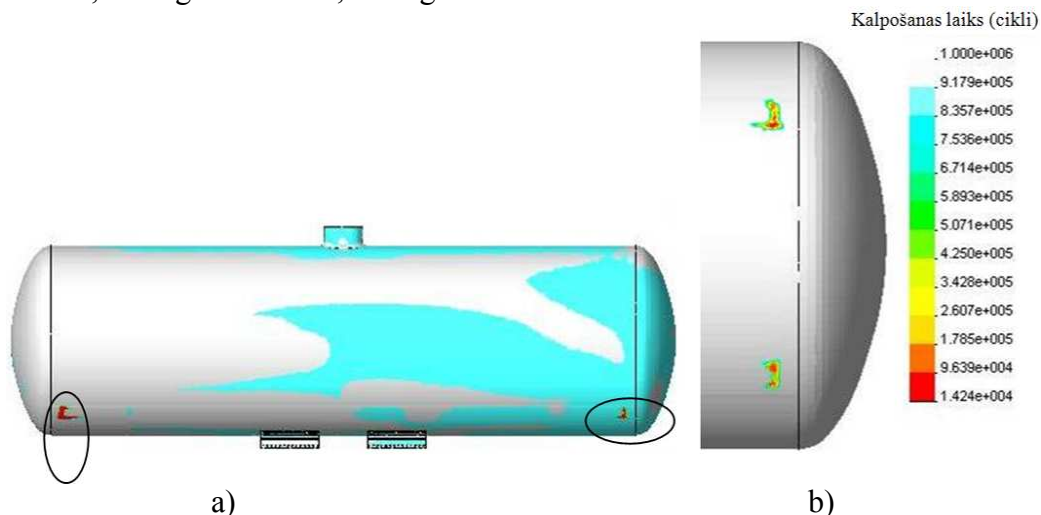
Konstrukcijas uzvedība tika pētīta elastīgajā apgabalā. Palmgrēna-Mainera bojājumu lineārās saskaitīšanas hipotēze (3) tika izmantota gadījumā, kad bojājumu daļa D pie jebkura spriegumu amplitūdas līmeņa ir proporcionāla spriegumu darbības ciklu daudzumam n_i un apgriezti proporcionāla pilnam ciklu skaitam N_o , kas novestu pie sagraušanas šajā līmenī. Sloojuma režīmu skaits tiek apzīmēts ar k . Teorētiski sagraušana notiek pie $D = 1$.

$$D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_o} \quad . \quad (3)$$

Izmantotā lineārā teorija neapraksta dažādu līmeņu spriegumu iedarbību secību un pieņem, ka iepriekšējās slogošanas vēsture neietekmē bojājumu uzkrāšanas ātrumu, kas ir šīs metodes trūkums.

3. Katla aprēķina rezultāti

Ja katls balstās uz visām nekustīgo balstu brusām bez atstarpēm, vertikālās dinamiskās slodzes vagona ekspluatācijas laikā rada konstrukcijas bojājumus līdz 45% 2. un 3. zonā. Garenvirziena ekspluatācijas slodzes vagona ekspluatācijas laikā rada konstrukcijas bojājumus līdz 20% 2. zonā. Ja iekšējie (apakšējie) nekustīgie balsti ieliecas, tad katls turas tikai uz ārējiem (augšējiem) nekustīgajiem balstiem. Šajā gadījumā katla bojājumi vertikālo un garenisko ekspluatācijas slodžu summas sasniedz 220 % (3.a. attēls) un aprēķinātais kalpošanas laiks ir bīstami mazs un sastāda tikai 11 – 14 gadu (3.b attēls), bet nominālais kalpošanas laiks, kā augstāk minēts, ir 32 gadi.



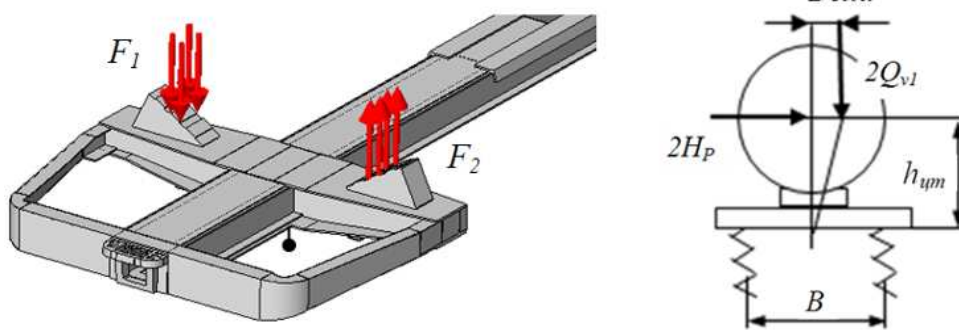
3. attēls. a) Katla bojājumi vertikālo un garenisko ekspluatācijas slodžu summas katla ekspluatācijas laikā, skats no sāniem,
b) kalpošanas laiks, nekustīgo balstu fragments, skats no apakšas

Balstoties uz cisternvagona modeļa 15-II863 katla nogurumizturības galīgo elementu aprēķina rezultātu pie vertikālo un horizontālo ciklisko slodžu kombinācijas, var secināt, ka katla stiprība normālas ekspluatācijas režīmos ar katla balstīšanu uz visām nekustīgo balstu brusām apmierina nosacījumu (2) prasībām un katlam ir stiprības rezerve.

Ja cisternvagona katls balstās tikai uz ārējiem (augšējiem) nekustīgajiem balstiem, parādās ievērojami vietējās lieces spriegumi čaulā ap nekustīgajiem balstiem. Bojājumi no dinamiskajām gareniskajām ekspluatācijas slodzēm (3.a attēls) ir 2.2 reizes lielāki nekā pieļaujamais lielums. Šādā gadījumā nekustīgo balstu drošība ir ļoti maza – cisternvagona katla aprēķinātais kalpošanas laiks samazinās 2.3 – 2.9 reizes (3.b attēls), salīdzinot ar cisternvagona nominālo kalpošanas laiku.

4. Rāmja aprēķins

Cisternvagona rāmja nogurumizturības tika novērtēta sānu šūpošanās (pie pārkraušanas) režīmā sliežu ceļa garenisko nelīdzenumu dēļ. Ekspluatācijas laikā bieži izveidojas plaisas rāmja metināto šuvju garenvirziena (pamatsiju) un šķērsvirziena (pulkas sija) siju savienojuma zonā. Vagona – ceļa iedarbības sānu dinamiskais spēks $2Hp$ (pārrēķinot no riteņpāra uz ratiņiem) iedarbojas uz rāmi ar spēkiem F_1 , F_2 , kā parādīts 4. attēlā, kur Δ – vagona smaguma centra nobīde (no $2Hp$), h_{um} – vertikālais attālums no vagona smaguma centra līdz atsperu piestiprināšanas vietai, $2Q_{v1}$ – cisternvagona katla svārs ar kravu. Pie tam sānu dinamiskais spēks $2Hp$ ir neliels un nevar radīt spriegumus, kas ir tuvi materiāla tecēšanas robežai. Šis spēks mainās laikā ar vidējo frekvenci 1.25 Hz, kas apmierina noteikumu (2). Tādēļ tika veikts stiprības aprēķins, noteiktas maksimālo mainīgo spriegumu zonas, un balstoties uz to, izpildīts nogurumizturības aprēķins. Rāmis ir izgatavots no tērauda BcT3. Galīgo elementu tīklojuma izmēri ir 60 mm. Galīgo elementu modelis sastāv no 73192 galīgajiem elementiem.



4. attēls. Cisternvagona rāmja modelis un sānu spēka $2Hp$ pieliktās slodzes shēma

5. Rāmja aprēķina rezultāti

Rāmja nogurumizturības aprēķins pētītajā zonā tika veikts, ievērojot pieļaujamo drošības koeficientu $[n] = 1.8$, ko iegūst no formulas (skat. [2]):

$$n = \frac{\sigma_{aN}}{\sigma_{aP}} \geq [n], \quad (4)$$

kur σ_{aN} – izturības robeža (pēc amplitūdas) rāmja garensijas un šķērssijas savienojuma zonā pie bāzes ciklu skaita $N = 10^7$ stacionārā kustības režīmā;

σ_{ap} – dinamiskā sprieguma aprēķinātā amplitūda, reducētam ciklu skaitam N , kas ir ekvivalenta reāla ekspluatācijas režīma spriegumu bojājošajai iedarbībai projektētajā vagona kalpošanas laikā.

Šķērssijas apakšējai loksnei $\sigma_{ap} = 60.5$ MPa,

garensijas un šķērssijas augšējam un apakšējam plauktu savienojumam attiecīgi $\sigma_{ap} = 58.5$ MPa un $\sigma_{ap} = 55.5$ MPa.

Izturības robežu σ_{aN} aprēķina pēc formulas (skat. [2]):

$$\sigma_{aN} = \left(\frac{\sigma}{k_{\sigma}} \right)_k \cdot \left(1 - z_p \cdot v_{\sigma_{aN}} \right), \quad (5)$$

kur $\left(\frac{\sigma}{k_{\sigma}} \right)_k$ – izturības robežas samazināšanas koeficienta vidējais lielums, pieņemam 1.5 (kārbas veida sijās, kas metinātas no loksnēm ar gareniskām leņķa šuvēm bez stinguma šķērsribām un diafragmām metinājuma šuvē);

z_p – sadalījuma kvantile σ_{aN} , pieņemam 1.645;

$v_{\sigma_{aN}}$ – izturības robežas variējamais koeficients metinātām sijām un rāmim (automātiskā metināšana), pieņemam 0.05.

Tādējādi izturības robeža $\sigma_{aN} = 104$ MPa, bet aprēķinātais drošības koeficients šķērssijas augšējai loksnei $n = 1.71$, garensijas un šķērssijas augšējo un apakšējo plauktu savienojumam attiecīgi $n = 1.78$ un $n = 1.87$.

No sakarības starp aprēķināto un pieļaujamo drošības koeficientu tika aprēķināts rāmja kalpošanas laiks T_a . Aprēķins apstiprina noguruma plaisu rašanās iespējamību šķērssijas augšējās loksnes zonā ($T_a = 26$ gadi), garensijas un šķērssijas augšējo un apakšējo plauktu savienošanas zonā ($T_a = 30$ gadi) – normatīvais kalpošanas laiks ir $T_N = 32$ gadi.

6. Secinājumi

Stiprība pie daudzciklu slogojuma ir nepietiekama: katlam metināto šuvju zonā pie nekustīgiem augšējiem balstiem, rāmim šķērssijas augšējās loksnes zonā un garensijas un šķērssijas augšējo un apakšējo plauktu savienošanas zonā.

Lai palielinātu cisternvagona katla kalpošanas laiku, savlaicīgi jāpiespiež katls nekustīgo balstu savienojumos un jāmaina nekustīgo balstu koka brusas, nodrošinot katla vienmērīgu piekļaušanos. Cilindriskās daļas, katla dibena un katla apakšējās loksnes metinājumu zonās ir nepieciešams veikt metināto šuvju pārbaudi ar nesagraujošās kontroles metodēm.

Literatūra

1. Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм. Альбом – Справочник 002И-97 ПКБ ЦВ - Проектностроительное бюро, 1998.

2. Нормы для расчета и проектирования вагонов, железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Изменения и дополнения №1 и №2 ВНИИВ-ВНИИЖТ-Москва, 1996.

Boiko A., Auziņš J., Januševskis J. Cisternvagona stiprības novērtējums pie daudzciklu sloojuma

Darbā veikts cisternvagona katla un rāmja nogurumizturības novērtējums. Aprēķini tika veikti ar galīgo elementu metodi. Dotā uzdevuma sarežģītības dēļ cisternvagona katls un rāmis tika aprēķināti atsevišķi. Cisternvagona katla kalpošanas laiks tika novērtēts, ievērojot vertikālo un garenisko dinamisko slodžu iedarbību pie dažādiem balstīšanas apstākļiem uz vagona rāmja. Cisternvagona rāmja nogurumizturība tika novērtēta sliežu ceļa garenisko nelīdzenumu izraisītajā sānu šūpošanās (pie pārkraušanas) režīmā. Ja katls turas tikai uz ārējiem (augšējiem) nekustīgajiem balstiem, aprēķinātais kalpošanas laiks ir bīstami mazs un sastāda tikai 11 – 14 gadu, mazāk nekā nominālais kalpošanas laiks - 32 gadi. Cisternvagona rāmja stiprība pie daudzciklu sloojuma arī ir nepietiekama. Aprēķins apstiprina noguruma plaisu rašanās iespējamību šķērssijas augšējās loksnes zonā (26 gadi), kā arī garensijas un šķērssijas augšējo un apakšējo plauktu savienošanas zonā (30 gadi). Lai nodrošinātu nominālo cisternvagona kalpošanas laiku ir nepieciešama savlaicīga pārbaude iepriekš minētajās zonās.

Boyko A., Auzins J., Janushevskis J. Evaluation of Strength of Tank Car Under Repeated Loading

In this paper the fatigue strength of frame and tank of the railway tank car was estimated. Calculations were carried out by finite element method. Because of high difficulty of mentioned calculations the tank and frame were calculated separately. Lifetime of tank of the railway tank car was estimated on the basis of the damages from the vertical and longitudinal dynamic loads at the different schemes of constraints. Lifetime of frame of the railway tank car was calculated on the basis of the safety factor at the rolling due to longitudinal irregularities of the railway track. If the tank is supported only on outside (upper) bearings then calculated lifetime is dangerously small and is only 11 – 14 years, significantly less than nominal lifetime 32 years. The strength of frame of the railway tank car under high-cycle loading is insufficient too. Calculation confirms possibility of fatigue cracks appearance in zone of upper plate of cross-beam (26 years) and in zone of joint of upper and lower flanges of longitudinal and cross-beam (30 years). It is necessary to do test of above named zones for guarantee of lifetime of railway tank car.

Бойко А., Аузиньш Я., Янушевский Я. Оценка ресурса рамы вагона-цистерны при многоцикловом нагружении

В данной работе выполнена оценка усталостной прочности котла и рамы вагона-цистерны. Расчеты выполнены с использованием метода конечных элементов. В связи с большой ресурсоемкостью задачи котел и рама вагона-цистерны рассчитывается отдельно. Срок службы котла вагона-цистерны оценивался на основе повреждаемости от действия вертикальных и продольных динамических нагрузок при различных условиях опирания на раму вагона. Срок службы рамы вагона-цистерны определялся на основе расчета коэффициента запаса при режиме боковой качки (при перевалке) из-за продольных неровностей рельсового пути. Если котел опирается только на внешние (верхние) лежневые опоры, тогда рассчитанное время службы опасно мало и составляет только 11 – 14 лет, что значительно меньше, чем номинальный срок службы - 32 года. Прочность рамы вагона-цистерны при многоцикловом нагружении также недостаточна. Расчет подтверждает возможность появления усталостных трещин в зоне верхнего листа поперечной балки (26 лет) и в зоне соединения верхних и нижних полок продольной и поперечной балок (30 лет). Чтобы обеспечить срок службы вагона-цистерны, необходимо своевременное обследование выше упомянутых зон.