



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Dmitrijs Gorbačovs**

# **GUMIJAS KORDA ELASTĪGO SAJŪGU UN TO STIPRINĀJUMA BULTSKRŪVJU ATTEIKUMU PĒTĪJUMS**

Promocijas darbs



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Transporta institūts

**Dmitrijs Gorbačovs**

Doktora studiju programmas "Transports" doktorants

## GUMIJAS KORDA ELASTĪGO SAJŪGU UN TO STIPRINĀJUMA BULTSKRŪVJU ATTEIKUMU PĒTĪJUMS

**Promocijas darbs**

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

Konsultanti  
*Dr. sc. ing.* ALEKSANDRS BOIKO  
*Dr. sc. ing.* JĀNIS EIDUKS

Rīga 2024

NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA  
Eiropas Reģionālās  
attīstības fonds

---

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektā Nr. 8.2.2.0/20/1/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 23.februārī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas 6b ielā, 513. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesors *Dr. habil. sc. ing.* Vladimirs Šestakovs,  
Rīgas Tehniskā universitāte

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

Profesors *Dr. sc. ing.* Valeriy Kuznetsov  
*Instytut Kolejnictwa*, Polija

## APSTIPRINĀJUMS

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

Dmitrijs Gorbačovs ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 3 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 198 attēli, 51 tabulas, 12 pielikumi, kopā 207 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 89 nosaukumi.



## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

C – ogleklis  
Mn – mangāns  
Si – silīcijs  
V – vanādijs  
Cr – hroms  
N – slāpekļis  
P – fosfors  
S – sērs  
Al – alumīnijs  
Cu – varš  
Ni – niķelis  
Ti – titāns  
W – volframs  
Mo – molibdēns  
Co – kobalts  
Pb – svins  
Zr – cirkonijs  
HNO<sub>3</sub> – slāpekļskābe  
HB – cietības vērtība pēc Brinela  
ER1 – Rīgas elektrovilciens, 1. tips  
ER2 – Rīgas elektrovilciens, 2. tips  
ER2T – Rīgas elektrovilciens, 2. tips, ar rekuperatīvo un reostatu bremsēšanu  
EP2P – Rīgas elektrovilciens, 2. tips, ar reostatu bremsēšanu  
EP2T – Rīgas elektrovilciens, 2. tips, ar rekuperatīvo un reostatu bremsēšanu  
EIII2 – Luhanskas elektrovilciens, 2. tips  
ET2 – Toržokas elektrovilciens, 2 tips  
EP9 – Rīgas elektrovilciens, 9. tips  
EIII9 – Luhanskas elektrovilciens, 9. tips  
ED9 – Demihovas elektrovilciens, 9. tips  
DR1A – Rīgas dīzeļvilciens, 1. tips  
TGM4 – manevru dīzeļlokomotīve ar hidropārvadu, 4. modelis  
TGM6 – manevru dīzeļlokomotīve ar hidropārvadu, 6. modelis  
TEM2 – manevru dīzeļlokomotīve ar elektropārvadu, 2. modelis  
TA-2 – elektrovilcienu tehniskā apkope 2 apjomā  
TA-3 – elektrovilcienu tehniskā apkope 3 apjomā  
TR-1 – elektrovilcienu atjaunošanas remonts 1 apjomā  
TR-3 – elektrovilcienu atjaunošanas remonts 3 apjomā  
TR-3+ – elektrovilcienu atjaunošanas remonts 3 apjomā ar kalpošanas termiņa pagarinājumu  
VR – elektrovilcienu atjaunošanas vidējais remonts  
GR – elektrovilcienu atjaunošanas galvenais remonts  
GEM – galīgo elementu modelēšana  
LDz – valsts akciju sabiedrība “Latvijas dzelzceļš”

# ANOTĀCIJA

Darbā izstrādāta gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu noveršanas metodika, lai savlaicīgi izvērtētu gumijas korda sajūga bojājuma cēloņus un novērtētu apvalka nospriegojuma stāvokli pie esošajām slodzēm. Metodika tika aprobēta uz gumijas korda sajūgiem, kuri plaši pielietoti Latvijas dzelzceļa ritošā sastāvā. Darbā apkopota un detalizēti izpētīta gumijas-korda sajūgu un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu statistika laika periodā no 2012. līdz 2021.gadam. Tika veikts dažādu starptautisku autoru gumijas korda sajūgu pētniecības darbu apskats. Latvijas dzelzceļa apstākļos tika noteikta spēku un spriegumu iedarbība uz ritošā sastāva gumijas korda sajūgu, kā arī noteikta gumijas korda cietība dažādos temperatūras diapazonos. Apkopoti dati par gumijas korda sajūga slīpuma leņķiem: radiālā un aksiālajā novirzē. RTU laboratorijā tika veikti dažādu gumijas korda sajūga paraugu vienpusējas izstiepšanas testi un iegūti slodzes deformācijas grafiki. Programmā SolidWorks tika veikts stiprības aprēķins un slodžu meklēšana, kuras ietekmē gumijas korda sajūga apvalka defektu rašanos un attīstību. Pilna mēroga izmēģinājumu gaitā uz stiepes aprīkojuma tika veikta sajūga fragmentu formas meklēšana, ar kuras palīdzību iespējams izpētīt sajūgu apvalku visvairāk noslogotās un bojātās vietas. Tika izveidoti testos izmantoto paraugu un virsmas slāņa plākšņu apvalka fragmentu 3D modeļi. Veikta gumijas korda sajūga apvalka frekvences analīze, lai noteiktu tā pašfrekvences, kā rezultātā tika konstatētas kritiskās frekvences, no kurām ekspluatācijas laikā jāizvairās. RTU laboratorijā, pamatojoties uz eksperimentiem, tika noskaidroti gumijas korda sajūga bultskrūvju bojājuma cēloņi. Pamatojoties uz veiktajiem pētījumiem, ko autors ir veicis promocijas darba ietvaros, ir izstrādāta metodika, lai savlaicīgi izvērtētu gumijas korda sajūgu bojājuma cēloņus un novērtētu apvalka nospriegojuma stāvokli pie esošajām slodzēm. Ir ierosināts aprīkot ritošo sastāvu ar triecienvibrācijas ierīcēm, lai kontrolētu bultskrūvju stāvokli ekspluatācijas laikā, un, lai samazinātu šādu sajūgu bultskrūvju bojājumu skaitu.

Darba struktūra un apjoms. Promocijas darbs sastāv no ievada, 3 nodaļām, 12 pielikumiem, kopējais apjoms 208 lpp. Kopējais atēlu skaits – 198; tabulas – 51. Literatūras avotiem – 89.

## ANNOTATION

In the work, a methodology for preventing the failure of rubber cord couplings and their fastening bolts has been developed in order to timely assess the causes of damage to rubber cord joints and assess the state of casing tension under the existing loads. The methodology was tested on rubber cord couplings, which are widely used in the rolling stock of Latvian Railways. The paper collects and investigates in detail the statistics of failures of rubber-cord couplings and their anchoring bolts for the period from 2012-2021. A review of scientific research papers on rubber-cord couplings by various international authors was carried out. The actions of forces and stresses under operating conditions on the rolling stock of the Latvian Railway have been determined, and also the hardness of rubber-cord couplings in different temperature ranges has been determined. Data on rubber cord couplings angles in radial angular and axial deflection of shafts is collected. Experiments on uniaxial tension of different samples of rubber-cord coupling have been carried out in RTU laboratory; stress-strain diagrams have been obtained. In the SolidWorks software strength calculation and search of loads influencing occurrence and development of defects of rubber-cord coupling shell has been performed. In the course of full-scale tests on a tensile testing machine, a search was made for the shape of the coupling fragments, with the help of which it is possible to investigate the most stressed and damaged areas of the coupling shells. 3D models of specimen shell fragments and surface layer plates used in the tests were created. The frequency analysis of the rubber-cord coupling shell to determine its natural frequencies was performed, and critical frequencies to be avoided during operation were found. In the RTU laboratory, on the basis of experiments, the reasons for the destruction of the rubber-cord coupling bolts were determined. On the basis of the comprehensive researches carried out by the author as part of the promotion work, a methodology has been developed for the timely investigation of the causes of destruction of rubber-cord couplings and an estimation of a stressed condition of a shell of a coupling from operating loadings has been developed. It has been proposed to equip vehicles with shock and vibration bolt condition monitoring during operation devices to reduce the number of bolt failures of such couplings.

Structure and scope of work. The doctoral thesis consists of an introduction, 3 chapters, 12 appendices, a conclusion and a list of references, with a total volume of 208 pages. The total number of figures is 198; tables – 51. The list of references includes 89 sources.

# SATURS

ANNOTATION .....	6
IEVADS .....	9
1. PĒTĪJUMA OBJEKTA APSKATS .....	11
1.1. Elastīgo sajūgu klasifikācija .....	11
1.2. Gumijas korda sajūgi izmantojamie Latvijas dzelzceļa ritošā sastāvā.....	14
1.3. Gumijas korda sajūga apskate remonta sistēmas ietvaros .....	18
1.4. Gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju bojājumu analīze Latvijas dzelzceļā .....	19
1.5. Ukrainas dzelzceļa gumijas korda sajūgu atteikumu analīze.....	27
1.6. Gumijas korda sajūga atteikumu analīze pa sezonām .....	28
1.7. Gumijas korda sajūgu atteikumu finanšu teriņu izpēte .....	30
1.8. Gumijas korda sajūgu zinātniskās izpētes apskats .....	32
1.9. Pirmās nodaļas secinājumi.....	36
2. GUMIJAS KORDA SAJŪGU UN TO STIPRINĀJUMA BULTSKRŪVJU ATTEIKUMA NOVĒRŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE .....	38
2.1. Statistisko datu apkopojums par bojājumu zonām.....	38
2.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas .....	39
2.3. Gumijas korda sajūgu ģeometrisku izmēru kontrole.....	41
2.4. Gumijas korda sajūga cietības pārbaude. ....	42
2.5. Gumijas korda sajūga sairšanas spēku aprēķins .....	44
2.6. Gumijas korda sajūga noviržu mērījumu.....	48
2.7. Gumijas korda sajūga frekvenču analīze .....	49
2.8. Gumijas korda sajūga materiāla īpašību pētījumi .....	50
2.9. Gumijas korda sajūga modeļa izstrāde GEM programmas pakotnē .....	51
2.10. Bultskrūvju bojājumu noteikšana ar dažādam metodēm .....	52
2.11. Metodikas pielietošanas blokshēma .....	53
2.12. Nodaļas secinājumi .....	54
3. METODIKAS APROBĀCIJA UZ TOROIDĀLO GUMIJAS KORDA SAJŪGA PIEMĒRU .....	55
3.1. Toroidāla gumijas korda sajūga bojājumu zonas noteikšana .....	55
3.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas .....	56
3.3. Sajūga ģeometrisko izmēru kontrole .....	59
3.4. Cietības noteikšana pēc “Shore A” metodes atkarībā no temperatūras .....	62

3.5. Gumijas korda sajūga sagraušanas spēku aprēķins .....	64
3.6. Gumijas korda sajūgu aksiālās radiālās un leņķiskas novirzes mērījumu rezultāti ....	67
3.7. Sajūga apvalka viena virziena deformācijas izmēģinājumu rezultāti .....	72
3.8. Modelēšanas programmas izvēle .....	89
3.9. <i>SolidWorks</i> programma aprēķināšanas modeļa izveidošana .....	92
3.10. Gumijas korda sajūga elastīgā elementa aprēķins ar GEM modelēšanas programmas pakotnes palīdzību .....	97
3.10.1. Sajūga apvalka virsmas slāņa gumijas plāksnes modelēšana .....	97
3.10.2. Gumijas korda sajūga apvalka fragmenta modelēšana .....	102
3.11. Gumijas korda sajūga apvalka pilna modeļa modelēšana.....	114
3.12. Radiālo aksiālo un leņķisko noviržu aprēķinu rezultāti, kas iedarbojas uz gumijas korda sajūgu.....	119
3.13. Gumijas korda sajūga frekvences analīze .....	122
3.14. Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju lūzumu rakstura un cēloņa veida apskats .....	127
3.14.1. Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju M-24 sagraušana cēloņu izpēte .....	128
3.14.2. Gumijas korda sajūga stiprināšanas M24 bultskrūvju sagraušanas veidu noteikšana .....	129
3.14.3. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot statisko slodzi.....	130
3.14.4. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot ciklisko slodzi.....	132
3.14.5. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana pie M-24 bultskrūvju triecienizturības pārbaudes .....	136
3.15. M-24 bultskrūvju pētišanas standarta <i>ISO 898-1:2013</i> un <i>EN 10083- 3:2007-01</i> atbilstība prasībām.....	138
3.16. Bultskrūvju paraugu metalogrāfiskā analīze.....	145
3.17. Bultskrūvju M-24 mikrostruktūras defektu veidošanās analīze pie dažādiem motorvagonu nobraukuma diapazoniem .....	148
1.18. Bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīču projektēšana .....	152
3.19. Triecienvibrācijas ierīces testēšana.....	155
3.20. Ekonomiskais efekts no metodikas ieviešanas un triecienvibrācijas ierīču ieviešanas ekspluatācijā.....	164
SECINĀJUMI .....	165
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	167
PIELIKUMI .....	172

# IEVADS

Mūsdienās mašīnbūvē tiek lietoti dažāda veida sajūgi. Rotācijas momenta pārraidei starp agregātiem, kas pakļauti nozīmīgām dinamiskām, vibrējošām un trieciena slodzēm, izmanto sajūgu, ko izgatavo no augsti elastīga silikona, gumijas vai gumijas ar nostiprinātām šķiedrām un tērauda kordu. Šāda tipa sajūgi ir paredzēti ievērojamu leņķu, asu vai radiālu nobīžu kompensēšanai. Maksimāli iespējamās nobīdes ražotājs norāda izstrādājuma pasē vai maksimālās nobīdes atzīmēti standartos. Sajūgus ar augsti elastīgu U vai toroidāla profila apvalku lieto dažādās piedziņās: celtniecības mašīnās un ceļu būves tehnikā, mašīnbūves darbagaldos, velmēšanas un urbšanas iekārtās, sūkņu agregātos, transportā – motorvagonu ritošajā sastāvā, kā arī dažāda veida kuģu spēka piedziņā.

Katru gadu Eiropā tiek fiksēts ievērojams rūpniecisko iekārtu neplānoto remontu skaits saistībā ar elastīgā sajūga atteici. Elastīgās gumijas korda sajūga atteice izraisa rūpnieciskās iekārtas vai vilces ritošā sastāva vienības apturēšanu neplānotā remonta veikšanai. Savukārt neplānotā remonta veikšanai nepieciešams finansējums, lai atjaunotu iekārtas darbderīgumu. Vidēji viena neplānotā remonta cenu veido elastīgā sajūga cena, tai pievienotā agregāta nomaiņas, kā arī ražošanas iekārtu dīkstāves izmaksas. Latvijā laika periodā no 2012. līdz 2021. gadam VAS “Latvijas dzelzceļš” uzņēmumā, kas nodarbojas ar ritošā sastāva remontu, ir bijis 101 gadījums, kad noticis elastīgā gumijas korda sajūga atteikums. Finansiālie zaudējumi, lai veiktu bojātā sajūga nomaiņu, vidēji veidoja 575–594 eiro atkarībā no sajūga veida. Tāpēc rodas nepieciešamība savlaicīgi atklāt atteices iemeslu un ieviest mūsdienīgus tehniskus risinājumus, lai samazinātu neplānotos remontus un finanšu tēriņus saistībā ar gumijas korda sajūga atteici. Līdz ar to, izanalizējot radušos situāciju, promocijas darba autors ir izstrādājis savu aprēķina metodiku un ārējo faktoru ietekmes vērtējumu uz gumijas korda sajūga un to sānu virsmas apvalku. Metodika izstrādāta un aprobēta, par piemēru ņemot VAS “Latvijas dzelzceļš” elektrovilciens ritošā sastāva elastīgo sajūga pievadu ar toroidāla veida profila apvalku, kas uzstādīts *ER2* sērijas elektrovilciena vagoniem, un U veida profila apvalku, kas uzstādīts *ER2T* sērijas elektrovilciena vagoniem.

## Darba mērķi un uzdevumi

**Darba mērķis:** Gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu iemeslu izpēte, metodikas izstrāde šīs parādības iespējamības samazināšanai.

### Darba uzdevumi:

1. Apkopot statistiskos datus par gumijas korda sajūgu un bultskrūvju atteikuma un sistematizēt tos.
2. Izstrādāt gumijas korda sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu novēršanas metodiku un veikt to aprobāciju.
3. Modelēšanas programmas pakotnē izveidot gumijas korda sajūga elastīgā elementa aprēķina modeli.
4. Izstrādāt vibrācijas un triecienslodzes kontroles sistēmu, kas uztver tās gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvēs.

5. Izstrādāt rekomendācijas gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu samazināšanai.

#### **Pētījuma metodes.**

1. Eksperimenti gumijas korda materiāla fragmentu un gumijas korda sajūga virsmas gumijas slāņa īpašību noteikšanai pie stiepšanas vienas virzienā.
2. Galīgo elementu modelēšana *SolidWorks Simulation* vidē, izmantojot nelineārus augsti elastīga materiāla modeļus.
3. Modelēšana *SolidWorks Simulation* vidē, tika veikti sajūgu apvalku modālo formu, frekvenču un spriedzes-deformējošā stāvokļa pētījumi, lai novērtētu to atteices cēloņus.
4. Lai novērtētu gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju sagraušanas cēloņus, tika veiktas bultskrūvju dinamiskās un statiskās stiepes pārbaudes, kā arī bultskrūvju materiāla mikrostrukturālā un ķīmiskā analīze.

#### **Darba zinātniska novitāte.**

1. Izstrādāta metodika savlaicīgai atteikumu novēršanai gumijas korda sajūgu apvalkam un to stiprinājuma bultskrūvēm.
2. Izstrādāts datormodelis *SolidWorks Simulation* vidē. Izmantota *Mūnija–Rivlina* metode, kas ļauj novērtēt slodzes ietekmi uz gumijas korda sajūgu un to maksimālas kritiskās vērtības, bīstamās frekvences un sprieguma lielumus pie dažādiem ātruma diapazoniem.
3. Izgudrota triecienvibrācijas ierīce, kas dod iespēju pastāvīgi uzkrāt un analizēt datus par trieciena spēku, ko uztver bultskrūves transportlīdzekļa ekspluatācijas laikā.

**Iegūto rezultātu ticamība** rezultātu ticamība tiek nodrošināta, vērtējot un salīdzinot rezultātus ar citu autoru rezultātiem un ar datiem, kas iegūti, vairāku sajūgu apvalku vienpusēji deformējot pilna mēroga eksperimentu gaitā. Eksperimentālo datu ticamību nodrošina mērījumu precizitāte un salīdzināšana ar normatīvās dokumentācijas datiem.

#### **Darba praktiskā nozīme.**

Rekomendācijas, kas izstrādātas, pamatojoties uz veiktajiem pētījumiem, ļaus samazināt gumijas korda sajūga atteikumus ekspluatācijā.

Ar izstrādāto bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīces palīdzību var pastāvīgi uzkrāt un analizēt datus par trieciena spēku, lai samazinātu dzelzceļa transporta ritošā sastāva vai citu nozaru transportlīdzekļu neplānoto remontu skaitu tā bojājumu dēļ, kā arī lai samazinātu avāriju vai citu negadījumu skaitu.

# 1. PĒTĪJUMA OBJEKTA APSKATS

Līdz šim brīdim, lai kompensētu slodzes starp vārpstām, tika izmantoti dažādi elastīgie sajūgi. Mašīnbūvē elastīgo sajūgu grupā ir sastopamas dažādas sajūgu konstrukcijas – ieliktnu-pirkstu, sajūgi ar elastīgu elementu zvaigznītes formā, toroidālā formā un citi. Ierīču vārpstās šāda tipa sajūgu savienojuma zonā parasti ir aksiālas, radiālas, leņķiskas novirzes. Tāpēc savienojumi ir pakļauti ievērojamām mehāniskām un termiskām slodzēm. Šādas slodzes bieži izraisa elastīgo elementu un stiprinājuma elementu savienojumu bojājumus.

## 1.1. Elastīgo sajūgu klasifikācija

Jebkuru sajūgu, kas pieļauj zināmu relatīvu kustību starp savienotam vārpstām, un nodrošina vibroizolāciju, sauc par elastīgo sajūgu. Mūsdienu mašīnbūvē plaši tiek izmantoti elastīgie sajūgi ar elastīgiem elementiem, kuri paredzēti griezes momenta pārraidei starp agregātiem no vienas vārpstas uz otru. Ja vārpstas būtu ideāli izlīdzinātas un mašīnas darbības laikā nekustētos un nevibrētu, tādā gadījumā nebūtu vajadzīgi elastīgie sajūgi. Elastīgie sajūgi darbības laikā tiek pakļauti ievērojamām vibrācijām, dinamiskām un triecien slodzēm plašā mēroga diapazonā. Elastīgie sajūgi samazina triecienus un sitienus, kā arī kalpo kā aizsardzības līdzeklis pret rezonējošām vērpes vibrācijām, kas rodas nevienmērīgas rotācijas rezultātā, turklāt elastīgiem sajūgiem pieļauj salīdzinoši lielas savienoto vārpstu asu nobīdes. Dažiem elastīgo sajūgu veidiem ir spēja kompensēt radiālās vārpstas novirzi (kas var būt līdz 10 mm).

Elastīgie sajūgi atšķiras no citiem sajūgu veidiem ar savu konstrukcijas vienkāršību, berzes virsmas neesamību, turklāt savienojumi ir ļoti nejutīgi pret putekļiem un mitrumu, kā arī tiem piemīt elektriskās izolācijas spēja. Elastīgie sajūgi konstruktīvi izgatavoti no gumijas vai gumijas korda materiāla, rotācijas apvalku veidā. Elastīgajiem sajūgiem ir dažādas formas un izmēri, kas ir vispārīgs termins un ar nosaukumu ietver daudzus sajūgu veidus, kurus izmanto mašīnbūvē un dzelzceļa ritošā sastāvā. Elastīgo sajūgu konstrukcijas ir ļoti dažādas, un tām ir savas īpašības, kas nosaka to pielietojuma jomu [75].

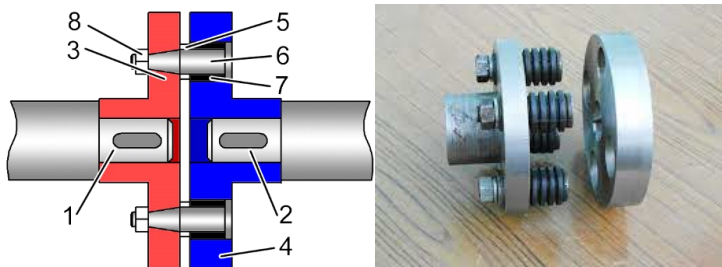
Lielo elastīgo sajūgu galvenā īpašība ir stingrība vai (stingrības apgrieztā vērtība) pakļāvīgums un deformējamība, t.i. spēja pārveidot enerģiju siltumā elastīgo elementu deformācijas laikā. Eksploatācijas laikā elastīgie sajūgi periodiski tiek pakļauti atteicām, un pēc izejas no ierindas elastīgus sajūgus, var nomainīt, bez agregātu nobīdes savienojumā ar sajūgu, kas ir svarīgi, novēršot sajūgu atteicu seku likvidēšanu.

Mašīnbūvē ir zināmi dažāda veida elastīgie sajūgi, kuru konstrukcijām ir vairākas iezīmes.

- **Elastīgais ieliktnu-pirkstu sajūgs**

Elastīgais ieliktnu-pirkstu sajūgs sastāv no diviem disku pus sajūgiem, kur vienām koniskos urbumos ir nostiprināti savienojošie pirksti ar gofrētiem gumijas ieliktniem, kas paredzēti griezes momenta pārnesšanai no vienas vārpstas uz otru un kalpo dinamisko slodžu kompensēšanai. Elastīgā ieliktnu - pirksta sajūga vispārējais skats ir parādīts (1.1. att.).





1.1. att. Elastīgais ieliktnu-pirkstu sajūgs.

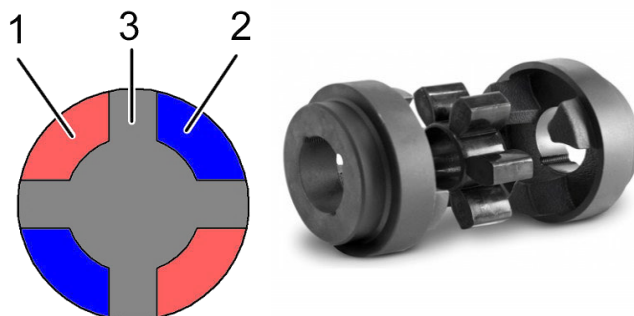
1; 2 – vadoša un vadāma vārpsta; 3; 4 – pussajūgi; 5 – distances gredzens;  
6 – savienojošie pirksti; 7 – elastīgs elements; 8 – stiprinājuma uzgrieznis.

Elastīgo ieliktnu – pirkstu sajūgu plaši pielieto mašīnbūves nozarē, izmantojot griezes momenta pārraidei vidēji no 6,3 līdz 16000 N m. Gumijas ieliktnu neliela biezuma dēļ, šāda veida sajūgam ir zems pakļāvīgums, kas rezultātā kompensē nelielas vārpstas novirzes.

Ekspluatācijā ir pieļaujama vārpstu radiālā nobīde līdz 0,6 mm, leņķiskā nobīde līdz 1°30' [58]...[75]. Lielas vārpstu aksiālas, radiālas un leņķiska novirzes samazina gumijas ieliktnu ilgmūžību, noslogojot vārpstas ar papildu lieces spēku.

- **Elastīgie sajūgi ar elastīgu elementu zvaigznītes formā**

Elastīgie sajūgi ar zvaigznītes formas elastīgo elementu pieder pie sajūgu klases ar gumijas elastīgiem elementiem, kas darbojas uz saspiešanu. Salīdzinājumā ar citiem sajūgu veidiem, kur elastīgie elementi darbojas bīdes un vērpes apstākļos, zvaigznītes veida sajūgiem ir lielāka noslodzes iespējamībai un attiecīgi mazāki gabarītmēri, kas ekonomē materiālu. Tomēr šo savienojumu vērpes un radiālā stingrība ir diezgan augsta, kā rezultātā to triecienu amortizēšanas un kompensējošās spējas ir mazākas nekā cita veida elastīgajiem sajūgiem. Tomēr piedziņās ar zemu vibrācijas frekvenci un salīdzinoši nelielu vārpstu asu novirzi sajūgos ar zvaigznīti darbojas diezgan apmierinoši. Elastīgo sajūgu uzbūve zvaigznītes formā parādīta (1.2 att.).



1.2. att. Sajūgs ar elastīgu elementu zvaigznītes formā.

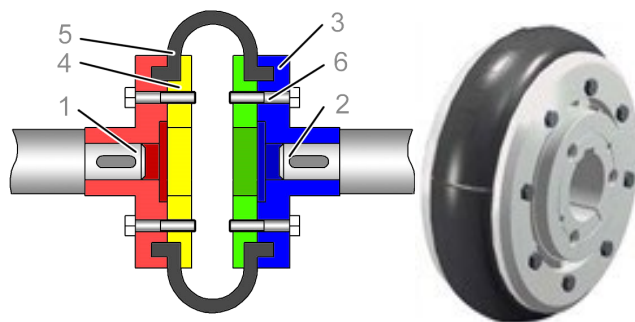
1; 2 – vadoša un vadāma vārpsta; 3 – elastīgais elements zvaigznītes formā.

Elastīgi izciļņu sajūgi, zvaigznītes formā, tiek piemēroti, lai savienotu asu nenobīdītās cilindriskās vārpstas, pārnesot griezes momentu vidēji no 2,5 līdz 400 N m. [75] Šādu sajūgu veids ir diezgan kompakts un drošs ekspluatācijā, tam ir zema pakļautība, bet darbaspēja (drošums) strauji samazinās, palielinoties vārpstas novirzei. Sajūgs pieļauj radiālās vārpstas novirzi līdz 0,4 mm, leņķisko novirzi līdz  $1^{\circ}30'$ . [75]

Būtisks divu iepriekš uzskaitīto elastīgo sajūgu veidu trūkums ir mazas vārpstu radiālās nobīdes, kā arī mazas griešanās momentu pārnese. Savukārt, lai pārnestu lielāku griezes momentu un lielu radiālo nobīdi vislabāk piemēroti elastīgie gumijas korda sajūgi ar toroidālajiem apvalkiem. Sajūgam ar toroidālo apvalku ir augstas elastības un kompensējošās īpašības, pateicoties lielajām gumijas deformācijas īpašībām.

- **Elastīgie sajūgi ar toroidālam gumijas apvalkiem**

Elastīgie sajūgi ar toroidālo apvalku, plaši izmanto sūkņēšanas agregātos, ceļu būves mašīnas un ražošanas iekārtu piedziņās, urbšanas iekārtās, ūdens transporta kuģu spēka piedziņās, kā arī dīzeļlokomotīvu palīgiekārtās, elektrolokomotīvu un motorvagonu ritošajā sastāvā.



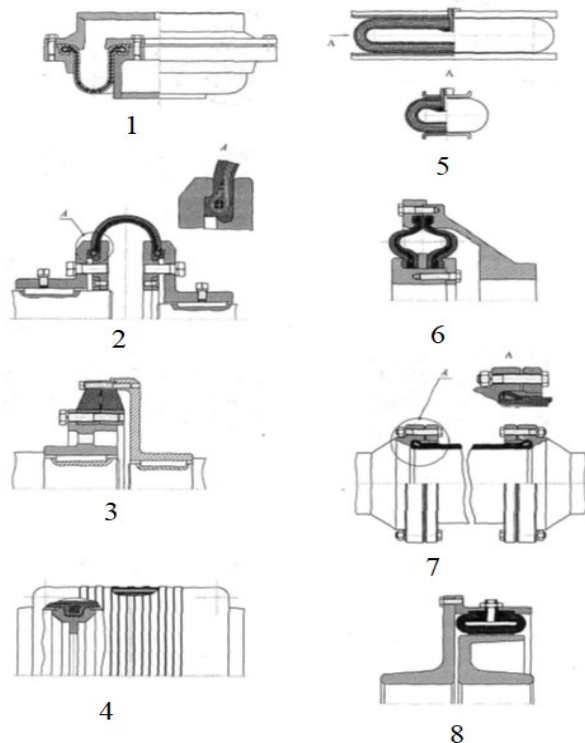
1.3. att. Elastīgais sajūgs ar toroidālo apvalku:

1, 2 – vadoša un vadāma vārpsta; 3 – pussajūgi; 4 – piespiežamie gredzeni; 5 – toroidālas gumijas korda elastīgais sajūgs; 6 – bultskrūvju stiprinājuma elementi.

Gumijas korda elastīgie sajūgi, paredzēti, lai pārnestu noteiktu griezes momenta vērtību starp nesavirzīti izvietotām vārpstām mehānismos, ar dinamiskām un triecien slodzēm, un attiecas pie svarīgākajām ierīcēm, kas plaši pārstāvētas mūsdienu mašīnbūvē un dzelzeļa ritošajā sastāvā. Šie sajūgi atšķiras no citiem sajūgu veidiem ar konstrukcijas vienkāršību, turklāt palīdz samazināt vibrācijas un trokšņa līmeni, kā arī tiem piemīt elektroizolācijas spējas.

Sajūgs ar toroidālo apvalku ir neaizvietojams mehānismos, kuros ir problemātiski nodrošināt vilces elektrodzinēja vārpstu izlīdzināšanu ar vilces reduktoru vai izpildmehānismu, kas darbojas vibrācijas un vārpstu novirzes apstākļos. Elastīgais sajūgs ar toroidālo apvalku ir paredzēts savirzītu asu cilindrisku vārpstu savienošanai, pārvadot griezes momentu vidēji no 20 līdz 31 500 N m. Sajūgs pieļauj radiālās vārpstas nobīdi līdz 15 mm, leņķisko nobīdi līdz  $4^{\circ}30'$ . [75].

Rūpniecisko iekārtu ekspluatācijā var sastapt konstrukcijas pamata ar gumijas korda apvalku un gumijas-metāliski elastīgo elementu, to galvenie veidi redzami 1.4. attēlā.



1.4. att. Konstruktijas, ar gumijas korda apvalku un gumijas-metāliski elastīgo elementu pamatā:

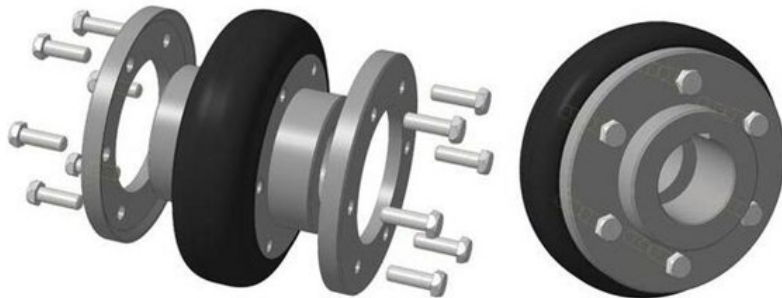
- 1 – diafragmas tipa pneimatiskais amortizators ar gumijas korda apvalku; 2 – augsti elastīgs sajūgs ar gumijas korda toroidālo apvalku; 3 – diafragmas tipa augsti elastīgs sajūgs ar gumijas metāliskiem elastīgiem elementiem; 4 – “Kaimans” tipa hermetizējošais elastīgais elements naftas un gāzes nozarei; 5 – spilvena tipa pneimatiskais amortizators ar gumijas korda apvalku. 6 – sajūgs ar diafragmas tipa gumijas korda apvalkiem. 7 – gumijas korda īscaurule; 8 – kopne – pneimatiskais sajūgs.

1.2. nodaļā tiks apskatīti toroidālo elastīgo sajūgu pamatveidi, kuri pielietoti Latvijas dzelzceļa ritošā sastāvā.

## 1.2. Gumijas korda sajūgi izmantojamie Latvijas dzelzceļa ritošā sastāvā

Gumijas korda sajūgiem, izmantojamiem ritošajā sastāvā Latvijas dzelzceļā ir augstas kompensējošās īpašības, kas ļauj tos izmantot piedziņās ar ievērojamām savienoto vārpstu radiālajām, aksiālajām un leņķiskajām nobīdēm, kas pakļautas plašā vērtību diapazonā statiskajām, vibrācijas-trieciena un dinamiskām slodzēm. Gumijas korda sajūgi izmantojamie ritošajā sastāvā, attiecas pie atbildīgajiem mezgliem, kas ļauj pārnest lielus griezes momentus. Ļoti bieži gumijas korda sajūga drošums nosaka visa ritošā sastāva vilces līdzekļa vienības drošumu. Gumijas korda sajūgu konstrukcijas un izmēri, izmantojamie ritošā sastāvā ir ļoti atšķirīgie, tie

atkarīgi no darba apstākļiem, griezes momenta pārraidei, kas, savukārt, nosaka to pielietojuma jomu. Gumijas korda sajūga konstrukcijas piemērs redzami 1.5. attēlā.



1.5. att. Gumijas korda sajūga kopskats.

Uz doto brīdi Latvijas dzelzceļā ritošajā sastāvā gumijas korda sajūgi tiek izmantoti griezes momenta pārvadīšanai elektrovilcienos, dīzeļvilcienos, kā arī manevru dīzeļlokomotīvēs. Manevru dīzeļlokomotīvēm *TGM4* [81], *TEM2* [82], *TGM6* [83] ir uzstādīts  $500 \times 130$  mm izmēra gumijas korda sajūgs. Sajūga funkcija, lai pārnestu griezes momentu no enerģētiskas iekārtas vārpstas uz hidropārvada vārpstu.



1.6. att. Gumijas korda sajūgs  $500 \times 130$  mm dīzeļlokomotīvēm *TGM4*, *TEM2*, *TGM6*.

ČME-3 sērijas manevru dīzeļlokomotīvē izmanto  $405 \times 100$  mm izmēra gumijas korda sajūgu. Šis sajūgs paredzēts griezes momenta pārnesei no hidromehāniskā reduktora uz kompresora vārpstu [69].



1.7. att. Gumijas korda sajūgs dīzeļlokomotīvēm ČME-3:  
a – kopskats; b – novietošanas vieta.

*DRIA* sērijas dīzeļvilcienos pielieto divus gumijas-korda sajūga tipus [67] Griezes momenta pārnesei no enerģētiskas iekārtas vārpstas uz hidropārvada vārpstu - izmanto gumijas-korda sajūgu ar izmēru 580 x 130 mm (1.8. a. att.).

Griezes momenta pārnesei no dīzeļdzinēja vārpstas uz starterģeneratora vārpstu izmanto gumijas-korda sajūgu, ar izmēru 360 x 100 mm (1.8. b. att.).



1.8. att. Gumijas korda sajūgs *DRIA* sērijas dīzeļvilcieniem:  
a – sajūgs 580 x 130 mm; b – sajūgs 360 x 100 mm.

Gumijas korda sajūgs elektrovilcienos ir paredzēts griezes momenta pārvadīšanai no vilces dzinēja vārpsta uz riteņpāra reduktoru [74], un piestiprināts no vienas puses pie vilces dzinēja vārpsta atlokiem, no otras puses pie mazā zobrata vārpstas vilces reduktora, ar *M-24* bultskrūvju palīdzību. Gumijas korda sajūga izmantošana ļauj izlīdzināt dinamiskās slodzes un nodrošināt ritošā sastāva vienmērīgu darbību [85]

Elektrovilcieniem izmanto divu tipu gumijas-korda sajūgus ar šādiem izmēriem:

- *ER2* – 580 x 130 mm;
- *ER2T* – 520 x 150 mm

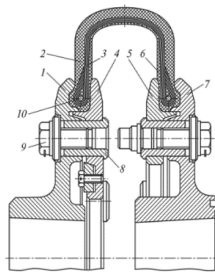
*ER2* un *ER2T* sērijas elektrovilcienu gumijas korda sajūga kopskats ir redzami 1.9. a; b. attēlā.



1.9. att. Gumijas korda sajūga kopskats:  
a – toroidāla veida (ER2); b – U veida (ER2T)

Kā redzams 1.9. attēlā, elektrovilcienu ER2, ER2T gumijas-korda sajūgā tiek izmantots viengabala gumijas-kordu apvalks, kurš stiprinās pie atlokiem ar šķeltiem spiedien aplīem. Spiedien aplī stiprinās pie atlokiem ar skrūvēm (8 uz katru atloku) ar tapām, kuras atslogo skrūves no šķērsslodzēm. Uz viena no spiedien aplīem ir izvietots centrējošais aplis, kurš ir nepieciešams pie sajūga montāžas, kā arī kalpo par elementu kas amortizē dinamiskos momentus piedziņā.

Elektrovilcienu ER2 gumijas korda sajūga frontālais skats redzams 1.10. attēlā.



1.10. att. Gumijas korda sajūga frontālais skats:

- 1; 7 – atloks; 2 – protektors; 3 – gumijas korda karkass; 4; 5 – iekšējās stiprinājuma pusdiski;
- 6 – iekšējās aizsargslānis; 8 – stiprinājuma ieliktnis; 9 – stiprinājuma M-24 bultskrūve;
- 10 – metālais gredzens.

Kā redzams 1.10. attēlā, gumijas korda sajūgs konstruktīvi ir daudzslāņu konstrukcijas elements un sastāv no ārējā protektora gumijas korda karkasa, un iekšējā aizsargslāņa. Gumijas korda sajūga karkass ir sajūga nesošā daļa, kas pārvadot griezes momentu, uzņem visu slodzi un sastāv no krustojošiem korda slāņiem, kuri piesūcināti ar gumiju uz sintētiskā kaučuka bāzes. Korda karkass no mehāniskiem bojājumiem pasargāts ar gumijas ārējo slāni (protektoru), kas pēc četrus (4) sajūga parauga mērījumu rezultātiem sastāda 9–12 mm un iekšējais aizsargslānis 1,5–2 mm. Sajūga ārējais gumijas slānis (protektors) veicina karkasa stabilitātes paaugstināšanu – gumijas korda elementa pamat nesošajā daļā, pārraidot griezes momentu. Sajūgā nav kustīgu savienojumu ar virsmas berzi un tai nav nepieciešama pastāvīga apskate (aprūpe) un smērēšana. Galvenā atšķirība starp gumijas korda sajūga elektrovilcienu ER2T un ER2 sērijām ir tā, ka, lai samazinātu centrālās spēku ietekmi, tika mainīta tā apvalka forma (1.9.b. att.), kā arī gumijas

korda elements ir aprīkots ar papildus "ekvatoriālo" korda joslu, kā rezultātā sajūga korda karkass ieguva U veida raksturīgu formu, nevis toroidālo.

Šobrīd gumijas kordu sajūgu apskate tiek veikta saskaņā ar apstiprināto remonta sistēmu.

### 1.3. Gumijas korda sajūga apskate remonta sistēmas ietvaros

Elektrovilcienu ekspluatācijas laikā gumijas korda sajūgi Latvijas dzelzceļa apstākļos pakļauti dažādām slodzēm, kuru absolūtā vērtība un laiks mainās. Atkarībā no elektrovilciena braukšanas režīma vilces dzinēju attīstītā jauda, griezes moments un rotācijas frekvence var atšķirties plašā diapazonā.

Tādējādi gumijas korda savienojumi darbojas ārkārtīgi sarežģītos apstākļos, nesalīdzināmi grūtākos, kā vairākums pārējo elektrovilciena mezglu un agregātu. Turklāt gumijas korda sajūgi ir viens no retajiem elementiem, kurus ir grūti vizuāli kontrolēt ne tikai kustības laikā, bet arī apgrozības punktos. Un tikai tehnisko apkopju laikā, kuras veic atbilstoši (1.1. tab.) norādītajiem datiem ne retāk kā reizi četrās dienās (*TA-2*) un astoņās dienās (*TA-3*), notiek sajūga periodiska apskate esošās Latvijas dzelzceļa remonta sistēmas ietvaros. Katra veida apkopes vai remonta apjomu nosaka attiecīgi Ministru kabineta noteikumi un citi saistoši normatīvie dokumenti. Lai nodrošinātu esošo motorvagonu ritošo sastāvu bezatzei darbību un uzturēšanu atbilstošā tehniskajā stāvoklī, ievērojot Ministru kabineta 2020. gada 9. jūnija noteikumu Nr.374 „Dzelzceļa savstarpēja izmantojamības noteikumi” un Ministru kabineta 2010.gada 3.augusta noteikumu Nr.724 [48] „Dzelzceļa tehniskās ekspluatācijas noteikumi” prasības, kā arī nodrošināt vilcienu satiksmes drošību saskaņā ar elektrovilcienu tekošo remontu un tehniskās apkalpošanas noteikumiem [49], un iekšējo normatīvas dokumentācijas prasībām [51]. Par vilces ritošā sastāva tehnisko apkopju un remontu sistēmu nodrošināšanu” noteica tehniskās apkopes termiņus un tehniskā remonta nobraukuma normu datus par starp remonta nobraukumiem, kas atspoguļoti (1.1. tab.).

1.1.tabula

Vilces ritošā sastāva nobraukumu normas starp tehniskajām apkopēm un remontiem

MVRS sērija.	Tehniskā apkopju periodiskums			Atjaunošanas remontu periodiskums			
	<i>TA-2</i> , dienas.	<i>TA-3</i> , dienas.	<i>TA-3(5)</i>	<i>TR-1</i> , km	<i>TR-3(TR-3+)</i> , km	<i>VR</i> , km	<i>GR</i> , km
<i>ER2</i>	Ne retāk kā reizi 4 darba dienas.	Ne retāk kā reizi 8 darba dienas.	Katrā piektajā <i>TA-3</i>	30000	240000	960000	1920000
<i>ER2T</i>	Ne retāk kā reizi 4 darba dienas.	Ne retāk kā reizi 8 darba dienas.	Katrā piektajā <i>TA-3</i>	30000	240000	960000	1920000

Lai nodrošinātu vilces ritošā sastāva efektīvāku izmantošanu, atkarībā no tā tehniskā stāvokļa, atļauts veikt tehniskās apkopes un atjaunošanas remontus ar nobraukumiem, kas atšķiras no normatīvos noteiktā par  $\pm 10\%$ . Lai kontrolētu sajūgu tehnisko stāvokli, tiek veiktas periodiskas

pārbaudes Latvijas dzelzceļa esošās remonta sistēmas ietvaros, saskaņā ar [49] reglamentētām, noteiktām gumijas korda sajūga un stiprinājuma bultskrūvju operācijām, kas atspoguļotas (1.2. tab.).

1.2. tabula

Remonta operāciju nosaukums

Remonta veids	Vizuālā apskate	Sajūga bultskrūves stiprinājuma pārbaude	Stiprinājuma bultskrūvju savilkšana	Gumijas korda sajūga nomaiņa un bultskrūves nomaiņa
<i>TA-2</i>	x	x	-	-
<i>TA-3</i>	x	x	-	-
<i>TR-1</i>	x	-	x	-
<i>TR-3; VR; GR</i>	-	-	-	x

Bet, neskatoties uz regulāro gumijas kordu sajūgu apskati, remonta sistēmas ietvaros, tomēr starpremonta laikā notika sajūgu atteikumi.

#### 1.4. Gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju bojājumu analīze Latvijas dzelzceļā

Promocijas darba 1.4. nodaļā tika veikta gumijas korda sajūga un to *M-24* stiprinājuma bultskrūvju statistikas datu vākšana, apstrāde un bojājumu atteicu analīze, kura tiek izmantota *ER2* un *ER2T* sērijas elektrovilcienos un *DRIA* sērijas dīzeļvilcienos. Laika posmā no 2012-2021.gadam elektrovilcienu ekspluatācijas parkā Latvijas dzelzceļā atrodas, atkarībā no kustības grafika, 24-26 elektrovilcienu sastāvi, kuros ir 62 motorvagoni, tai skaitā 3-6 rezerves vagoni un 10 dīzeļvilcienu motorvagoni, kuros izmantoti gumijas korda sajūgi. Kopējais gumijas korda sajūgu skaits sastāda:

- elektrovilcienos – 280 gumijas korda sajūgi;
- dīzeļvilcienos – 20 gumijas korda sajūgi.

Kopējo gumijas korda sajūga bultskrūvju stiprinājuma skaits sastāda:

- elektrovilcienos – 4160 gab;
- dīzeļvilcienos – 320 gab.

Šis gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju skaits ir pietiekams, lai veiktu vispārēju atteicu informācijas analīzi, kā arī izstrādātu metodiku gumijas korda elastīgā sajūga atteicu cēloņu izpēti. Atteikumu skaita datu izpēte sākās no motorvagona ieviešanas ekspluatācija, pēc atjaunošanas remonta veikšanas *TR-3 (TR-3+)*, *VR*, *GR* apjomā [51]. Un līdz nākamajam atjaunošanas remontam *TR-3 (TR-3+)*, *VR*, *GR* apjomā, pie nobraukumu sasniegšanas:

- elektrovilcienu vagonam 240±10 % tūkst. kilometru nobraukuma;
- dīzeļvilcienu vagonam 200±10 % tūkst. kilometru nobraukuma.

Kur gumijas korda sajūgs un tās stiprinājuma bultskrūves, saskaņā ar remonta noteikumiem [49], jānomaina pret jaunām.

Gumijas korda sajūgu darbība notiek dinamiskas slodzes apstākļos ar lielu spēku un vibrācijas slodzēm. Parasti uz gumijas korda sajūgu darbības laikā ietekmē ārējie atmosfēras faktori: ūdens, putekļi, cietās daļiņas, samazināta gaisa mitrums un temperatūra. No agregātu pusēm uz sakabes



nokļūst arī agresīvas vielas, piemēram, smērvielas, eļļas, ķīmisko vielu šķidrums. Šie faktori izraisa gumijas paātrinātu sacietēšanu vai mīkstināšanu, plaisāšanu, kas samazina sajūga demferejošas īpašības un to kalpošanas laiku [24]. Gumijas korda sajūga nostiprināšana notiek, saspiežot korpusa sienīgas ar tērauda atlokiem, ar bultskrūvju saskrūvēšanas palīdzību. Šādā savienojumā iespējama savienojuma atslābšana un kā rezultātā pārslīdēšana starp apvalku un atlokiem, kas izraisa apvalka pārkaršanu vai apvalka mehānisko bojājumu.

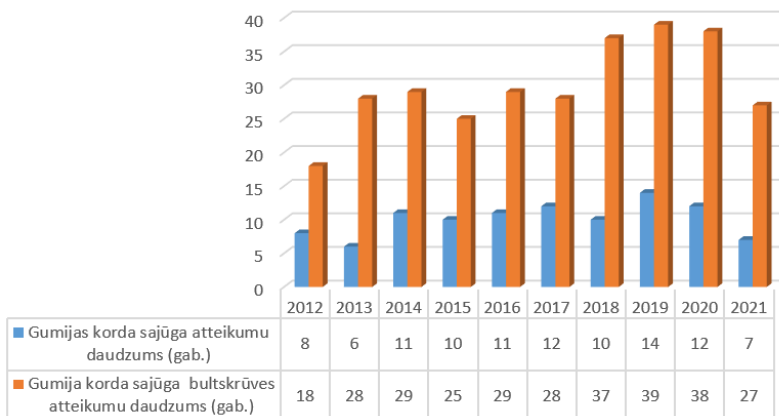
Dati par gumijas korda sajūga un to stiprinājumu bultskrūvju atteikumiem tika ņemti, pamatojoties uz dzelzceļa transporta uzņēmuma neplānoto remontu atskaitēm [47] un parādīti 1.2. pielikumā. Pēc neplānoto remontu atskaites datiem [47] laika posmā no 2012. līdz 2021.g. tika konstatēti 101 gumijas korda sajūga atteicu gadījumi un 298 gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju *M-24* atteicu gadījumi.

Gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju atteicu dati par laika posmu no 2012. līdz 2021. gadam norādīti (1.3. tab.) un (1.11. att.).

1.3. tabula

Elektrovilcienu gumijas korda sajūga un gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi

Gads	Gumijas korda sajūga atteicu daudzums, gab.	Gumijas korda sajūga atteicu daudzums procentos, %	Gumija korda sajūga bultskrūves atteicu daudzums, gab.	Gumijas korda sajūga bultskrūvju atteicu daudzums procentos, %
2012	8	2,96	18	0,43
2013	6	2,22	28	0,67
2014	11	4,07	29	0,69
2015	10	3,70	25	0,60
2016	11	4,07	29	0,69
2017	12	4,44	28	0,67
2018	10	3,70	37	0,88
2019	14	5,18	39	0,93
2020	12	4,44	38	0,91
2021	7	2,59	27	0,64
Σ	101	3,73	298	0,71



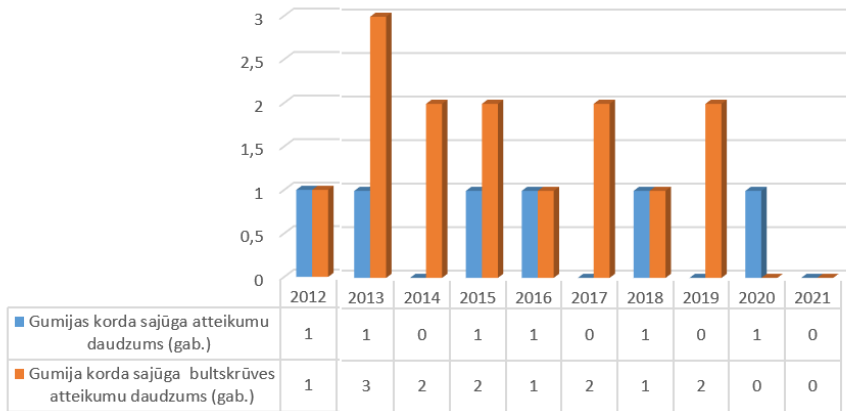
1.11. att. ER2 un ER2T Gumijas korda sajūga un gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi.

Dīzeļvilcienos, par šo pašu laika periodu no 2012. līdz 2021. g., tika konstatēti 6 gumijas korda sajūga atteicu gadījumi un 14 stiprinājuma bultskrūvju atteicu gadījumi. Visi gumijas korda sajūga atteikuma gadījumi notiek vasaras sezonā, kad dīzeļvilcienos dīzeļtelpas temperatūra pēc mērījuma rezultātiem sasniedz vairāk nekā +50 °C. Dati par atteicu skaitu norādīti (1.4. tab.) un (1.12. att.).

1.4. tabula

DR1A gumijas korda sajūga un gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi

Gads	Gumijas korda sajūga atteicu daudzums, gab.	Gumijas korda sajūga atteicu daudzums procentos, %	Gumija korda sajūga bultskrūves atteicu daudzums, gab.	Gumijas korda sajūga bultskrūvju atteicu daudzums procentos, %
2012	1	5	1	1,25
2013	1	5	3	3,75
2014	0	0	2	2,50
2015	1	5	2	2,50
2016	1	5	1	1,25
2017	0	0	2	2,50
2018	1	5	1	1,25
2019	0	0	2	2,50
2020	1	5	0	0
2021	0	0	0	0
Σ	6	1,25	14	1,75



1.12. att. DR1A gumijas korda sajūga un gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi.

Elektrovilcienu un dīzeļvilcienu gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju salīdzinoša datu analīze apkopoti un parādīta (1.5 tab.).

1.5. tabula

Gumijas korda sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumi laikā periodā 2012.-2021

Atteikumu nosaukums	Atteikumu daudzums		Atteikumu procentuālais daudzums, %	
	Elektrovilcienu <i>ER2</i> un <i>ER2T</i> , gab.	Dīzeļvilcienu <i>DR1A</i> , gab.		
			Elektrovilcienu	Dīzeļvilcienu
1. Gumijas korda sajūga bultskrūvju sagraušana	298	14	95,51	4,49
2. Gumijas korda sajūga sagraušana	101	6	94,39	5,60

Analizējot (1.5. tab.) statistikas datus, varam konstatēt, ka:

1. visvairāk gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu notiek elektrovilcienu;
2. elektrovilcienu gumijas korda sajūga atteikumi ir 94,39 %, bet to stiprinājuma bultskrūves atteikumu skaits sastāda 95,51 % no kopējā bojājumu skaita.

Dīzeļvilcienu gumijas korda sajūgu atteikumi sastāda 5,60 %, bet to stiprinājuma bultskrūvēm 4,49 % no kopējā atteikumu skaita.

Dati par sajūgu skaitu esošo ekspluatācijā toroidālo un U-veida sajūgu, kā arī dati par šādu veidu sajūgu atteikumiem parādīti (1.6. tab.).

1.6. tabula

Ritošā sastāvā gumijas korda sajūga atteikumi 2012-2022

Sajūgu tipi	Gumijas korda sajūgu daudzums ekspluatācijā, gab.	Atteikumu daudzums, gab.
Toroidālais sajūgs ( <i>ER2</i> )	164	66

580 x 130MM		
U veida sajūgs (ER2T) 520 x 150MM	116	35
Toroidālais sajūgs (DRIA) 580 x 130MM	10	6
Toroidālais sajūgs (DRIA) 360 x 100MM	10	1

Analizējot sniegtos statistikas datus, kuri parādīti (1.5 un 1.6 tab.) konstatēts, ka:

- visvairāk gumijas korda sajūga un stiprinājuma bultskrūvju sagraušana notiek elektrovilcienos;
- vislielākais atteikumu skaits notiek sajūgam ar izmēru 580 × 130mm divām ritošā sastāva sērījām. Šī sajūga tipam atteicu skaits ir 72 gadījumu.

Lai detalizētāk izpētītu sajūga atteikumus elektrovilcienos, veiksīm pētījumu par elastīgo sajūgu izstrādes atkarību uz atteici no uzstādīšanas brīža līdz atteikuma iestāšanās brīdim. Sajūgu atteikuma dati un sajūga nobraukums pirms atteices ir norādīti 1. pielikumā.

Saskaņā ar 1.pielikuma tabulā apkopotajiem datiem laika posmā no 2012. līdz 2021. gadam, tika konstatēts, ka toroidāla un U veida gumijas korda sajūgu atteikumi notiek nobraukuma diapazonā no 1478 – 251 236 km. [50] ar vidējo rādītāju nedaudz vairāk par 124 tūkst. km. un patiesībā ir nejaušs rādītājs, kuru ietekmē dažādi iemesli:

1. remonta noteikumu ievērošana gumijas korda sajūga uzstādīšanas laiks;
2. ātruma režīma un vagona noslodzes ietekme;
3. mijiedarbības ietekme starp vagona ekipāžas daļu un sliežu ceļa virsbūvi.

Savukārt elektrovilciena motorvagona gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi notiek nobraukuma diapazonā no 1628 – 254 646 km. [50] un ir nejaušs rādītājs, kuru ietekmē dažādi iemesli, tādi kā:

- uz bultskrūvju atteikumiem sākuma posmā no 0 līdz 30 tūkst. km. var ietekmēt faktori, kas saistīti ar remonta noteikumu neievērošanu gumijas korda sajūga montāžas laikā, veicot atjaunošanas remontu TR-3 [51] apjomā;
- motorvagona kustības laikā bultskrūvēs, var rasties divaksiālais un trīsksiālais sprieguma stāvoklis, piemēram, saspiešana, spriedze, vērpes, lieces;
- iecirkņa ātruma palielināšana līdz 120 km/h noved pie bultskrūvju deformācijas, lielu dinamisko un triecienslodžu rašanās dēļ, kas rodas, motorvagonam braucot pa dzelzceļa sliežu ceļu salaidnēm.
- Turklāt papildus bultskrūvju bojājumus var ietekmēt tādi faktori kā:
- ārēja gaisa temperatūras pazemināšanās un paaugstināšanās diapazonā no –20 °C līdz +30 °C, kā arī dienas temperatūras svārstības, kas var sasniegt līdz 15 °C;
- bultskrūvju metālā kaitīgu piemaisījumu klātbūtne;
- remonta noteikumu [49] neievērošana veicot atjaunošanas, remontu TR-1 stiprinot (pārsniedzot pieļaujamo griezes momentu) gumijas korda sajūga bultskrūves.

Visu iepriekšminēto faktoru ietekmē gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju materiālā var rasties noguruma mikroplaisas, kas ir papildu sprieguma koncentratori, kā rezultātā gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves varētu būt pakļauti sagraušanai [68].

Gumijas korda sajūga konstrukcijas nostiprināšanai vilces piedziņas mezglā ir raksturīgas bīstamas atteices. Elektrovilcienu vilces piedziņas ekspluatācijas pieredze liecina, ka izmantojot gumijas korda sajūgu no ilgizturības un bez atteikuma pozīcijas šie elementi (sajūgs un tās stiprinājuma bultskrūves) ir viens no vājākajiem elementiem elektrovilciena vilces iekārtā. Bet vislielāko problēmu sastāda vilces piedziņas stiprinājuma *M-24* bultskrūvju sagraušana. Četru bultskrūvju sagraušana no astoņām var izraisīt gumijas-korda sajūga pārrāvumu, un iekšējā atloka izmešanu, kas var izraisīt sliežu ceļa, elektrovilcienu ritošā sastāva daļas (ekipāžas daļa), elektrovilciena mehāniskās iekārtas vai vagona virsbūvi bojājumus. Iekšējā atloka disks var nokļūt arī vagona salonā pa skata lūku, izraisot salona bojājumus un pat pasažieru traumēšanu.

Latvijas dzelzceļā 2019. gada novembrī *ER2T* sērijas vagonā notika gumijas korda sajūga stiprinājuma pusdiska izmešana. Sajūga kopskats pēc pusdiska izmēšanas rezultātā redzami 1.13. attēlā.



1.13. att. Korda sajūga bojājums pusdiska izmēšanas rezultātā.

Pusdiska izmēšanas rezultātā bija trieciens pret apskates lūkas aizsargrežģi. Un rezultātā tika salocīts un bojāts apskates lūkas aizsargrežģis.

2022. gada oktobrī *ER2T* sērijas vagonam notika sagraušana visam 8 korda sajūga stiprinājuma bultskrūvēm. Mašīnista operatīvās rīcības rezultātā gumijas korda sajūga pusdiska izmešana nenotika. Sajūga veids redzams 1.14. attēlā.



1.14. att. Gumijas korda sajūga 8. bultskrūvju sagraušana.

Elektrovilciena kustības laikā uz gumijas korda sajūgu iedarbojas dažādi spēki un momenti, kas saistīti ar elektrovilciena ātrumu un kustības veidu (vilces režīms, brīvgaitas režīms, bremzēšana). Eksploatācijas laikā gumijas korda sajūgs pastāvīgi pakļauts vairākkārtējām, atkārtotām mainīgām triecien slodzēm no sliežu ceļa augšējā slāņa. [66] Un pie kustības pa dzelzceļa sliežu ceļa salaidnem. (pa savienojumiem) nelīdzena ceļa dēļ pastāvīgi mainās vilces dzinēja vārpstas un reduktora mazā zobrata vārpstas relatīvais stāvoklis, un lai kompensētu šo neatbilstību paredzēts gumijas korda sajūgs. Elektrovilcieni atbilstošos eksploatācijas apstākļos gumijas korda sajūgam ir raksturīga paaugstināta spēja droši strādāt ar nelielām savienoto vārpstu savstarpējām nobīdēm. Tomēr, jo lielāka nobīde, jo īsāks ir gumijas korda sajūga kalpošanas laiks, tā kā ar vārpstu radiālo un leņķisko nobīdi gumijas korda sajūgs kompensē savienoto vārpstu nenovirzi, un kā rezultātā gumijas korda sajūga materiālā rodas cikliski spriegumi izraisot tā sakaršanu, kas īpaši izpaužas vasaras sezonā. Kā arī sajūga materiāla stiprības samazināšanās, kuru var izraisīt destabilizējoši procesi. Destabilizējošus procesus gumijas korda sajūgā izraisa šādi faktori:

- noguruma plaisu parādīšanās uz sajūga virsmas;
- gumijas korda sajūga ārēja apvalka sasilšana;
- sajūga stabilitātes zudums liela griezes momenta rezultātā;
- konstrukcijas stingrības izmaiņas sajūga materiāla novecošanas vai agresīvas vides iedarbības dēļ.

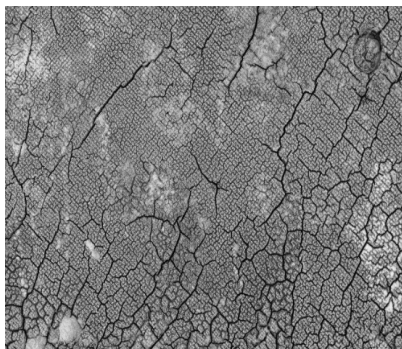
Sakarā ar elektrovilcieni eksploatācijas apstākļiem, gumijas korda sajūgi tiek pakļauti dažādām lielu spēku un momentu ietekmēm, temperatūras iedarbībai, kā arī vienlaicīgi tos ietekmē ārējās vides iedarbība un tie darbojas sarežģītākos apstākļos nekā uz citām ritošā sastāva sērijām [86].

Šī iemesla dēļ, pie vienlaicīgas ķīmisko, mehānisko un temperatūras faktoru iedarbības uz gumijas korda sajūgu, to īpašību izmaiņas laika gaitā kļūst grūti prognozējamas. Šo faktoru ietekme kopā var izraisīt gumijas korda sajūgu sairšanu.

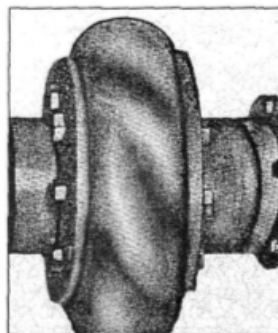
Šo faktoru ietekme var izraisīt:

- a) paātrināto gumijas novecošanu (a);
- b) gumijas korda sajūga apvalka stabilitātes zudumu (b);
- c) noslāņošanos (c);
- d) korda slāņa pārrāvumu (d);
- e) gumijas korda sajūga sānu sienas un ārējās virsmas bojājumu (f).

Gumijas korda sajūga drošums nosaka visa vilces līdzekļa vienības drošumu.



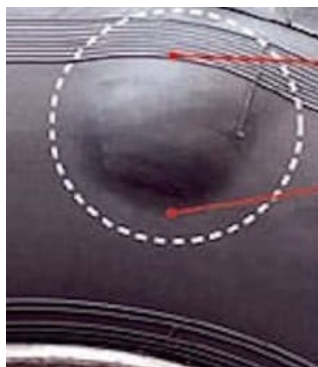
a



b



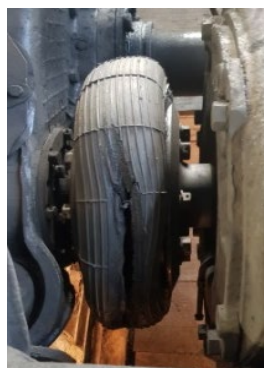
c



d



e



f

1.15. att. Gumijas korda sajūgu sagraušanas un atteikumu veidi:

- a – paātrināta gumijas novecošana; b – gumijas korda sajūga apvalka stabilitātes zudumu;
- c – gumijas un korda slāņa noslāņošana; d – korda slāņa atslāņošana, pārrāvums; e – gumijas korda sajūga sānu sienas bojājums; f – gumijas korda ārējās virsmas bojājums.

Gumijas saplaisāšana (1.15. att. a.) atmosfēras apstākļos notiek salīdzinoši ātri un tāpēc tas ir visbīstamākais novecošanas veids. Pārslīdēšanas iemeslu parasti izraisa pārslodze vai nepietiekams saspiešanas spēks uz atlokiem, korpusa sieniņas nosēdēšana, vai nepietiekama bultskrūvju pievilksanas spēka dēļ.



1.16. att. Gumijas korda sajūga slāņa pārrāvuma piemērs.

Tāpēc, plānotā apskates laikā, īpašu uzmanību jāpievērš elastīga elementa apvalka stāvoklim, sajūgu un atloku novietojumiem, stiprinājuma elementu pārbaudei, apvalka stāvoklim un bultskrūvju savienojuma stāvoklim, un bultskrūvju pievilkšanas spēku. Par galveno gumijas plaisu veidošanās nosacījumu ir vienlaicīga temperatūras un stiepes spēka ietekme uz to. Praktiski šādi apstākļi vienā vai otrā pakāpē ekspluatācijas laikā tiek radīti gandrīz visiem gumijas korda sajūgiem.

## 1.5. Ukrainas dzelzceļa gumijas korda sajūgu atteikumu analīze

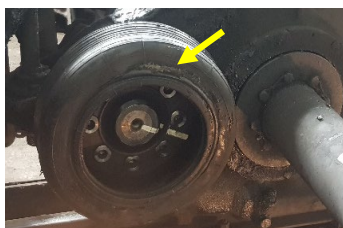
Saskaņā ar Ukrainas dzelzceļa datiem par laika periodu no 2015. līdz 2020. gadam Ukrainas dzelzceļu ekspluatācijas parka kopējais dažādu sēriju elektrovilcienu skaits (*ЭП1; ЭП2; ЭП2Р; ЭП2Т; ЭИИ12; ЭТ2; ЭР9 ЭИИ9 ЭД9*) sastāda 366 vienības. Motorvagonu skaits vienā elektrovilcienā sastāda 3 līdz 5 motorvagoni. Kopējais ekspluatācijā esošo motorvagonu skaits sastāda 1546 vienības. Savukārt motorvagonu izmantoto gumijas korda sajūgu kopskaits sastāda 6184 gab., un gumijas korda sajūgu sagraušanas skaits minētajā laika periodā sastādīja 2594 gadījumus. Dati par gumijas korda sajūgu atteikumiem parādīti (1.7. tab.).

1.7. tabula

Gumijas korda sajūgu atteikumi Ukrainas dzelzceļā

Gads	Ekspluatācijā esošo sajūgu skaits		Sajūgu atteikumu daudzums	
	Toroidāla veida 580 × 130, mm	U veida 520 × 150, mm	Toroidāla veida 580 × 130, mm	U veida 520 × 150, mm
2015	5078	1106	411	93
2016	5078	1106	377	102
2017	5078	1106	406	87
2018	5078	1106	421	84
2019	5078	1106	457	109
2020	5078	1106	399	78

Saskaņā ar Ukrainas dzelzceļu saņemto informāciju, elektrovilcienos uzstādīto sajūgu bojājumi notiek, sajūgu nostiprināšanas vietā pie atlokiem parādīts (1.17. att.).



1.17. att. Elektrovilciena ER2R gumijas korda sajūga sagraušana.

Atsevišķi jāatzīmē, ka Ukrainas dzelzceļā bija pilnīgi sajūga apvalka sagraušanas gadījumi ar motorvagona grīdas bojājumu un sajūga vai atloka fragmentu iekļūšanu elektrovilciena motorvagona pasažieru salonā.





1.18. att. Gumijas korda sajūga atloka izmēšana vagonu salonā.

Analizējot dažādu elektrovilcienu sēriju sajūga apvalku sagraušanas pakāpi un zonas, var secināt, ka sagraušanas zonas atrodas aptuveni tajās pašās apvalku zonās, un arī pie līdzīgām jaudas slodzēm, kā uz Latvijas dzelzceļā.

## 1.6. Gumijas korda sajūga atteikumu analīze pa sezonām

Pētītajā laika posmā no 2012. līdz 2021. gadam gumijas korda sajūga atteikumu problēma un īpaši gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju *M-24* lūzuma problēma bija dominējošā visiem elektrovilcieniem, kuri tika ekspluatēti Latvijas dzelzceļā. Jāpiebilst, ka Latvijas dzelzceļā gumijas korda sajūgs un tā nostiprināšanas bultskrūves *M-24*, darbojas dažādos temperatūras diapazonos. Zemas temperatūras apstākļos gumijas korda sajūgs zaudē tādu īpašību, kā elastīgumu. Savukārt augstas temperatūras apstākļos sajūga materiāls tiek pakļauts tādai īpašībai ka novecošana, temperatūras iespaidā. Rezultātā mainās sajūga materiāla fizikālās īpašības, kas savukārt var atstāt būtisku ietekmi uz bojājumu skaitu. Detalizētākai bojājumu izpētei, jāņem vērā temperatūras ietekme uz gumijas korda sajūgu un tā nostiprināšanas bultskrūvēm. Ierosināts izpētīt gumijas korda sajūga un tā nostiprināšanas bultskrūvju bojājumu statistiku vasaras, rudens-pavasara un ziemas sezonā, kā arī noteikt gumijas korda sajūga sasilšanas temperatūru reālos ekspluatācijas apstākļos vasaras un pavasara-rudens sezonā. Vasaras sezonā, kad pieaug pārvadājumu intensitāte un palielinās motorvagonu noslodze, gumijas korda sajūgs darbojas paaugstinātas apkārtējās gaisa temperatūras apstākļos, ar palielinātām vārpstas novirzēm, pieaugot braukšanas ātrumam, kā arī palielinātiem vilces un bremsēšanas griezes momentiem, kā rezultātā gumijas korda sajūgs tiek pakļauts siltuma iedarbībai. Vasaras sezonā visi vilces piedziņas elementi, ietverot arī gumijas korda sajūgu un tā nostiprināšanas bultskrūves, uzsilst, kas tiek papildus pakļauts siltuma iedarbībai no vilces elektrodzinēja un bremsēšanas ierīcēm. Ziemas sezonā zemas apkārtējās gaisa temperatūras apstākļos, attiecīgi ievērojami pazeminās gumijas korda sajūga un bultskrūvju metāla temperatūra.

Kopējā gumijas korda sajūga atteikumu sezonālā statistika no 2012. līdz 2021. gadam parādīta (1.8. tab.).

Gumijas korda sajūga atteikumu sezonālā statistika

Gadi	Atteikumu daudzums ziemas sezona*, gab.	Atteikumu daudzums vasaras sezona*, gab.	Atteikumu daudzums rudens-pavasara sezona*, gab.	Gumija korda kopējais atteikumu daudzums, gab.
2012	3	3	2	8
2013	2	3	1	6
2014	3	6	2	11
2015	4	3	3	10
2016	4	4	3	11
2017	6	2	4	12
2018	6	2	2	10
2019	6	3	5	14
2020	5	3	4	12
2021	3	3	1	7
Σ	42	32	27	101

\*Vasaras sezona no 15.maijā līdz 14.septembrim; rudens-pavasara sezona no 15.marta līdz 14.maijamun no 15.septembra līdz 14. novembrim; ziemas sezona no 15.novembra līdz 14. martam.

Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju *M-24* atteikumu dati pa sezonām parādīti (1.9. tab.).

Gumijas korda sajūga bultskrūves *M-24* atteikumi pa sezonām

Gadi	Gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi. Ziemas sezona*	Gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi. Pavasaras sezona*	Gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumi. Vasaras sezona*	Kopējais bultskrūvju atteikumu daudzums
2012	7	2	9	18
2013	11	5	12	28
2014	11	8	10	29
2015	9	8	8	25
2016	13	5	11	29
2017	14	5	9	28
2018	17	7	13	37
2019	18	6	15	39
2020	17	9	12	38
2021	12	4	11	27
Σ	129	59	110	298

\*Vasaras sezona no 15.maijā līdz 14.septembrim; rudens-pavasara sezona no 15.marta līdz 14.maijam un no 15.septembra līdz 14. novembrim; ziemas sezona no 15.novembra līdz 14.martam.

Saskaņā ar (2.4 un 2.5 tab.) atspoguļotajiem datiem var secināt, ka lielākais gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju bojājumu skaits notiek ziemas periodā, kad ir zema apkārtējā gaisa temperatūra. Zemas temperatūras apstākļos var samazināties gumijas korda sajūga elastība un palielināties tā cietība. Savukārt stiprinājuma bultskrūvju metālam temperatūras pazemināšanās rezultātā var novērot tendenci kļūt trauslam un sagraust. Sagraušana trausluma rezultātā ir visbīstamākais sagraušanas veids. Tā bīstamība ir tāda, ka tā notiek bez priekšnosacījumiem, piemēram, bez plastiskās deformācijas. Plaisas palielināšanās notiek strauji, un izplatīšanās ātrums trauslās sagraušanas laikā ir aptuveni vienāds ar skaņas ātrumu metālā. Plaisa palielinās un kļūst par bultskrūvju galīgās sagraušanas vietu. [68]...[57].

## 1.7. Gumijas korda sajūgu atteikumu finanšu teriņu izpēte

Tā kā gumijas korda sajūgs un tā stiprinājuma bultskrūves ir neremontējami, tad to atteikuma gadījumā elektrovilcienu motorvagonam ir jāveic neplānotais remonts, kas izraisa vagona dīkstāvi. Dati par vagonu dīkstāvi atspoguļoti (1.10. tab.).

1.10. tabula

Kopējais vagonu dīkstāves laiks neplānotā remonta laikā

Gads	Atteikumu nosaukums	
	Gumijas korda sajūgu bultskrūvju <i>M-24</i> nomaiņa, st.	Gumijas korda sajūga nomaiņa, st.
2012	528	552
2013	1008	216
2014	1296	648
2015	1032	408
2016	1056	504
2017	1320	672
2018	1368	576
2019	1176	600
2020	1200	456
2021	1104	288
Σ	11 088	4920

Neplānotu remontu veikšana ir saistīta ar lieliem finanšu līdzekļu tēriņiem, iegādājoties jaunus gumijas korda sajūgus, to vidējā cena ir:

- *ER2T* sērijas elektrovilcieniem – 166,36 €;
- *ER2* sērijas elektrovilcieniem – 147,23 €;
- stiprinājuma bultskrūvju *M-24* iegāde – 1,09 €.

Lai veiktu neplānoto remontu, nepieciešams atkabināt motorvagonu no elektrovilciena sastāva. Lai atkabinātu motorvagonu tiek veikti manevru darbi ar dīzeļlokomotīves izsaukšanu. Manevru darbu izmaksas sastāda - 427,98 € no tiem:

- dīzeļlokomotīves darbības laiks manevru darbu veikšanai sastāda 2 stundas, maksa par manevru darbu sastāda -316,43 €;
- maksa par *LDZ* infrastruktūras izmantošanu ar dīzeļlokomotīvi - 96,72 €;
- piemaksas darbiniekiem par neplānoto remontu veikšanu - 10,32 €;
- elektroenerģijas patēriņa izmaksas vagona pacelšanai ar elektrodzinēja palīdzību uz domkrata - 4,51 €.

Apkopotas finanšu izmaksas par neplānotiem remontiem parādītas (1.11. tab.).

1.11. tabula

Finanšu izmaksas atteikumu novēršanai

Atteikumu nosaukums	Izmaksas par 1 neplānotā remonta veikšanu, €	Kopējās izmaksas par 10 gadiem, €
Gumijas korda sajūga bultskrūvju nomaiņa	429	103 895
Gumijas korda sajūga nomaiņa uz <i>ER2</i> motorvagona	575	35 663
Gumijas korda sajūga nomaiņa uz <i>ER2T</i> motorvagona	594	23 179

Analizējot tabulas datus par finanšu izmaksām, tika konstatēts, ka sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu seku atjaunošanai ir augstas izmaksas.

Apskates un remonta pasākumi novirzīti samazināt sajūga bojājumu risku un palielināt sajūgu drošumu, tomēr ekspluatācijā bieži notiek gadījumi, kad samazinās demferejošas īpašības vai vispār sajūga sagraušana (1.19. att.).



1.19. att. Gumijas korda sajūga bojājums:

a – demferejošo īpašību samazinājums; b – sajūga sagraušana.

No promocijas darba uzrakstīšanas un līdz atteikumu statistikas datu savākšanas beigām no 09.2019. līdz 12.2021., tika konstatēti 33 atteikumu gadījumi, kas saistīti ar gumijas korda sajūga atteikumiem, no tiem:

- 26. gumijas korda bojājumu gadījumu konstatēja tehniskās apkopes vai atjaunošanas remonta izpildes laikā;

- 7. gumijas korda bojājumu gadījumu konstatēja ceļā, pasažieru pārvadāšanā iesaistīto regulāro vilcienu maršrutā (elektrovilcienu darbības laikā līnijā).

Braukšanas laikā gumijas korda sajūga sagraušanas rezultāta, vienam elektrovilcienu motorvagonam nostrādāja aparātu aizsardzība un kā rezultātā elektrovilcienu apstāšanās ceļa posmā. Laika periodā no 09.2019. līdz 12.2021. sajūga atteikumu rezultātā pieciem elektrovilcieniem tika konstatēts kavējums no 5 līdz 15 minūtēm. Bet divi elektrovilcieni nokavēja vairāk nekā 30 minūtes.

Pēc gumijas korda sajūga bojājumu konstatēšanas no līnijas tika noņemti visi 7 elektrovilcienu sastāvi. Savukārt vilcienu apstāšanās ceļa posma nozīmē vilcienu kustības grafika aizkavēšanu vai vispār vilcienu atcelšanu. Vilcienu kustības grafika kavējumi un vilcienu atcelšana summējas ar finansiāliem zaudējumiem, kas var mainīties atkarībā no gadalaika (sezonas). Dati par finansiālajām izmaksām neplānotu remontu veikšanai, kas saistīti ar gumijas korda sajūga nomaiņu, ir parādīti (1.11. tab.). Papildus pie tam finanšu izmaksas par elektrovilcienu noņemšanu no līnijas ir parādīti (1.12. tab.).

1.12. tabula

Finanšu izmaksas par elektrovilcienu noņemšanu no līnijas

Finanšu zaudējumu veidi grafika aizkavēšanas dēļ	Zaudējumu summa no kustības grafika aizkavēšanu, €
No bilešu pārdošanas	20-200
Elektrovilcienu noņemšana no līnijā gumijas korda sajūga atteikuma dēļ	Elektroenerģijas patēriņš – 50 - 75
	Izmaksas par LDZ infrastruktūru – 28,60

Atceļot vilcienu, papildus uzņēmuma finansiālajiem zaudējumiem pastāv reputācijas un imidža zaudējumi, kurus ne vienmēr var precīzi aprēķināt. Attiecīgi rodas jautājums, kā dēļ notiek gumijas korda sajūga atteikumi? Un vai šī problēma ir aktuāla pasaulē.

## 1.8. Gumijas korda sajūgu zinātniskās izpētes apskats

Ar elastīgo sajūga projektēšanu, aprēķināšanu, modelēšanu un testēšanu nodarbojas daudzi uzņēmumi, institūti, laboratorijas un pētnieki. Pētījumi tiek veikti materiālu īpašību uzlabošanas virzienā, meklējot jaunas augsti elastīgas elementa formas atbilstoši tehnoloģiskajām prasībām vai demferojošas efektivitātes prasībām.

Attīstoties jaunām ražošanas tehnoloģijām, parādās dažādas gumijas korda sajūga konstrukcijas, kas tiek izmantotas pneimatiskajās slāpēšanas sistēmās un aizsardzības līdzekļos pret triecieniem un vibrācijas līmeņiem pārmiju mehānismu pārslēgšanai. Elastīgie gumijas korda sajūgi arvien vairāk tiek izmantoti daudzas rūpnieciskas ražošanas jomas, šķirošanas stacijas, šie jautājumi tika izskatīti zinātniskajā darbā [18].

Zinātniskajā darbā [65] Tiek piedāvāti aprēķinātie un eksperimentālie vērpes pētījumu rezultāti elektrovilcienu piedziņas savienojumu, gumijas korda apvalkos. Šajā darbā tika piedāvāts korda veids un armēšanas parametri, pie kuriem apvalks nodrošina nepieciešamo griezes momentu atkarībā no vērpes leņķa. Zinātniskajā darbā veiktais pētījums nodemonstrēja efektīvu un pietekoši adekvātu vērpes atspoguļojumu gumijas kordu sajūga apvalku konstrukcijām, pamatojoties uz teoriju par šķiedru armētu materiālu pielietošanu pie mazām un lielām deformācijām.

Gumijas korda slāņa, kurš atrodas plaknes sprieguma stāvoklī, viskoelastīgo īpašību izpētei un noteikšanai veltīts darbs [88]. Šis darbs ir veltīts gumijas un gumijas auklas relaksācijas funkciju noteikšanai un ietver šādus aspektus: gumijas un gumijas korda viskoelastīgo īpašību eksperimentāla noteikšana un viskoelastīgo īpašību aprēķini ar viskoelastības lineārās teorijas palīdzību, izmantojot aproksimācijas metodi un novienādošanu. Darbībā divslāņu gumijas korda paraugiem eksperimentāli tika noteikti relaksējošās funkcijas parametri ar Proni metodes palīdzību, periodiski izmainot sprieguma-deformācijas stāvokli.

Zinātniskajā darbā [28] tika veikts gumijas korda sajūga elastomēru materiālu apraksts. Lai izvērtētu to darbspēju, izmantoti vairāki viskoelastīgā materiāla uzvedības modeļi. Lai veiktu konstruktīvu modeļu aprakstu, visbiežāk tiek pielietots *Mūnija-Rivlina* modelis. Darbā tika analizēti sajūga paraugu izmēģinājuma eksperimentu izstiepšanas dati saskaņā ar *ISO 37* un arī veikti cietības pārbaudes izmēģinājumi pēc *Šora A* metodes. Gumijas korda karkasu elastomēru materiālu viskoelastīgo īpašību aprēķiniem, autori iesaka izmantot Gentas vienādojumu materiāla ar cietību 80 un 90 nosacītās vienības *Mūnija-Rivlina* parametru aprēķināšanai.

Darbā [54] Tiek prezentēti plānu un elastīgu, pastiprinātu ar stingrības ribām, cilindrisku rotējošu apvalku ar piestiprinātiem cietiem ķermeņiem pašfrekvenču un brīvo svārstību formu pētījumu rezultāti. Uzdevums tiek risināts ar lineāro formulējumu, izmantojot Ritca metodi, ņemot vērā ribas diskretu izvietojumu. Skaitliskie rezultāti, kas iegūti, pamatojoties uz precizēto matemātisko modeli, liecina, ka piestiprinātie cietie ķermeņi būtiski ietekmē plānsienu apvalku dabiskās frekvences un vibrācijas režīmus.

Tiek atklātas jaunas atkarības, likumsakarības un fizikāli mehāniskie efekti čaulas sistēmas strukturālo nevienādīgumu dēļ, kam ir liela praktiska nozīme un kas ļauj izstrādāt pasākumus tās vibrodinamisko īpašību uzlabošanai.

Ar gumijas korda elastīgā elementa deformācijas pētījumu nodarbojās [38]. Šajā zinātniskajā darbā tika pētītas un aprakstītas gumijas korda elastīga elementa īpašības, kuras izvērtētas ar GEM palīdzību. Darbā risināts pneimoelastīgā elementa deformāciju un spriegumu aprēķināšanas uzdevums, pielietojot galīgo elementu metodi (GEM). Ar šīs metodes palīdzību var precīzi noteikt gumijas korda elastīgā elementa materiāla īpašības. Pēc gumijas korda elementa saspiešanas eksperimentu rezultātiem, tika noteikti atbilstoši *Mūnija-Rivlina* koeficienti un uzzīmēts grafiks, kurš attēlo deformācijas atkarību no slodzes līmeņa. Darbā piedāvāts izveidot datormodeli augsti elastīga gumijas korda elastīgā elementa deformācijas zonu identificēšanas un noteikšanas pētīšanai.

Gumijas korda sajūga uzbūvei, īpašības un darbības principiem nodarbojas zinātniskas literatūras autori [71].

Zinātniskas darbs [61] ir veltīts gumijas korda plakano sajūgu skaitļošanas - eksperimentālai izpētei un augsti elastīgas sajūgu matemātiskā modeļa izstrādei ar darba elementu gumijas korda diska formā. Darbā tiek pētīta sajūgu darbība pie lieliem griezes momentiem, aksiālie spēki (pie griezes momenta noslogošanas), kā arī vibrācijas un trokšņa līmeņa samazināšanas jautājumi. Darbā tika piedāvāta eksperimentāla stenda izstrāde plakanās gumijas korda sajūga izmēģināšanai un gumijas korda diska slodzes raksturlielumu noteikšanas metodika augsti elastīgiem sajūgiem, ļaujot noteikt empīriskas likumsakarības starp vērpes pagrieziena leņķi augsti elastīgā gumijas korda sajūga elementiem un pielikto momentu.

Darbā [76] ir parādīti hiperelastīgo materiālu deformācijas teorētiskie pamati, izmantojot empīrisko *Mūnija-Rivlina* modeli. Kā arī parādīti armēta elastomēra parauga eksperimentālo pētījumu rezultāti pēc plaknes deformācijas shēmas. Eksperimentālo pētījumu rezultāti tika

izmantoti Mūnija-Rivlina konstantu noteikšanai pēc darbā piedāvātās metodes. Darbā piedāvāta Mūnija-Rivlina metode vienādojuma konstantu noteikšanai elastomēram, kas apraksta hiperelastīgu materiālu ar nelineārām īpašībām uzvedību. Atrastās konstantu vērtības var izmantot, lai modelētu elastīga materiāla deformācijas procesus, izmantojot modernu programmatūru.

Elastīgās gumijas korda sajūga histerēzes īpašību noteikšanai metodiskajā materiālā [10] aprakstītas sekojošas materiāla īpašības. Eksploatējot tādus izstrādājumus kā amortizatori, riepas, piedziņas siksnas, konveijera lentes utt., to darbības laikā gumija tiek pakļauta mainīgām deformācijām, kuru amplitūda ir daudz mazāka nekā gumijas pagarināšanās sagraušanas brīdī. Darbā tiek pētīta gumiju izvēle ar optimālām īpašībām saistībā ar dinamiskā režīma specifiskajām iezīmēm, pētījumi tiek veikti 2 virzienos:

1) sakarība starp spriegumu un deformāciju cikliskas slodzes apstākļos (elastības-histerēzes īpašības);

2) sakarība starp dinamiskajiem spriegumiem un gumijas izturību, t.i. sloģošanas ciklu skaits, ko konkrētā materiāla paraugs var izturēt nesairstot.

Darbā tiek pētīti dažādi dinamiskās slodzes veidi un, pamatojoties uz rezultātiem, noteikti gumijas koeficienti un elastības moduļi.

Zinātniskajā rakstā [73] izklāstīta fenomenoloģiskā metode dažādu asimetriskas konstrukcijas augsti elastīga gumijas korda sajūga noteiktu atbilstību saņemšanai. Pirmās kārtas nelineārā pietuvinājumā tika aprakstīts vadītas anizotropijas deformācijas efekts, ņemot vērā temperatūras ietekmi. Norādīti bāzes izmēģinājumi, kas nepieciešami, lai noteiktu materiālos parametrus piedāvātajā matemātiskajā modelī. Zinātniskajā rakstā izstrādātā aprēķinu - eksperimentālā metode ļauj konstruēt dažādu augsti elastīgo sajūgu konstrukciju noslogojuma (griezes momenta un spēka) raksturlielumus, ņemot vērā vārpstas novirzes mašīnu piedziņās.

Darbā [34] tika piedāvāta kompleksā teorētiskā metode, lai izpētītu polimēra un gumijas stāvokli pēc nelineāro elastīgo deformāciju iedarbības, kurām lineārās elastības teorija atkarībā no pielietotajām slodzēm nevar paredzēt to mehānisko uzvedību. Piedāvātā teorija ir detalizēti īstenota, un tai nav ierobežojumu ģeometriski un fizikāli nelineāru materiālu analizē. Ka testa piemērs šīs jaunās pieejas ietvaros tika sastādīti pamata vienādojumi nelineāri elastīgajam materiālam. Iegūti materiāla sprieguma un deformācijas rezultāti pie vienmērīgas un nevienmērīgas šķērsvirziena ārējās slodzes priekš dažāda veida ierobežojuma nosacījumiem, slodzēm un materiāla īpašībām.

Darbā [52] tika piedāvāts saspīestas griezes pie lielām deformācijām nelineārs uzdevuma risinājums rotējošo apvalku, no gumijai līdzīga materiāla (savienojumu sajūgi), balstoties uz bezmomentu teorijas pielaidēm. Nelineārās teorijas pielietošana ļāva noteikt asu spēkus, kas rodas sajūga apvalkā vērpes laikā. Redzamiuzdevuma risinājums pie lielām toroidālo apvalku no gumijas korda materiāla, kuri noslogoti ar griezes momentiem, aksiālajiem un centrālās spēkiem, asimetriskām deformācijām. Tiek pētīta centrālās slodzes ietekme uz sajūga rotējošo apvalku, kas ir svarīgs, lai novērtētu vārpstu atbalstu, kuri savienoti ar sajūga palīdzību, noslogojumu.

Zinātniskajā rakstā [63], raktuvju konveijera lentes pārklājošai gumijai tika noteiktas Mooney-Rivlin modeļa koeficientu vērtības *ANSYS 14.0* programmatūras pakotnē. Gumijas sprieguma-deformācijas stāvokļa galīgo elementu analīzes rezultāti tiek salīdzināti ar eksperimentāliem datiem. Konveijera lentes pārklājošās gumijas modelēšanas rezultāti labi saskaņojas ar eksperimentālajiem datiem, kas apliecina modeļa atbilstību *Munija-Rivlina* no *ANSYS 14.0* programmatūras pakotnes.

Darbā [84] tika piedāvāta iekšējā profila un optimālā materiālu sadalījuma aprēķināšanas procedūra, automašīnas pneimatiskajai riepai presformas konfigurācijā, lai adekvāti aprakstītu elastīgi izkliedējošās riepas gumijas īpašības un gumijas kordu kompozītmateriālu. Tika izskatīts Mūnija-Rivlina nelineārais elastīgās deformācijas modelis un viskoelastīgais Proni modelis, kā arī statistiskie un dinamiskie izmēģinājumu eksperimentālie dati. Izstrādātās aprēķinu metodes ļauj prognozēt auto riepu ekspluatācijas raksturlielumus projektēšanas stadijā un augstāk minēto produktu aprobēšanu ražošanā.

Darbā [36] tika apskatīts parauga galīgo elementu trīsdimensiju (3D) modelis, ar kuru tika pētīta divslāņu kompozītmateriālu, kas izgatavoti no korda un gumijas, mehāniskās uzvedības kombinētā stiepes un vērpes slodzes ietekmē. Spriegojuma-vēršanas savienojums, kā korda savītā rakstura sekas, tika aplūkots izmantojot galīgo elementu metodi. Saistītās stingrības rezultāti, kas iegūti divu slāņu tērauda korda - gumijas kompozītmateriālam galīgo elementu analizē pie vērpes slodzes, tika salīdzināti ar eksperimentālajiem datiem. Darbā tika parādīta un aprakstīta korda orientācijas, anizotropijas un apjoma daļas ietekme uz relatīvo deformāciju un sajūga stingrību.

Zinātniskajā rakstā [43] tika novērtēta sajūgu ar gumijas korda apvalkiem, kas kalpo, lai vienmērīgi sadalītu slodzi starp divu motoru piedziņas līnijām velmēšanas dzirnavās, darbības efektivitāte. Rakstā sniegti sajūgu un piedziņu ar gumijas korda apvalkiem dinamiskie un statistiskie elastīgie raksturlielumi. Gumijas korda sajūga stabila darbība tiek analizēta izmantojot matemātiskos modeļus, kas apraksta katra dzinēja slodzes pārnese līnijas atkarībā no katra dzinēja darba leņķa novirzes. Rakstā sniegti pierādījumi, ka šāda veida sajūgi, kas ļauj pārraidīt griezes momentu līdz 8000 kNm, ir piemēroti divu dzinēju piedziņas griezes momenta pārvadei ar kopējo jaudu līdz 10 000 kW. Zinātniskajā rakstā arī ir pierādīts, ka elastīgo sajūgu ar gumijas korda apvalkiem izmantošana, bez hidrauliskā savienojuma starp sajūgiem, nodrošina vienmērīgāku slodzes sadalījumu, jo palielinās piedziņas mehāniskās sistēmas elastība.

Zinātniskajā rakstā [15] tika piedāvāti eksperimentālo pētījumu rezultāti par sprieguma-deformācijas stāvokli gumijas korda sajūgu apvalku nostiprināšanas, stabilizācijas un stiprības samazināšanas stādījās, statiskās slodzes režīmā. Redzamišo raksturlielumu ietekmes samazinājums uz pievada dinamisko slodzi. Tiek izskatīti īpatnējās berzes fizikālie procesi sajūga elastīgajā elementā. Zinātniskajā rakstā tika piedāvāti īpatnējās berzes atkarības grafiki no dinamiskā momenta, vibrācijas frekvences, vērpes leņķiem un sajūga korpusa temperatūras.

Zinātniskajā darbā [55] tika izpētīti *M-14* bultskrūvju sagraušanas iemesli, kuri izgatavotiem no tērauda *30XTC A* ar aizsargājošu kadmija pārklājumu. Lai noskaidrotu izgatavotos no tērauda *30XTC A* bultskrūvju sagraušanas cēloņus, tika pētīti ķīmiskie un fāžu sastāvi, mikrostruktūra un lūzumu vietas.

Darbā aplūkoti arī vidēja oglekļa satura konstrukciju tēraudi, kuriem ekspluatācijas laikā ir tendence uz aizkavētu lūzumu pie statiskām slodzēm, kas ir zemākas par tecēšanas robežu, ciklisku (ikdienas un sezonālu) temperatūras izmaiņu apstākļos. Zinātniskajā darbā, pēc analīzes rezultātiem, tika noteikti bultskrūvju sagraušanas iemesli un sniegti rekomendācijas to novēršanai.

Darbā [56] apskatīta dažāda veida paraugu, kas izgatavoti no *30XTC A* markas tērauda ar cinka pamata pārklājumiem, sagraušana, kā arī analizēti stiprinājumu, izgatavotu no *30XTC A* markas tērauda, sagraušana ekspluatācijas laikā, konstatēti bojāto detaļu darbaspējas zuduma iemesli, pielietojot skenējošu elektronu mikroskopijas metodi, un izpētīti paraugu, kas izgatavoti no *30XTC A* markas tērauda, noguruma un graudu robežas trausluma sagraušanas mehānismi. Veiktie detaļu, kas izgatavotas no *30XTC A* markas tērauda, pētījumi ļāva noteikt galvenos stiprinājumu sairšanas cēloņus ekspluatācijas laikā. Vairums detaļu atteices gadījumu ir saistīti ar noguruma



plaisām, kas veidojas apstrādes rezultātā radušos skrāpējumu dēļ uz virsmas, iespaiduma vai daļiņām no smilšu strūklas, kā arī berzes darbības laikā. Pamatojoties uz veiktajiem pētījumiem, sniegtas rekomendācijas, lai novērstu faktorus, kas veicina *30XICA* markas tērauda paraugu sairšanu.

Darbā [87] analizēti augstas stiprības bultskrūvju salīdzinošie stiprības raksturlielumu mērījumu rezultāti, kas iegūti ar portatīvo cietības mērītāju, ko pielieto konstrukciju apsekošanai. Veiktie augstas stiprības bultskrūvju īpašību pētījumi ar dažādām kontroles metodēm, apstiprināja to stiprības raksturlielumu noteikšanas pieļaujamību un pareizību konstrukciju apsekošanas procesā ar pārnēsājamiem cietības mērītājiem, ar nosacījumu, ka iepriekš veikta mēraparāta pielāgošana, salīdzinot tiešo un netiešo rezultātu vērtības.

Darbā [23] tika aprakstīta dažādu leģējošu elementu ietekme uz *TBF* tērauda rūdīšanas paaugstināšanu, kā arī pētīta leģējošu elementu ietekme uz *TBF* tērauda cietību pēc Vickers metodes, mikrostruktūru un paliekošā austenīta īpašībām. Izpētīta leģējošu elementu ietekme, tādu kā, *Cr*, *Mo* un *Ni*, uz *TBF* tērauda mikrostruktūru un paliekošā austenīta ar saturu 0,2 % *C*, 1,5 % – *Si*, 1,5 % – *Mn* un 0,05 % – *Nb* īpašībām. *TBF* tēraudu paliekošā austenīta raksturlielumi un tilpuma daļa tika noteikta ar rentgenstaru difraktometriju. Darbā veiktie pētījumi apstiprināja leģējošu elementu ietekmi uz tērauda cietību un rūdīšanu.

Visi literatūras apskatā minētie risinājumi vērsti, lai samazinātu sajūgu bojājumu risku un palielinātu sajūgu drošību, tomēr ekspluatācijā sastopami gadījumi, kad notiek amortizējošo īpašību samazināšanās vai pat sajūga sagraušana. Tāpat šobrīd ir gadījumi, kad notiek sajūgu un to stiprinājuma *M-24* bultskrūves bojājumi starpremontu periodā, neskatoties uz to, ka atsevišķi autori pielieto dažādas metodes un aprēķinu programmas sajūgu drošuma un darbaspējas izpētei. Tomēr šīs metodes neizskata gumijas korda apvalka materiālu īpašību izmaiņu prognozes ekspluatācijas laikā. Pagaidām nav elastīgo gumijas korda sajūgu pētījumu priekš attiecīgajām mašīnbūves konstrukcijām Latvijas apstākļos, īpaši Latvijas dzelzceļam. Sajūgu izturība, to īpašības un īpatnības Latvijas apstākļos nav pētītas.

## 1.9. Pirmās nodaļas secinājumi

Analizējot iegūtos datus, laika periodā no 2012. līdz 2021. gadam Latvijas dzelzceļā tika konstatēts liels gumijas korda sajūgu atteikumu skaits, kopējais gumijas korda sajūga atteikumu skaits sastāda 101 gadījums un 298 ir tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumi. Tāpat promocijas darbā tika veikts detalizēts sajūgu un bultskrūvju atteikumu novērtējums pa sezonām un konstatēts, ka lielākā atteiču skaita daļa ir attiecināma uz ziemas periodu. Līdzīga problēma, saistīta ar gumijas korda sajūga atteikumiem ir arī uz Ukrainas dzelzceļa, kur kopējais gumijas korda sajūgu atteikumu skaits laika periodā no 2015 -2020g. sastāda 3024 gadījumus. Gumijas korda sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu problēma izpētīšanas ir aktuāla un attiecīgi pastāv zinātniska interese.

Analizējot augstākminētos ārzemju autoru pētījumus, varam konstatēt, ka:

1. Vairāki autori pēta augstas elastības apvalka sajūgu darbību.
2. Izstrādāti analītiski aprēķini sajūga amortizējošās spējas novērtēšanai, piedāvātas jaunas augsti elastīga sajūga elementa formas, tiek pētītas dažādas aprēķinu metodes sajūgu stāvokļa novērtēšanai un to drošuma palielināšanai.

3. Tiek izmantotas mūsdienīgas aprēķinu sistēmas un galīgās elementu modelēšanas programmas, piemēram, Ansys, AutodeskInventorAutoCad, Adams, SolidWorks, MSC Nastran, Medyna u.c.

Tomēr citu autoru pētījumos var konstatēt vairākus trūkumus:

1. Dotajos zinātniskajos rakstos autori nav aplūkojuši tādus jautājumus kā sajūgu materiāla cietības mērīšana dažādos temperatūras diapazonos no  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ekspluatācijas laikā Latvijas dzelzceļa apstākļos un nav ņēmuši vērā gumijas korda sajūga ģeometrisko parametru mērīšanu.
2. Netika pētīti spriegumi, kas iedarbojas uz sajūgu, izraisot sajūga sānu virsmas sairšanu.
3. Nav pētīta gumijas korda sajūgu bojājumu un atteices statistika ekspluatācijas laikā.
4. Netika veikti elastīgo sajūgu rūpniecisko iekārtu noslogojuma pētījumi atkarībā no to nobraukuma vai darbības laika.
5. Netika veikti sajūgu drošuma parametru pētījumi, un kādā veidā palaišanas reižu skaita un palaišanas griezes momentu lielums ietekmē gumijas korda sajūgu bojājumus.
6. Netika izskatīta bultskrūvju mikrostruktūra atkarībā no bultskrūvju darbības laika attiecīgajā mezglā.
7. Autoru darbos netika veikti pētījumi par sajūga slīpuma leņķu novirzes ietekmi uz tā drošumu.

Līdz ar to, izanalizēta esošā situācija, saistīta ar datiem par sajūga darbības laiku līdz atteikumam (parādīts tabulā korda sajūga bojājumu analīze – Pielikums 1), datiem par sajūga apskates periodiskumu ekspluatācijas laikā, dažādu spēku, spriegumu iedarbības ietekmē, temperatūras ietekmē, kā arī vārpstas noviržu ietekmi uz sajūgu. Ņemot vērā iepriekš minētās iedarbības izstrādāsim savu metodiku, kā aprēķināt un novērtēt ārējo faktoru ietekmi uz gumijas korda sajūga apvalku. Un tika veikta metodikas, aprobācija, izmantojot pieejamu Latvijas dzelzceļa motorvagona ritošā sastāva vilces piedziņu ar toroidāliem gumijas korda sajūgiem.

## **2. GUMIJAS KORDA SAJŪGU UN TO STIPRINĀJUMA BULTSKRŪVJU ATTEIKUMA NOVĒRŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE**

Dažādās disertācijās un zinātniskajos darbos teorētiskie aprēķini tiek veikti, izmantojot matemātisko aparātu un sarežģītas formulas. Sarežģīta matemātiskā aparāta izmantošana prasa daudz datu, kas var nebūt pieejami, bet pieņēmumu izmantošana nedod objektīvu priekšstatu par to, kas notiek ar gumijas korda sajūgu, un tas var radīt kļūdu aprēķinos.

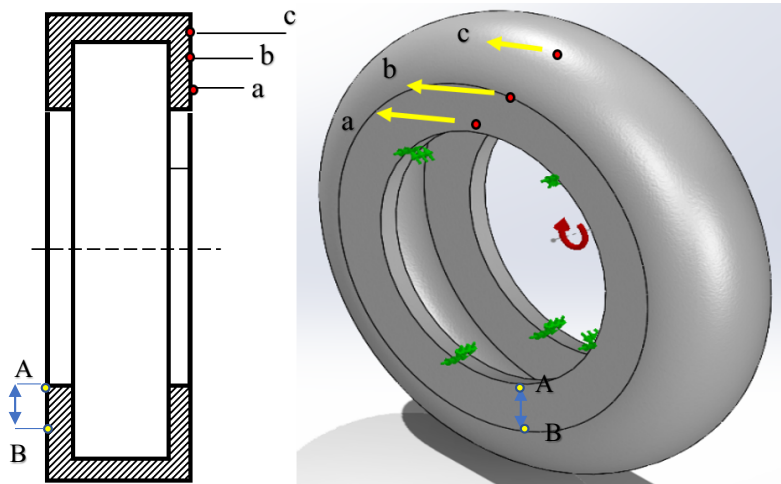
Lai samazinātu dažādu dzelzceļa transportā un rūpnieciskajās iekārtās izmantojamo gumijas korda sajūga bojājumu skaitu, tiek ierosināts izmantot sekojošu gumijas korda sajūgu un stiprinājuma bultskrūvju metodiku.

Izstrādātās metodikas mērķis ir samazināt gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju atteikuma skaitu, savlaicīgi noteikt elastīgā sajūga apvalka bultskrūves bojājuma cēloņus un izstrādāt pasākumus, lai panāktu sajūgu un to bultskrūvju atteikumu gadījumu samazināšanos. Gumijas korda sajūga un to bultskrūvju stiprinājuma atteikuma novēršanas metodika ietver 10 punktus.

1. Statistisko datu apkopojums par bojājumu zonām.
2. Uzsilšanas temperatūras kontrole.
3. Gumijas korda sajūgu cietības pārbaude.
4. Gumijas korda sajūgu izmēru kontrole.
5. Gumijas korda sajūgu sagraušanas spēku aprēķins.
6. Gumijas korda sajūgu noviržu mērījumi.
7. Gumijas korda sajūgu frekvenču analīze.
8. Gumijas korda sajūgu materiālā īpašību pētījumi pie stiepšanas vienas virzienā.
9. Gumijas korda sajūga modeļa izstrāde GEM programmas pakotnē.
10. Bultskrūvju bojājumu noteikšana ar dažādam metodēm.

### **2.1. Statistisko datu apkopojums par bojājumu zonām**

Lai identificētu un atrastu sagraušanas zonas, jāveic ekspluatējamo sajūgu vizuāla apskate. Gumijas korda sajūgu vizuālo apskati jāveic pie nestrādājoša aprīkojuma, tehniskās apkopes sistēmas ietvaros, kā arī gumijas korda sajūgu vizuālo apskati jāveic katru reizi pēc agregāta apstāšanās. Gumijas korda sajūgs uz defektu klātbūtni jāpārbauda pa visa sajūga virsmu apakšēja daļā (a), vidēja daļā (b) un augšēja daļā (c) (2.1. att) no abām pusēm. Noteikt sajūgu bojājuma virsmas sastopamās ekspluatācijā, noteikt un izmērīt attālumu no stiprinājuma diska punkta A līdz bojājuma vietas punktam B (2.1. att.). Savākt atteikuma statistiku ne mazāk kā N gadījumus.



2.1. att. Gumijas korda sajūga apskates vietas.  
a – apakšējā daļa; b – vidējā daļa; c – augšējā daļa.

Pēc vizuālās apskates tika konstatētas bojājumu zonas, kurās notiek atteikumi, kas liecina par problemātisku zonu klātbūtni gumijas korda sajūgā un kas ir jāizpēta. Ja ekspluatācijā tiek konstatēta gumijas korda sajūga sagraušana vai bojājums, tas ir jānomaina.

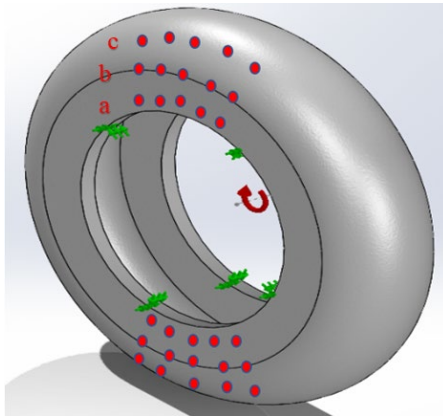
## 2.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas

Gumijas korda sajūga silšanas temperatūras kontrole tehniskās apkalpošanas sistēmas ietvaros jāveic uzreiz pēc ražošanas aprīkojuma apstāšanās. Lai veiktu temperatūras kontroli, ir jāzina maksimālā ekspluatācijā pieļaujamā gumijas korda sajūga robežuzsilšanas temperatūra  $t_{max}$ . Sajūgu robežtemperatūru reglamentē normatīvo tehniska dokumentācija vai *ISO*; *EN* standarti. Temperatūras mērījumi jāveic:

- a – gumijas korda sajūga apakšējā daļā;
- b – gumijas korda sajūga vidusdaļā;
- c – gumijas korda sajūga augšējā daļā.

Temperatūru jāizmēra sajūga augšējā, vidējā un apakšējā daļā piecās vietās pa sajūga apli, vismaz 5–7 mm attālumā no iepriekšējā temperatūras mērījuma.

Temperatūras mērīšanas vietas redzamas 2.2. attēlā.



2.2. att. Temperatūras un cietības kontroles vietas:  
a – apakšējā daļa; b – vidējā daļa; c – augšējā daļa.

Temperatūras mērīšanas vietas nosaka pēc diametru starpības ( $D - d$ ):

- a – 10 % starpības apakšējā daļā;
- b – 50 % starpības vidējā daļā;
- c – 90 % starpības augšējā daļā.

Veikt uzsilšanas temperatūras pārbaudi  $N$  gumijas korda sajūgiem 30 punktos  $t_1 \dots t_{30}$  (2.2. att.) no abām pusēm un noteikt uzsilšanas temperatūras vidējo vērtību (2.1. formula).

$$t_{vid} = \frac{\sum_{i=1}^{30} t_i}{30} \quad (2.1)$$

kur  $t_i$  – uzsilšanas temperatūra, °C

Saskaņa ar standarta datiem pārbaudīt vidējo noteikto temperatūru ar maksimāli pieļaujamu  $t_{max}$  (2.2. formula).

$$t_{vid} < t_{max} \quad (2.2)$$

Temperatūras kontrole jāveic ar bezkontakta pirometru, kam jānodrošina temperatūras mērīšanas diapazonu no -30 °C līdz 100 °C ar mērījumu precizitāti līdz 0,1 °C.

Sajūgu uzsilšanas temperatūras parametru kontroles periodiskums jāveic atkarībā no ekspluatācijas temperatūras apstākļiem:

- -20 °C līdz 0 °C – reizi sešos mēnešos;
- 0 °C līdz +20 °C – reizi sešos mēnešos;
- +21 °C līdz +25 °C – reizi trīs mēnešos;
- +26 °C līdz +30 °C – reizi mēnesī;
- +31 °C līdz +35 °C – reizi nedēļā.

Temperatūras mērījumu rezultāti jānoformē ar protokolu.

Bet gumijas korda sajūgiem, kas darbojas augstas temperatūras apstākļos, kā arī Latvijas dzelzceļa ritošā sastāvā, lai kontrolētu maksimālo sildīšanas temperatūru, sajūga virsmai tiek piedāvāts uzklāt termokrāsu.

### 2.3. Gumijas korda sajūgu ģeometrisku izmēru kontrole

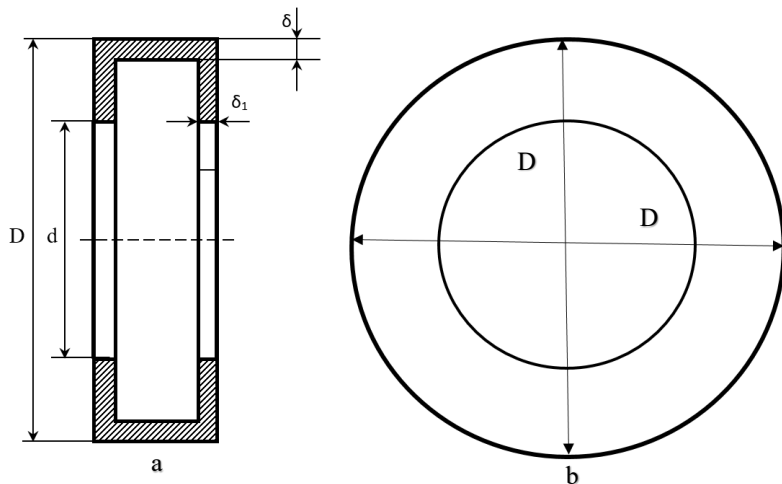
Ekspluatācijā tiek noteikt šādos sajūga ģeometriskos izmērus:

- ārējās virsmas diametrs  $D$ , mm;
- iekšējais sēžas diametrs  $d$ , mm;
- augšējās daļas biezums  $\delta$ , mm;
- sānu sienas biezums  $\delta_1$ , mm.

Veicot gumijas korda sajūga mērījumus, jāzina sajūgu izmēru robežvērtības  $D$ ,  $d$ ,  $\delta$ ,  $\delta_1$ , kas ir pieļaujamas ekspluatācijā. Mērījumi jāveic uz nedarbojošās iekārtas sistēmas tehniskās apkalpošanas ietvaros. Veikt sajūgu izmēru kontrole, noteiktas  $D$ ,  $d$ ,  $\delta_1$  (2.3. a att.). Izmērs  $\delta$  tika izmantots spēka  $P_c$  aprēķiniem. Salīdzināt  $D$ ,  $d$ ,  $\delta_1$  ar standarta datiem  $D_{st}$ ,  $d_{st}$ ,  $\delta_{1st}$ .

- $D_{st} < D < D_{st}$ ;
- $d_{st} < d < d_{st}$ ;
- $\delta_{1st} < \delta_1 < \delta_{1st}$ .

Lai precīzi noteiktu sajūga diametru un pārbaudītu uz ekscentrisitātes, jāveic divi mērījumi horizontāli un vertikāli starp mērīšanas plāksnēm  $90^\circ$  leņķī. Ģeometrisko izmēru mērīšanas vietas redzamas 2.3. b attēlā.



2.3. att. Ģeometrisko izmēru noteikšana:  
a – sajūgu izmēru kontrole; b – pārbaudīt uz ekscentrisitātes.

Sajūga diametru  $D$ ;  $d$  un sānu virsmas  $\delta$ ;  $\delta_1$  mērījumus jāveic 3 vietās pa sajūga apli. Sajūga ārējo diametru  $D$  un iekšējo diametru  $d$  mērījumus jāveic ar bīdmēru 0–600 mm ar mērījumu precizitāti 0,1 mm, Bet sajūga sienas biezumu  $\delta$ ;  $\delta_1$  veic ar mikrometru 0–150 mm, ar mērījumu

precizitāti 0,01 mm. Iegūtie sajūgu mērījumu rezultāti tiek salīdzināt ar ISO EN un DIN standartiem, kas reglamentē gumijas korda sajūga robežizmērus pieļaujamus ekspluatācijā.

Sajūgu izmēru ģeometrisko mērījumu rezultāti tiek noformēt ar protokolu.

Metodikas ietvaros tika piedāvāts selektīvi kontrolēt izmērus jauniem sajūgiem pirms ieviešanas ekspluatācijā. Ekspluatācijā esošiem sajūgiem ģeometriskos izmērus kontrolē atkarībā no apgriezību skaita:

- līdz 700 apgr./min. – vienu reizi gadā;
- no 701 līdz 1500 apgr./min. – vienu reizi pusgadā;
- no 1501 līdz 1800 apgr./min. – vienu reizi trijos mēnešos;
- no 1801 līdz 2000 apgr./min. – vienu reizi mēnesī.

Pēc mērījuma rezultātiem, ja sajūga izmērs atbilst standarta *ISO, EN, DIN* prasībām, sajūgu atļauts ekspluatēt, ja sajūga izmērs neatbilst *ISO, EN, DIN* standarta prasībām, tad šo sajūgu ekspluatēt nedrīkst. Sajūgu ģeometriskos izmērus tālāk izmanto, aprēķinot spēkus un spriegumus, kas iedarbojas uz sajūgu ekspluatācijas laikā (metodikas 2.5. solis).

## 2.4. Gumijas korda sajūga cietības pārbaude.

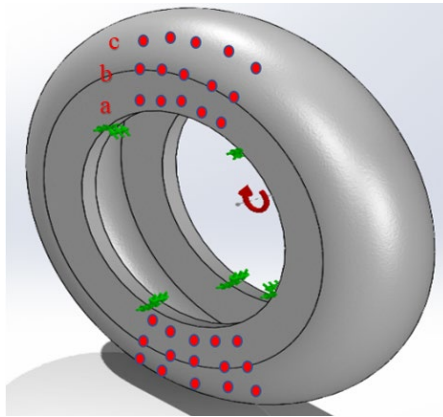
Gumijas korda sajūga cietību reglamentē *ISO, EN* un *DIN* standarti. Atbilstoši standartiem gumijas korda sajūga cietība tiek noteikta ar Šora A metodes palīdzību, un tai jābūt no 50,0 – līdz 65,0 nosac. vien. robežās. Mērījumi, ar Šora A metodes palīdzību, tiek reglamentēti saskaņā ar *ISO 7619-1:2010* [29] standartu. Mērījumi jāveic ar gumijas cietības mērītāju Šora A Durometers [29] vai ar citu cietības mērītāju ar precizitātes klasi  $\pm 0,1$ . Mērījumu izturēšanas laikam jābūt  $3 \pm 1$  sek. Cietības noteikšanas ierīcei jānodrošina mērījumu precizitāte apkārtējās vides temperatūras diapazonā no  $-30$  °C līdz  $+60$  °C. Cietības noteikšanas mērierīcei jānodrošina mērījumu precizitāte pie apkārtējās vides temperatūras diapazonā no  $-30$  °C līdz  $+60$  °C. Sajūgu cietības mērījumu jāveic pie dažādiem temperatūras diapazoniem:

- $-20$  °C;
- $0$  °C;
- $+20$  °C;
- $+60$  °C.

Sajūgu cietības mērījumi jāveic dažādos temperatūras diapazonos:

- $-20$  °C;
- $0$  °C;
- $+20$  °C;
- $+60$  °C.

Cietības mērījumi sajūga augšējā vidējā un apakšējā daļā jāveic vismaz 5–7 mm attālumā no iepriekšējā temperatūras mērījuma vietas. Cietības mērīšanas vietas redzamas 2.4 attēlā.



2.4. att. Cietības kontroles vietas.

. Cietības mērīšanas vietas nosaka pēc diametru starpības ( $D - d$ ):

- a – 10 % starpības apakšējā daļā;
- b – 50 % starpības vidējā daļā;
- c – 90 % starpības augšējā daļā.

Katrā temperatūras diapazonā jāveic pieci cietības mērījumi:

- gumijas korda sajūga apakšējā daļā;
- gumijas korda sajūga vidusdaļā;
- gumijas korda sajūga augšējā daļā.

Veikt cietības pārbaudi  $N$  gumijas korda sajūgiem 30 punktos un  $C_1 \dots C_{30}$  (2.2. att.) no katra sajūga puses un aprēķināt vidējo vērtību (2.3. formula).

$$C_{\text{vid}} = \frac{\sum_{i=1}^{30} C_i}{30}, \quad (2.3)$$

kur  $C_i$  – cietība, nosac. vien.

Pārbaudīt vidējo noteikto  $C_{\text{vid}}$  ar maksimāli pieļaujamu  $C_{\text{max}}$  (2.4. formula).

$$C_{\text{st min}} < C_{\text{vid}} < C_{\text{st max}} \quad (2.4)$$

Cietības mērījumi jāveic atkarībā no temperatūras apstākļiem, kādos darbojas gumijas korda sajūgs:

- no  $-20$  °C līdz  $0$  °C – reizi mēnesī;
- no  $+1$  °C līdz  $+20$  °C – reizi trīs mēnešos;
- no  $+21$  °C līdz  $+40$  °C – reizi mēnesī;
- no  $+41$  °C līdz  $+60$  °C – reizi nedēļā.

Cietības mērījumu rezultāti tiek noformēt ar protokolu.

Ja sajūgu cietība neatbilst normatīvo dokumentu prasībām, tad sajūgu nedrīkst nodot ekspluatācijā bet ekspluatācijā esošo sajūgu ir jānomaina pret jaunu.



No gumijas korda sajūga temperatūras un cietības lielā mērā ir atkarīgas sajūga gumijas korda elastības īpašības. Cietības pārbaudi periodiskumu jāveic sistēmu, kurām ir uzstādīti gumijas korda sajūgi, tehniskās apkopes ietvaros.

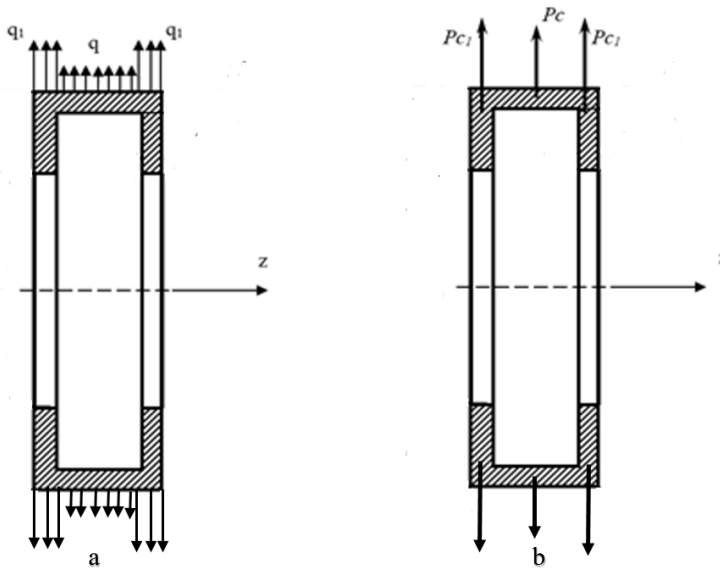
Ja nosacījumi netiek izpildīti, tad gumijas korda sajūgu jānomaina. Ja nosacījumi, pēc metodikas punktiem ir izpildīti, tad jāpāriet pie metodikas piektā punkta.

## 2.5. Gumijas korda sajūga sairšanas spēku aprēķins

Ja ekspluatācijas laikā notiek sajūgu atteikumi, bet sajūgu ģeometriskie izmēri, cietības parametri un silšanas temperatūra atbilst *ISO*, *EN*, *DIN* standartu prasībām, tad, lai identificētu sajūgu atteikuma cēloņus, nepieciešams veikt spēku, spriegumu un griezes momenta aprēķinus, kas iedarbojas uz sajūgu, un jānosaka to maksimālās vērtības ekspluatācijas apstākļos.

Centrbēdzes spēka  $P_c$  darbība un tā intensitāte  $q$  redzama 2.5. attēlā.

Saskaņā ar 2.5. metodikas punktu, spēku darbības noteikšana nepieciešama, lai identificētu gumijas korda sajūga bīstamos darbības režīmus pie dažādiem ātruma diapazoniem.



2.5. att. Centrbēdzes spēks, kas iedarbojas uz sajūgu, un tā intensitāte:

a –centrbēdzes spēka intensitāte  $q$ ; b –centrbēdzes spēks  $P_c$   $P_{c1}$

Rezultējošais īpatnējais centrbēdzes spēks, kas iedarbojas uz sajūgu N/m:

1) darbojas sajūga centrā

$$P_c = \int_0^{b-2\delta_1} q \cdot dz = \int_0^{b-2\delta_1} \rho \cdot \delta \cdot \frac{D-\delta}{2} \cdot \omega^2 \cdot dz = \rho \cdot \delta \cdot \frac{D-\delta}{2} \cdot \omega^2 \cdot (b-2 \cdot \delta_1), \quad (2.5)$$

kur  $\omega$  –leņķiskais ātrums, rad/sek;

$q$  –centrbēdzes spēka intensitāte sajūga sānu virsmā, N/m<sup>2</sup>;

$\rho$  –gumijas korda sajūga materiāla blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$\delta_1$  –sajūga sānu virsmas biezums, mm;

$b$  –sajūga biezums, mm;

$D$  – sajūga diametrs, mm;

2) darbojas sānu virsmā

$$P_{c1} = \int_0^{\delta} q_1 \cdot dz = \int_0^{\delta} \rho \cdot \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot d \cdot dz = \rho \cdot \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot d \cdot \delta \quad (2.6.)$$

kur  $\omega$  – leņķiskais ātrums, rad/sek;

$\rho$  – gumijas korda sajūga materiāla blīvums, kg/m<sup>3</sup>.

$q_1$  – Centrbēdzes spēka intensitāte sajūga sānu virsmā, N/m<sup>2</sup>;

$\delta$  – sajūga augšējās virsmas biezums, mm;

$b$  – sajūga biezums, mm;

$D$  – sajūga diametrs, mm.

3) Centrbēdzes spēka intensitāte sajūgu centrālajā daļā N/m<sup>2</sup>:

$$q = \frac{dP_c}{ds} = \rho \cdot \delta \cdot \frac{D - \delta}{2} \cdot \omega^2 \quad (2.7.)$$

kur  $\omega$  – leņķiskais ātrums, rad/sek;

$\rho$  – gumijas korda sajūga materiāla blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$\delta$  – sajūga augšējās virsmas biezums, mm;

$D$  – ārējās virsmas diametrs, mm.

Centrbēdzes spēka intensitāte sajūga sānu virsmā N/m<sup>2</sup>:

$$q_1 = \frac{dP_{c1}}{ds} = \rho \cdot \frac{D - d}{2} \cdot \frac{D + d}{2} \cdot \omega^2 \quad (2.8.)$$

kur  $\omega$  – leņķiskais ātrums, rad/sek;

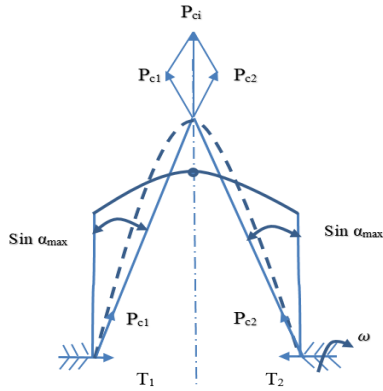
$\rho$  – gumijas korda sajūga materiāla blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$d$  – sajūga iekšējais diametrs, mm;

$D$  – ārējās virsmas diametrs, mm.

4. Asu spēka  $T$  noteikšana.

Grafiskais spēku apzīmējums, kas iedarbojas uz gumijas korda sajūgu, redzami 2.6. attēlā. un parādīts ar pārtrauktām līnijām.



2.6. att. Spēku darbība uz gumijas korda sajūgu.

Aksiālā spēka  $T$  iedarbību uz sajūgu noteikta pēc (2.9. formulas).

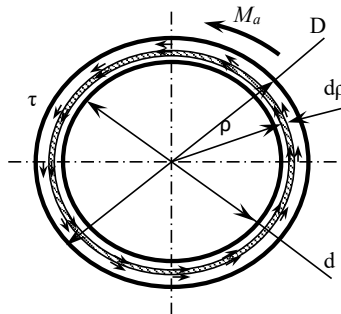
$$T = P_{c1} \cdot \sin \alpha \quad (2.9.)$$

kur  $P_{c1}$  - rezultējošais īpatnējās centrālās spēks sānu virsmā, N/m.

Vērtība  $\sin \alpha$  tika noteikta grafiski, ņemot vērā centrālās spēka aprēķinu, kas palielinās, apgriezumu skaita palielināšanas līdz 1825 apgr/min (120 km/h), un noteikts grafiski  $\alpha_{\max} = 8^\circ$ ;  $\sin 8 = 0,139$ .

4. Vērpes nobīdes tangenciālo spriegumu attiecība pret berzes vietu  $\tau$ ; un attiecība pret sajūga stiprinājuma atloku  $\tau_k$  noteikšana.

Vērpes nobīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret berzes vietu redzami 2.7. attēlā.



2.7. att. Tangenciāla sprieguma noteikšanas aprēķinu modelis.

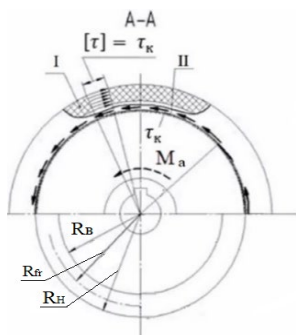
- Sajūgu bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret berzes vietu noteikts pēc (2.10 formulas).

$$\tau = \frac{M_a}{\frac{\pi D^4}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)} \rho \leq [\tau] \quad (2.10.)$$

kur  $M_a$  – vilces dzinēja griezes moments, k N m;

$D$  – gredzena ārējais diametrs, mm;  
 $d$  – gredzena iekšējais diametrs, mm;  
 $\rho$  – berzes rādiuss, mm;  
 $[\tau]$  – pieļaujamais tangenciālais spriegums 0,7 - 0,75 MPa [59].

Sajūgu bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret sajūga stiprinājuma atloku redzami 2.8. attēlā.



2.8. att. Vērpes bīdes tangenciālā sprieguma iedarbība.

$R_B$  – gredzena iekšējais rādiuss;  $R_H$  – gredzena ārējais rādiuss;  $R_{fr}$  – berzes rādiuss;  
 $\tau_k$  – vērpes bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret sajūga stiprinājuma atloku;  
 $M_a$  – enkura vārpstas griezes moments.

I – vērpes laukums; II – enkura vārpstas vērpes nobīdes

$$\tau_k = \frac{M_a}{\frac{\pi D^4}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)} \frac{D}{2} = \frac{16 \cdot M_a}{\pi D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)} \leq [\tau]; \quad (2.11.)$$

kur  $M_a$  – vilces dzinēja griezes moments, k N m;

$D$  – gredzena ārējais diametrs, mm;

$d$  – gredzena iekšējais diametrs, mm;

$[\tau]$  – pieļaujamais tangenciālais spriegums 0,7 - 0,75 MPa [59].

Iegūtos griezes bīdes tangenciālo sprieguma aprēķina rezultātus jāsalīdzina ar pieļaujamo griezes bīdes tangenciālo spriegumu.

Griezes moments noteikts pēc 2.12. formulas.

$$M_a = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n} \eta \quad (2.12.)$$

kur  $P$  - vilces dzinēja jauda, k W;

$n$  – vilces dzinēja apgriezieni, apgr/min;

$\pi$  – matemātiska konstante = 3,14;

$\eta$  - vilces dzinēja lietderības koeficients 86–92 % [60].

Spēku, spriegumu un griezes momenta iedarbību uz gumijas korda sajūgu nosaka pie dažādām apgr/min lielumiem.

- 50 apgr/min;
- 100 apgr/min;
- 150 apgr/min;
- 200 apgr/min;
- 500 apgr/min;
- 1000 apgr/min;
- 1500 apgr/min;
- 2000 apgr/min.

Pie tam saskaņā ar 2.11 un 2.12 formulu vērpes griezes bīdes tangenciālais spriegums  $\tau_k$  un moments  $M_a$  jānosaka pie maziem apgr./min (no 0 līdz 200 apgr./min.), centrālās spēka  $P_c$  darbību noteikt pie lieliem apgr./min (no 500 līdz 2000 apgr./min.). Aksiālo spēku  $T$  noteikt pie apgriezieniem virs 1500 apgr/min.

Sprieguma un momenta spēku skaitlisko vērtību nosaka ar precizitāti līdz simtdaļai (0,00) no aprēķinātajām vienībām.

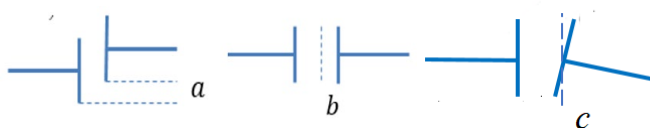
Gumijas korda sajūga sagraušanas spriegumu aprēķins un spēku iedarbības noteikšana nepieciešama, lai identificētu gumijas korda sajūga bīstamos darbības režīmus pie dažādiem darbības ātruma diapazoniem.

Aprēķinātā spēka  $P_c$  vērtība un momenta  $M_a$  ietekme tālāk tiek izmantota GEM modelēšanas programmā.

## 2.6. Gumijas korda sajūga noviržu mērījumu

Sajūgu aksiālo radiālo un leņķisko noviržu pieļaujamās vērtības reglamentē *ISO*; *EN*; *DIN* standarti un tās tiek mērītas:

- a – radiālā virzienā;
- b – aksiālā virzienā;
- c – leņķiskā virzienā.

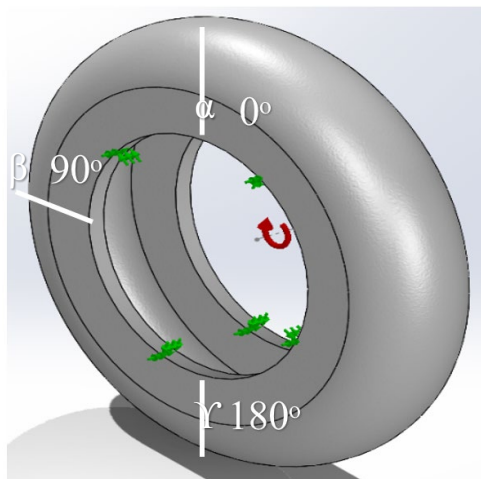


2.9. att. Sajūgu noviržu veidi:

a – radiālā virzienā; b – aksiālā virzienā; c – leņķiska virzienā.

Sajūga noviržu lielumu noteikšana jāveic uz nestrādājošām iekārtām tehniskās apkopes sistēmas ietvaros. Veikt noviržu mērījumus N sajūgiem trijās vietās. (2.10. att.) pa sajūga apli;

- sajūga augšējā daļā  $\alpha - 0^\circ$ ;
- sajūga vidējā daļā  $\beta - 90^\circ$ ;
- sajūga apakšējā daļā  $\gamma - 180^\circ$ .



2.10. att. Gumijas korda sajūga mērījuma vietas.

Katram sajūgam jāveic mērījumi:

- radiālā  $a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha$ ;
- aksiālā  $a_\beta, b_\beta, c_\beta$ ;
- leņķiskā  $a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma$ .

Iegūti mērījumu dati jāsalīdzina ar standarta datiem

$$a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha, a_\beta, b_\beta, c_\beta, a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma < a_{st}, b_{st}, c_{st}$$

Gumijas korda sajūga mērījumus aksiālo, radiālo un leņķisko noviržu noteikšanu veic ar speciālo mērinstrumenta palīdzību aksiālo, radiālo un leņķisko noviržu mēršablonu ar precizitātes klasi  $\pm 0,1$  mm. Mērījumu periodiskumu jānodrošina atkarībā no ekspluatācijas apstākļiem:

- svarīgos dzelzceļa un jūras transporta aprīkojuma mezglos mērījumus jāveic sajūgu uzstādīšanas laikā un reizi gadā, veicot atjaunošanas remontu;
- citām rūpnieciskajām iekārtām mērījumi jāveic sajūgu uzstādīšanas laikā.

Mērījumu dati jānoformē ar pārbaudes protokolu.

Iegūtie aksiālo radiālo un leņķisko noviržu mērījumu dati tiek izmantoti modelēšanai GEM programmas vidē (9. metodikas solis), lai noteiktu noviržu ietekmi uz gumijas korda sajūga drošu darbību.

## 2.7. Gumijas korda sajūga frekvenču analīze

Lai veiktu gumijas korda sajūga frekvenču analīzi  $N$  paraugiem, nepieciešams noteikt:

- gumijas korda sajūga masu,  $M$ ;
- sajūga stinguma koeficientu,  $F$ ;
- sajūga rezonanses pašfrekvences,  $\omega$ .

Gumijas korda sajūga masas noteikšana ar nosvēršanas palīdzību, izmantojot svarus ar precizitāti  $\pm 50$  g.

Noteikt sajūga stingumu  $K$ , k N m/rad (2.13 formula).

$$K = M_a / \varphi \quad (2.13)$$

kur  $M_a$  – griezes moments, k N m;

$\varphi$  – pagrieziens leņķis, rad.

Sajūga pašfrekvences ir atkarīgas no stinguma koeficienta un sajūga masas. (2.14. formula)

$$\omega = (F/M)^{0.5} \quad (2.14)$$

kur  $F$  – sajūga stinguma koeficients, H/m;

$M$  – sajūga masa, kg.

Lai iegūtu rezultātus hercos, 2.14 formula jādala ar  $2\pi$

$$\omega = (F/M)^{0.5} / 2\pi \quad (2.15)$$

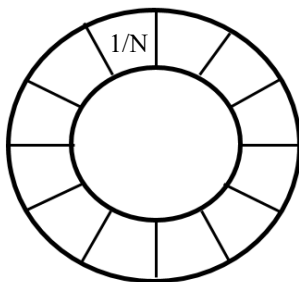
kur  $\pi$  – matemātiska konstante = 3,14.

Tālāk rezonanses frekvenču pētīšanā tika izmantota GEM modelēšanas programma (9. metodikas solis). Lai noteiktu bīstamās frekvences, pie kurām svārstībās piedalās noteikts sajūga masas daudzums.

## 2.8. Gumijas korda sajūga materiāla īpašību pētījumi

Pētījumu mērķis ir noteikt gumijas korda sajūga materiāla mehāniskās īpašības pie dažāda veida slodzēm. Materiāla īpašību noteikšana tika veikta ar stiepes pārbaudes iekārtu pie vienreizēja pārrāvuma un cikliskā veida slodzēm, pie tam maksimāli noslogojot sagraušanai pakļautās zonas.

Lai noteiktu materiāla īpašības, jāveic gumijas korda sajūga fragmentu sagraušanas un cikliskos eksperimentus. Sadalīt sajūgu uz  $N$  līdzīgam daļām un paņemt  $1/N$  fragmentu sagraušanai un cikliskiem eksperimentiem.



2.11. att. Sajūga apvalka fragmentu paraugu izmēru un formu izvēle.

Veikt  $N_i$  izmēģinājuma sēriju pie vienreizējas sagraušanas un  $N_i$  pie cikliskas slodzes noteikt materiāla īpašības:

- 1) deformācijas  $L_i$ , mm;
- 2) relatīvās deformācijas,  $\varepsilon_i$ ;
- 3) elastības modulis  $E_i$ , MPa;
- 4) spriegumi  $\sigma_i$ , MPa.

Pēc izmēģinājuma rezultātiem noteikt atkarību  $\sigma = f(\varepsilon)$ , veikt to aproksimāciju:

$$\sigma = f(\varepsilon) = a\varepsilon^n + b\varepsilon^{n-1} + k_0 \quad (2.12)$$

kur  $\sigma$  – spriegums, MPa;

$\varepsilon$  – relatīvā deformācija;

$a$ ;  $b$ ;  $k_0$  – koeficienti.

Pamatojoties uz testa rezultātiem, noteikt atkarības deformācijai no sprieguma un ar iegūto datu aproksimācijas rezultātiem, izveidot materiāla matemātisko modeli. Tālāk, pēc izmēģinājuma rezultātiem, dabūtās materiāla īpašības tiek izmantotas elastomēra materiāla modeļa izveidei GEM vidē un tiks izmantotas materiāla modeļa formēšanai metodikas 9. soli.

## 2.9. Gumijas korda sajūga modeļa izstrāde GEM programmas pakotnē

Lai realizētu šo metodikas punktu, jāizvēlas programma GEM pakotnē, kurā tiks veikta modelēšana (*ANSYS*, *ABAQUS*, *MD ADAMS MEDINA*, *SOLIDWORKS*). Noteikt piemērotākās programmas projektēšanai, aprēķinu modelēšanai un elastomēra materiāla sprieguma stāvokļa analīzei un izveidot GEM materiāla modeli.

Modeļa materiāla īpašības no metodikas 8. soļa un izmēģinājuma rezultātu datus, sprieguma  $\sigma$  atkarību no deformācijas  $\varepsilon$  ( $\sigma = f(\varepsilon)$ ), pie vienreizēja pārrāvuma un cikliskā noslogojuma veida ievadīt GEM modelēšanas programmā. Izvēlēties elastomēra materiāla modeļus pēc:

- 1) Monija-Rivlina metodes –  $\sigma_{MR} = f(\varepsilon)$ ;
- 2) Blatz - Ko metodes –  $\sigma_{BL} = f(\varepsilon)$ ;
- 3) Nelineāro - elastīgo metodes (NLE) –  $\sigma_{NLE} = f(\varepsilon)$ .

Programmā GEM izveidot gumijas korda sajūga materiāla modeli katram no iepriekš minētajiem elastomēra materiāla modeļu paraugiem.

Noteikt modelēšanas kļūdu:

$$\Delta_1 = \sum (\sigma_{MR} - \sigma)^2, \quad (2.17)$$

$$\Delta_2 = \sum (\sigma_{BL} - \sigma)^2, \quad (2.18)$$

$$\Delta_3 = \sum (\sigma_{NLE} - \sigma)^2, \quad (2.19)$$

kur  $\sigma$  – spriegums pēc izmēģinājuma rezultātiem, MPa;

$\sigma_{MR}$ ;  $\sigma_{BL}$ ;  $\sigma_{NLE}$  – spriegums pēc modelēšanas rezultātiem, MPa.

Izvēlēties modeli pēc –  $\Delta_1, \Delta_2; \Delta_3 = \min$ .



Pamatojoties uz modelēšanas rezultātiem, izvēlieties materiāla modeli, kas vislabāk raksturo eksperimentālos datus deformācijas diapazonā, kas noteikts no testa rezultātiem. Izvēlētajā elastomēra materiāla modelī jāveic aksiālo, radiālo un leņķisko noviržu ietekmes, sprieguma ietekmes pie dažādiem ātruma diapazoniem modelēšana un jānosaka rezonanses frekvences, kas iedarbojas uz gumijas korda sajūgu. Tālāk ar izvēlēto materiāla modeli izpildīt jāveic parametru modelēšana  $P_c, M_a, a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha, \omega$ , ar dažādiem modulēšanas parametriem jānosaka gumijas korda sajūga visvairāk noslogotās zonas un jāsalīdzina iegūtie dati ar  $P_c, M_a, a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha, \omega$  robežvērtībām.

Pamatojoties uz modelēšanas rezultātiem GEM programmā, jānosaka gumijas korda sajūga visvairāk noslogotās zonas.

## 2.10. Bultskrūvju bojājumu noteikšana ar dažādam metodēm

Šī metodikas punkta mērķis ir noteikt bultskrūvju atteices cēloņus. Lai noteiktu bultskrūvju atteices cēloņus nepieciešams veikt bultskrūvju izmēģinājumu ar dažādu nostrādāšanas laiku:

$$t_{\text{eksp}} = \sigma_f f (\Delta t) \quad (2.20)$$

kur:  $t_{\text{eksp}}$  – ekspluatācijas laiks, st;  
 $\sigma_t$  – sagraušanas spriegums, MPa;  
 $(\Delta t)$  – laika intervāls, st.

- sagraušana pie statiskās slodzes  $P_s$ , N paraugiem;
- sagraušana pie dinamiskās slodzes  $P_d$ , N paraugiem;
- sagraušana pie triecienslodzes  $a_k$  pie dažādiem temperatūras diapazoniem N paraugiem;
- cietības noteikšana, HB N paraugiem;
- ķīmisko sastāvu noteikšana N paraugiem par kaitīgu fosfora P un sēra S piemaisījumu klātbūtni.

Izmēģinājumu mērķis noteikt gumijas korda sajūga bultskrūvju atteikumu iemeslus.

Iegūtie izmēģinājuma rezultāti jāsalīdzina ar ISO un EN standarta datiem:

- $P_s > P_{s\ st}$ ;
- $P_d > P_{d\ st}$ ;
- $a_k > a_{k\ st}$ ;
- $HB_{st} < HB < HB_{st}$ ;
- $P < P_{st}$ ;
- $S < S_{st}$ .

Izmantojot iepriekš minētās izpētes metodes, noteikt gumijas korda sajūga bultskrūvju sagraušanas cēloņus un, ar metalogrāfiskās analīzes palīdzību apstiprināt mikroplaisu defektu un plaisu klātbūtni mikrostruktūrā.

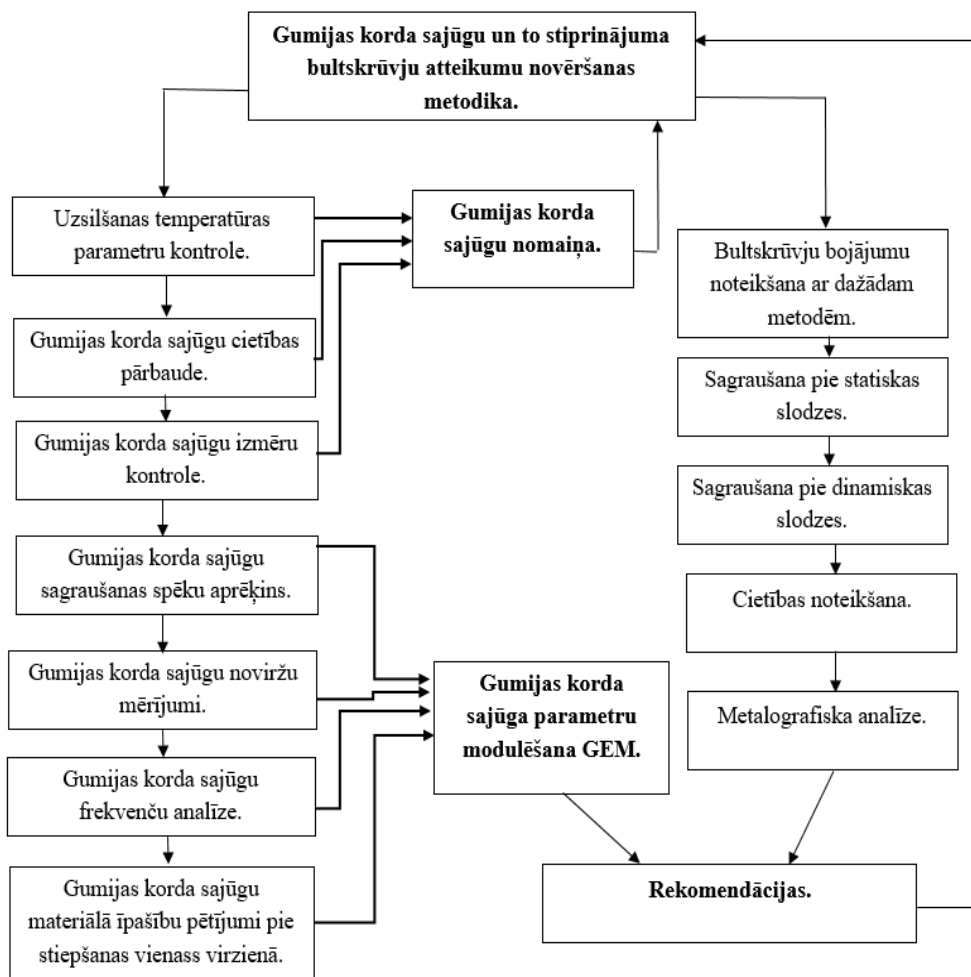
Metalogrāfiskās analīzes mērķis – iegūt informāciju par materiāla struktūru mikroskopiskā līmenī, sagatavojot paraugu un analizējot tā virsmu. Analīze jāsaņem ar pulēta un iegravēta parauga sagatavošanu, kas var atklāt materiāla mikrostruktūru. Ar mikroskopa palīdzību, ar palielinājumu no  $\times 100$  līdz  $\times 500$  izpētīt sagatavoto paraugu mikrostruktūru, uz mikrodefektiem, defektiem, plaisām, porām un ieslēgumu klātbūtni.

Ekspluatācijā uz gumijas korda sajūga bultskrūvēm iedarbojas triecienvibrācijas slodzes. Triecienvibrācijas slodžu lielumu tiek piedāvāts kontrolēt ar izstrādāto triecienvibrācijas ierīci, kas

dod iespēju pastāvīgi uzkrāt, analizēt un automātiski savākt statistiskos datus par trieciena spēku, ko uztver bultskrūves transporta līdzekļa ekspluatācijas laikā. Ar triecienvibrācijas ierīces palīdzību tiek piedāvāts fiksēt triecienvibrācijas slodzes lielumus un noteikta lieluma triecienu skaitu, kas uztver bultskrūves. Palielinoties darbības laikam, mikrostrukturā pakāpeniski uzkrājas defekti. Metodikas punkta mērķis ir noteikt trieciena slodzes kritisko lielumu, pēc tas sasniegšanas ir nepieciešams nomainīt bultskrūves, lai izvairītos no to sagraušanas.

## 2.11. Metodikas pielietošanas blokhēma

Metodikas pielietošanas algoritms ir parādīts blokhēmā.



Blokhēmā parādīts secīgu darbību algoritms, kura realizācija ļaus izstrādāt rekomendācijas gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu samazināšanai un novēršanai ekspluatācijā.

## 2.12 Nodaļas secinājumi

Tika izstrādāta gumijas korda sajūgu un stiprinājuma bultskrūvju atteikuma skaitu samazinājuma metodika. Gumijas korda elastīgo sajūgu atteikumu novēršanas metodika ir izstrādāta, lai nodrošinātu vadības lēmumu pieņemšanas procesu pamatojoties uz saņemto informāciju, kas nepieciešama, lai izvēlētos optimālās darbības, uz kuru pamata tiek veidoti korektīvie un preventīvie pasākumi, kuri novērstu un nepieļautu gumijas korda sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu rašanos ekspluatācijas laikā. Metodikā iekļauts reglamentētu darbību un izmēģinājuma metožu kopums ar GEM modelēšanas pielietojumu. Metodika var tikt realizēta pielietojot vispārīgās programmas Windows Office pakotnes, kā arī modelēšanas programmas, tādas kā Ansys, SolidWorks, AutoCad, bez liela skaita darbinieku piesaistes. Ieviešot izstrādāto metodiku, ir iespējams panākt gumijas korda sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu samazināšanos, kas savukārt nozīmē iekārtu dīkstāves un ar to nomaīņu saistīto finansiālo izmaksu samazināšanos.

Izstrādātās metodikas mērķis – samazināt gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu ekspluatācijā.

Atbilstoši izstrādātajai metodikai 3.nodaļā tika piedāvāts veikt aprobāciju un apstiprināt atteices cēloņu noteikšanas metodikas punktu efektivitāti, izmantojot plaši pielietoto Latvijas dzelzceļa ritošā sastāva gumijas korda sajūgu 580 × 130 mm piemēru.

### 3. METODIKAS APROBĀCIJA UZ TOROIDĀLO GUMIJAS KORDA SAJŪGA PIEMĒRU

Gumijas korda sajūgs ir visizplatītākais un tiek izmantots uz dažādiem ritošā sastāvā veidiem: *ER2* un *ER2T* sērijas elektrovilcieniem, *DRIA* sērijas dīzeļvilcieniem, kā arī *TGM4*, *TGM6*, un *TEM2* sērijas dīzeļlokomotīvēm, kā arī dažādos rūpniecisko iekārtu modeļos. Attiecīgi, promocijas darba 3 nodaļā veicām toroidāla veida gumijas korda sajūgu sānu virsmas sagraušanas cēloņu pētījumu. Pamatojoties uz 1 daļas datiem tika konstatēts ka viss izplatītākie ir gumijas korda sajūgi ar izmēru 580 × 130 mm. Un šāda tipa gumijas korda sajūgi elektrovilcienos strādā vissrežģītajos apstākļos un pakļauti vislielākam atteikumu skaitam. Promocijas darbā 3 daļā veiksīm metodikas pārbaudi uz šāda tipa sajūgiem.

Lai noteiktu sajūga bojājumu iemeslu noteikšanu uz pētījumam tika ņemti 3 gumijas korda sajūgu paraugi. Informācija par gumijas korda sajūga darbību uz motorvagoniem uzrādīta 3.1. tabulā.

3.1.tabula

Dati par gumijas korda darbību

Parauga Nr.	Vagona Nr.	Sajūga uzstādīšanas datums	Sajūga noņemšanas datums	Sajūga darbības laiks uz vagona, dienas	Sajūga nobraukums uz vagona, km
2	Nr. 989-04	31.03.2020.	03.06.2021.	429	64 078
1	Nr.2021-02	31.01.2019.	07.06.2021.	857	197 450
3	jauns sajūgs	-	-	-	0

Lai noskaidrotu gumijas korda sajūga sagraušanas cēloņus, RTU laboratorijā tika veikta pētāmo sajūgu ģeometrisko izmēru noteikšana, kā arī pie dažādiem temperatūras diapazoniem tika pārbaudīta sajūgu paraugu cietība saskaņā ar 2; 3 un 4 metodikas soļiem.

#### 3.1.Toroidāla gumijas korda sajūga bojājumu zonas noteikšana

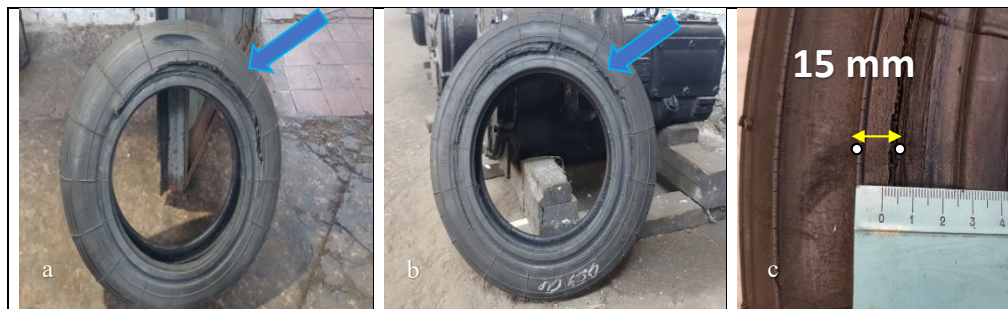
Veicot gumijas korda sajūgu sagraušanas izpēti, kopš promocijas darba rakstīšanas uzsākšanas 09.2019., autors konstatēja, ka Latvijas dzelzceļā elektrovilcienos galvenais atteikumu cēlonis ir sajūga sānu virsmas sagraušana. Sajūga bojājumi, laika periodā no 09.2019. līdz 31.12.2021. sasniedza 21 gadījumu.

1 (viens) gadījums ir saistīts ar sajūga augšējās virsmas nodilumu, kas radies berzes rezultātā pret reduktora stiprinājuma bultskrūvi un sajūgam izraujoties no stiprinājuma rievām (parādīts 1. daļas (1.10.att.) gumijas korda sajūga sagraušanas un atteikumu veidi, attēls (f). Sajūga nobraukums pirms atteices sastāda 210 874 km [47]...[50]. Izpētot sajūga augšējo virsmu tika konstatēts, ka atteikuma iemesli varētu būt sekojošie:

1. riteņpāru buksēšana, kā rezultātā daudzkārt palielinājās centrālās spēks;
2. atjaunošanas remonta laikā netika veikta gumijas korda sajūga bultskrūvju pievilksana.

Visi pārējie 20 gumijas korda sajūgu atteikuma gadījumi saistīti ar sānu virsmas sagraušanu. Ar konstatētu sagraušanas vietu – sajūga sienas 10 – 20 mm attālumā no ārējā diametra diska stiprinājuma vietas. Gumijas korda sajūga sanu virsmas sagraušanas piemēri tika parādīti (3.1 att.).

Gumijas korda sajūga sanu virsmas sagraušanas piemēri tika parādīti (3.1 att.).



3.1. att. Gumijas korda sajūga sānu virsmas sagraušanas piemēri:

a – 1. paraugs; b – 2. paraugs; c – sagraušanas zonas noteikšana 2. paraugs.

Jāatzīmē, ka pie sajūga pilnīgas sagraušana rodas bīstama situācija aprīkojumam, apkalpojošajam personālam vai arī pasažieriem.

### 3.2. Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūras noteikšanas

Spēku iedarbības uz gumijas korda sajūgu rezultātā notiek tā deformācija. Deformācijas rezultātā notiek gareniskā un šķērsvirziena sastiepšana, kā arī šķērseniskā saspiešana, kuru ietekmē mainās sajūga forma un tilpums. Gumijas un gumijas korda konstrukciju elementi pie cikliskām slodzēm parāda, ka tām piemīt viskoelastīgas īpašības, kas izraisa to sakaršanu. Siltuma izdalīšanās notiek pie periodiski mainīgiem sprieguma deformējošiem stāvokļiem, un tas īpaši izpaužas vasaras sezonā [13]. Piemēram elektrovilcienu ekspluatācijas apstākļos gumijas korda sajūgs atrodies zem motorvagona un novietotam starp vilces dzinēju vienā pusē un vilces reduktoru otrā pusē, gumijas korda sajūgs, ierobežotas vietas dēļ, vasaras sezonā tiek pakļauts papildu siltuma izdalīšanai no vilces dzinēja vilces režīmā, kā arī riteņpāru bremzēšanas režīmā.

Liela siltuma izdalīšanās izraisa sajūga ārējā apvalka uzkaršanu, kā rezultātā tas termiski novecojas. Elastīgā gumijas korda sajūga termiskās novecošanas piemērs parādīts (3.2. att.).



3.2. att. Sajūga termiska novecošana:  
a- skats no kreisajā pusē; b – skats no labajā pusē.

Saskaņā ar izstrādāto 2.2.metodikas punktu ekspluatācijas apstākļos tika piedāvāts pārbaudīt ilgstošu uzsilšanas temperatūras parametru, nepieļaujot to maksimālo vērtību. Gumijas korda uzsilšanas temperatūra nedrīkst pārsniegt +75 °C [21]...[49]...[53]. Temperatūras mērījumu veikti ar bezkontakta pirometru “Raitek” ar precizitātes klasi  $\pm 0,1$  °C .Apkārtējā gaisa temperatūras rādījumi tika ņemti no dzelzceļa informācijas tablo datiem. Gumijas silšanas temperatūras dati norādīti (3.2; 3.3; 3.4; 3.5. tab.).

Laī noteiktu gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūru saskaņā ar izstrādāto metodikas 2.8 punktu reālos ekspluatācijas apstākļos, darba autors veica trīs izmēģinājuma braucienus pēc atjaunošanas remonta TR-3 izpildes un trīs eksperimentālus braucienus ar pasažieru vilcieniem; divus braucienus ar elektrovilcienu ER2 1307 un vienu ar elektrovilcienu ER2 1342R.

1. 27.07.2020. pēc maršruta Rīga-Sloka-Rīga pie apkārtējās gaisa temperatūras dzelzceļa stacijā Sloka +27 °C.
2. 04.07.2021. pēc maršruta Rīga - Tukums 2 - Rīga pie apkārtējās gaisa temperatūras + 28 °C dzelzceļa stacijā Rīga.
3. 22.08.2022. pēc maršruta Dubulti – Rīga - Dubulti pie apkārtējās gaisa temperatūras +29 °C dzelzceļa stacijā Dubulti.

27.07.2020. Slokas stacijā tika veikta vagonu Nr.1307-02; Nr.991-06 un Nr.1307-10 gumijas korda sajūga temperatūras noteikšana. Mērījumu dati parādīti (3.2 tab.).

3.2. tabula

R/p Nr.	Vagona Nr.		
	1307-02	991-06	1307-10
	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C
1	+38,2	+38,4	+37,2
2	+37,7	+40,2	+36,5
3	+37,6	+37,9	+36,8
4	+37,3	+38,6	+39,9

04.07.2021. Rīgas stacijā tika veikta vagonu *Nr.1307-02*; *Nr.991-06* un *Nr.1307-10* gumijas korda sajūga temperatūras noteikšana. Mērījumu dati parādīti (3.3. tab.).

3.3. tabula

R/ p Nr.	Vagona Nr.		
	<i>1307-02</i>	<i>991-06</i>	<i>1307-10</i>
	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C°	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C°	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C°
1	+37,3	+41,5	+39,8
2	+39,7	+39,6	+38,4
3	+37,4	+43,1	+41,7
4	+42,6	+38,8	+39,1

22.08.2022. Dubultu stacijā tika veikta vagonu *Nr.1342-04* un *2022-02* gumijas kordas sajūga temperatūras noteikšana. Mērījumu dati parādīti (3.4. tab.).

3.4. tabula

Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūra

R/p Nr.	Vagona Nr.	
	<i>1342-04</i>	<i>2022-02</i>
	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t C
1	+47,1	+45,6
2	+45,7	+46,1
3	+46,3	+44,9
4	+46,0	+45,4

Korda sajūga temperatūras noteikšana vagonam veicot izmēģinājuma braucienus pēc TR- 3 remonta parādīti (3.5. tab.).

3.5.tabula

Gumijas korda sajūga uzsilšanas temperatūra

Izmēģinājuma brauciena datums	Vagona Nr.	Gaisa temperatūra st. Sloka, °C	Vidēja uzsilšanas temperatūra, t °C			
			1.r/p	2.r/p	3.r/p	4.r/p
28.04.2020.	<i>989-06</i>	+6	8,1	8,4	10,2	9,8
11.08.2020.	<i>991-02</i>	+18	23.6	24.1	23.0	23.5
17.08.2020.	<i>1310-02</i>	+23	26.8	26.4	28.1	27.1

- 27.07.2020. elektrovilcienam *Nr.1307* ar pasažieru daudzumu 50-60 %, uz motorvagona *Nr.991-06* konstatēta otrā riteņpāra gumijas korda sajūga uzsilšana, uzsilšanas temperatūra sastādīja t +40,2 C;

- 04.07.2021 elektrovilcienam *Nr.1307* ar pasažieru daudzumu 40-50 % uz vagona *Nr.991- 06* konstatēts trešā ritenpārim gumijas korda sajūga uzsilšana, uzsilšanas temperatūra sastādīja  $t +43,1$  °C;
- 22.08.2022. elektrovilcienam *Nr.1342R* ar pasažieru daudzumu 100 – 120 % uz motorvagona *Nr.1342-04* konstatēts pirmā ritenpārim gumijas korda sajūga uzsilšana, uzsilšanas temperatūra sastādīja  $t +47,1$  °C.

Kopskaitā uzsilšanas temperatūra tika izmērīta 44 gumijas korda sajūgiem.

Pēc izmēģinājumu braucieni rezultātiem tika konstatēts, ka Latvijas dzelzceļa apstākļos tiek ievērots nosacījums sajūga nesasilšanai vairāk par  $t^{\circ} + 75$  °C.

Tāpat elektrovilciena izmēģinājumu brauciena laikā 07.04.2021., pēc 12 gumijas korda sajūgu vizuālās apskates rezultātiem, 7 sajūgiem tika konstatētas termiskās novecošanas pazīmes, kā arī nelielas plaisas uz sajūgu sānu virsmas. Viena sajūga kopskats ir parādīts (3.3. att.).



3.3. att. Gumijas korda sajūga novecošanas pazīmes.

Pie termiskās novecošanās gandrīz visas galvenās gumijas korda sajūga materiāli fizikālās un mehāniskās īpašības neatgriezeniski izmainās pa visu sajūga apjomu. Tāpat termiskās novecošanas rezultātā var mainīties gumijas korda sajūga ārējās virsmas slāņa cietība [77]...[31]. Termiskās novecošanas ietekmes rezultātā gumijas korda sajūga materiālā var rasties plaisas un plīsumi, kuri ir nozīmīgi spriedzes koncentratori [89], kā rezultātā sajūgs var iziet no ierindas sānu virsmas sagraušana dēļ.

Pēc izmēģinājumu braucieni rezultātiem tika konstatēts, ka Latvijas dzelzceļa apstākļos tiek ievērots nosacījums sajūga nesasilšanai vairāk par  $t^{\circ} +75$  °C.

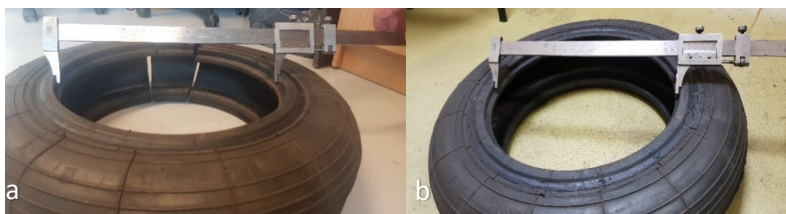
### 3.3. Sajūga ģeometrisku izmēru kontrole

Lai noskaidrotu gumijas korda sajūga sagraušanas cēloņus, RTU laboratorijā tika veikti pētāmo sajūgu ģeometrisku izmēru kontrole saskaņā ar metodikas 2.3. punktu. Saskaņā ar metodikas soli jāveic sekojošos ģeometriskos izmērus:



- ārējās virsmas diametrs  $D$ , mm;
- iekšējais sēžas diametrs  $d$ , mm;
- augšējās daļas biezums  $\delta$ , mm;
- sānu sienas biezums  $\delta_l$ , mm.

Sajūga ārējās virsmas diametra  $D$ , iekšējā sēžas diametra  $d$  mērījumi tika veikti ar bīdmēra 0 – 600 mm palīdzību, ar precizitātes klasi  $\pm 0.1$  mm. mērījuma piemēri tika redzami 3.4. attēlā.



3.4. att. Sajūga iekšējā sēžas diametra mērījumi:  
a – 1 paraugs; b – 3. paraugs.

Sajūga 1., 2. parauga augšējās virsmas  $\delta$  un sānu sienas  $\delta_l$  ģeometrisko izmēru kontrole tika veikta uz izgriezta sajūga fragmenta.

Šim nolūkam no gumijas korda sajūgiem  $580 \times 130$  mm tika sagatavoti paraugi:

- 1 paraugs (3.5.a. att.);
- 2 paraugs (3.5.b. att.).



3.5. att. Gumijas korda sajūgu sagatavošana mērījumiem:  
a- 1 paraugs; b – 2 paraugs.

Bet sajūga 3. paraugam, ģeometrisko izmēru kontrole tika veikta uz vesela, neizgriezta sajūga. 3. parauga ģeometrisko izmēru kontrole tika veikta, izmantojot mikrometru 0-50 mm ar mērījumu precizitāti 0,01 mm.

Izgrieztie 1. un 2. parauga fragmenti; tālāk tika izmantoti metodikas 2.7. solī, lai noteiktu sajūgu fizikālās un mehāniskās īpašības.

Gumijas korda sajūgu veiktie mērījumi tika salīdzināti ar standartu *DIN EN 13913:2003-08* [5]. Gumijas korda sajūga 580 mm × 130 mm mērījumu dati un standarta dati apkopoti 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Sajūgu ģeometrisko izmēru noteikšana

Rādītāja nosaukums	Paraugu mērījumu rādītāji, mm			<i>DIN EN 13913:2003-08</i> , mm
	1. paraugs	2. paraugs	3. paraugs	
Ārējās virsmas diametrs $D$ , mm	580,5 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	585,5 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	580,1 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	580 <sup>+2</sup>
Iekšējais sēžas diametrs $d$ , mm	354,5 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	354,8 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	354,2 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	354 <sup>+2</sup>
Sānu sienas biezums $\delta_l$ , mm	28,5 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	29,2 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	29,9 <sup>+0,01</sup> <sub>-0,01</sub>	30 <sup>+2</sup>

Pamatojoties uz mērījumu rezultātiem, tika konstatēts, ka visi sajūgu izmēri, izņemot 2. paraugu, ārējās virsmas diametrs  $D$  atbilst *DIN EN 13913:2003-08* standarta prasībām. Pamatojoties uz gumijas korda sajūga 2. parauga mērījuma rezultātiem, tas ir jānomaina pret jaunu sajūgu, jo neatbilst standarta *DIN EN 13913:2003-08* prasībām. Laika posmā no 01.02.2022 līdz 30.12.2022 tika veikti 53 ekspluatācijā esošiem gumijas korda sajūgiem ģeometrisko izmēru mērījumi, gumijas korda sajūga vidējās ģeometrisko izmēru vērtības norādītas 3. pielikumā. Kopumā izmērīto gumijas korda sajūgu paraugu kopskats sastāda 53 gab.

Pēc mērījumu rezultātiem tika konstatēts ka trim sajūgiem ārējās virsmas diametrs  $D$  neatbilst standarta prasībām gumijas korda sajūgu darbības rādītāji parādīti 4 pielikuma un redzami 3.3. tabulā.

3.3.tabula

Ārējās virsmas diametra mērījuma rezultāti

Sajūga Nr.	Mērījuma datums	Ārējās virsmas diametrs mērījumi, mm	Mērījumu neatbilstība, mm	Gumijas korda sajūga nobraukums, km	<i>DIN EN 13913:2003-08</i> , mm
8	25.03.2022	583,6	1,6	158 463	580 <sup>+2</sup>
26	06.05.2022	584,7	2,7	230 456	
33	10.10.2022	585,1	3,1	214 598	

Pēc mērījumiem un nobraukumu datu analīzes tika rekomendēts sajūgu Nr. 8 nomainīt pret jaunu, bet sajūgu Nr. 26. un Nr. 33. paraugam pēc vizuālas apskates netika konstatētas bojājumu pazīmes un sakarā ar to, ka vagoniem uz kuriem uzstādīti gumijas korda sajūgi tika saplānots atjaunošanas remonts, pieņemts risinājums sajūgu nomainīt pret jauno *TR-3* atjaunošanas remonta laikā.

### 3.4. Cietības noteikšana pēc “Shore A” metodes atkarībā no temperatūras

Gumijas korda sajūgs Latvijas dzelzceļa ekspluatācijas apstākļos darbojas dažādos apkārtējās gaisa temperatūras diapazonos no –20 °C līdz +30 °C, bet paša sajūga silšanas temperatūra saskaņā ar mērījumu rezultātiem, vasaras periodā sastāda vairāk nekā +47 °C. Atšķirīgs temperatūras diapazons var ietekmēt gumijas korda sajūgu materiāla cietību, neatbilstošas cietības rezultātā sajūgs var zaudēt savas elastības īpašības [89]. Elastīgo īpašību samazināšana vai pārmērīga palielināšanās var izraisīt priekšlaicīgu sajūga atteici tā ekspluatācijas laikā. Pētījuma mērķis ir noteikt cietību pie dažādam temperatūras režīmiem.

Svarīgs gumijas raksturojums, kā augsti elastīgu elementu īpašība, ir salizturība, kura lielā mērā nosaka to relaksācijas īpašības. [77]...[33] RTU laboratorijā izmantojot gumijas cietības mērītāju *Elcometer 3120 Shore Duromer A* [29] ar precizitātes klasi  $\pm 0.1$ , tika veikta cietības pārbaude saskaņā ar *ISO 7619-1:2010* standarta[20] prasībām. Trim gumijas korda sajūgiem, paņemtiem uz pētījumiem, cietības mērījumi veikti 4 (četros) dažādos temperatūras diapazonos:

- t+60 °C;
- t+22 °C;
- t 0 °C;
- t –20 °C.

Iegūtie cietības mērījumu dati tika salīdzināti ar *ISO 14691:2008* [21] standarta datiem. Mērījumu rezultāti redzami 3.3; 3.4. tabulā.

3.3. tabula

Gumijas korda sajūga 1 un 2. parauga cietības noteikšana

Cietība pēc Šora A pārklājuma gumijai, nosac.vien	1. paraugs				2. paraugs				ISO 14691:2008
	Vidēja vērtība				Vidēja vērtība				
	t+60, °C	t+22, °C	t 0, °C	t –20, °C	t+60, °C	t+22, °C	t 0, °C	t –20, °C	
Sānu mala A* augšdaļa	60,7	67,3	68,5	75,9	60,0	69,4	72,6	76,9	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala A* vidusdaļa	56,6	62,9	66,9	73,7	61,3	68,3	71	73,7	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala A apakšēja daļa	57,3	63,1	70,6	74,0	61,6	69,9	73,8	76,4	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala B* augšdaļa	59,9	66,0	71,4	75,3	59,9	68,6	72,3	74,4	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala B vidusdaļa	56,6	61,7	68	73,4	60,1	67,0	71,1	75,7	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala B apakšēja daļa	56,9	64,3	68,5	71,4	63,1	67,4	71,8	73,1	no 50,0 līdz 65,0

\* A puse (no vilces reduktora puses); B puse (no vilces dzinēja puses).

Gumijas korda sajūga 3. parauga cietības noteikšana

Cietība pēc Šora A pārklājuma gumijai, nosac.vien	3 paraugs				ISO 14691:2008
	Vidēja vērtība				
	t+60, °C	t+20, °C	t 0, °C	t -20, °C	
Sānu mala A* augšdaļa	52,7	57,3	61,5	65,5	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala A* vidusdaļa	54,6	55,9	60,9	63,7	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala A apakšēja daļa	51,3	53,1	60,6	64,0	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala B* augšdaļa	50,9	56,0	61,4	65,3	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala B vidusdaļa	50,6	57,7	62,3	65,4	no 50,0 līdz 65,0
Sānu mala B apakšēja daļa	50,1	54,3	61,5	64,7	no 50,0 līdz 65,0

\*A puse (no vilces reduktora puses); B puse (no vilces dzinēja puses).

Pēc iegūtajiem mērījumu rezultātiem tika konstatēts:

- 20 °C temperatūrā sajūgu 1. un 2. paraugam izmērītās cietības vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus [21] par 6,4 – 11,9 nosacītajās vienībās. Sajūga paraugam izmērītās cietības vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus [21] par 0,5 nosac. vien.
- 0 °C temperatūrā sajūgu 1 un 2. paraugam izmērītās cietības vērtība pārsniedz standarta cietības parametrus [21] par 3 – 6,4 nosac. vien. Sajūga 3. paraugam izmērītās cietības vērtības atrodas normas robežās;
- +22 °C temperatūrā:
  - 1. paraugam divas vidējās mērījumu vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus [21] par 1,0–2,9 nosac. vien.;
  - 2. paraugam visas vidējās mērījumu vērtības pārsniedz standarta cietības parametrus [21] par 2,0–4,4 nosac. vien.;
  - 3. paraugam izmērītās cietības vērtības atrodas normas robeža.
- +60 °C temperatūrā cietības vērtības sajūgiem netiek pārsniegtas.

Laika posmā no 01.02.2022 līdz 30.12.2022 papildus tehniskai apkopei tika veikti cietības mērījumi 4 ekspluatācijā esošiem gumijas korda sajūgiem dažādos temperatūras diapazonos no -10 °C līdz +30 °C. Mērījumu rezultāti parāda, kā pie gaisa temperatūra no -10 °C līdz 0 °C visiem gumijas korda sajūgiem cietības parametrs pārsniedz standarta datus par 10,8 – 3,2 nosac. vien. Pie 0 °C līdz 5 °C 2 gumijas korda sajūgiem cietības parametrs pārsniedz standarta prasības par 9,2 – 3,2 nosac. vien. Un vienam gumijas korda sajūgam cietības parametrs neatbilst standarta prasībām temperatūras diapazonos no -10 °C līdz +20 °C un līdz ar to tika pieņemts risinājums gumijas korda sajūgu nomainīt pret jaunu. Pamatojoties uz cietības mērījumu rezultātiem, tika konstatēts būtisks cietības pieaugums ziemas periodā. Sezonālā cietības pārbaude parādīja, ka, pie zemākas gaisa temperatūras gumijas korda sajūgu cietības parametrs neatbilst standarta un ISO 14691 2008 prasībām. Un otrādi, temperatūrai paaugstinoties virs +30 °C, visu gumijas korda sajūgu paraugu cietības parametrs atbilst ISO 14691:2008 standarta datiem. Pamatojoties uz sajūgu cietības pārbaudes rezultātiem var konstatēt, ka sajūgu augsti elastīgo īpašību zaudēšana notiek pie zemām gaisa temperatūrām.

Dati par sajūgu vidējo cietības vērtību doti (3. tab.) pielikumā.

### 3.5. Gumijas korda sajūga sagraušanas spēku aprēķins

Saskaņā ar 2.5. metodikas punktu Spēku darbības noteikšana nepieciešama, lai identificētu gumijas korda sajūga bīstamos darbības režīmus pie dažādiem ātruma diapazoniem.

Gumijas korda sajūga aprēķinos par pamatdatiem ir ņemts maksimālais griezes moments, kuru limitē pieļaujama sajūga apvalka stabilitātes zudums [21]...[53]. Gumijas korda sajūga stabilitātes zudums ir sajūga nespēja saglabāt sākotnējo stāvokli vai formu. Saskaņā ar [21]...[53], gumijas korda sajūga apvalku stabilitātes zudums notiek pie  $1,2 \cdot 10^4$  N m. Maksimālais griezes moments  $M_a$  tiek sasniegts pie maziem vilces dzinēja apgriezieniem elektrovilciena paātrinājuma laikā. Maksimālais griezes moments noteikts pēc metodikas 2.5 punkta, (2.4. formula).

Saskaņā ar aprēķinu rezultātiem griezes moments  $M_a$  piecos ātruma diapazonos redzams 3.5. tabulā.

3.5.tabula

Griezes momenta noteikšana

Elektrovilciena ātrums, km/h	Vilces dzinēja apgriezieni, apgr./min.	Griezes moments $M_a$ , N m
5	64	$1,74 \cdot 10^4$
10	129	$8,65 \cdot 10^3$
20	258	$4,32 \cdot 10^3$
40	517	$2,15 \cdot 10^3$
120	1825	$0,96 \cdot 10^3$

Saskaņā ar rezultātiem tika konstatēts:

- pie ātruma 5 km/h (64 apgr/min) griezes moments uz vilces dzinēja vārpstas. saskaņā ar aprēķiniem sastāda  $1,74 \cdot 10^4$  N m. Pie šīs griezes momenta vērtības sajūgam notiek stabilitātes zudums, kas pārsniedz noteikto parametru par  $8,4 \cdot 10^3$  N m. Paātrinājums līdz ātrumam 5 km/h (64 apgr/min) saskaņā ar eksperimentālā brauciena rezultātiem vidēji sastāda 2,5 sek.;
- pie 10 km/h (129 apgr/min) nenotiek sajūga apvalka stabilitātes zudums. Tiek ievērots nosacījums gumijas korda sajūga apvalka stabilitātes zaudēšanai. Paātrinājums līdz ātrumam 10 km/h sastāda vidēji 5 sek.

Pēc sajūga spēku aprēķinu rezultātiem konstatēts sajūga stabilitātes zudums pie 64 apgr/min, stabilitātes zuduma parametrs pārsniedz pieļaujamo robežu par vairāk nekā  $0,54 \cdot 10^4$  N m, un kā rezultātā sajūgs īslaicīgi zaudē savu darbību.

#### ▪ Centrbēdzes spēku un centrālās spēku intensitātes noteikšana.

Centrbēdzes spēku intensitāte  $q$ ;  $q_l$  un centrālās spēku  $P_c$ ;  $P_{cl}$ . noteikšana pie 60 km/h un maksimālā ātrumā 120 km/h:

Leņķiskais ātrums  $\omega$ ;

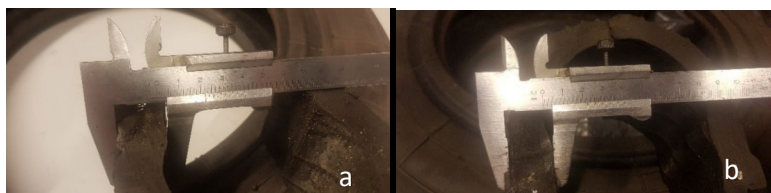
- pie ātruma 60 km/h = 72,24 rad/sek;
- pie ātruma 120 km/h = 191,07 rad/sek.

Sajūga diametrs  $D$  un sajūga iekšējais diametrs  $d$  norādīti (3.2. tab.).

Pārējie sajūgu parametri  $\delta$ ;  $\delta_l$ ;  $b$  redzami 3.6. tabulā.

Lai noteiktu sajūga sānu biezumu  $\delta_1$  un sajūga augšējās virsmas biezumu  $\delta$  tika veikti mērījumi, izmantojot bīdmēru 0 – 150 mm, ar mērījuma precizitāti 0,1 mm.

Sajūgu sānu virsmas mērīšanas rezultāti redzami 3.6 attēlā un apkopoti 3.6. tabulā



3.6. att. Sajūga sānu virsmas mērīšana:

a – 1. paraugs; b – 2. paraugs.

3.6.tabulā

Sajūga mērījuma parametri

Parauga Nr.	$\delta$ sajūga augšējās virsmas biezums, mm	$\delta_1$ sajūga sānu biezums, mm	$b$ sajūga biezums, mm
1.	15,8	22,1	132,1
2.	16,5	22,4	131,6
3.	15,9	22,2	130,2

Pēc izstrādātās metodikas 2.5. punkta tika aprēķināti spēki, kas darbojas uz gumijas korda sajūgu, aprēķina dati apkopoti 3.7. tabulā.

3.7. tabulā.

Aprēķinu rezultāti

Sajūgu parametri	Leņķiskais ātrums; rad/sek	$q$ , N/m <sup>2</sup>	$q_1$ , N/m <sup>2</sup>	$P_c$ , N/m	$P_{c1}$ , N/m
1. paraugs	72,24	$7,97 \cdot 10^4$	$1,40 \cdot 10^6$	$7,80 \cdot 10^3$	$1,05 \cdot 10^4$
	191,07	$1,48 \cdot 10^5$	$2,56 \cdot 10^6$	$1,43 \cdot 10^4$	$1,93 \cdot 10^4$
2. paraugs	72,24	$8,02 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^6$	$7,95 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^4$
	191,07	$1,47 \cdot 10^5$	$2,51 \cdot 10^6$	$1,44 \cdot 10^4$	$1,95 \cdot 10^4$
3. paraugs	72,24	$7,73 \cdot 10^4$	$1,36 \cdot 10^6$	$7,61 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^4$
	191,07	$1,41 \cdot 10^5$	$2,50 \cdot 10^6$	$1,39 \cdot 10^4$	$1,88 \cdot 10^4$

▪ **Asu spēka  $T$  noteikšana.**

Īpatnējo aksiālo spēku  $T$  parādīšanās ir izskaidrojama ar to, ka pie 1825 apgr/min (120 km/h) centrālās spēka  $P_{c1}$  iedarbībā gumijas korda sajūga apvalks tiek deformēts tā, ka tā sānu virsmas pieņem konisko formu. Grafiskais spēku apzīmējums, kas iedarbojas uz gumijas korda sajūgu, parādīts (2.6. att.) metodikas punkta un aprēķināts pēc (2.7. formulas):

- 1. paraugs  $T = 1,93 \cdot 10^4 \cdot 0,139 = 2,68 \cdot 10^3$  N/m;
- 2. paraugs  $T = 1,95 \cdot 10^4 \cdot 0,139 = 2,71 \cdot 10^3$  N/m;
- 3. paraugs  $T = 1,88 \cdot 10^4 \cdot 0,139 = 2,61 \cdot 10^3$  N/m.

▪ **Vērpes nobīdes tangenciālo spriegumu noteikšana**

Griezes moments uz gumijas korda sajūga korpusa tiek pārnests ar berzes spēkiem, kas rodas pievelkot M-24 bultskrūves gumijas korda sajūga stiprināšanai. Pārraidot griezes momentu no vilces dzinēja uz sajūgu, vietā, kur sajūgs piestiprināts pie atloka kopā ar sajūga stiprinājumu pie atloka, darbojas vērpes bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret berzes vietu  $\tau$  un vērpes bīdes tangenciālais spriegums  $\tau_k$ . Vislielākā bīdes tangenciāla sprieguma vērtība  $\tau_k$  tiek sasniegta gredzenveida šķērsgriezumā pie atloka ar diametru  $D$ , pie elektrovilciena paātrinājuma, kad vilces dzinējs realizē vislielāko (maksimālo) griezes momentu  $M_a$

Pie šāda veida deformācijas sajūga šķērsgriezumos iedarbojas ne tikai griezes moments, bet arī berzes spēki sajūgā. Lai noteiktu spriegumu attiecībā pret berzes vietu  $\tau$  un vērpes bīdes tangenciālo spriegumu  $\tau_k$  nepieciešams veikt sajūga atloku mērījumus. Šim nolūkam tika veikti 1 un 2. paraugam atloku mērījumi. 3. paraugam atloks netika mērīts tā kā sajūgs ir jauns un nav bijis ekspluatācijā. Atloku izmēri veikti ar bīdmēru 0 - 450 mm, ar precizitāti  $\pm 0,1$  mm, mērījuma dati apkopoti 3.8. tabulā.

3.8. tabula

Sajūgu atloka mērīšanas dati

Parauga Nr.	Gredzena ārējais diametrs $D$ , mm	Gredzena iekšējais diametrs $d$ , mm	Sajūga piespiešanas vieta atlokam, berzes rādiuss $\rho$ , mm	Berzes rādiusa laukums $d\rho$ , mm
1	421,1 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	340,2 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	175,3 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	15,1 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>
2	420,2 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	339,9 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	175,1 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>	15 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,1</sub>

Vērpes bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret berzes vietu un sajūgu bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret sajūga stiprinājuma atloku noteikts pēc (2.10 un 2.11 formulas) un aprēķina rezultāti apkopoti 3.9. tabulā.

3.9. tabula

Sajūgu sprieguma un spēku aprēķinu rezultāti

Parauga Nr.	Vilces dzinēja apgriezieni, apgr./min.	$\tau$ , MPa	$\tau_k$ , MPa
1.	64	1,71	2,05
	129	0,85	1,02
	258	0,42	0,51
2.	64	1,72	2,07
	129	0,86	1,03
	258	0,43	0,51

Pēc aprēķinu rezultātiem tika konstatēts, ka maksimālais bīdes tangenciālais spriegums attiecībā pret sajūga stiprinājuma atloku  $\tau_k$  tiek sasniegts brīdī, kad elektrovilciens tiek palaišanas no vietas, pie 64 apgr/min, tiek pārsniegts maksimālais tangenciālais spriegums:

- 1. paraugam par 1,30 MPa;
- 2. paraugam par 1,32 MPa.

Pie 64 apgr/min ( $M_a = 8,65 \cdot 10^3$  N m) sajūgu 1. paraugam tas sastāda 1,02 MPa, šajā gadījumā pieļaujama tangenciālais spriegums tiek pārsniegts par 0,27 MPa; sajūgu 2. paraugam

tas sastāda 1,03 MPa un pārsniedz pieļaujamo tangenciālo spriegumu par 0,28 MPa. Pie 129 apgr/min ( $M_a=4,32 \cdot 10^3$  N m) pieļaujama tangenciālā sprieguma netiek pārsniegts un sastāda 1 paraugam = 0,51 MPa; 2. paraugam = 0,51 MPa.

### 3.6. Gumijas korda sajūgu aksiālās radiālās un leņķiskas novirzes mērījumu rezultāti

Laikā periodā no 2012. līdz 2021.gadam vidējais nobraukums nostrādei līdz atteikumam sastāda nedaudz vairāk par 128 tūkst. km, un par iepriekš minētajā laika periodā tika konstatēti 66 toroidālo gumijas korda sajūgu atteikumi:

- ar nobraukumu virs 200 tūkst. km, uz gumijas korda sajūga atteikuma brīdi, tika konstatēti 8 gadījumi, kas sastāda 12,12 % no visiem sajūgu atteikumiem;
- ar nobraukumu līdz 30 tūkst. km, uz gumijas korda sajūga atteikuma brīdi, tika konstatēti 8 gadījumi, kas sastāda 12,12 % no visiem sajūgu atteikumiem;
- ar nobraukumu diapazonā no 30 tūkst. km līdz 200 tūkst. km tika konstatēti 50 atteikuma gadījumi, kas sastāda vairāk nekā 75,75 % no kopējā atteikumu skaita.

Viens no iespējamiem 8 gumijas korda sajūgu atteikumu iemesliem nobraukuma diapazonā no 9972 līdz 29 384 km [50] var būt nepareiza (nekvalitatīva) uzstādīšana, vai nepareiza sajūga radiālā, ass novirzes vai slīpuma leņķa regulēšana veicot atjaunošanas remontus *TR-3*; *TR-3+*; (*VR*; *GR*) apjomā, kā rezultātā sajūgs var priekšlaicīgi iziet no ierindas. Nepareizas sajūgu regulēšanas piemēri parādīti 3.7. attēlā.



3.7. att. Nepareizi sajūgu regulēšanas piemēri:  
a - radiāla izmēru neievērošana; b –aksiālo izmēru neievērošana.

Elektrovilcienu ekspluatācijas apstākļos gumijas korda sajūgu deformācijas palielinās pie lielas motorvagonu noslodzes (palielināts pasažieru skaits rītā un vakarā pasažieru pārvadājumos), kā arī liela pasažieru skaita pārvadājumiem vasaras periodā. Šajos laika periodos vilces piedziņas vārpsta un vilces dzinēja vārpsta tiek pakļauta ievērojamai novirzei radiālā, aksiālā un leņķiskā virzienā, un jo lielāka vārpstu nobīde, jo lielāki spriegumi iedarbojās uz sajūgu.

Izmērot sajūga 1. un 2.parauga vārpstu novirzi un slīpuma leņķi, tika konstatēts:



1. Gumijas korda sajūga 1. paraugam vārpstu novirze radiālajā, aksiālajā un leņķiskajā virzienā atrodas vidējo vērtību robežās un sastāda:

- radiālā virzienā – 3 mm;
- aksiālā virziena – 7 mm;
- leņķiskā virzienā - 1°.

2. Gumijas korda sajūga 2. paraugam vārpstu novirze radiālajā, aksiālajā un leņķiskajā virzienā atrodas augšējo vērtību robežās un sastāda:

- radiālā virzienā – 12 mm;
- aksiālā virziena – 10 mm;
- leņķiskā virzienā - 3°.

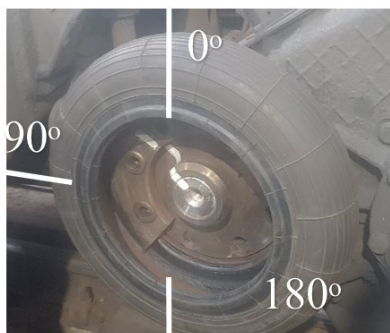
Saskaņā ar elektrovilcienu remonta noteikumiem un iekšējās dokumentācijas prasībām, uzstādot sajūgu ritošajam sastāvam, sajūga novirzēm tā uzstādīšanas laikā jāatbilst noteiktiem parametriem, kurus reglamentē remonta noteikumi [49]. Saskaņā ar remonta noteikumiem [49], gumijas korda sajūgu novirzes mērījumi tiek veikti *TR-3* [51] atjaunošanas remonta laikā sajūga augšējā daļā. Laika posmā no 2021.-2022.gadam, lai pārbaudītu gumijas korda sajūga vārpstu noviržu atbilstību remonta noteikumu [49]. prasībām, tika izmērītas sajūga novirzes 30 ekspluatācijā esošiem motorvagoniem sasniedzot nobraukumu  $100 \div 200 \pm 5$  % tūkst. km. Šajos nobraukuma lielumos mērījumi veikti 70 sajūgiem. Lai nodrošinātu labāko mērījuma precizitāti, tika veikti mērījumi trijās vietās pa sajūga loku 0°, 90°, 180°.

Sajūgu vārpstu aksiālo, radiālo un leņķisko noviržu mērījumi veikti ar speciāla šablona palīdzību ar precizitātes klasi  $\pm 0,1$  mm.



3.8. att. Specialais mērījuma šablons.

Gumijas korda sajūga mērījumu vietas ar šablona palīdzību tika pārdarītas (3.9. att.).



3.9. att. Gumijas korda sajūga mērījuma vietas.

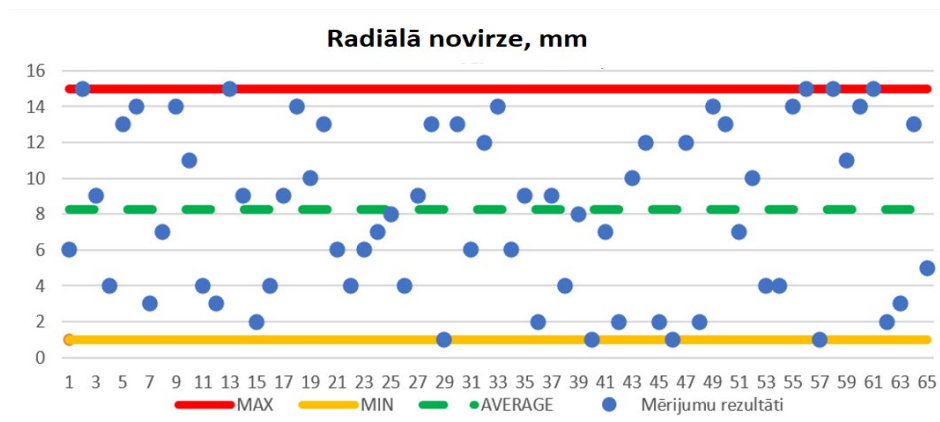
Mērījumu vidējās vērtības dati saskaņā ar metodikas 2.6.punktu (0°; 90°; 180°). apkopoti 3.10. tabulā

3.10.tabula

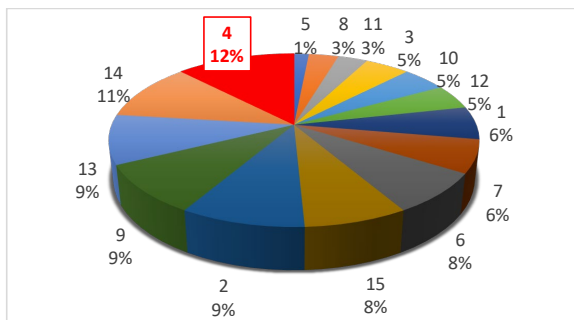
Sajūgu leņķa novirzes mērījuma dati 2021-2022g.

Sajūga novirze	Radiālā nobīde, mm	Asu nobīde, mm	Leņķiskā nobīde, grāds
Vidējā izmērītā vērtība	1–15 mm	2–16 mm	$0 \pm 4^\circ$
Maksimālā pielaujamā vērtība	15,0	20,0	4,0

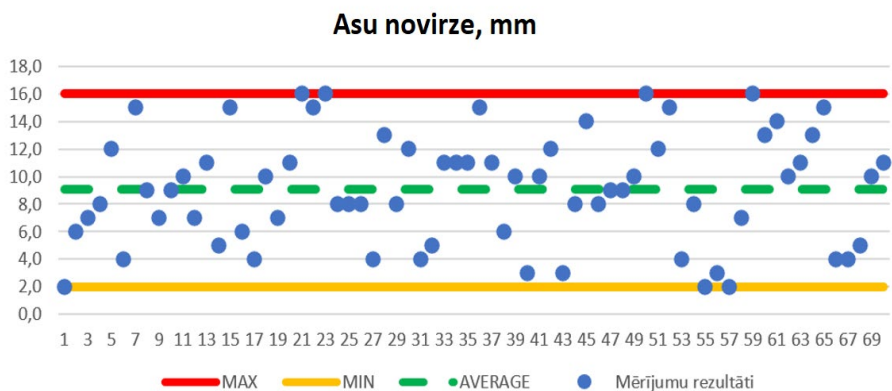
3.10. tabulā norādīto parametru noviržu mērījumu datu analīzes rezultātā tika iegūti sekojoši grafiki(3.10., 3.11., 3.12., 3.13., 3.14., 3.15. att.).



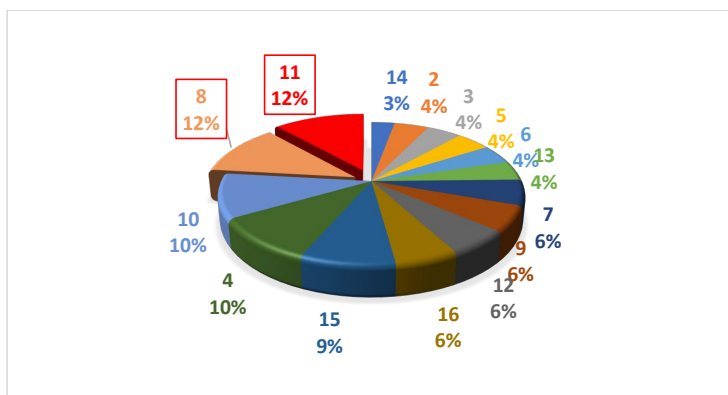
3.10. att. Radiāla novirzes mērījumu dati.



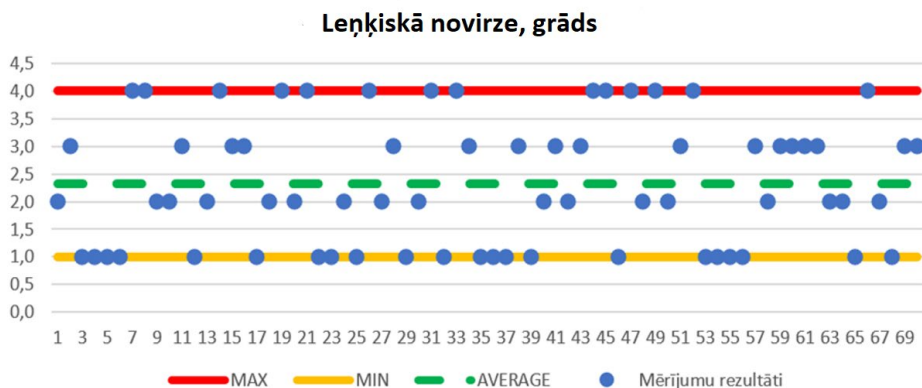
3.11. att. Vārpstu radiālā lielumu nobīde procentos.



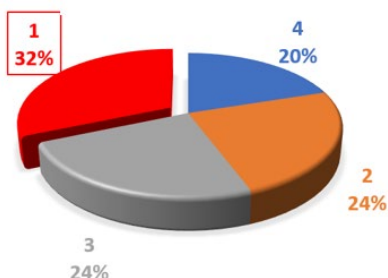
3.12. att. Asu novirzes mērījumu dati.



3.13. att. Asu novirze lielums procentos.



3.14. att. Leņķiskā novirzes mērījumu dati.



3.15. att. Leņķiskā novirze lielums procentos.

Grafikos parādīti parametru noviržu pētījuma rezultāti aksiālajā, radiālajā, leņķiskajā virzienā 70 gumijas korda sajūgu ekspluatācijas laikā.

Analizējot novirzes datus, tika konstatēti elastīgo sajūgu būtisku deformāciju gadījumi radiālā, aksiālā un leņķiskajā virzienā.

Mērījumu datu analīzes rezultātā tika konstatēts, ka ekspluatācijā visbiežāk sastopamie gadījumi ir:

- 1) 4 mm radiālajā novirzē – Šādu gadījumu skaits sastāda 8 gadījumus jeb 11,42 %;
- 2) 11 mm un 8 mm aksiālajā novirzē. Šādu gadījumu skaits sastāda 16 gadījumus jeb 22,85 %;
- 3) 3 mm leņķiskajā novirzē sastāda 17 gadījumus jeb 24,28 %.

Mērot vārpstu novirzi, tika konstatēts, ka uz vairākiem gumijas korda sajūgiem ir būtiskas vārpstu novirzes gan radiālajā, gan aksiālajā, gan leņķiskajā virzienā.

Pēc ekspluatācijā iegūtiem noviržu mērījumu robežvērtības datiem, nosaka maksimālās sajūgu noviržu vērtības radiālajās, aksiālajās un leņķiskajās novirzēs, jāveic sajūgu regulēšana ar novirzes lielumu, kas ir tuvu nullei (0).

### 3.7. Sajūga apvalka viena virziena deformācijas izmēģinājumu rezultāti

Saskaņā ar [49], uzstādot jaunu toroidālo sajūgu, tā nostrādāšanai līdz atteikumam jābūt ne mazākam kā 200 tūkst. km. Saskaņā ar 1.pielikuma datiem tika konstatēts, ka gumijas korda sajūgu vidējais nostrādāšanas laiks līdz atteikumam sastāda:

- 2012.g. – 175,0 tūkst.km;
- 2013.g. – 142,7 tūkst.km;
- 2014.g. – 134,3 tūkst.km;
- 2015.g. – 130,8 tūkst.km;
- 2016.g. – 106,3 tūkst.km;
- 2017.g. – 98,5 tūkst.km;
- 2018.g. – 88,3 tūkst.km;
- 2019.g. – 97,1 tūkst.km;
- 2020.g. – 188,0 tūkst.km;
- 2021.g. – 121,1 tūkst.km.

Saskaņā ar 1. pielikuma datiem tika konstatēts, ka toroidālā sajūga vidējais nobraukums līdz atteicei pēdējo 10 gadu laikā, sastāda 128,1 tūkst. km.

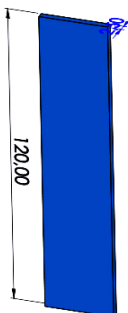
Tāpēc, lai noteiktu gumijas korda sajūga elastīga elementa aprēķinu un īpašības, tika atlasīti sajūgi ar nobraukumu ne mazāku kā vidējais nobraukums līdz atteikumam:

1. 2021.gada 26.decembrī motorvagens *ER2 3034-06* tika nosūtīts neplānotā remonta veikšanai sakarā ar 2.riteņpāra gumijas korda sajūga stiprinājuma bulskrūvju nomaiņu. Sajūga nobraukums sastāda 155,9 tūkst. km [50]. Starpība starp sajūga nobraukumu un vidējo nobraukumu līdz atteicei sastāda 17,8 %;
2. 2022.gada 14.aprīlī motorvagens *ER2 1300-02* tika nosūtīts neplānotā remonta veikšanai sakarā ar 2. riteņpāra gumijas korda sajūga stiprinājuma bulskrūvju nomaiņu. Sajūga nobraukums sastāda 219,6 tūkst. km [50]. Starpība starp nobraukumu un vidējo nobraukumu līdz atteicei sastāda 41,7 %;
3. 2022.gada 4.maijā motorvagens *ER2 1341-04* tika nosūtīts neplānotā remonta veikšanai sakarā ar 3. riteņpāra gumijas korda sajūga stiprinājuma bulskrūvju nomaiņu. Sajūga nobraukums sastāda 128,3 tūkst. km [50]. Starpība starp nobraukumu un vidējo nobraukumu līdz atteicei sastāda 0 %;
4. 2022.gada laikā neplānotā remonta veikšanai tika nosūtīti 3 motorvagoni sakarā ar vilces dzinēju nomaiņu. Pētījumā atlasīto sajūgu vidējais nobraukums sastāda aptuveni 200 tūkst. km.

Visi sajūgi tika atlasīti vienpusējas stiepes pārbaudei. Lai pārbaudītu iepriekš minētos sajūgu atteiču rezultātus, tiek piedāvāts veikt modelēšanu ar galīgo elementu modelēšanas *GEM* programmas palīdzību. Lai veiktu modelēšanu *GEM* vidē, ir nepieciešams noteikt materiāla īpašības pārbaudot savienojumu fragmentus uz stiepi. Sajūga apvalka eksperimentālie pētījumi tika veikti, lai noteiktu sajūga apvalka darba slodzes un maksimālās spēka slodzes, pie vienreizējas vienas izstiepšanas un arī pie cikliskās izstiepšanas. Šim nolūkam, priekš optimālas sajūga korpusa bojājuma zonas noslogošanas, tika veikta formas un sajūga apvalka fragmenta izmēra meklēšana [2]. Lai noteiktu sajūga materiālus aprēķina modelim tika izstrādātas sajūgu fragmentu formas. Tika pētīta auklas šķiedru orientācija, veikta sajūga fragmentu mehāniskās apstrādes

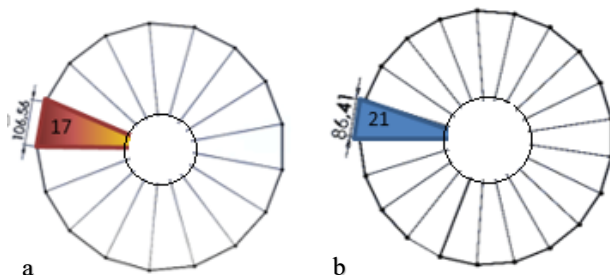
metožu meklēšana. Tika veikta sajūgu fragmentu paraugu izstrādāšana SolidWorks galīgo elementu programmā. Izmēģinājumam tiek piedāvāts sagatavot noteiktas formas un izmēra fragmentus:

- gumijas virsmas slāņa paraugs ar nomināliem izmēriem  $120 \times 25 \times 2,5$  mm redzams 3.16 attēlā.



3.16. att. Sajūga gumijas virsmas slāņa paraugs –  $120 \times 25 \times 2.5$  mm.

- Sajūga apvalka fragmentu paraugi vienreizējas un cikliskas stiepšanas izmēģinājumam.



3.17. att. Sajūga apvalka fragmentu paraugu izmēru un formu piemēri vienreizējai un cikliskai stiepšana:

a – 21 fragmentu daudzums; b – 17 fragmentu daudzums.

Sajūga apvalka ārējā diametra fragments sadalīts 21 sektorā ar vienu stiepšanas līdz sagraušanas slodzei (3.17.a. att.). Cikliskai slodzei izmantot paraugu ar fragmentu loka garumu 17 sektoros parādīts (3.17.b. att.).

Fragmenti tiek izgriezti tā, lai tos būtu iespējams novietot stiepes pārbaudes iekārtā atbilstošos virzienos, atkārtot darba slodzes. Ar šādu iestatījumu bija iespējams noslogot sajūgu zonas, kuras sairst ekspluatācijas laikā.

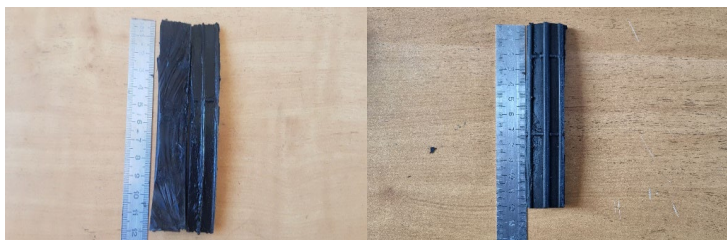
RTU laboratorijā tika sagatavoti un veikti izmēģinājumi vairākiem elementiem saskaņā ar metodikas 2.8. punktu:

1. Sajūgu augšējā un sānu slāņu pārklājošās gumijas plakanam plāksnēm;
2. Gumijas korda sajūga fragmentiem.

Gumijas paraugu virsmas slāņa nominālie izmēri redzami 3.18. attēlā. Izstrādāto formu un sajūga apvalka fragmentu griezumu izmēri redzami 3.19. attēlā.

Lai novērtētu katra apvalka materiāla ietekmi, tika sagatavoti un izmēģināti šādi paraugi:

1. plakanās plāksnes - no gumijas korda sajūga ārējā pārklājuma slāņa tika izgriezti trīs  $120 \times 5 \times 2,5$  mm izmēra paraugi, izgriezto gumijas paraugi redzami 3.18 attēlā.



3.18. att. Gumijas testēšanas parauga piemērs.

2. -Gumijas korda sajūgiem, paņemtiem uz pētījumiem, tika izgriezti fragmenti 86 mm garumā no loka, lai veiktu eksperimentu pie vienreizējas slodzes līdz sagraušanai. Cikliskai slodzei tika izmantoti paraugi ar fragmentu loka garumu 106 mm.

Sajūgu fragmenti tika izgriezti ar griezējdisku, savukārt pārkaršusās virsmas tika noslīpētas līdz viendabīgam materiālam. Asās malas tika slīpētas bez materiāla pārkaršanas, lai izlīdzinātu sprieguma koncentratorus.



3.19. att. Optimizēti sajūga fragmenti spēka slodžu izpētei.

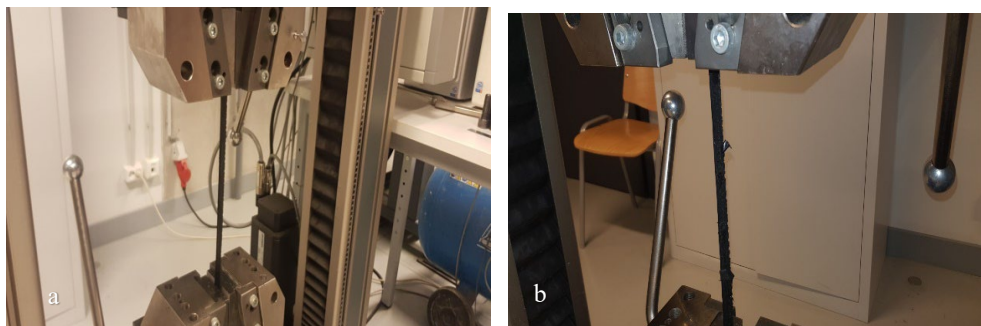
Izmēģinājuma laikā tika noteikta sajūga fragmentu optimālā forma un izmēri sajūga bojājuma zonas maksimālai noslodzei. Dati parādīti (3.11. tab.).

3.11.tabula

Sajūgu fragmentu mērījumi

Sajūgu fragmentu izmēri	Loka garums apakšā, mm	Loka garums augšā, mm	Sānu sienas biezums sagraušanas vietā, mm	Profila augšējās daļas biezums mm
I paraugu grupa, 1. un 4. fragments	65±2	86±2	20±2	15,5±1
II paraugu grupa, 2., 3., 5. un 6. fragments	67±2	105±1	19±2	15±1

Sajūga ārējā pārklājuma slāņa plakanās plāksnes izmēģinājumi tika veikti ar ZwickRoell Z150 stiepes pārbaudes iekārtu. Tika reģistrētas pakāpeniskas parauga garuma izmaiņas ar pieaugošu slodzi. Plakanās plāksnes testa rezultāti tika salīdzināti ar normatīvās dokumentācijas [5] datiem. Tika veikti 7 augšējā un sānu pārklājuma slāņu plākšņu izmēģinājumi, parādīts (3.20 att.). Izmēģinājuma vidējie pamata rezultāti ir parādīti (3.12. tab.). Plāksnes, kura izgriezta no virsmas sānu pārklājuma slāņa, deformācijas izmaiņu raksturs parādīts (3.21. att.), bet sajūga augšējās virsmas slāņa plāksnes (3.22 att.).



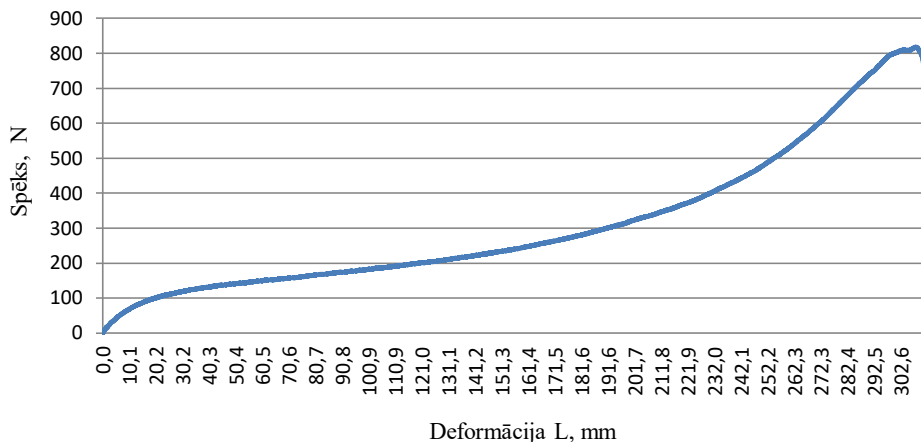
3.20. att. Gumijas parauga stiepšana uz aprīkojuma:  
a – 1.paraugs; b –3. paraugs.

3.12. tabula.

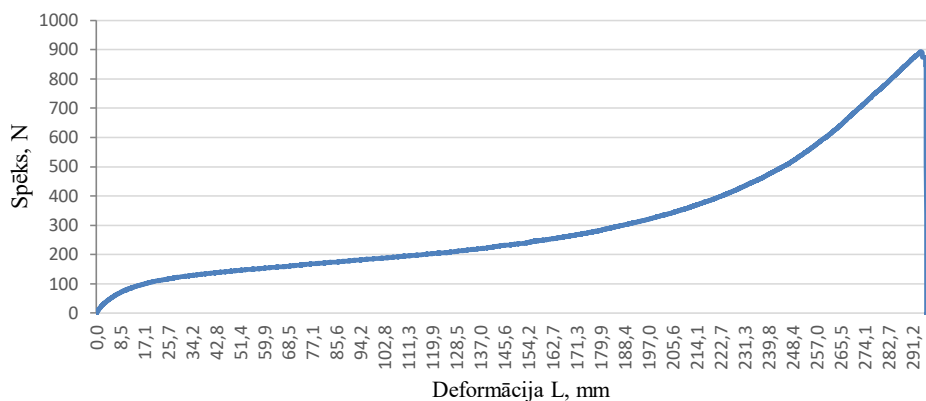
Gumijas augšējā pārklājuma slāņa plāksnes īpašības, pieņemtas turpmākiem aprēķiniem

Rādītāja nosaukums	Testa paraugi		DIN EN 13913:2003-08 parametrs, 100 %	Novirze no normatīvā parametra, %	
	1-3	4-7		1-3	4-7
	Ārējā seguma slāņa (protektora) gumijas nosacītais spriegums pie 300 % pagarinājuma MPa, ne mazāk	5,53	5,59	5,89	6,72
Stiepes izturības robeža ārējam gumijas slānim (protektors), to pārraujot (nosacītā stiepes izturība) MPa, ne mazāk	13,30	14,56	12,75	3,41	12,43
Relatīvais pagarinājums, pārraujot ārējo pārklājumu (protektoru) ne mazāk %	514,8	491,1	450,0	12,58	8,83
Relatīvais paliekošais pagarinājums pēc ārējās gumijas pārklājuma slāņa (protektora) pārrāvuma ne vairāk %	28	26	35,0	25,0	34,6
Cietība pēc Šora A pārklājuma gumijai, nosacītās vienības	64	63	no 50,0 līdz 65,0	no 21,87 līdz 4,62	no 20,63 līdz 3,17





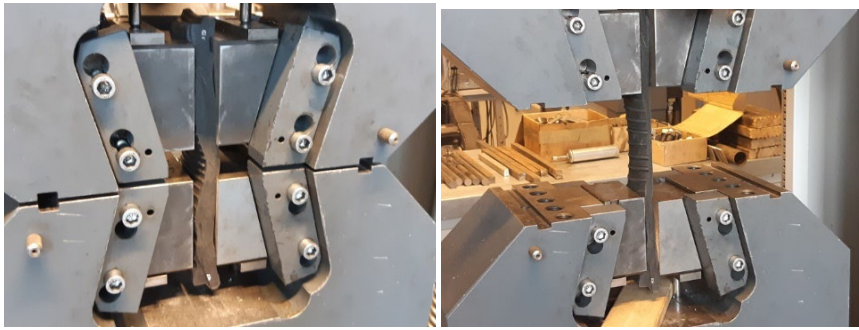
3.21. att. Gumijas 1. parauga noslogojuma grafiks līdz pārraušanai.



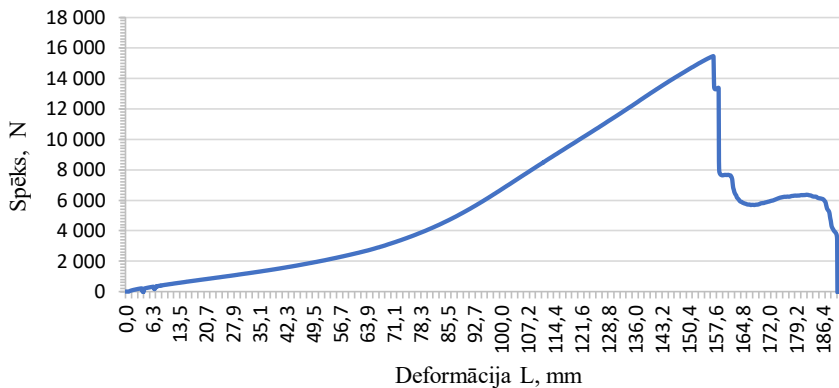
3.22. att. Gumijas 3. parauga noslogojuma grafiks līdz pārraušanai.

Sajūga apvalka fragmentu (sektoru) izmēģinājumi tika veikti ar stiepes pārbaudes iekārtu *ZwickRoell Z600*. Pie pieaugošas slodzes tika reģistrētas pakāpeniskas vienreizējas izmaiņas parauga garumā. Tika veikta cikliskā slodze, lai noteiktu sajūga darba spēka raksturlielumus un maksimālos spēka raksturlielumus.

Testi tika veikti 6 sajūgu fragmentiem, sajūga 1. fragmenta izmēģinājumi parādīti (3.23. att.), bet sajūga apvalka fragmentu deformācijas izmaiņu raksturs no vienreizējas pieaugošas slodzes parādīts (3.24. att.).



3.23. att Sajūga fragmenta izmēģinājums.

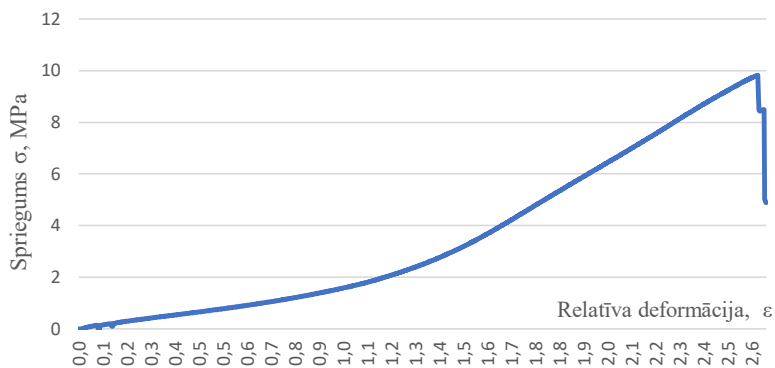


3.24. att. 1.fragmenta noslogojuma grafiks līdz pārraušanai.

Pamatojoties uz gumijas korda sajūga materiālu izmēģinājumiem uz stenda un vienas pusējas stiepes eksperimenta rezultātiem, tika piedāvāts veikt rezultātu aproksimāciju, izmantojot iebūvēto *Excel* funkciju ar tālāku iegūto datu ievadīšanu elementu modelēšanas un polinomu aproksimāciju programmā *SolidWorks*, lai novērtētu sajūgu sprieguma stāvokli. Gandrīz jebkurš uzņēmuma inženiertehniskais darbinieks var strādāt ar šāda līmeņa programmatūras pakotnēm.

- **Sajūga fragmentu parametru noteikšana**

Sajūga apvalka, kas izgatavots no augsti elastīgiem materiāliem, modeļu aprēķiniem pārrēķinām sajūga apvalka virsmas slāņa plākšņu paraugu, plākšņu un sajūga apvalka fragmentu stiepes un pagarinājuma spēkus, kas iegūti izmēģinājuma laikā. Noteiksim nominālos spriegumus  $\sigma$ , dalot iegūtos spēkus ar paraugu sākotnējo laukumu. Šajā gadījumā paraugu relatīvo deformāciju  $\varepsilon$  ierakstīsim kā paraugu esošo pagarinājumu attiecību pret paraugu sākotnējo garumu pirms stiepšanas. Rezultātā veidojam nominālo spriegumu grafikus no paraugu deformācijas. 1. grupas 1.fragmenta apvalka spriegumu grafiks, kas iegūts no parauga stiepšanas rezultātiem (3.24. att.), parādīts (3.25. att.).



3.25. att. Fragments Nr.1 sprieguma atkarība no relatīvās deformācijas.

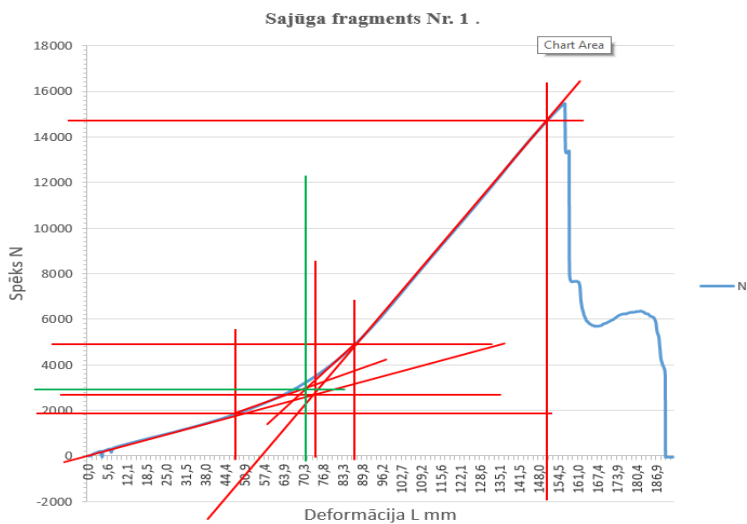
Apvalka fragmenta stiepes rezultātu pārvēršanas uz spriegumiem rezultāti tiks izmantoti, lai izveidotu materiāla aprēķinu modeli galīgo elementu modelēšanas programmas vidē. Lai to izdarītu, tālāk veiksīm grafiku aproksimāciju, ar mērķi novērtēt iegūtos rezultātus, kas ir vistuvāk dotajai nepārtrauktajai funkcijai. Lai pārbaudītu rezultātus, tika veikta grafiku lineārā un polinomā aproksimācija.

Lineārās aproksimācijas gadījumā aproksimāciju veido izmantojot lineārās funkcijas. Sajūga fragmentu Nr.1. deformācijas rezultātu lineārā aproksimācija un pārrēķināšana nominālajos spriegumos redzami 3.13. tabulā, 3.26. un 3.27. attēlā.

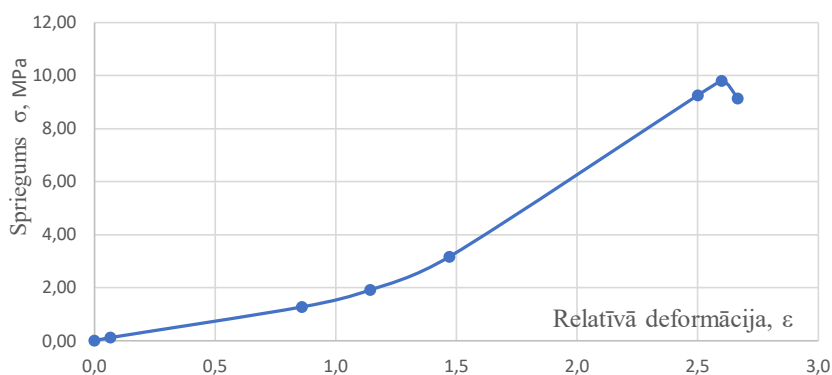
3.13. tabula

Sajūga fragmentu Nr.1 aprēķināšanas rezultāti

Spēks, N	Deformācija, L, mm	Spriegums, $\sigma$ , MPa	Relatīva deformācija, $\epsilon$
0	0	0,0	0,0
193	4	0,1	0,1
2012	51,6	1,3	0,9
3017	68,5	1,9	1,1
5002	88,3	3,2	1,5
14580	150	9,3	2,5
15435	156	9,8	2,6
14400	160	9,1	2,6



3.26. att. 1.fragmentu lineārā aproksimācija.



3.27. att. Sajūga 1.fragmentu. lineāras aproksimācijas rezultāts.

Sajūga fragmentu Nr.4. deformācijas rezultātu lineārā aproksimācija un pārrēķināšanā nominālajos spriegumos tika parādīta 3.14. tabulā.

3.14. tabula

Sajūga fragmentu Nr. 4 . aprēķināšanas rezultāti

Spēks, N	Deformācija $L$ , mm	Spriegums $\sigma$ , MPa	Relatīva deformācija, $\epsilon$ .
2652	4	1,8	0,1
5004	37	3,5	0,6
7050	57,4	4,9	1,0
8154	66,3	5,7	1,1
14760	103,6	10,3	1,7

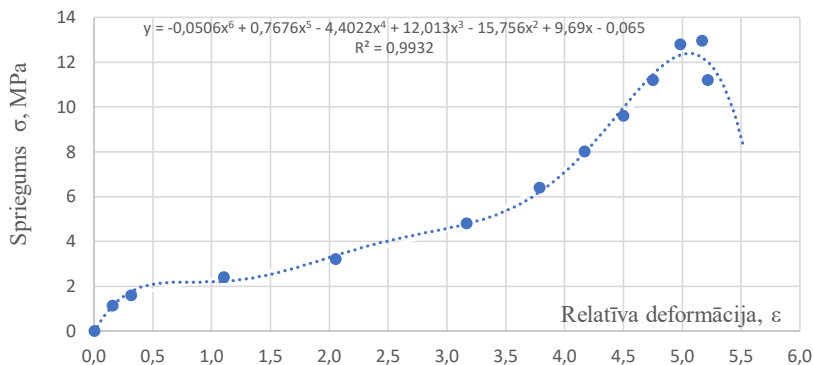
17170	115,8	11,9	1,9
16000	120	11,1	2,0

Dati par gumijas ārējā slāņa deformācijas rezultātiem parādīti (3.15. tab.) 6. kārtas polinominālās funkcijas deformāciju grafika aproksimācija atkarībā no stiepes ekspluatācijas un pēkšņām vienreizējām slodzēm līdz sajūga apvalka gumijas ārējā slāņa sagraušanai parādīts (3.28. att.).

3.15. tabula

Gumijas ārēja slāņa aprēķināšanas rezultāti

Spēks, N	Deformācija $L$ , mm	Spriegums, $\sigma$ , MPa	Relatīva deformācija, $\varepsilon$
0	0	0	0,000
70	9,4	1,12	0,157
100	18,9	1,6	0,315
150	66	2,4	1,100
200	123	3,2	2,050
300	190	4,8	3,167
400	227	6,4	3,783
500	250	8	4,167
600	270	9,6	4,500
700	285	11,2	4,750
800	299	12,8	4,983
810	310	12,96	5,167
700	313	11,2	5,217



3.28. att. Gumijas parauga deformācijas rezultātu aproksimācija.

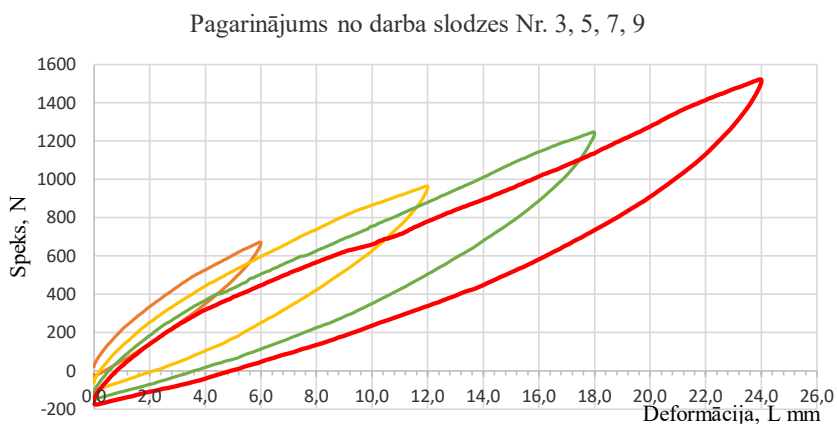
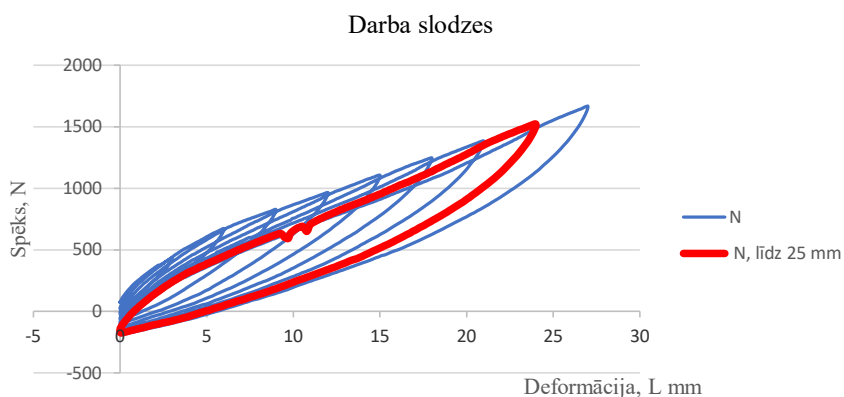
- **Sajūgu fragmentu atlikušā pagarinājuma noteikšana**

Sajūgu 2. un 3. fragmenti grupa I un 5. un 6. fragmenti grupa II noslogošanas ātrums ar darba un pēkšņām slodzēm, tiek parādīts (3.16. tab.). Sajūgu 2. un 3. fragmenti noslogoti ar ekspluatācijas slodzēm, sajūgu 5. un 6. fragmenti noslogoti ar pēkšņām slodzēm. Deformācijas izmaiņas raksturs sajūgu 2. un 5. fragmentiem pie cikliskās slodzes parādīts (3.29 – 3.31. att.).

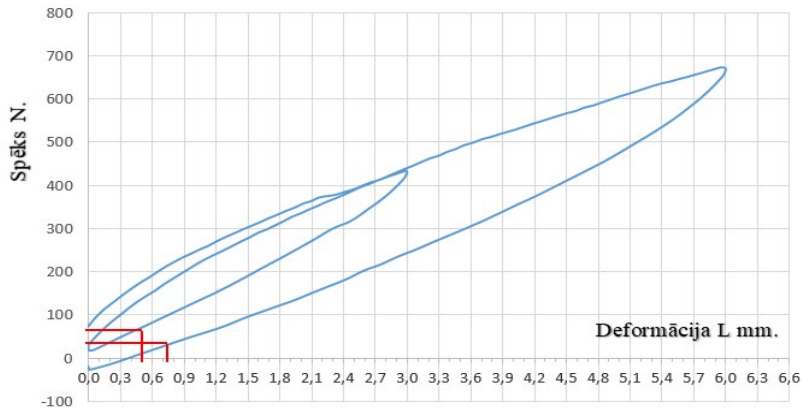
3.16. tabula

Sajūga apvalka fragmentu noslogošanas secība

Slodzes raksturojums	Noslogojuma ciklu skaits, gab.	Noslogojuma ātrums, mm/s
Ekspluatācijas slodzes	10	0,4
Pēkšņas slodzes (līdz sagraušanai)	20	0,8

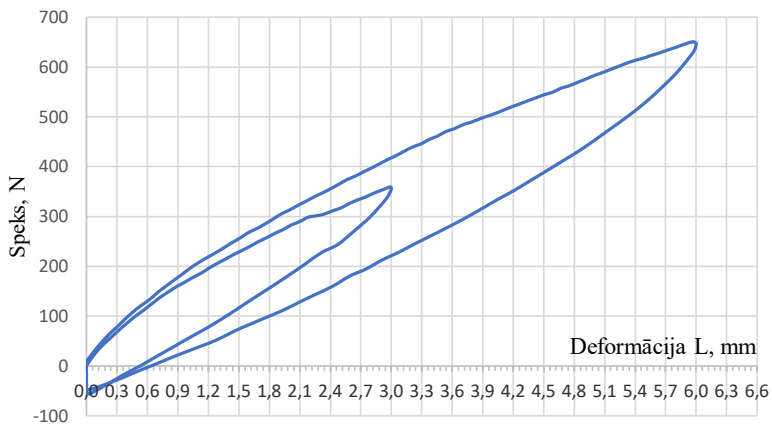


- **Atlikušās deformācijas noteikšana atkarībā no darba slodzēm**



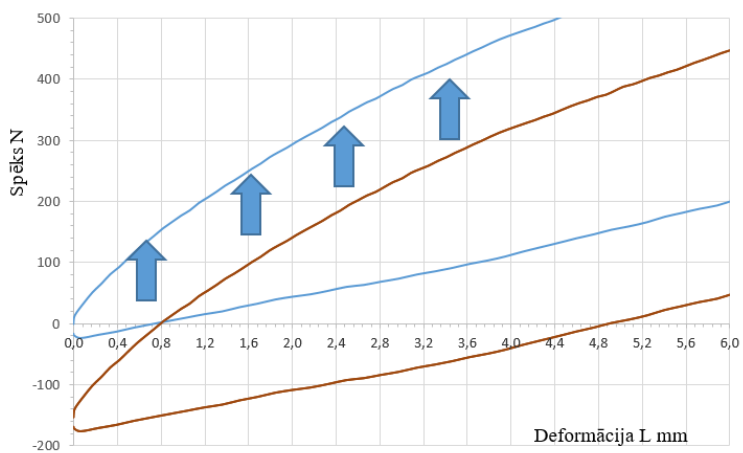
3.31. att. 2. fragmenta darba cikliskās slodzes grafiks atkarībā no atlikušā pagarinājuma.

Atlikusī deformācija otrajā un trešajā slogošanas ciklā vidēji sastāda 0,5 – 0,7 mm (3.31. att.), bet pie katras turpmākas noslodzes paliekošā deformācija palielinās. Pārbaudes atlikušās deformācijas noteikšanai tika veiktas virzot spēka grafikus uz koordinātu sākumpunktu (3.32. un 3.33. att.).



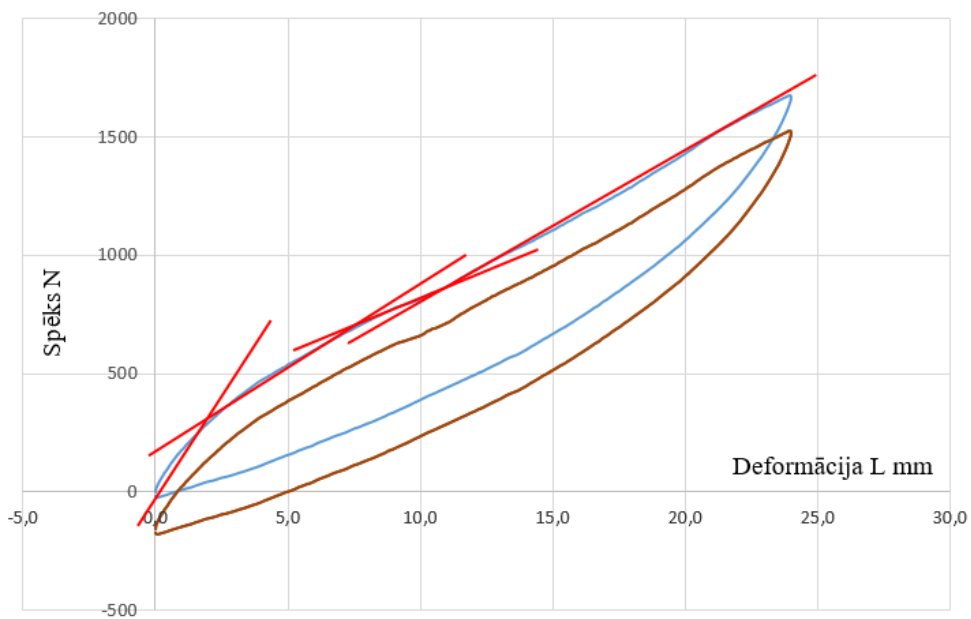
3.32. att. 2. fragmenta darba cikliskās slodzes grafiks, kas ņemts no sākotnējām koordinātēm, atkarībā no atlikušā pagarinājuma.

Veicot padziļinātu grafika (3.32. att.). pētīšanu, tika konstatēts, ka pie cikliskām darba slodzēm ekspluatācijā paliekošā deformācija sastāda 0,8 mm.



3.33. att. 2. fragmenta grafika sākotnējās koordinātes.

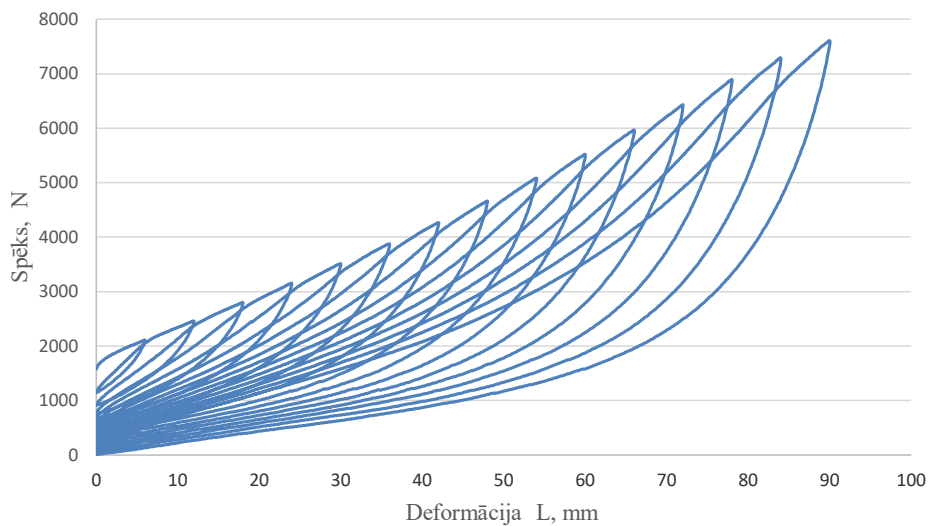
Fragmenta lineārā aproksimācija atkarībā no darba slodzes parādīta grafikā (3.34. att.).



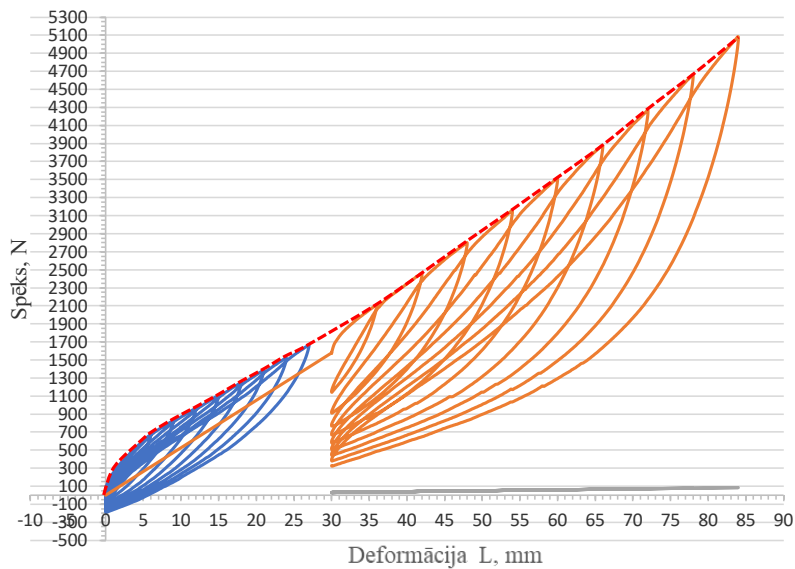
3.34. att. Darba cikliskas slodzes grafika lineāra aproksimācija.



- Kritisko slodžu pētīšana

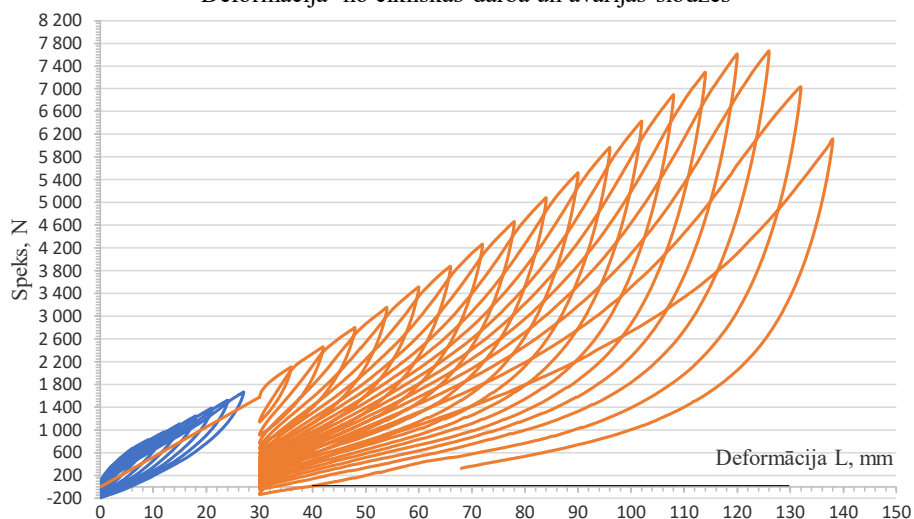


3.35. att. 5. un 6. fragmentu deformāciju grafiks atkarībā no ekstremālam cikliskām slodzēm.



3.36. att. 2., 3 un 5., 6 fragmenta deformāciju grafiks atkarībā no ekspluatācijas un ekstremālam cikliskām slodzēm.

### Deformācija no cikliskas darba un avarijas slodzes



3.37. att. Eksploatācijas un ekstremālās cikliskās slodzes izmēģinājumu veids līdz sajūgu 2., 3 un 5., 6 fragmentu sagraušanai.

Cikliskās slodzes rezultāti liecina, ka deformējot sajūga apvalka fragmentu līdz 25 mm, kas ir kritiskais lielums eksploatācijā, spēka vērtība sasniedz aptuveni 1500 N. Sajūga apvalka fragmenta tālākas deformācijas laikā, līdz 80-90 mm, tiek novērota sajūga apvalka materiāla stiprināšanas efekts, tā kā ar katru jaunu noslogojumu slodze palielinās nelineāri un sasniedz 7500 N pie maksimālās deformācijas 90 mm.

2., 3 un 5., 6 sajūga fragmentu izmēģinājumi pie cikliskām slodzēm un pārvēršana nominālajos spriegumos parādīta (3.17. tab.) un rezultātu aproksimācija (3.38. att.). Aprēķinātais elastīgais modulis sastāda – 10 MPa ( $E = \sigma/\epsilon = 10 \text{ MPa}$  (3.39 att.)).

3.17. tabula

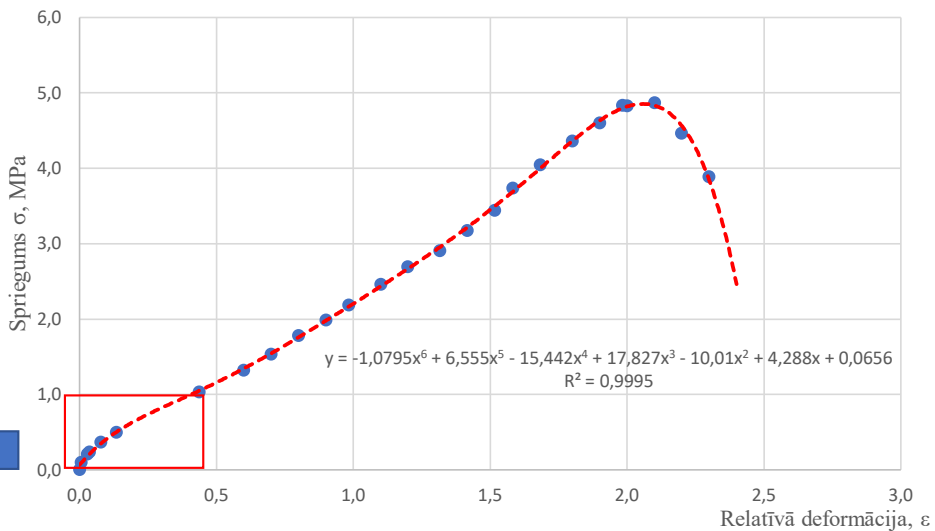
Sajūgu fragmentu izmēģinājumi

Spēks, N	Deformācija L, mm	Spriegums $\sigma$ , MPa	Relatīva deformācija, $\epsilon$ .
0	0	0,00	0,00
160	0,4	0,10	0,01
324	1,69	0,21	0,03
372	2,18	0,24	0,04
579	4,67	0,37	0,08
783	8,08	0,50	0,13
1623	26,18	1,03	0,44
2081	36	1,32	0,60
2412	42	1,53	0,70
2802	48	1,78	0,80
3130	54	1,99	0,90
3445	59	2,19	0,98
3876	66	2,46	1,10

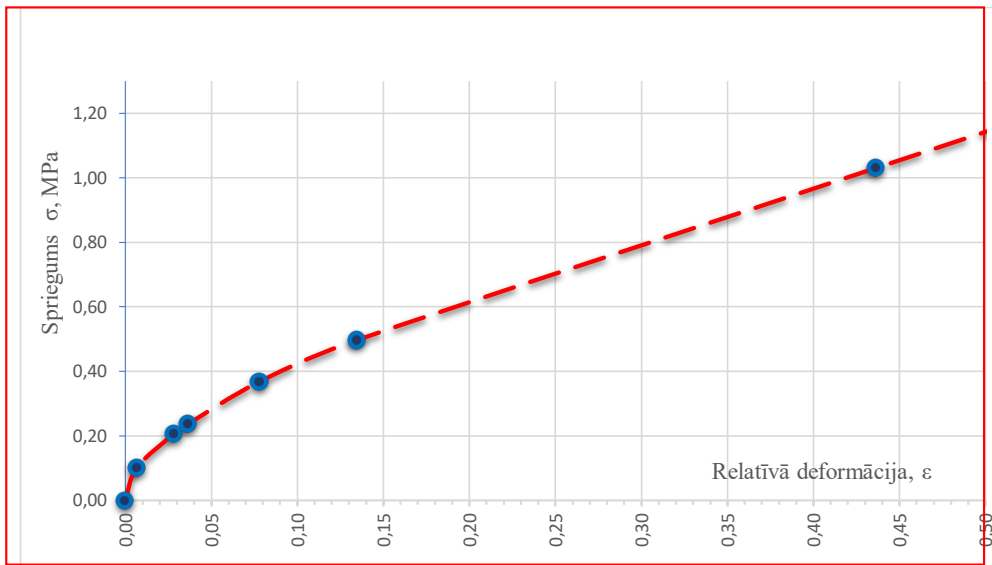
3.17 tabulas turpinājums

Spēks, N	Deformācija L, mm	Spriegums $\sigma$ , MPa	Relatīvā deformācija, $\epsilon$ .
4239	72	2,69	1,20
4578	79	2,91	1,32
5000	85	3,17	1,42
5415	91	3,44	1,52
5890	95	3,74	1,58
6375	101	4,05	1,68
6864	108	4,36	1,80
7248	114	4,60	1,90
7612	119	4,83	1,98
7599	120	4,82	2,00
7667	126	4,87	2,10
7031	132	4,46	2,20
6118	138	3,88	2,30

Grafikos (3.38; 3.39. att.) tika parādīta deformāciju datu aproksimācija atkarībā no ekspluatācijas un pēkšņām cikliskām slodzēm līdz sajūgu 2., 3 un 5., 6 fragmentu apvalku sagraušanai. Aproksimācija tika veikta ar 6 kārtas polinoma funkcijas palīdzību. Pēc (3.39. att.) parādītajiem izmēģinājuma rezultātiem tālāk tiks aprēķināti elastīguma moduļi.

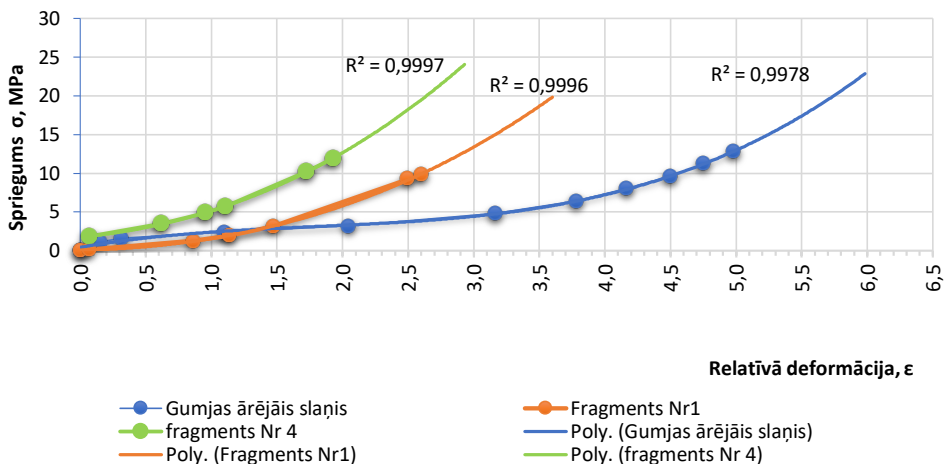


3.38. att. Sajūgu 2., 3 un 5., 6 fragmentu cikliskās ekspluatācijas slodzes rezultātu aproksimācija



3.39. att. Cikliskās ekspluatācijas slodzes rezultātu aproksimācija. Palielināts fragments. Sajūgu 2., 3 un 5., 6 fragmenti.

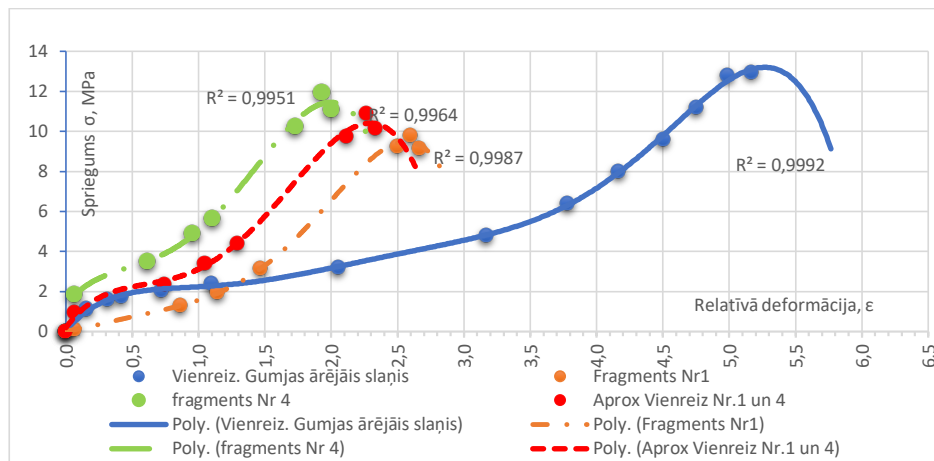
Sajūga gumijas slāņa relatīvās deformācijas rezultāti ( $R^2=0,9978$ ) un 1., 4. fragmentu pie ekspluatācijas un ekstremālam vienreizējām slodzēm ( $R^2 = 0,9996$  un  $R^2 = 0,9997$ ) datu aproksimācija parādīta grafikā (3.40. att.).



3.40. att. Sajūga gumijas slāņa un 1. un 4. fragmentu relatīvai pagarinājums bez sagraušanas. Vienreizēja stiepšana.

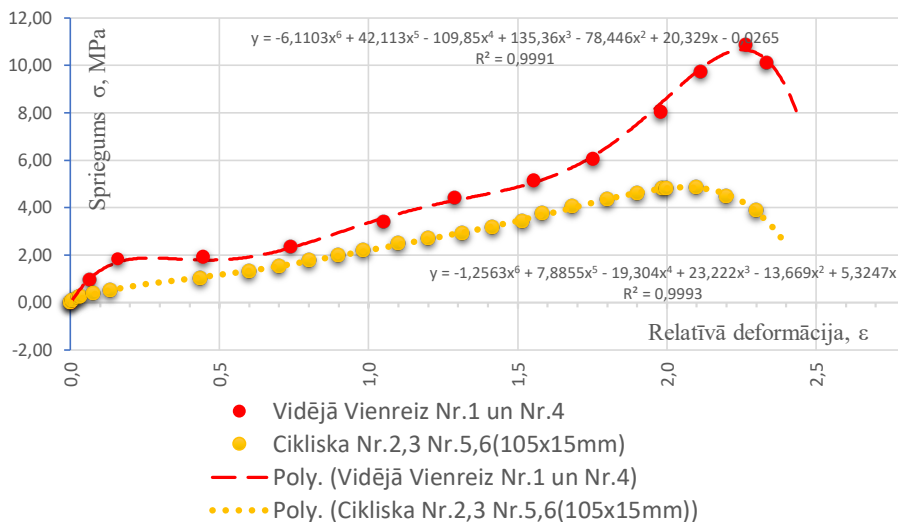
Sajūga gumijas slāņa relatīvā pagarinājuma aproksimācija pie vienreizējas izstiepšanas ( $R^2=0,9992$ ) un 1. un 4. sajūga fragmentu ( $R^2 = 0,9987$  un  $R^2 = 0,9951$ ) pie vienreizējām ekspluatācijas un pēkšņām slodzēm līdz sagraušanai. 1. un 4. fragmentu vidējais raksturlielums

( $R^2 = 0,9964$ ) līdz sagraūšanai. Tālāko pagarinājumu prognoze tika veikta ar 4. un 6.kārtas polinomiem.



3.41. att. Sajūga gumijas slāņa un 1. un 4. fragmentu rezultātu aproksimācija.

Sajūga 1., 4. fragmentu vienvirziena stiepšanas izmēģinājuma rezultātu salīdzinājums, pie vienreizējas izstiepšanas ( $R^2 = 0,9991$ ) un sajūgu 2., 3 un 5., 6 fragmenti pie eksploatācijas un ekstremālam cikliskām slodzēs ( $R^2 = 0,9993$ ) līdz sagraūšanai, tika parādīts grafikā (3.42. att.).



3.42. att. Vienpusējas stiepes izmēģinājuma rezultātu salīdzinājums.

Lai veiktu izmēģinājumu, fragmenti tika atlasīti tā, lai maksimāli noslogotu sajūga darba zonas. Tika veikti sajūgu gumijas slāņa un sajūgu fragmentu izmēģinājumi pie vienreizējas un pie cikliskas izstiepšanas. Eksperimentu laikā tika iegūti materiāla raksturojumi: slodze - deformācija, kura pārrēķinātā uz sprieguma - deformācijas atkarībām pie vienreizējas un pie cikliskām

izstiepšanas slodzēm, kuru rezultātā tika noteiktas gumijas korda sajūga materiāla mehāniskās īpašības, kas tika izmantotas precīzai parametru noteikšanai *GEM* vidē.

Pēc šiem modeļiem tiks konstruēti materiāla aprēķinu modeļi, lai izveidotu gumijas korda apvalka 3D modeļus galīgo elementu modelēšanai.

Lai meklētu slodzes, kas ietekmē sajūga apvalka bojājumus, ir nepieciešami vairāki aprēķini, izmantojot skaitlisko modelēšanu. Šim mērķiem nepieciešams, ņemot vērā slodzes raksturu un gumijas korda materiāla īpašības, izvēlēties efektīvu modelēšanas un aprēķinu programmu (*GEM*) kompleksu [4].

### 3.8. Modelēšanas programmas izvēle

Šajā promocijas darba nodaļā tiek analizētas specializētās programmas ar mērķi noteikt piemērotākās programmas projektēšanai, aprēķinu modelēšanai un kompozītmateriālu sprieguma stāvokļa analīzei. Nodaļas mērķis ir izvēlēties mūsdienīgu skaitļošanas programmatūras pakotni galīgo elementu modelēšanai, lai novērtētu sajūgu dempferējošās īpašības, sajūga stāvokļa novērtēšanu un palielinātu to drošumu.

Mūsdienās konstrukciju un to elementu nestspējas aprēķiniem (analīzei) un to optimālo konfigurāciju un izmēru aprēķiniem inženieru praksē visā pasaulē tiek izmantotas daudzas datorprogrammas. Bez šādām datorprogrammām praktiski nav iespējams efektīvi projektēt mūsdienu prasībām atbilstošas sarežģītas nesošās konstrukcijas, kuras var sastāvēt no vairākiem tūkstošiem elementu. Šobrīd plaši tiek izmantotas gala elementu metodes programmas (*GEM*), kuras ļauj modelēt dažādu veidu gala elementu modeļus. Liela priekšrocība ir dažādu pakešu esamība, kuras realizē *GEM* tādā līmenī, kas ļauj runāt par aprēķinu standartizāciju. Visizplatītāko *GEM* pakešu skaitā attiecināmi dažādi paveidi *ANSYS*, *ABAQUS*, *MD ADAMS SOLIDWORKS* komerciālās programmas [44]...[37]. Izskatīsim detalizētāk katru no programmām ar gala elementu metodi.

*ANSYS* - tā ir programmu pakete gala elementu analīzei, risina uzdevumus dažādām inženierdarbības sfērām (konstrukciju stiprība, termodinamika, šķidrums un gāzu mehānika, elektromagnētisms), ieskaitot saistītos daudz disciplināros uzdevumus (termoizturība, magnētēlastība siltumapmaiņu, elektromagnētismu, hidrogāzu dinamiku kā atsevišķi, tā arī kopējā. u.c.). *ANSYS* - tas ir profesionāls gala elementu aprēķina komplekss, kas ļauj risināt uzdevumus par stiprību, dažādās ražošanas jomās. *ANSYS* ir universāla programmatūra, kuru izmanto inženiertehniskām simulācijām visa produkta dzīves cikla laikā. Bez citiem rīkiem *ANSYS* pakotne ietver trīs fizikālu procesu simulatorus: konstrukcijām, plūsmu mehānikai (*CFD*) un elektromagnētismam, kas var savstarpēji mijiedarboties.

*ANSYS* pielikums tiek izmantots tādās sfērās kā:

- autobūve;
- atomenerģētika;
- dzelzceļa transports;
- kuģubūve;
- dzinēju būve;
- būvniecības nozare;
- elektromašīnbūve.

*ANSYS* Mechanical risina šāda tipa uzdevumus:

- stiprības analīze - statistiskā;
- stabilitāte;
- dinamiskā;
- superelementi;
- formas optimizācija;
- kontaktu uzdevumi;
- siltuma analīze;
- siltuma modeļi;
- akustika;
- starpdisciplinārā analīze.

Modelēšana un analīze rūpnieciskās sfērās ļauj izvairīties no dārgiem un ilgstošiem izstrādes cikliem, kā “projektēšana - izgatavošana - izmēģināšana”. Sistēma strādā uz ģeometriskā kodola Parasolid bāzes. KE analīzes programmu sistēma *ANSYS* tiek izstrādāta amerikāņu kompānijā Ansys inc., kura sasaistīta ar citām paketēm, tādām kā *CAD* - sistēma *NX*, *CATIA*, *Pro/ENGINEER*, *SOLIDEDGE*, *SOLIDWORKS*, Autodesk Inventor un dažām citām.

Galvenie trūkumi: augstas izmaksas, sarežģījumi apgūšanai, augstas sistēmas prasības.

*ABAQUS* – programmatūras pakotne galīgo elementu stiprības aprēķiniem. *ABAQUS* ietver sevī šādus galvenos moduļus, kas izstrādāti, lai atrisinātu tradicionālās galīgo elementu analīzes problēmas, tādas kā: statiku, dinamiku, siltuma pārnesei kombinācijā ar kontaktu mijiedarbību un nelineārām materiāla īpašībām, pamatojoties uz netiešas integrācijas shēmu. *ABAQUS/Standard* ļauj veikt šādus analīzes veidus:

- statistiskā sprieguma/pārvietošanās analīze;
- viskoelastīga / viskoplastiska reakcija;
- pārejošu dinamisku spriegumu/pārvietošanu analīze;
- pārejas vai līdzsvara stāvokļa siltuma pārnesei analīze;
- pārejas vai līdzsvara stāvokļa difūzijas masas analīze.

Materiālu īpašību *ABAQUS* matemātiskie modeļi ļauj aprakstīt metālus, čugunu, gumiju, plastmasu, kompozītmateriālus, elastīgas un trauslas putas, betonu, smiltis un mālu, piedevām, materiāla reakcija katram no šiem modeļiem var būt nelineāra [16]. Paredzētas lineāras un nelineāras elastīgas, elastīgi plastiskas un elastīgi viskoplastiskas likumsakarības. Varētu tikt modelēti gan izotropi, gan anizotropi materiāli, kā arī izveidoti materiāli, kuri noteikti lietotājam, izmantojot apakšprogrammas. Ar *ABAQUS* kompleksa palīdzību varētu atrisināt tādas sarežģītas problēmas kā turbomašīnu stiprības aprēķināšana un piedziņas sistēmu projektēšana, šasijas un transmisijas darbības analīze, riepu uzvedības noteikšana, metināto savienojumu aprēķināšana, nejaušu sadursmju analīze (avārijas testi), veicot kritienu testus, imitējot superplastisku veidojumu, metāla liešana, materiālu iespīšanās, veikt kompozītmateriālu konstrukciju aprēķinus, ņemot vērā liela skaita ķermeņu kontakta mijiedarbību un paškontakta, seismiskos efektus, sprādzienbīstamības efektus, aprēķināt kodolreaktoru uzticamību, analizēt elektronisko komponentu izturību[39].

Galvenie trūkumi: *ABAQUS* praktiski nav izplatīts un maz pazīstams Latvijā dzelzceļa transporta jomā.

*MSC.ADAMS* Programmatūras komplekss paredzēts dažādu industriālo iekārtu modelēšanai un aprēķināšanai, kā arī ļauj izveidot, modificēt un veikt reālistiskus trīsdimensiju modeļu aprēķinus *MD ADAMS* virtuālajā modelēšanas vidē.

Programatūras pakotne var tikt izmantota, lai atrisinātu plašu uzdevumu klāstu, piemēram:

- mašīnu mobilitātes analīzē;
- ceļņu torņa iekārtu vadības sistēmas izstrādē;
- zobratu pārnesei zobratriteņu (zobratu) konfigurācijas izstrādē;
- pagriezienu modulēšanā pie liela transportlīdzekļa ātruma;
- avārijas situācijas un atteikumu modelēšana;
- slodžu noteikšana, konstrukcijas izturību un ilgmūžību izpētīšanā.

*MSC.ADAMS* programmas pakotnes galvenie trūkumi. Neskatoties uz speciālā *ADAMS/Rail* moduļa klātbūtni dzelzceļa ritošā sastāva modelēšanai, *MSC.ADAMS* ir paredzēts transportlīdzekļu kinemātiskai un dinamiskai analīzei dažādās *FEA/CAE* sistēmās [11]. Programma ir grūti apgūstama un prasa noteiktus datorsistēmas resursus.

*SOLIDWORKS* – Šī programma tiek izmantota darbam rūpnieciskajā ražošanā, mašīnbūvē, un konstruēšanā.

Programma ļauj risināt rindu specifisku uzdevumu, tādu kā precīzu modeli inženieraprēķinu veidošanai. Cieto ķermeņu modelēšana *3D* formātā ļauj izveidot konstrukcijas atsevišķas detaļas, tā arī pilnvērtīgus salikumus dažādās ražošanas nozarēs. Pārbaudīt jebkura projekta funkcionalitāti var tieši modelī, izveidot fizisku prototipu tam nav nepieciešams. Tas ekonomē līdzekļus un laiku, ļaujot izslēgt visas iespējamās kļūdas aprēķinos projektēšanas posmā.

Šobrīd programma *SOLIDWORKS* piedāvā lielu skaitu izstrādātu programmu moduļus ar šādam funkcijām:

- projektu optimizācija;
- izstrādājumu mehāniskas pretestības noteikšana;
- izgatavoto izstrādājumu stiprības analīze;
- siltuma pārvades un stabilitātes noviržu testēšana;
- daudzveidīgu projektu aprēķinu veikšana.

Tāpat šis risinājums noder, ja ir jāveic pakāpeniska fiziskā modelēšana, kā rezultātā paātrina izstrādājuma izstrādi, paaugstina to kvalitāti un samazina izpēti procesa izdevumus.

SolidWorks efektīvi sadarbojas ar Windows lietojumprogrammām, piemēram, Excel, Word un citām.

Programmai *SOLIDWORKS* ir zemākas sistēmas prasības salīdzinājumā ar citām pārskatā parādītajām programmām. SolidWorks pakotne atbalsta visus galvenos standartus datu attēlošanai un apmaiņai ar citām modelēšanas programmām.

Pēc simulācijas programmu analīzes tiek piedāvāts izpētīt un noteikt gumijas korda materiāla stiprības īpašības, izmantot *SOLIDWORKS* simulācijas programmu, pētījuma problēmas nelineārā formulējumā pie lielām deformācijām gumijas korda apvalkā. Un izstrādāt sajūga apvalka materiāla aprēķināšanas modeli *SOLIDWORKS* vidē un veikt analīzi *SOLIDWORKS SIMULATION*.

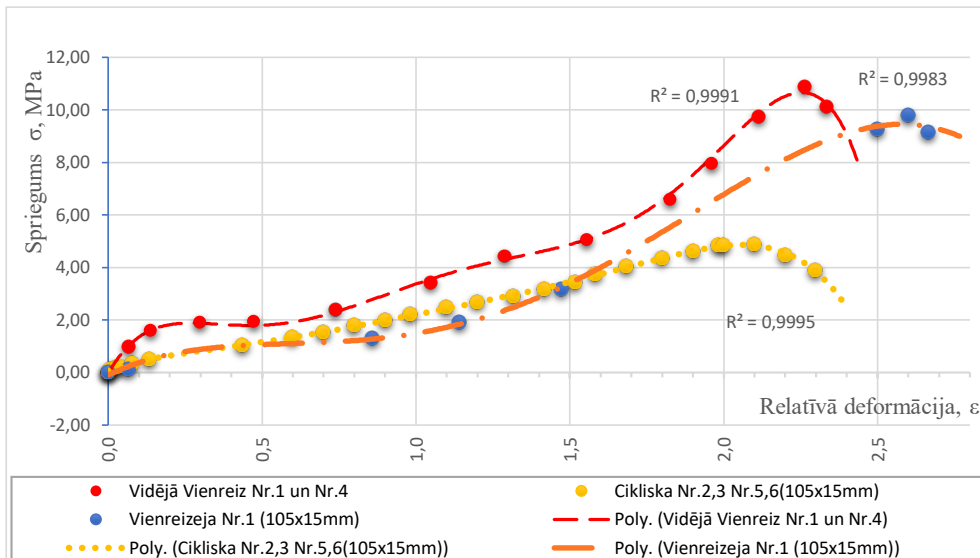


### 3.9. SolidWorks programma aprēķināšanas modeļa izveidošana

Lai izveidotu sajūga materiāla skaitlisko modeli, tika veikta vairāku testu rezultātu salīdzinošā analīze:

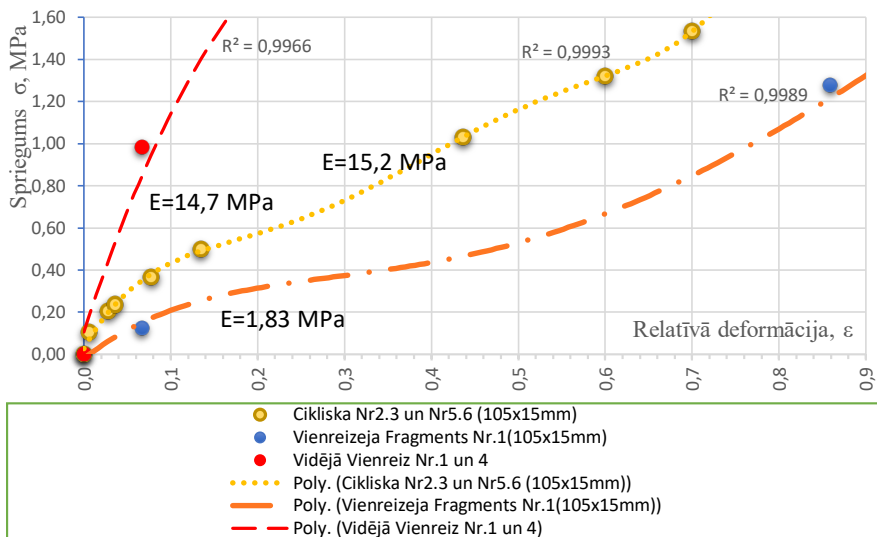
- gumijas virsmas slāņa paraugu vienpusēja stiepšana ar vienreizēju slodzi līdz sagraušanai, tika parādīta. (3.21. att.);
- apvalka fragmentu vienpusēja stiepšana ar vienreizēju slodzi, pakāpeniski palielinot stiepšanas amplitūdu katrā nākamajā solī, tika parādīts (3.24. att.);
- apvalka fragmentu stiepšana ar ciklisko slodzi, pakāpeniski palielinot stiepšanas amplitūdu katrā nākamajā solī (3.36. att.).

Spēka atkarība – pagarinājumi, kuri iegūti paraugu pārbaudes gaitā, tika pārrēķināti nominālajos spriegumos atkarībā no paraugu relatīvās deformācijas un parādīti (3.43–3.45. att.).



3.43. att. Paraugu nominālie spriegumi pie vienreizējas un cikliskas slodzes.

Sajūga apvalka nominālā sprieguma atkarība no relatīvās deformācijas fragmentiem pie vienreizējas un cikliskas slodzes redzama 3.44. attēlā.



3.44. att. Palielināts fragments maksimālās un minimālās vienreizējās un cikliskās slodzes diapazonā.

Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, kas izklāstīti (3.42. att.), tika novērtēts un aprēķināts virsmas slāņa gumijas paraugu mehānisko īpašību novērtējums un aprēķins sajūga apvalka fragmentiem pie vienreizējās stiepšanas un cikliskas stiepšanas slodzes tika piedāvāts (3.44. att.) apkopoti 3.18. – 3.22. tabulā.

3.18. tabula

#### Gumijas ārējā slāņa vienreizēja stiepšana

Proportionalitātes robeža, MPa	Elastības modulis, MPa	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža, MPa	Sagraušanas spriegums, MPa
$\sigma_{0,2}$	E	$\sigma_b$	$\sigma_y$	Fracture
1,12	7,15	12,96	1,6	11,2

Gumijas paraugu izmēri 120x25x2,5mm

Visus paraugus darba garums starp stiepes pārbaudes iekārtas spīlēm ir  $L=60$  mm.

3.19. tabulā

#### Sajūga 1. fragmenta vienreizēja stiepšana

Proportionalitātes robeža, MPa	Elastības modulis, MPa	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža, MPa	Sagraušanas spriegums, MPa
$\sigma_{0,2}$	E	$\sigma_b$	$\sigma_y$	Fracture
0,123	11,84	9,800	1,277	9,143

Sajūga 1. fragmenta šķērsriezuma izmērs 96 x 15mm un laukums  $S = 1440\text{mm}^2$

Sajūga 4. fragmenta vienreizēja stiepšana

Proporcionalitātes robeža, MPa	Elastības modulis, MPa	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža, MPa	Sagraušanas spriegums, MPa
$\sigma_{0,2}$	E	$\sigma_b$	$\sigma_y$	Fracture
1,84	17,63	11,9	3,5	11,1

Sajūga 4. fragmenta šķērsriezuma izmērs 96 x 15 mm un laukums S = 1440mm<sup>2</sup>

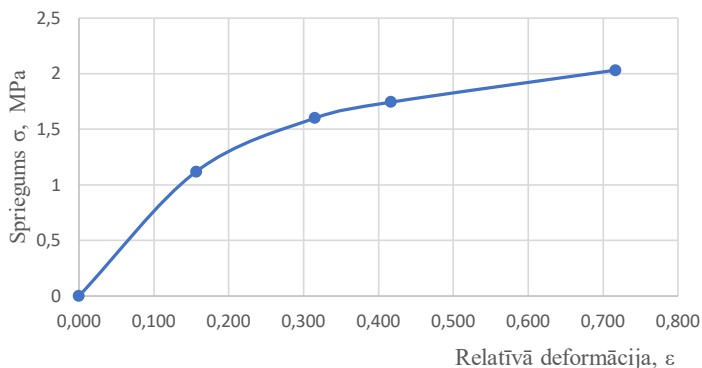
Sajūga 1. un 4. fragmenta vienreizējas stiepšanas vidējais rezultāts

Proporcionalitātes robeža, MPa	Elastības modulis, MPa	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža, MPa	Sagraušanas spriegums, MPa
$\sigma_{0,2}$	E	$\sigma_b$	$\sigma_y$	Sagraušana
0,98	14,73	10,86	2,38	10,13

2. un 5. fragmenta cikliskā slodze

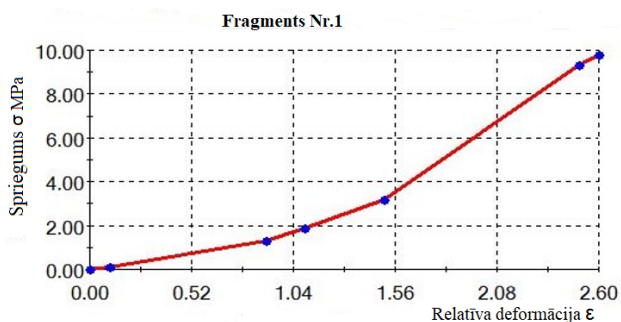
Proporcionalitātes robeža, MPa	Elastības modulis, MPa	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža, MPa	Sagraušanas spriegums, MPa
$\sigma_{0,2}$	E	$\sigma_b$	$\sigma_y$	Sagraušana
0,102	15,24	4,87	0,50	3,88

Atbilstoši aprēķinātajiem materiāla raksturlielumiem SolidWorks aprēķinu kompleksā tika izstrādāts materiāla aprēķina modelis gumijai no sajūga virsmas slāņa un sajūga apvalka fragmentiem. Modelējot Solidworks vidē tiek izmantots superelastīgs nelineāra materiāla modelis. Pamatojoties uz testēšanas laikā iegūtajiem parauga pagarinājuma rezultātiem tiek konstruētas nominālā sprieguma atkarības no paraugu pagarinājuma pakāpes, kas ir pieņemams šāda veida analīzēm. Sajūga apvalka nobīdes pakāpe un tās deformācija ekspluatācijas laikā ir nozīmīga. Tāpēc precīzākai materiāla uzvedības modelēšanai izmantojam izmēģinājuma datus un pielietojam piektās kārtas *Mūnija-Rivlina* vienādojumu. Vienādojuma koeficienti noteikti no deformācijas-sprieguma izmēģinājumu testa līknes. Gumijas virsmas slāņa materiāla līkne pie 43 mm pagarinājuma parādīta (3.45. att.).



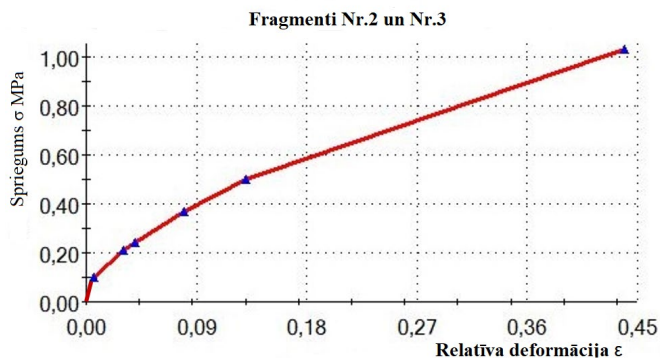
3.45. att. Gumijas virsmas slāņa materiāla līkne pie 43 mm pagarinājuma. Gumijas parauga izmēri ir  $120 \times 25 \times 2,5$  mm.

Iegūtās līknes, kas konstruētas SolidWorks programmā, ir parādītas (3.46 un 3.47 .att.).



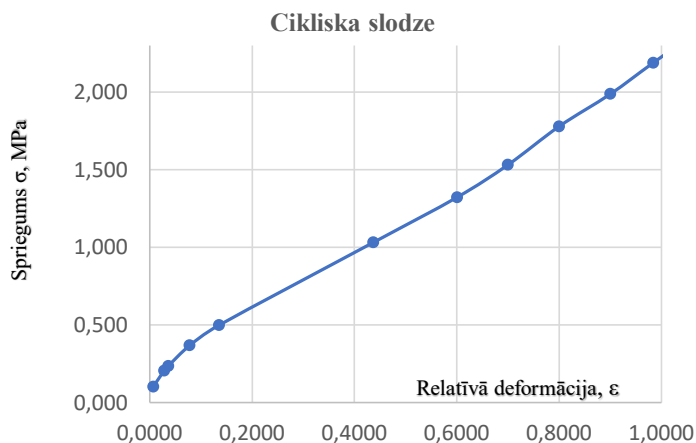
3.46. att. Materiāla līkne 1.fragmentam, pie pagarinājuma 150 mm, parauga izmērs -  $105 \times 15$  mm.

Sajūga 2. un 3. fragmentu materiāla aproksimētās raksturlielumu īpašības, kas konstruēta pēc izmēģinājuma rezultātiem. Cikliskā ekspluatācijas slodze līdz parauga pagarinājumam, pēc iegūtajiem rezultātiem, kas parādīti (3.38. att.), sastāda 26,18 mm.



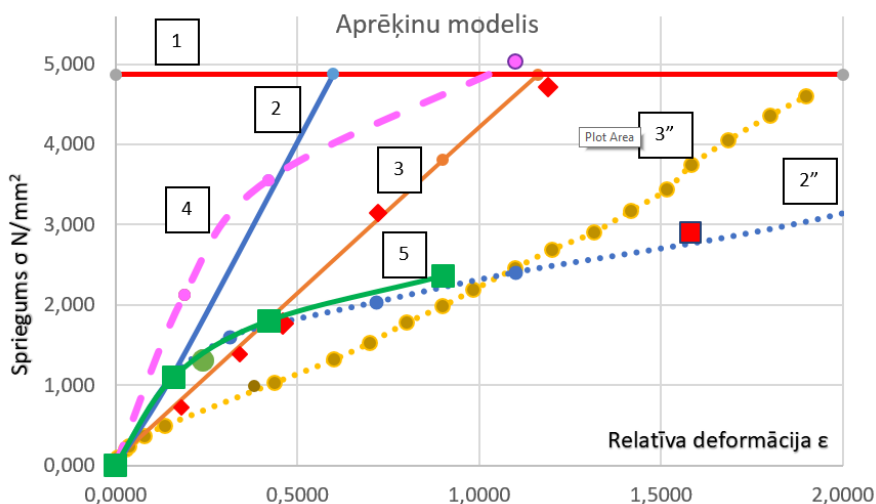
3.47. att. Sajūga 2. un 3. fragmentu aproksimētais materiāla raksturojums.

Aproksimētais sajūga fragmentu materiāla raksturlielums, kas konstruēts pēc izmēģinājuma rezultātiem, cikliskām ekspluatācijas slodzēm (2; 3 fragmenta pagarinājumi– 26,18 mm) un cikliskām kritiskām slodzēm (5. un 6. fragmenta pagarinājumi sastāda – 60,00. mm).



3.48 att. Sajūga 2.,3 un 5.,6. fragmentu aproksimētais materiāla raksturojums.

Rezultātā aprēķiniem varam izmantot sajūga apvalku materiālu lineāros (2, 3) un nelineāros (2, 3'') aprēķinu modeļus, kuri (3.49 att.) norādīti ar cipariem.



3.49. att. Salīdzinošais lineāro (nepārtrauktas līnijas –) un nelineāro (punktveida līnijas “. . .”) materiālu modeļu novērtējums.

1 – stiprības robeža; 2, 2'' - sajūga apvalka virsmas slāņa gumijas materiālu lineārie un nelineārie modeļi; 3 - lineārs, hiperelastīgs *Mūnija-Rivlina* modelis un 3'' - nelineārs materiālu modelis gumijas korda sajūga apvalku fragmentiem; 4 – gumijas materiāla hiperelastīgais Blatz Ko modelis; 5 – gumijas materiāla nelineārs elastīgais modelis.

Saskaņā ar SolidWorksprogrammā konstruēto materiālu aprēķinu modeļu izpētes rezultātiem, tika konstatēts, ka eksploatacijas slodzēm visprecīzākais ir gumijas materiāla nelineārais elastīgais modelis - 5 (Nonlinear Elastic Model), bet cikliskām slodzēm ar lielām deformācijām - Mūnija-Rivlina hiperelastiskais modelis – 3.3”.

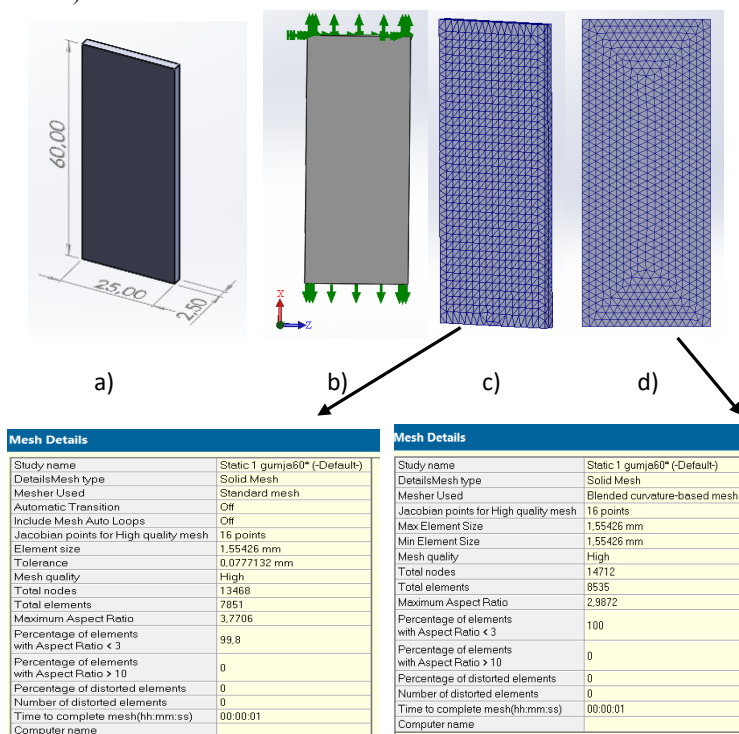
### 3.10. Gumijas korda sajūga elastīgā elementa aprēķins ar GEM modelēšanas programmas pakotnes palīdzību

Sajūga apvalka virsmas slāņa gumijas plāksnes aprēķina modelis un variantu aprēķini parādīti 3.5.1. nodaļā, bet gumijas korda sajūga apvalka fragmenta aprēķina modelis un variantu aprēķini parādīti 3.5.2. nodaļā.

#### 3.10.1. Sajūga apvalka virsmas slāņa gumijas plāksnes modelēšana

Tā kā materiālam ir nelineārs raksturlielums, tad jāizmanto nelineāra analīze, kas savukārt ievērojami sarežģī aprēķina procesu. Rezultātā aprēķina laiks tiek ievērojami palielināts. Tāpēc, lai optimizētu modelēšanas procesu un samazinātu datora laiku, izveidosim virsmas slāņa aprēķina modeli, kā arī sajūga apvalka šķērsriezuma radiālos modeļus. Kā zināms, šī pieeja uzlabo arī rezultātu precizitāti.

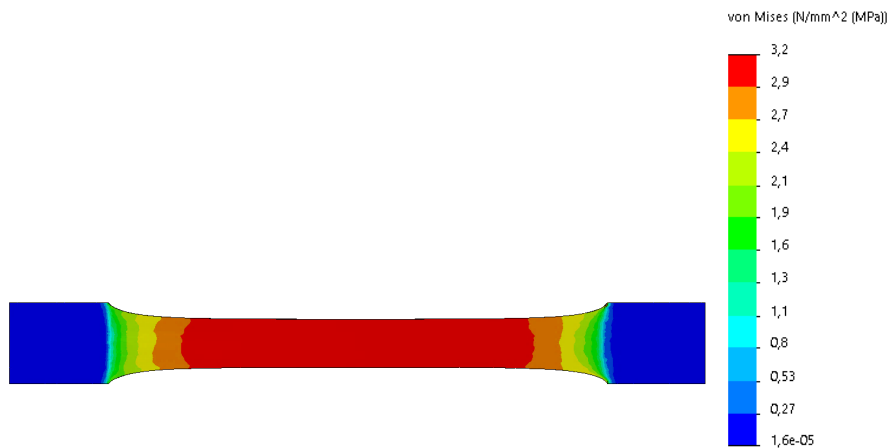
Izstrādātie sajūga gumijas virsmas slāņa modeļi un sajūga apvalka šķērsriezuma fragmenti ir parādīti (3.50 att.).



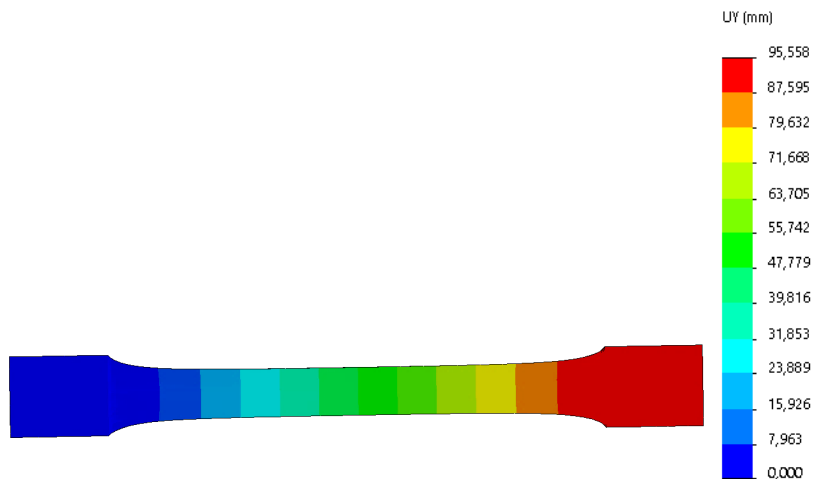
3.50 att. Dažādu modelēšanas tīklu izvēle.

a – gumijas parauga aprēķināšanas modelis, b – modeļu ierobežojumi un slodzes, c; d – tīkls ar raksturojumiem.

Aprēķina laikā tika mainīta tīklu kvalitāte un tika izvēlēts galīgo elementu optimālais izmērs. Gumijas plāksnes virsmas slāņa aprēķins uzrādīja labu rezultātu precizitāti (3.51 un 3.52 att.).

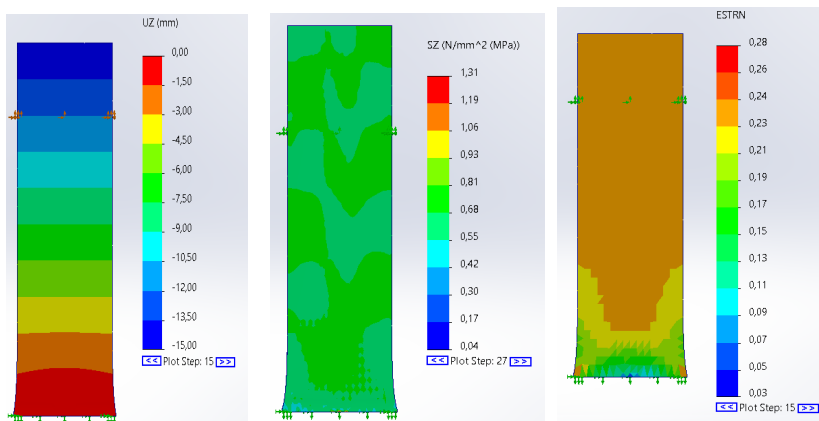


3.51. att. Spriegums gumijas plāksnē, kas izgriezta no sajūga virsmas slāņa.



3.52. att. Deformācija gumijas plāksnē, kas izgriezta no sajūga gumijas virsmas slāņa.

Virsmas slāņa gumijas parauga testēšanas izmēģinājuma rezultāti parādīti (3.53. att.). – spriegumi 1,31 MPa. pie pagarinājuma 15 mm, un ekvivalenta deformācija sastāda 0,28.

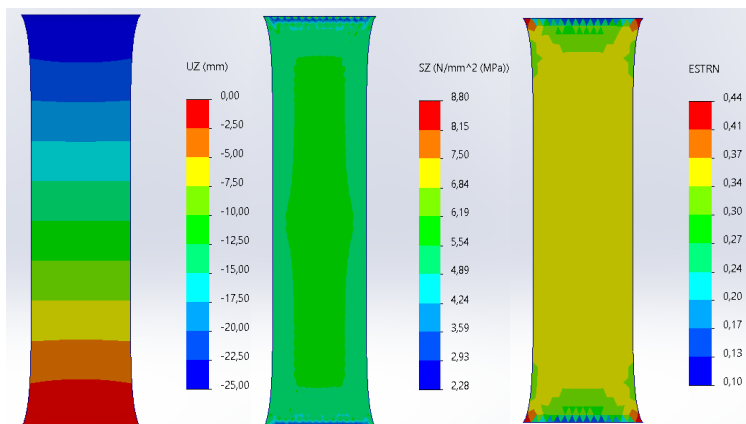


3.53. att. Gumijas parauga virsmas slāņa aprēķina modelis –  $60 \times 25 \times 2,5$  mm:  
 a –pagarinājums pa Z asi; b – spriegumi pa X asi; c – ekvivalenta deformācija pa Z asi.

Kā redzams no deformētā stāvokļa, plāksnei tiek piemēroti nesimetriski ierobežojumi, kurus nepieciešams nomainīt, kas tiek darīts turpmākajos aprēķinu variantos, kas parādīts (3.52. att.).

Spriegumu nelineārās modelēšanas kļūda 60 mm garai plāksnei sastāda - 6,42 % - (1,31 MPa) pret 1,4 MPa (3.15. tab.) deformācija – 4 % - 0,24 (3.53. att.) pret  $15 \text{ mm}/60 \text{ mm} = 0,25$ . Bet 120 mm garai plāksnei spriegumi sastāda +3,6 % - (2,9 MPa) pret 2,8 MPa deformācijas -7 % - 1,7 pret  $95 \text{ mm}/60 \text{ mm} = 1,58$ , (3.49 att.). atzīmēti kantana formā.

Veiksim salīdzinošu lineāro "—" un nelineāro " " novērtēšanu materiālu modeļiem «. . . »), kas izmantoti SolidWorks programmā (3.50 att.).

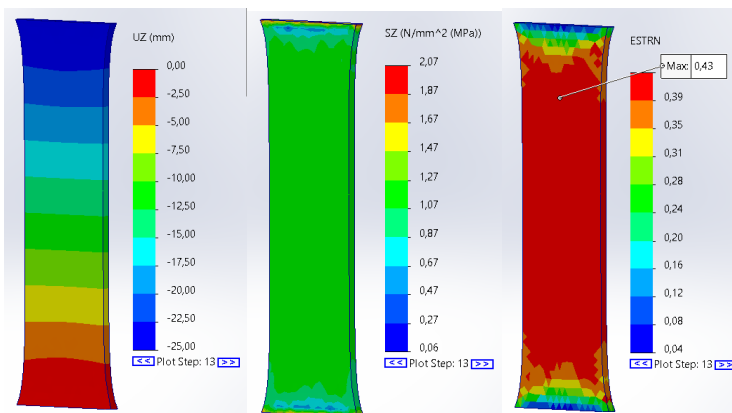


3.54. att. Materiāla lineārā analīze:  
 a –pagarinājums pa Z asi; b – spriegumi pa X asi; c – ekvivalenta deformācija pa Z asi.

Lineārā analīze dod paaugstinātus spriegumus vairāk nekā 6 MPa, pārsniedzot stiprības robežu, parādīts (3.22 tab.), tādēļ šo metodi turpmāk nepielietojam. Deformāciju lieluma aprēķina precizitāte ir apmierinoša.



Turpmāka nelineārā superelastības analīze *Mūnija Rivlina* aprēķinam 2 konstantes saskaņā ar izmēģinājuma rezultātiem parādītiem (3.18 - 3.22 tab.).

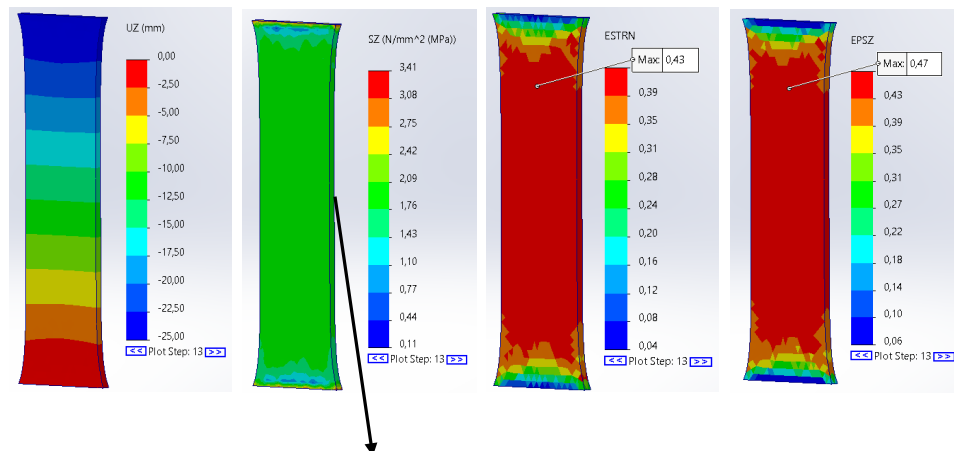


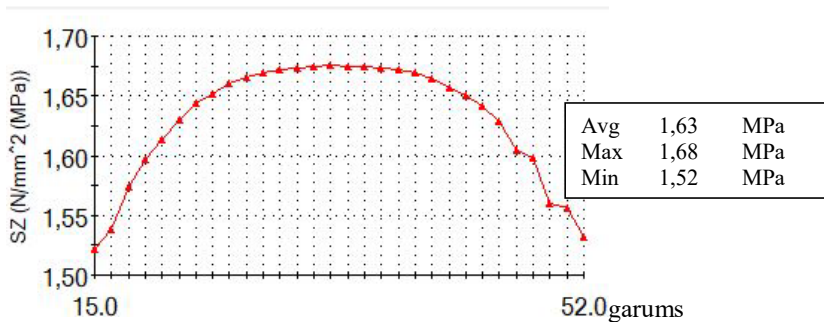
3.55. att. *Mūnija Rivlina* superelastības nelineārā analīze ( konstantes pa izmēģinājumiem):  
 a –pagarinājums pa Z asi; b – spriegumi pa Z asi; c – ekvivalenta deformācija pa Z asi.

*Mūnija-Rivlina* superelastības nelineārā analīze [38] aprēķināta pa 2 konstantām, dot precīzus rezultātus atsevišķos punktos pie lielām deformācijām līdz 200 %. Tomēr ar standarta deformācijām līdz 25 mm metode neuzrādīja precizitāti un dod rezultātus ar lineāru atkarību. Deformācijas lieluma aprēķina precizitāte ir apmierinoša. Tāpēc šo metodi vislabāk izmantot uzdevumos, kad deformācijas ir lielākas par 200 % un vairāk.

Tālāk izpildīsim precīzēsim *Mūnija-Rivlina* metodi, kura tika aprēķināta pēc 2 vai vairākām konstantēm, pamatojoties uz testa rezultātiem: nominālie spriegumi – materiāla paraugu vienaspusējas stiepšanas deformācija. Ka arī pielietosim uzlabotus algoritmus atmiņas sadalīšanai un daudzkodolu apstrādes iespējām, risinot uzdevumu ar *Intel Direct Sparse* programmas palīdzību. Tas ļāva paātrināt risināšanas procesu un uzlabot modelēšanas precizitāti. parādīts (3.56. att.).

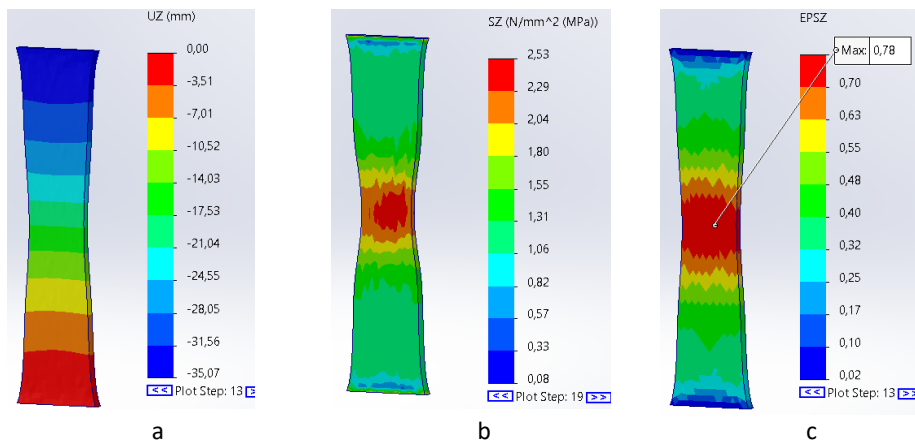
(3.56. att.) tika parādīts parauga deformācijas risinājums par 25 mm ar *Mūnija-Rivlina* metodes precizēšanu pēc 2 vai vairākām konstantēm, pamatojoties uz izmēģinājuma rezultātiem ar *Intel Direct Sparse* risinātāja palīdzību.





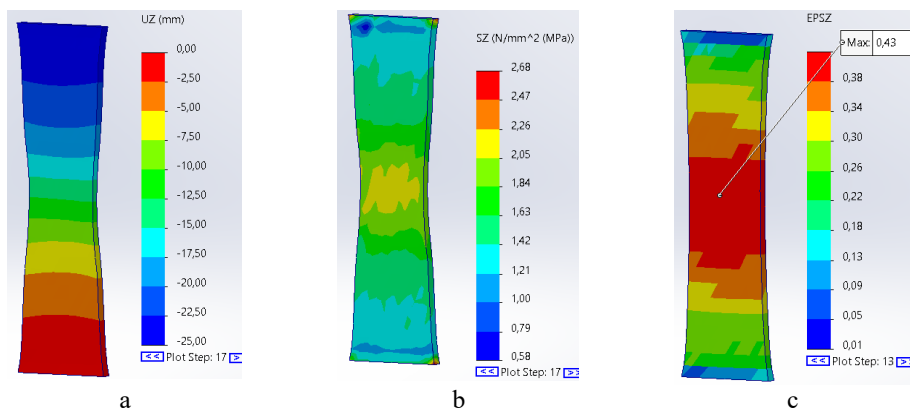
3.56. att. Parauga deformācijas atrisinājums par 25 mm.

Tālāk galīgo elementu tīklam tika veikta modifikācija, jo tā bija pārāk stingra. Veikta tīklu pārbūve, tika variēti elementu izmēri un pielaišanas izmēros. Rezultātā detaļas stiepšanās vietās parādījās kakliņa veidošanās pazīmes, tika meklēta risinājuma konverģence. Aprēķinu variācijas tika parādītas (3.57. –3.59. att.).



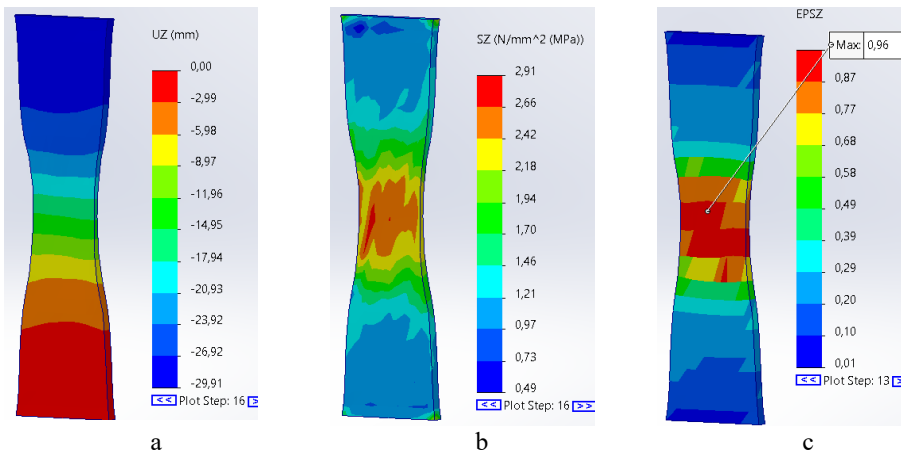
3.57.att. Nelineārā materiāla analīze:

a –pagarinājums pa Z asi; b – spriegumi pa X asi; c – normāla deformācija pa Z asi.



3.56. att. Modificēts tīkls, elementa izmērs palielināts līdz 2.5 mm:

a –pagarinājums pa Z asi; b – spriegumi pa X asi; c – normāla deformācija pa Z asi.

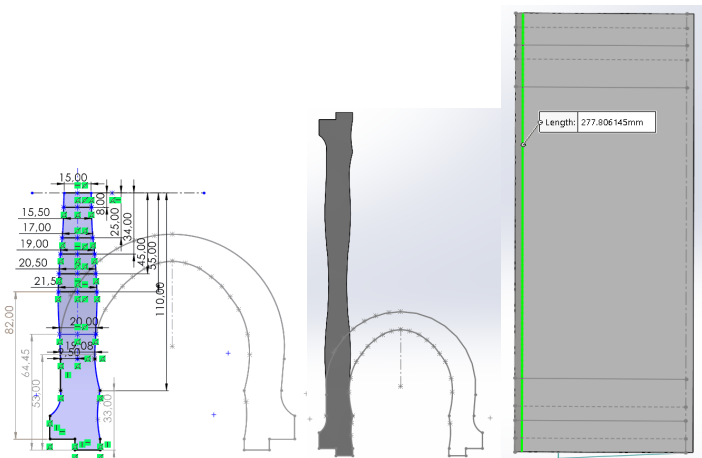


3.59. att. Elementa izmērs palielināts līdz 2.5 mm palielināta stiepes vērtība līdz 30 mm:  
 a –pagarinājums pa Z asi; b – spriegumi pa X asi; c – normāla deformācija pa Z asi.

Pētījuma rezultāti par optimālā materiāla modeļa galīgo elementu tīkla, veida un izmēra atrašanu ir parādīti (3.35. att.). Konstatēts, ka eksploataācijas slodzēm visprecīzāk der gumijas materiāla nelineārais elastīgais modelis - 5 (Nonlinear elastīgais modelis), bet priekš cikliskām slodzēm ar lielām deformācijām - hiperelastīgais *Mūnija-Rivlina* modelis – 3.3". Tālāk tiks izstrādāts sajūga apvalka fragmenta aprēķina modelis.

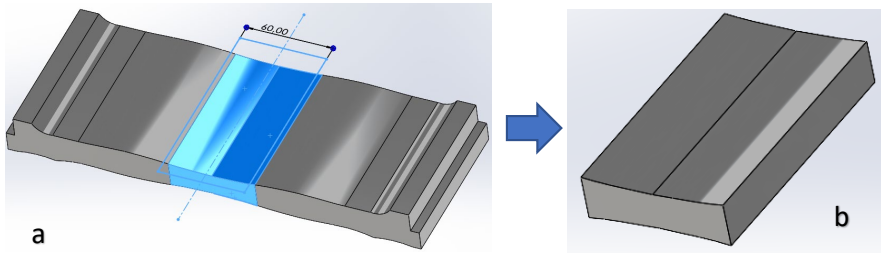
### 3.10.2. Gumijas korda sajūga apvalka fragmenta modelēšana

Tālāk tika izstrādāts sajūga apvalka fragmenta aprēķina modelis (3.60. att.). Izpildīti sajūga apvalka fragmenta aprēķinu varianti ar dažādām modelēšanas metodēm un dažādiem deformācijas lielumiem.

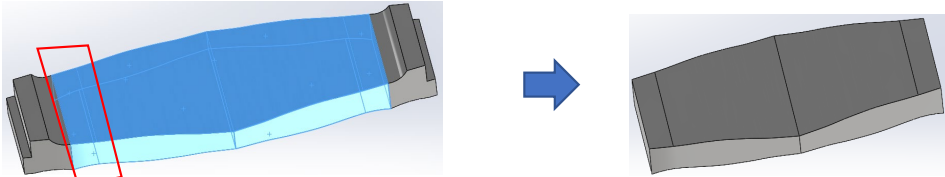


3.60. att. Apvalka fragmenta aprēķina modelis un nomodulēts izvērsums 278 mm garumā.

Apvalka fragmenta pilnais modelis ar zonu, kas testēšanas laikā pakļauta stiepšanai, un modificēts apvalka aprēķina modelis materiālu modeļu testēšanai parādīts (3.62. att.).

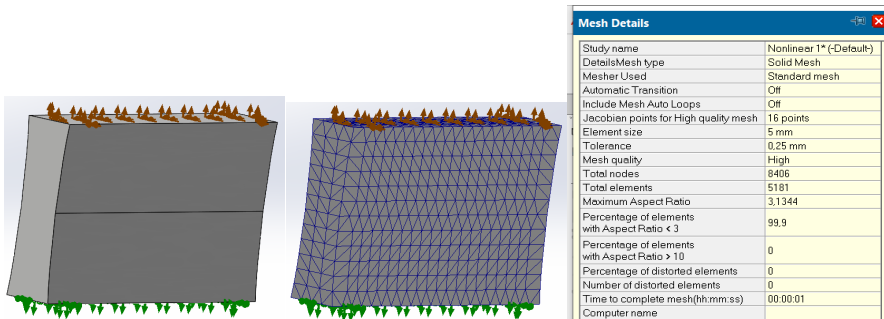


3.61. att. Apvalka fragmenta modelis:  
a – pilns modelis ar stiepes zonu; b – modificēts aprēķina modelis.

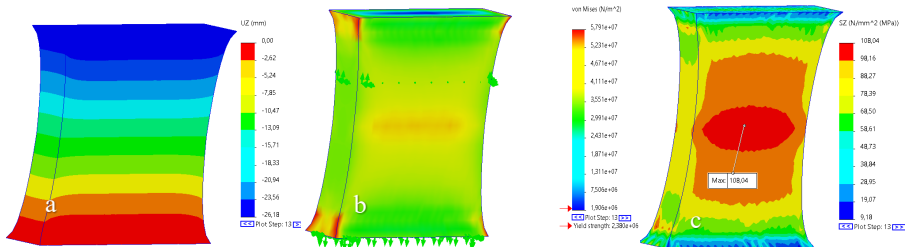


3.62. att. Pilns apvalka fragmenta modelis ar zonu no 100 līdz 220 mm, kas testēšanas laikā pakļauts stiepei, un modificēts apvalka aprēķina modelis materiālu modeļu testēšanai.

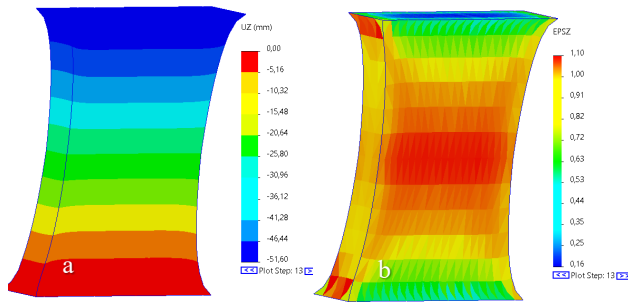
Sajūga stiprināšanas metode un tīkla modelēšanas parametri parādīti (3.63. att.).



3.63.att. Fragmenta modelis ar slodzēm un tīkls ar raksturojumiem.



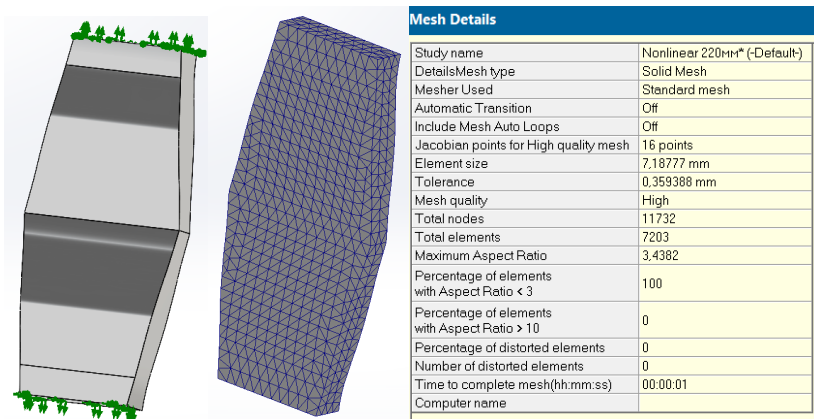
3.64. att. Aprēķinu rezultāti pie izstiepšanas līdz 21.60 mm:  
a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mizes spriegumi, c –spriegums pa Z asi.



3.65. att. Aprēķinu rezultāti izstiepšanai 51.60 mm:

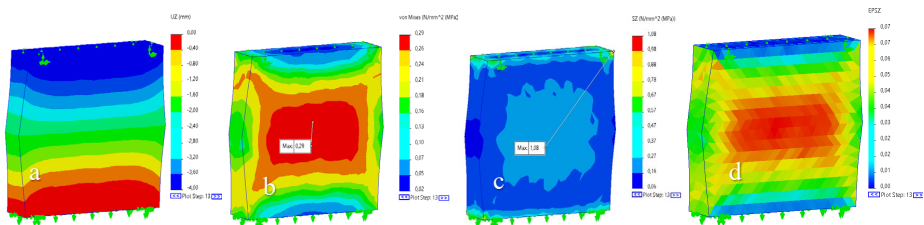
a – pagarinājums pa Z asi; b – normāla deformācija pa Z asi.

Tālāk tika modificēts modelis un precizēti aprēķini (3.66. att.).



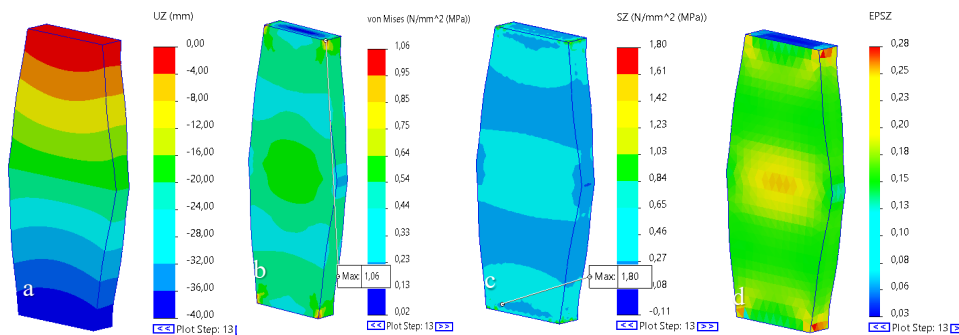
3.66. att. Gumijas korda sajūga apvalka fragmenta modificēts aprēķinu modelis.

- **Modelēšanas rezultāti pēc Mūnija-Rivlina metodes**



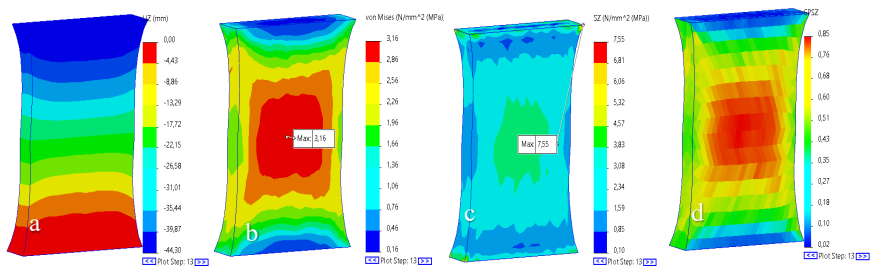
3.67. att. Fragmenta 110 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 4 mm:

a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mises spriegumi, c – spriegumi pa Z asi, d – normāla deformācija pa Z asi.



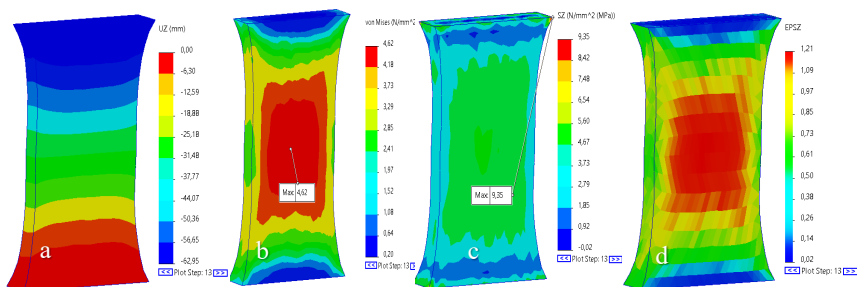
3.68. att. Modificētā pilna modeļa aprēķins, ar garumu 220 mm, pagarinājums 40 mm: a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mizes spriegumi, c – spriegumi pa Z asi; d – normāla deformācija pa Z asi.

110 mm modeļa aprēķins ar pagarinājumu līdz 44,3 mm parādīts (3.69. att.).



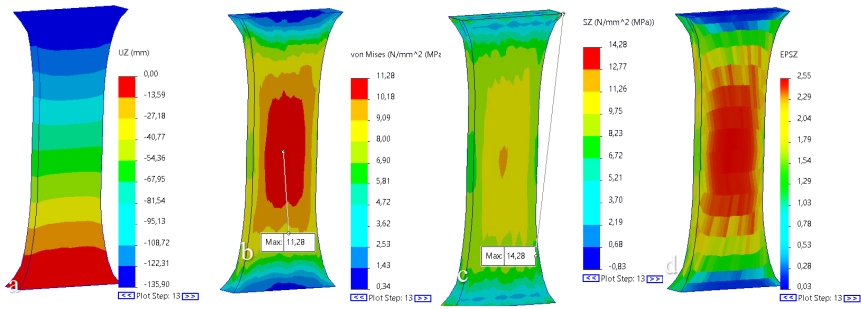
3.69. att. Fragmenta 110 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 44,3 mm: a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mizes spriegumi, c – spriegumi pa Z asi; d – normāla deformācija pa Z asi.

Tālāk (3.70. att.), parādīts 110 mm modeļa aprēķins ar pagarinājumu līdz 62,95 mm.



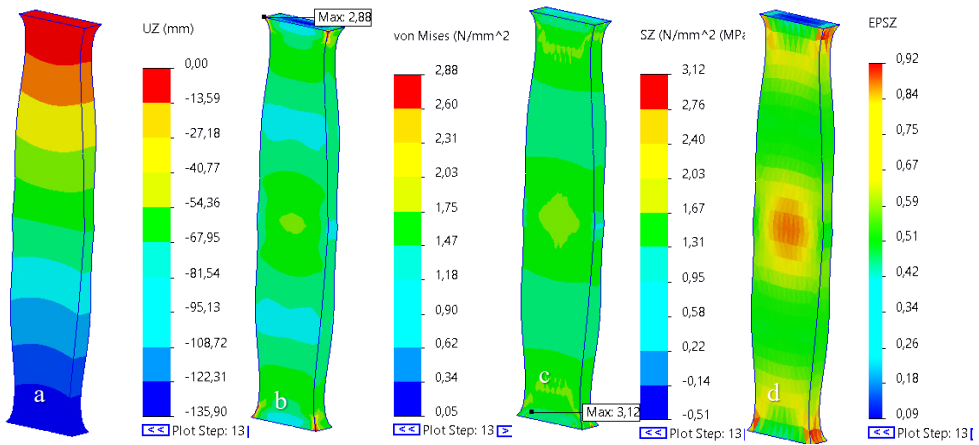
3.70. att. Fragmenta 110 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 62,95 mm: a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mizes spriegumi, c – spriegumi pa Z asi; d – normāla deformācija pa Z asi.

Tālāk tika veikti aprēķini modelim 110 mm ar pagarinājumu līdz 135,9 mm. Aprēķinu rezultāti parādīti (3.71 att.).

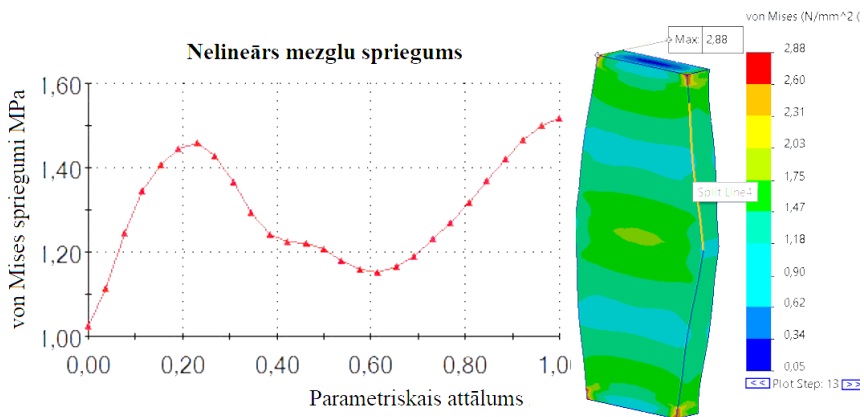


3.71. att. Fragmenta 100 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 135.9 mm: a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mizes spriegumi, c – spriegumi pa Z asi; d – normāla deformācija pa Z asi.

Pilna modeļa aprēķins 220 mm ar pagarinājumu līdz 135,9 mm tika parādīts (3.72. att.).



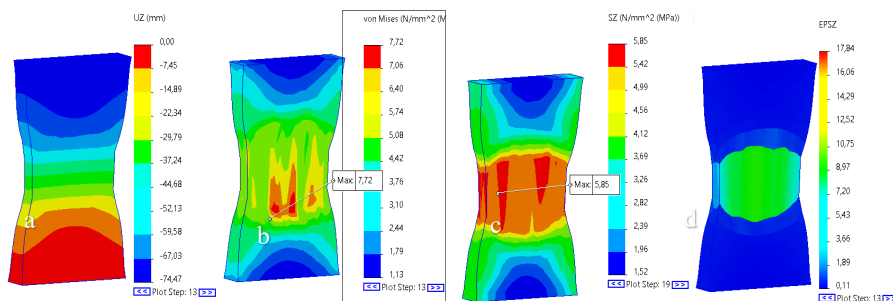
3.72. att. Fragmenta 220 mm aprēķins ar pagarinājumu 135,9 mm: a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mizes spriegumi, c – spriegumi pa Z asi; d – normāla deformācija pa Z asi.



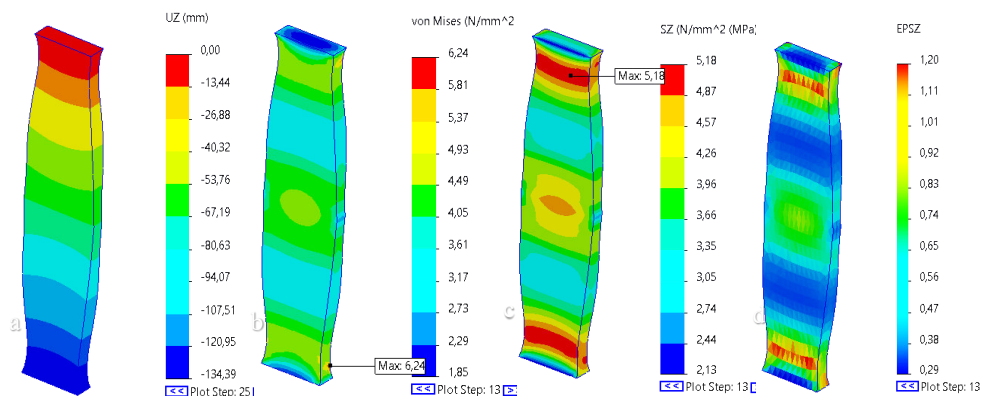
3.73. att. Malas reakcija no fiksācijas līdz fragmenta vidum fragmenta garums 100 mm.

- Modelēšanas rezultāti pēc Blatz -Ko metodes

Pilna modeļa aprēķins 110 mm ar pagarinājumu līdz 74,47 mm tika parādīts (3.74. att).



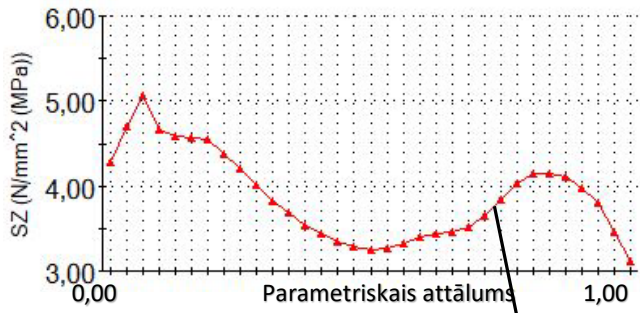
3.74. att. Fragmenta 100 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 74,47 mm:  
 a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mises spriegumi, c – spriegumi pa Z asi; d – normāla deformācija pa Z asi.



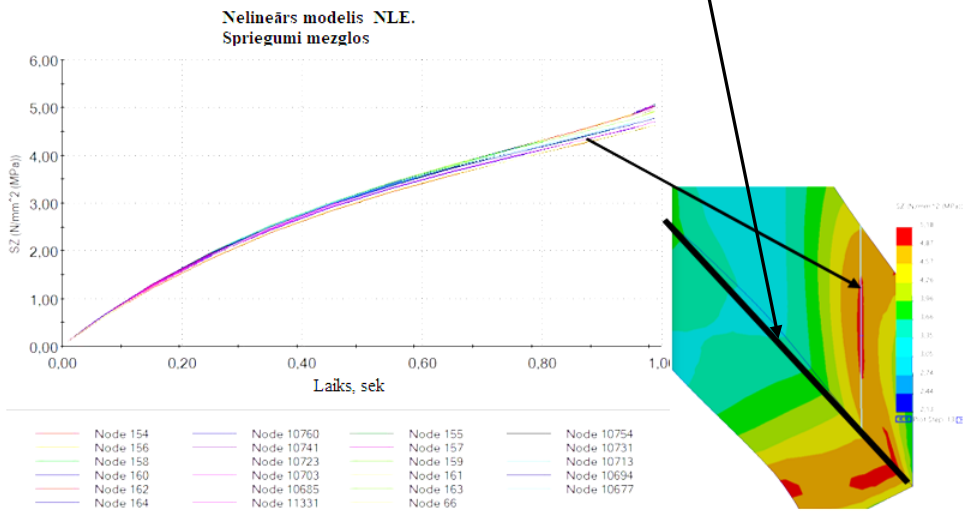
3.75. att. Fragmenta 220 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 134,4 mm:  
 a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mises spriegumi, c – spriegumi pa Z asi; d – normāla deformācija pa Z asi.

Spriegumu sadalījums pa sajūgu horizontālajām un vertikālajām virsmām sajūga apvalka ekspluatācijas bojājumu zonā parādīts (3.77. att.). Sajūgu apvalka ekspluatācijas bojājumu zona (atzīmēta ar sarkanu rāmi) parādīta (3.62. att.).

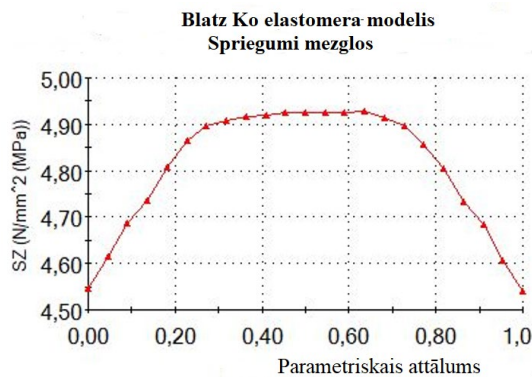




3.76. att. Sprieguma sadalījums pa fragmenta vertikālo malu



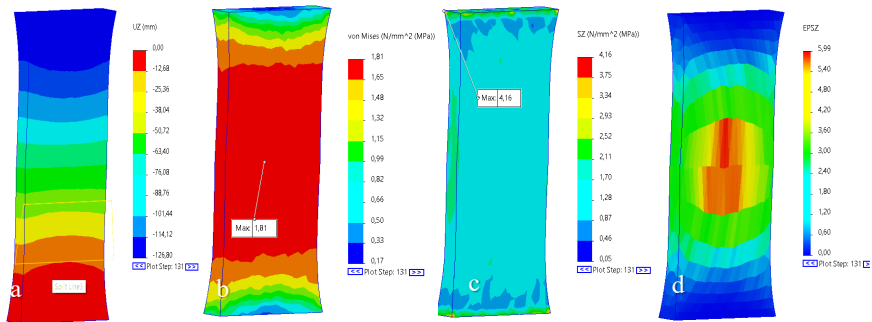
3.77.att. Sprieguma sadalījums pa fragmenta horizontālo malu sajūga apvalka ekspluatācijas bojājumu zonā.



3.78. att. Sprieguma sadalījums pa fragmenta horizontālo malu.

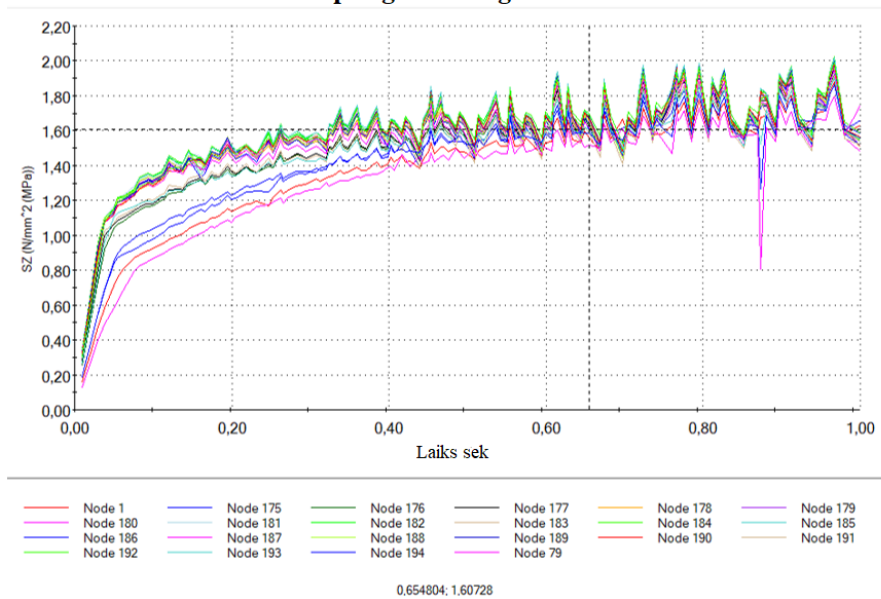
• Superelastīga materiāla modelēšana, izmantojot Nelineāro elastīgo metodi (NLE)

Modelēšanas rezultāti ar nelineāro elastīgo materiālu metodi parādīti (3.79 –3.81. att.).

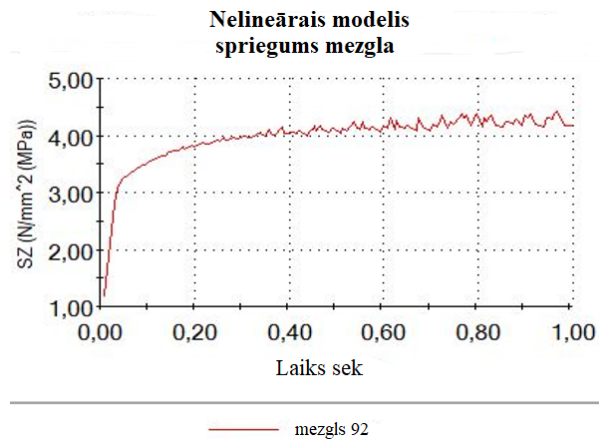


3.79. att. Fragmenta 110 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 126.8 mm:  
 a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mises spriegumi, c – spriegumi pa Z asi d – normāla deformācija pa Z asi.–

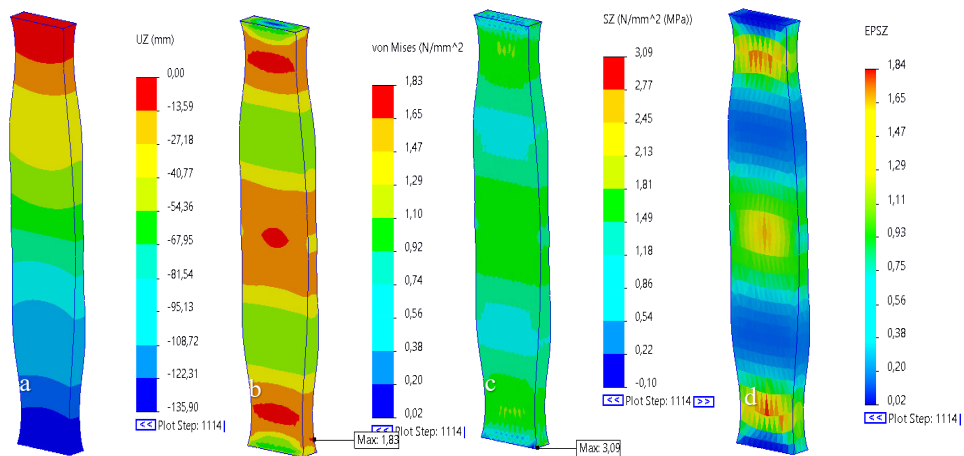
**Nelineāra materiāla modelis  
 spriegums mezglos**



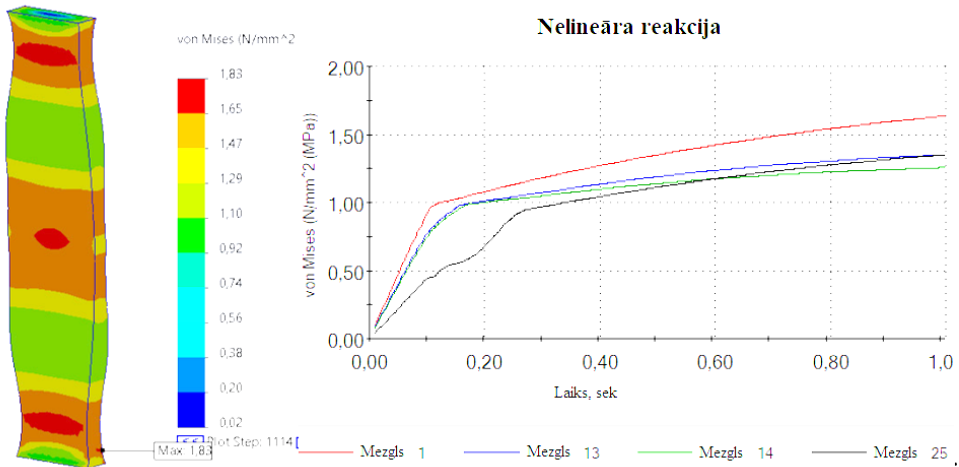
3.80. att. Mezglu reakcija gar aprēķina modeļa 110 mm nostiprināšanas malu ar nelineāru elastīgā materiāla modeļi.



3.81. att. Sajūga fragmenta 92 mezglu reakcija gar aprēķina modeļa 110 mm nostiprināšanas malu.

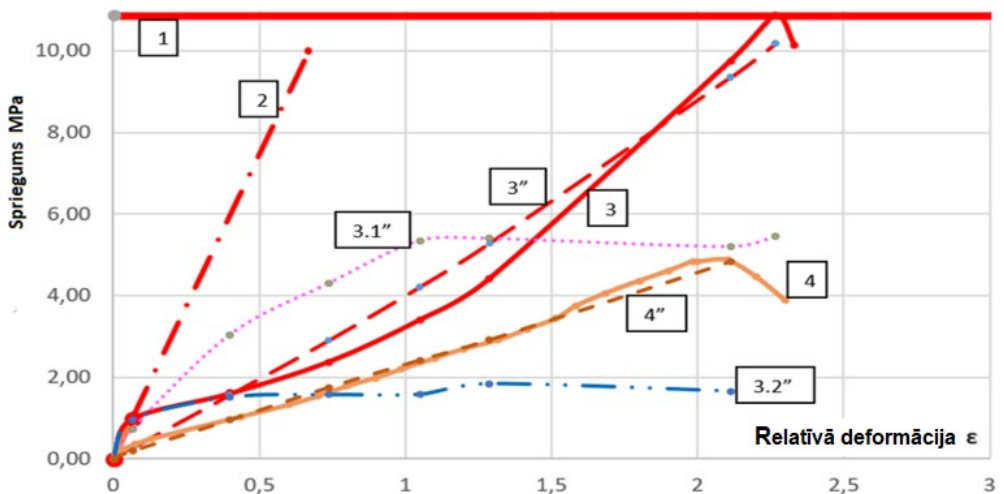


3.82. att. Fragmenta 220 mm aprēķins ar pagarinājumu līdz 135.9 mm:  
a – pagarinājums pa Z asi; b – von Mises spriegumi; c – spriegumi pa Z asi d – normāla deformācija pa Z asi.



3.83. att. Mezglu reakcija gar aprēķina modeļa 220 mm nostiprināšanas malu ar nelineāru elastīgā materiāla modeļi.

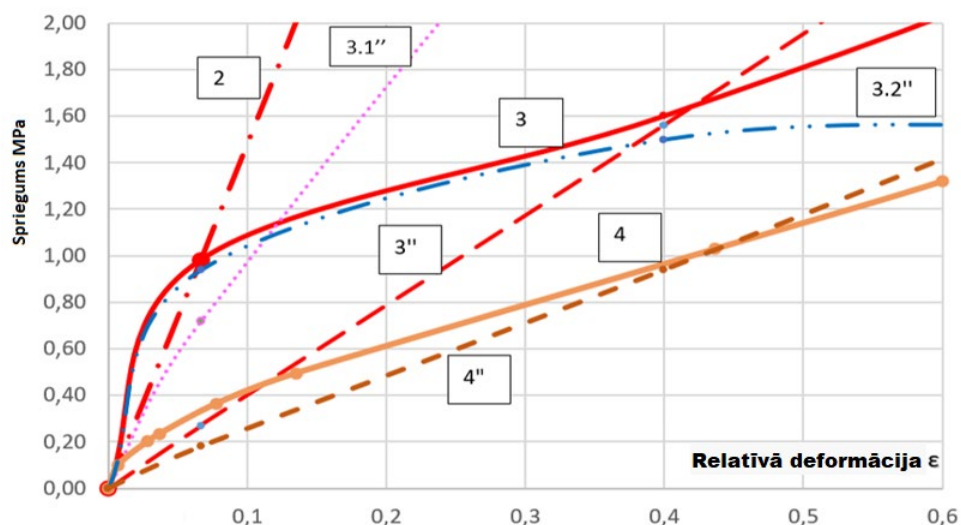
Konstatēts, ka Blatza metode sasniedzot 130 -140 % deformācijas tālāk neatspoguļo eksperimentu rezultātus. Tādējādi nelielām sajūga apvalka deformācijām varam izmantot abas metodes ar atbilstošu materiālu regulēšanu, bet deformācijām, kas lielākas par 130 %, Mūnija – Rivlina metodi. Lielām deformācijām pēc Mūnija-Rivlina metodes materiāla modelim nepieciešams pievienot trešo konstanti. Tāpat arī abu materiālu modeļu epīras ir atšķirīgas. Izmantojot Blatz metodi deformācijas zona ir izteikta ar kakliņa veidošanos apvalka fragmenta turpmākās sagraušanas vietā stiepšanas laikā (3.75. att.). Tikla un materiāla modeļa pielāgošanas rezultātā iegūtie simulācijas rezultāti parādīti (3.84 –3.87. att.).



3.84. att. Sajūga apvalka fragmentu stiepšanās modelēšanas rezultāti pielietojot dažādas metodes:

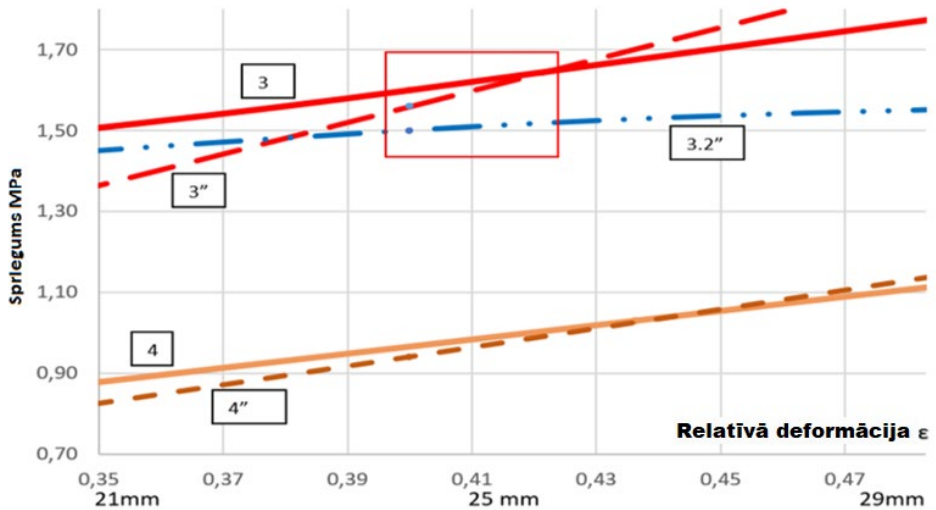
1 – stiprības robeža (10,86 MPa); 2 – elastības modulis 14,73 MPa; 3 – eksperimenta rezultāti – vienreizēja stiepšana līdz sagraušanai, 3" – rezultāti ar *Mūnija–Rivlina* metodi ar divām konstantēm; 3,1" – rezultāti ar *Blatz* metodi; 3,2" – rezultāti ar nelineāri elastīgo metodi; 4 – eksperimenta rezultāti – cikliska stiepšana līdz sagraušanai; 4" – rezultāti ar *Mūnija – Rivlina* metodi ar divām konstantēm, modificējot modeļa tīklu un gala elementu izmērus.

Analizējot (3.84. att.) varam konstatēt, ka visprecīzākos simulācijas rezultātus ekspluatācijas slodžu zonā parādīja nelineāri elastīgā materiāla metode. Šī metode praktiski precīzi atspoguļo 1,5 MPa pārbaudi rezultātus galīgo ekspluatācijas deformācijas zonā līdz 0,35 (21 mm) – 1,46 MPa, bet *Mūnija-Rivlina* metode uzrāda rezultātu 1,36 MPa. Tālāk nelineārā elastīgā materiāla metode sāk nedaudz samazināt sprieguma rezultātus - pie deformācijas 0,41 (25 mm) spriegumu samazināšanās ir nenozīmīga un sastāda 1,51 MPa pret 1,62 MPa pie *Mūnija Rivlina* metodes eksperimenta rezultātiem 1,63 MPa (3.85 un 3.87 att.).



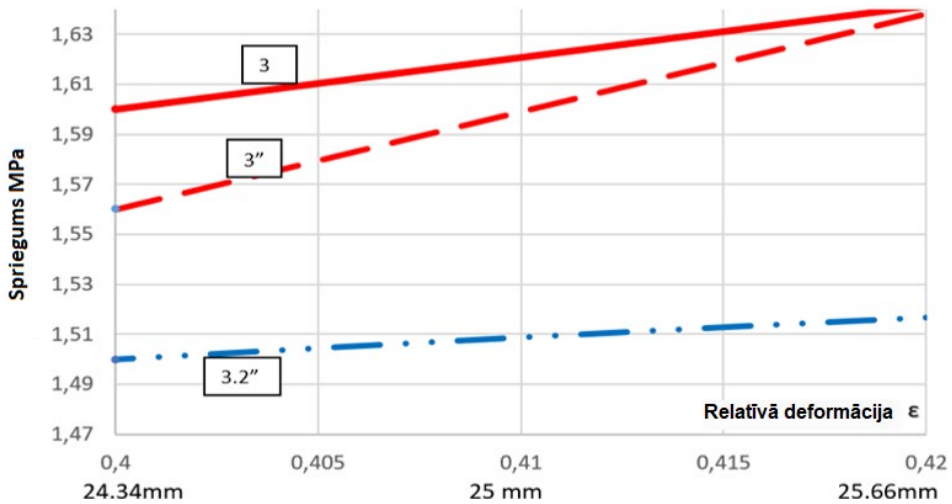
3.85 att. Grafika 3.84 fragments - sajūga apvalka fragmenta ekspluatācijas deformāciju zonā.

Analizējot (3.86. att.) varam konstatēt, ka visprecīzākos modelēšanas rezultātus ekspluatācijas slodžu zonā parādīja Nelineāra elastīgā materiāla metode. Šī metode praktiski precīzi atspoguļo testa rezultātus 1,5 MPa robežās ekspluatācijas deformāciju zonā līdz 0,35 (21 mm) – 1,46 MPa, bet *Mūnija-Rivlina* metode uzrāda rezultātu 1,36 MPa. Turpmāk *nelineārā* elastīgā materiāla metode sāk nedaudz pazemināt sprieguma rezultātus. Pie deformācijas 0,41 (25 mm) spriegumu pazeminājuma lielums ir nenozīmīgs un sastāda 1,51 MPa, pretēji 1,62 *Mūnija Rivlina* metodei ar eksperimenta rezultātiem 1,63 MPa (3.86.–3.87 att.).



3.86. att. Diagrammas 3.85. fragments sajūga apvalka ekspluatāciju ierobežojošo deformāciju zonā – 25 mm:

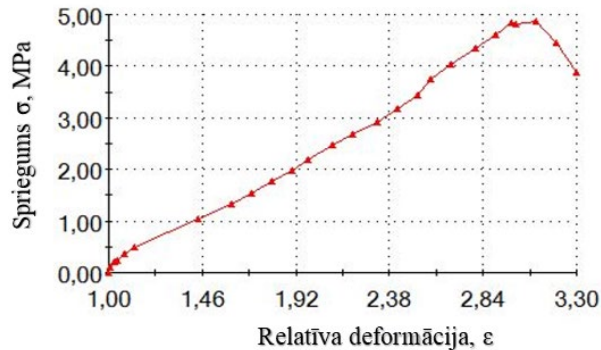
- 3. Eksperimenta rezultāti — vienreizēja stiepšana līdz sagraušanai
- 3'' – rezultāti pēc *Mūnija-Rivlina* metodes ar divām konstantēm,
- 3.2'' - rezultāti ar nelineāro elastīgo metodi,
- 4. Eksperimenta rezultāti — cikliska stiepšana līdz sagraušanai,
- 4'' - *Mūnija-Rivlina* metodes rezultāti ar divām konstantēm, modificējot modeļa tīklu un galīgo elementu izmērus.



3.87. att. Grafika 3.86. fragments sajūga apvalka ekspluatāciju ierobežojošo deformāciju zonā, pie vienreizējas slodzes – 25 mm:

- 3. Eksperimenta rezultāti — vienreizēja stiepšana līdz sagraušanai
- 3'' – rezultāti pēc *Mūnija-Rivlina* metodes ar divām konstantēm,
- 3.2'' - rezultāti ar nelineāro elastīgo metodi.

Lai gan *nelineārā* elastīgā materiāla metode (3.87. att.) dod lielāku precizitāti ekspluatācijas deformācijām līdz 0,4 (25 mm), tālāk metode neatspoguļo reālo priekšstatu par apvalka fragmentu deformāciju ar tālāku deformācijas pieaugumu (3.85; 3.86; 3.87. att.).



3.88. att. SolidWorks programmā ievadītā līkne, lai noteiktu materiāla koeficientus, izmantojot *Mūnija-Rivlina* metodi.

- **Materiālu modelēšanas metožu novērtēšana**

Turpmāk ar *Mūnija-Rivlina* metodi var modelēt pilnu gumijas korda sajūga apvalka modeli *Mūnija-Rivlina* metode modelēšanā ir darbietilpīgāka, bet ātrāka *SOLIDWORKS* aprēķinos (vidēji aprēķini notiek 15–20 min. laikā), kā arī aprēķini tiek veikti ar apmierinošu precizitāti. Precīzākā ir nelineāri elastīgā metode līdz 20 mm spriegumam, bet pēc šīs vērtības precizitāte samazinās, bet paaugstināšana ar šo metodi aizņem apmēram sešas reizes vairāk laika (vidēji vairāk nekā 1,5 stundas) nekā *Mūnija-Rivlina* metode. *Blatz* metode parāda parauga retināšanu, un šāda veida parauga precizitāte izrādījās neapmierinoša (neuzrādīja precizitāti šāda veida uzdevumiem).

Turpmāk ar *Mūnija-Rivlina* metodi var modelēt pilnu gumijas korda sajūga apvalka modeli (3.84. att.).

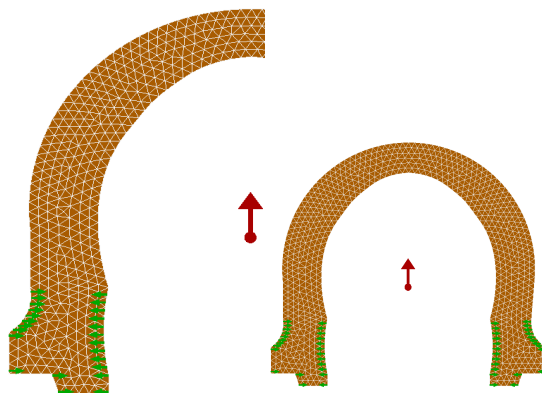
### 3.11. Gumijas korda sajūga apvalka pilna modeļa modelēšana

Modeļa aprēķinu šķērsgriezums un sajūga apvalka stiprinājuma zona tika parādīta (3.89. att.).



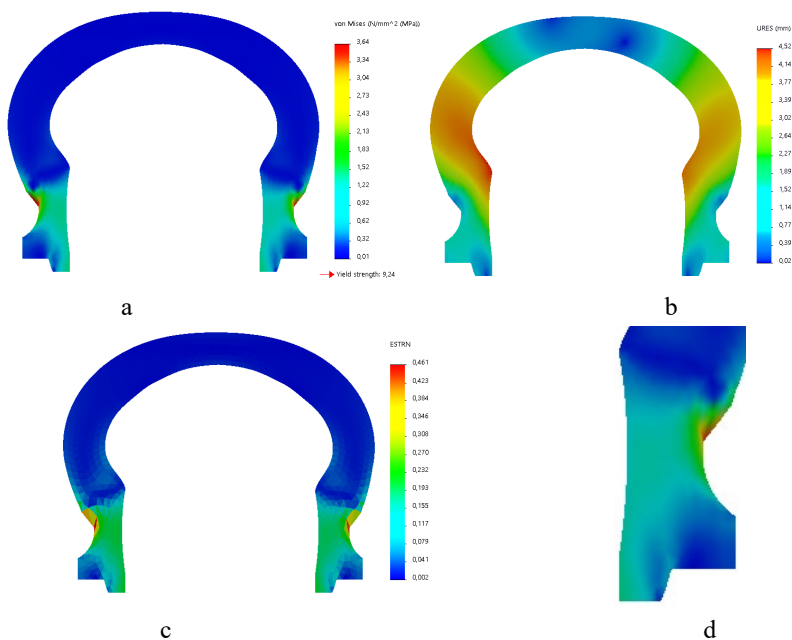


Metodes būtība ir sadalīt sektoru, kurā interesējošais parametrs mainās pēc sarežģīta likuma daudzos apakšsektoros, kas savstarpēji savienoti saskares punktos. Ņemot vērā lielo deformāciju stiprinājuma zonā un pielikto slodzi, noņemam galīgo elementu tīkla sabiezējumu. Ņemot vērā sajūga apvalka modeļa virsmas izliekumu, aprēķinu veikšanai tika izmantots orientēts tīkls. Inerciālie spēki pielikti modelim ar paātrinājumiem (apzīmēti ar bultiņu ar punktu sajūga centrā), kas izraisīti ar ievērojamām ātruma svārstībām.



3.91. att. Sajūga šķērs griezum bez sabiezējuma.

Sajūga piestiprināšanas vietā pie atlokiem spiediena spēka iedarbībā notiek tā deformācija, parādīta (3.92. att.).

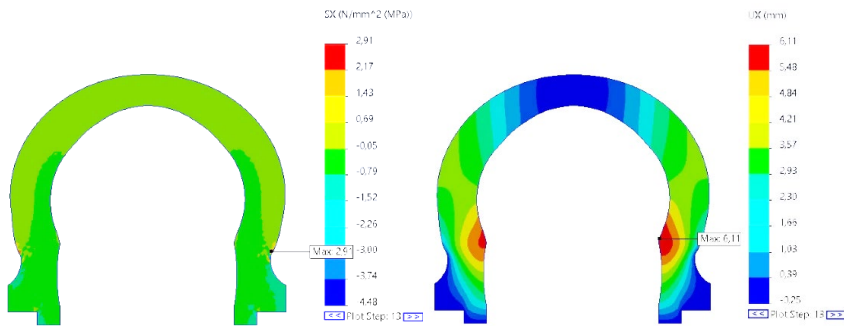


3.92. att. Sajūga fragmenta aprēķinu rezultāti no sajūga apvalka disku saspiešanas spēka ekspluatācijas laikā:

a – von Mizes spriegumi, b– ekvivalenta pārvietošana, c – normāla deformācijas, d – von Mizes spriegumi spriegumu fragment.

Griezies momentam iedarbojoties uz sajūgu, vietā, kur sajūgs ir piestiprināts pie atlokiem, notiek sajūga pagarināšanās centrālās spēka iedarbības rezultātā.

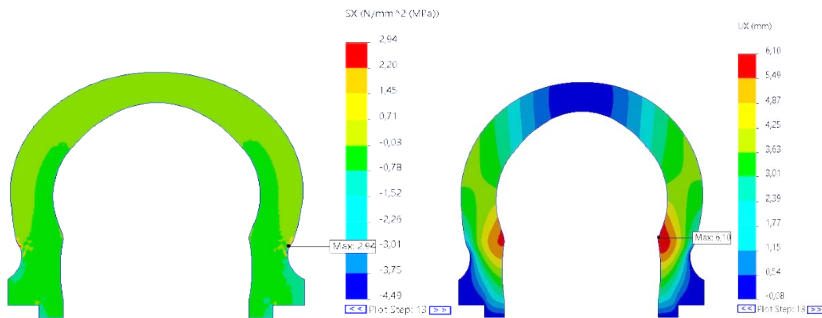
Sprieguma un nobīdes 2D modeļa epīri pa X asi no diska saspišanas un rotācijas ātruma apgr./min ir parādīti (3.93 –3.96. att.).



a b

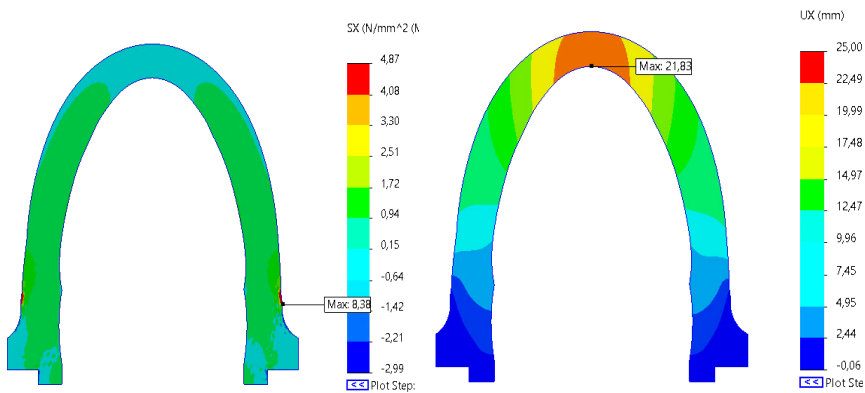
3.93. att. Sajūga spriegumi un pagarinājums pie 64 apgr/ min(5 km/h):

a - spriegums pa X asi; b – ekvivalenta nobīde pa X asi.



3.94. att. Sajūga spriegumi un pagarinājums pie 129 apgr./ min.(10 km/h):

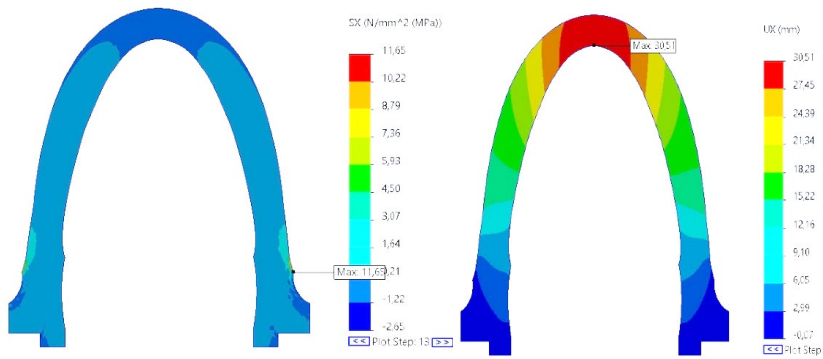
a - spriegums pa X asi; b – ekvivalenta nobīde pa X asi.



a b

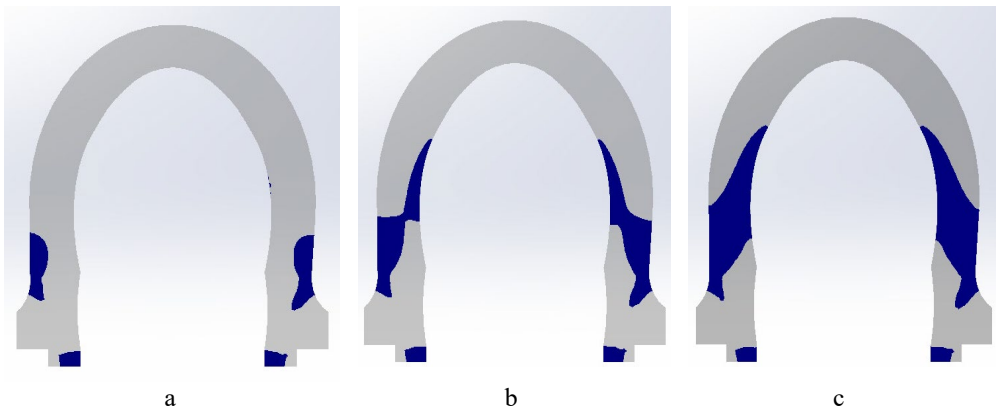
3.95 att. Sajūga spriegumi un pagarinājums pie 1521 apgr/ min. (100 km/h):

a - spriegums pa X asi; b – ekvivalenta nobīde pa X asi.



3.96 att. Sajūga spriegumi un pagarinājuma pie 1825 apgr./ min. (konstruktīvas ātrums 120 km/h):  
 a - spriegums pa X asi; b – ekvivalenta nobīde pa X asi.

Lai noteiktu maksimālo spriegumu zonas un formas pa sajūga šķērsgriezumu, tiek izdalīti tikai maksimālie spriegumi. Apvalka spriegumu sadalījuma veids sajūga šķērsgriezumā pie dažādiem griešanās ātrumiem tika parādīts (3.97. att.).



3.97. att. Maksimālā sprieguma izplatīšanās zona apvalka šķērsgriezumā pie dažādiem ātruma diapazoniem:  
 a – 1521 apgr/min (100 km/h); b – 1670 apgr/min (110 km/h); c – 1825 apgr/min (120 km/h).

Konstatēts, ka pie griešanās ātruma no 1520 apgr/min (100 km/h) spriegumi iedarbojas tikai uz ārējo virsmu, bet ar pieaugumu līdz 1670 apgr/min (110 km/h) un 1825 apgr/min (120 km/h) spriegumi izplatās pa visu sajūga šķērsgriezumu. Spriegumu darbības virzieni šķērsgriezumā griešanās laikā cikliski mainās ar katru sajūga apgriezību, tāpēc ilgstošas darbības laikā var rasties

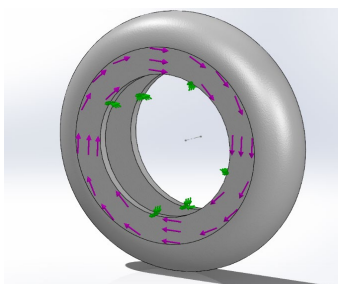
sajūga atslāņošanās vai sagraušana. Tā kā sprieguma līmenis sasniedz 11,65 MPa, tas pārsniedz eksperimentāli noteikto apvalka materiāla stiepes izturību – 4,9 MPa pie cikliskās slodzes (3.11. un 3.12. tab.) un stiepes izturību – 10,9 MPa pie vienreizējas slodzes līdz sagraušanai.

### 3.12. Radiālo aksiālo un leņķisko noviržu aprēķinu rezultāti, kas iedarbojas uz gumijas korda sajūgu.

Ar izstrādāto aprēķinu modeļu palīdzību šajā nodaļā pētīts sajūga sprieguma stāvoklis, ko ietekmē šādas slodzes:

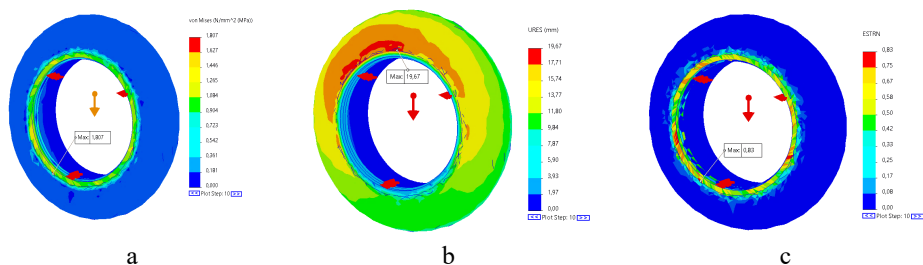
- radiālā;
- aksiālā;
- leņķiskā.

Novērtējot radiālo, aksiālo un leņķisko slodžu ietekmi pie 130 apgr./min. (10 km/h), tika konstatēts, ka galvenā ietekme uz sajūgu tiek pārnesta paātrinājuma laikā, jo šajā laikā iedarbojas lielākais griezes moments. Griezes momenta darbība uz sajūgu ir parādīta (3.98. att.).



3.98. att. griezes momenta ietekme uz sajūgu.

Radiālās slodzes un griezes momenta ietekme uz sajūgu ar maksimālo radiālo novirzi 15 mm redzama 3.99. attēlā.



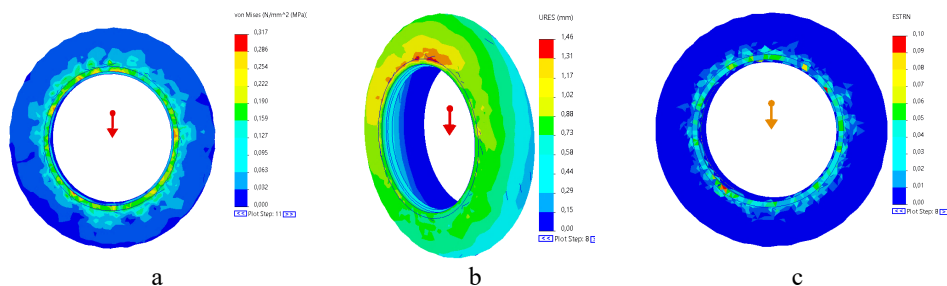
3.99. att. Radiālās slodzes ietekme uz sajūgu:

a - ekvivalentie spriegumi; b – ekvivalenta pārvietošana; c – ekvivalenta deformācija.

Momenta un radiālās novirzes slodzes iedarbība sadalās nevienmērīgi pa sajūga šķērs griezumu un sasniedz maksimumu sajūga bojājuma vietā blakus nostiprināšanas diskam. Maksimālā sprieguma vērtība no radiālās novirzes sajūga stiprinājuma punktā veido 1,80 MPa, un ekvivalenta pārvietošana no radiālās slodzes šajā gadījumā veido 19,67 mm. Šis slodzes veids ir

visbīstamākais sajūgam, jo pie šāda veida slodzes sajūgs tiek pakļauts vislielākajai deformācijas ietekmei, kas sakrīt ar ekspluatācijā esošo sajūgu bojājumu vietām.

Novērtējot leņķisko slodžu un momenta ietekmi, tika konstatēts, ka galvenā ietekme uz sajūgu, tiek pārnesta ar būtiskām vārpstu slīpuma leņķu novirzēm – 4 mm. Maksimālā sprieguma vērtība no leņķisko novirzes sajūga stiprinājuma punktā veido 0,31 MPa. Šajā gadījumā spriegumi tiek asimetriski sadalīti sajūga korpusa sienīnās un maina to zīmi ar katru sajūga apgriezību. Sajūga deformācijas veids no leņķiskām slodzēm redzams 3.100. attēlā.

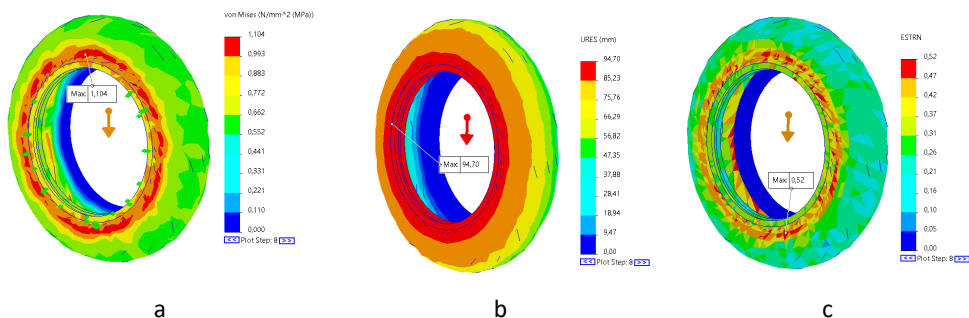


3.100. att. Leņķisko slodžu ietekme uz sajūgu:

a – ekvivalentie spriegumi; b – ekvivalenta pārvietošana; c – ekvivalenta deformācija.

Novērtējot aksiālo slodžu 20 mm un momenta ietekmi, tika konstatēts, ka galvenā ietekme uz sajūgu tiek pārnesta paātrinājuma laikā pie maziem ātrumiem. Aprēķinu rezultāti adekvāti atspoguļo sajūgu deformēto stāvokli, tomēr spriegumu līmenis ir mazāks nekā pie aksiālās novirzes (3.101. att. a).

Griezes momenta darbība pie 130 apgr/min (10 km/h) ar aksiālo novirzi 20 mm redzama 3.99. attēlā



3.101. att. Aksiālās slodzes ietekme uz sajūgu:

a – ekvivalentie spriegumi; b – ekvivalenta pārvietošana; c – ekvivalenta deformācija.

Modelēšanas rezultātā ar aksiālo novirzi 20 mm maksimālā sprieguma vērtība ir 1,10 MPa un maksimālā nobīde no aksiālās slodzes šajā gadījumā ir 94,70 mm.

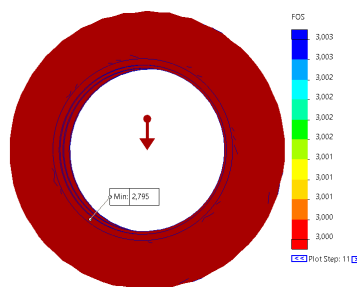
Vārpstu radiālās, aksiālās un leņķiskās novirzes laikā tika konstatēts, ka sajūga novirzes iedarbības bojājumu vietas, kas parādās simulācijas procesā, sakrīt ar ekspluatācijas laikā konstatētajām bojājuma vietām. Radiālo, aksiālo un leņķisko noviržu modelēšanas rezultāti tika parādīti (3.23. tab.).

Vārpstu radiālo, aksiālo, leņķisko noviržu ietekme uz sajūga apvalka spriegumiem.

Nr.	Slodzes nosaukums	Spriegumi, von Mizes, MPa	Deformācijas, mm	Stiprības robeža, MPa	Tecēšanas robeža pēc izmēģinājuma rezultātiem, MPa	Aprēķināto spriegumu novirzes novērtējums no stiprība robežas, %
1	Radiālā novirze 15 mm, un griezes moments pie 10 km/h.	1,80	0,83	4,87	0,5	62,9%
2	Leņķiskā novirze 4° un griezes moments pie 10 km/h.	0,31	0,1			93,5%
3	Aksiālā novirze 20 mm, un griezes moments pie 10 km/h.	1,10	0,52			77,34%

Saskaņā ar (3.13. tab.) datiem pie sajūga vienlaicīgas maksimālās aksiālās, radiālās un leņķiskas novirzes rezultējošie spriegumi sastāda 3,21 MPa un, ja spriegumi pārsniedz 60 % [77]...[80] no stiprības robežas sprieguma summārā lieluma pie cikliskās slodzes, tas var izraisīt sajūga pārrāvumu.

Tā kā Latvijas dzelzceļa ritošā sastāva gumijas korda sajūgi visā kalpošanas laikā tiek pastāvīgi pakļauti darba režīmu maiņai un radiāli-aksiālo un leņķisko noviržu ietekmei, lai izpētītu sajūga drošu darbību, novērtēsim režīmu maiņas biežumu sajūga ekspluatācijas laika periodā 2 gadi, pie maksimālā nobraukuma 264 tūkst.km. Pārbaudīsim sajūga drošības koeficientu pie 500 000 cikliem. Sajūga kalpošanas laika prognozēšana līdz atteikumam parādīta (3.102. att.).



3.102. att. Drošības rezerves koeficients no cikliskām un leņķiskām slodzēm.

Drošības rezerves koeficients ir vērtība, kas iegūta dalot aprēķināto spriegumu no GEM rezultātiem ar tecēšanas robežu  $\sigma_y$  norādīts (3.22 tab.), ja drošības koeficients ir mazāks vai vienāds ar 1, tad tas norāda, ka konstrukcija vai sastāvdaļa tiks bojāta uzreiz pēc projektētās slodzes sasniegšanas un nespēs izturēt papildus slodzi. Tā kā mūsu gadījumā sajūgs ir atbildīgs mezgls,

atteices sekas ir nopietnas, jo sajūga atteice nelabvēlīgos apstākļos var izraisīt visa elektrovilciena atteici. Pēc simulācijas rezultātiem drošības koeficients sastāda 2,795, un šajā gadījumā mēs uzskatām, ka tas ir nepietiekami. Mēs uzskatām, ka izmantojot savienojumu visā tā kalpošanas laikā ir nepieciešams augstāks drošības koeficients (*FoS*).

Ar šādiem datiem ir iespējams novērtēt sajūga darbību pēc aprēķinātā drošības koeficienta un ar tā palīdzību prognozēt laika posmu līdz atteikumam jebkāda veida un tipa gumijas korda sajūgam.

### 3.13. Gumijas korda sajūga frekvences analīze

Lai precizētu sajūga apvalka materiāla aprēķinu modeli, tika veikti svara kontrolmērījumi:

- visu sajūgu svēršana tika veikta RTU laboratorijā, izmantojot Platformas svarus Kern EOB150K50XL d 50 g. max 150 kg. ar precizitātes klasi  $\pm 50$  g. (3.103.a att.);
- 5 sajūga fragmentu un sajūga plākšņu fragmentu svēršana, izmantojot Kern EW 150- 3M svarus no 0,5 g līdz 1,5 kg ar precizitātes klasi  $\pm 0,01$  g. (3.103 .b att.).

Svēršanas rezultāti ir parādīti (3.103. att.) un (3.24. tab.).



3.103. att Paraugu svēršanas dati:

a – gumijas korda sajūgs; b – gumijas korda sajūga fragments.

3.24. tabula

Sajūgu un to fragmentu masas svēršanas dati

Parauga Nr.	Sajūga masa, kg	Sajūga fragmentu masa, kg	Virsmas slāņa plākšņu masa, kg
1	9,10	0,519	0,03186
2	9,30	0,514	0,03203
3	9,28	0,526	0,03092
4	9,25	0,509	0,02998
5	9,30	0,507	0,03068

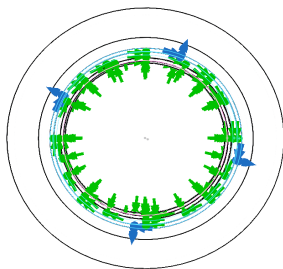
Sastādot materiāla aprēķina modeli, sajūga materiāla blīvuma aprēķināšanai izmantota vidējā vērtība:

- gumijas korda sajūga svars – 9,24 kg;

- sajūga fragmenta svars – 0,515 kg;
- virsmas slāņa plākšņu masa – 0,03109 kg.

Pēc tam tika veikta gumijas korda sajūga apvalka frekvences analīze, kas sastāv no rezonanses frekvenču noteikšanas, no kurām jāizvairās ekspluatācijas laikā.

SolidWorks simulācijas programmā nostiprinājām iepriekš izveidoto sajūga aprēķina modeli aksiālā un radiālā virzienā, gar virsmām, kurām pieguļas tērauda diski sakabes stiprināšanai pie savienoto agregātu vārpstām. (3.104. att.).



3.104. att. Sajūga modeļa nostiprināšana atloka kontakta zonās.

Sākotnējā posmā veiksīm frekvenču analīzi pirmajām 5 sajūga pašfrekvencēm. Frekvences analīzes dati tika parādīti (3.25. tab.). Pirmo 5 frekvenču analīzes rezultātā tika atrasta pirmā rezonanses frekvence – 54,87 Hz, šajās svārstībās ir iesaistīti 57,19 % no sajūga masas.

3.25 tabula

Sajūga piecu pašrezonanses frekvenču analīze

Izmēģinājuma Nr.	Pašsvārstību frekvence, Hz	Sajūga masas līdzdalība koeficienti pa asīm		
		X	Y	Z
1	54,87	0,571	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$8,34 \cdot 10^{-9}$
2	56,27	0,0194	$2,66 \cdot 10^{-6}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$
3	56,37	0,0260	$1,97 \cdot 10^{-8}$	$5,89 \cdot 10^{-7}$
4	60,98	$6,83 \cdot 10^{-5}$	$6,73 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$
5	61,33	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$

Tabulas datu rezultāti liecina, ka svārstībās iesaistītā sajūga masas daļa izpaužas tikai pa X asi un tādēļ ir nepieciešams izpētīt lielāku sajūga modālo frekvenču diapazonu, lai identificētu sajūgu svārstības pa Y un Z asīm,

Otrajā posmā veicām frekvenču analīzi 25. sajūga modālajām frekvencēm. (pirmo 25. rezonanses frekvenču analīze parādīta 6. pielikumā). 25. frekvenču pētījuma rezultāti liecina, ka vibrācijās iesaistītā sajūga masas daļa notiek pa Y un Z asi. Frekvenču diapazona 88,25 Hz svārstībās piedalās 38,8 % no sajūga masas pa Z asi, un tāda pati masa svārstībās piedalās pa Y asi ar frekvenci 88,36 Hz. Pēc 25 frekvenču pētījuma rezultātiem citas rezonanses frekvences tika konstatētas frekvenču diapazonā 124,78 Hz, 126,22 Hz. Masas ieguldījums joprojām ir nepietiekams, jo nedaudz vairāk par 50 procentiem no sajūgu masas ir iesaistīti svārstībās pa Y un Z asīm. Tālāk izpētīsim pirmās 40 sajūga pašfrekvences. Frekvences pētījuma dati parādīti 5. pielikumā. Pamatojoties uz 40 frekvenču pētījuma rezultātiem, tika konstatēts, ka sajūga masas kopējais devums šajās svārstībās sasniedza 61,8 % sajūga aksiālajā virzienā, 50 % vertikālajā un



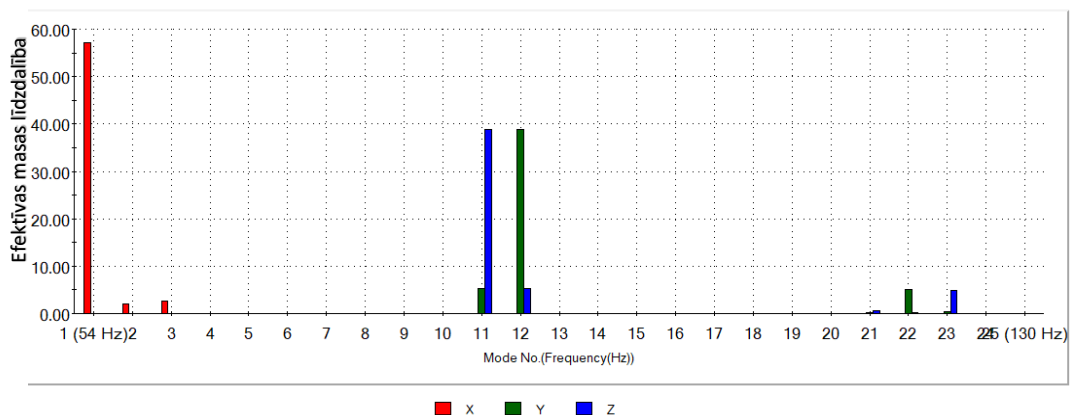
horizontālajā radiālajā virzienā. Tā kā svārstībās iesaistītā sajūga masas kopējā daļa ir lielāka par 60 %, tad tālākā masas līdzdalība nav nozīmīga un tāpēc apstājamies pie pirmo 40 frekvenču izlases. Lielākai skaidrībai no tabulas 5. pielikumā, pirmo 40 frekvenču izpēte. Izdalām galvenās masas, kas iesaistītas svārstības režīmu veidošanā. Rezonanses frekvenču kopsavilkuma tabula ar lielāko sajūga masas līdzdalību tika parādīta (3.26. tab.).

3.26 tabula.

#### Apkopotie pašfrekvences rezultāti

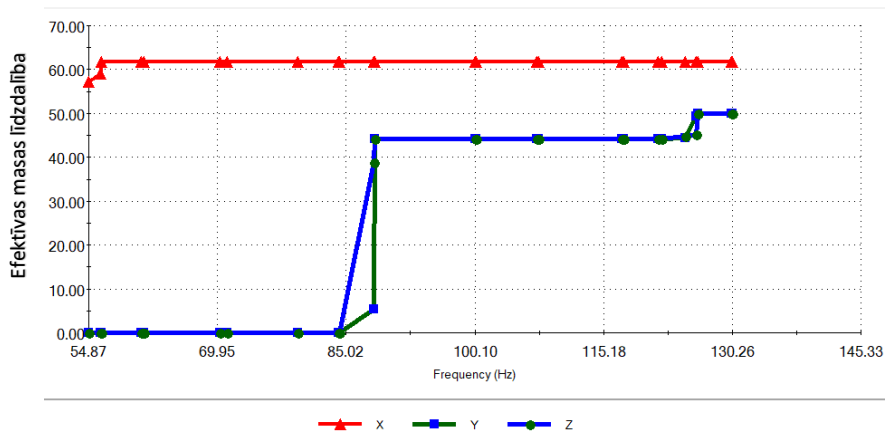
Izmēģinājuma Nr.	Pašsvārstību frekvence, Hz	Sajūga masas līdzdalība koeficienti pa asīm		
		X	Y	Z
1	54,87	0,5719	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$8,34 \cdot 10^{-9}$
2	56,27	0,0194	$2,66 \cdot 10^{-6}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$
3	56,37	0,0260	$1,97 \cdot 10^{-8}$	$5,89 \cdot 10^{-7}$
11	88,25	$1,82 \cdot 10^{-8}$	0,0533	0,3882
12	88,36	$2,14 \cdot 10^{-9}$	0,3881	0,0532
22	126,05	$4,85 \cdot 10^{-7}$	0,0511	0,0028
23	126,22	$1,89 \cdot 10^{-7}$	0,0048	0,0484

Šīs svārstīgās masas raksturo enerģijas daļu, kas iedarbojas uz sajūga apvalku un var izraisīt sajūga apvalka bojājumus. Lielākajām masām, kas norādītas (3.26. tab.), veidojam histogrammu masu dalībai svārstībās katrā virzienā. (3.105. att.).



3.105. att. histogramma, kas atspoguļo masas līdzdalību svārstībās.

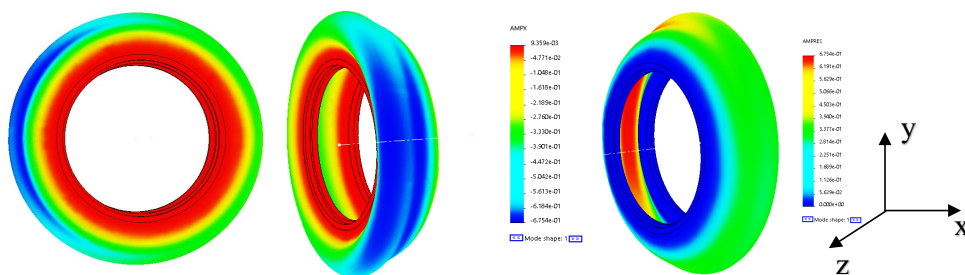
Lai novērtētu kopējo masas līdzdalības koeficientu no svārstību frekvencēm, izveidojam kopējās masas līdzdalības grafiku (3.106. att.).



3.106. att. Grafiks, kas attēlo masas līdzdalības kopējā koeficienta vērtējumu atkarībā no svārstību frekvencēm.

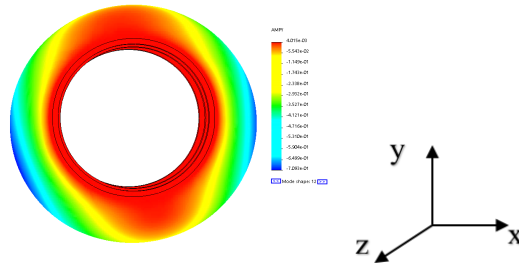
Histogrammu analīzes rezultātā (3.105. un 3.106. att.) nosakām galvenos vibrācijas režīmus, kas atbilst frekvencēm ar vislielāko sajūga masu līdzdalību, un masas līdzdalība norāda, kuri frekvenču režīmi ir visbīstamākie.

Pārsniedzot (3.26. tab.) norādītās frekvences rodas gumijas korda sajūga rezonanses svārstības, kurās piedalās ievērojami liela sajūga masa. Ja sajūgs ilgstoši strādā šo frekvenču diapazonā, tad notiek gumijas korda sajūga sagraušana. Zinot kritiskās frekvences, pētām sajūga apvalka svārstību režīmus (3.105; 3.106; 3.107; 3.108. att.). Kā redzams 3.105. attēlā, pirmā un galvenā svārstību forma pie 54,87 Hz ar lielāko sajūga masas daļu 57,19 % aksiālā virzienā noslogo sajūga apvalka sānu sienu. Noslogotā zona sakrīt ar sajūga bojājuma zonu ekspluatācijas laikā.

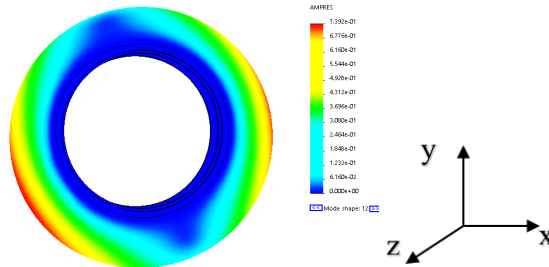


3.107. att. Sajūga svārstības pa X asi ar frekvenci 54,87 Hz.

Kā redzams 3.106. un 3.107. attēlā, svārstības forma pie 88,25 Hz un 88,63 Hz frekvencēm ar lielāko sajūga masas daļu, attiecīgi 38,81 % un 38,82 %, kas vērsta radiālā, horizontālā un vertikālā virzienā, izstiepj sajūga apvalka augšējo virsmu un sānu sienu radiālā virzienā. Noslogotās zonas ekspluatācijas laikā daļēji sakrīt ar sajūga bojājuma zonu.

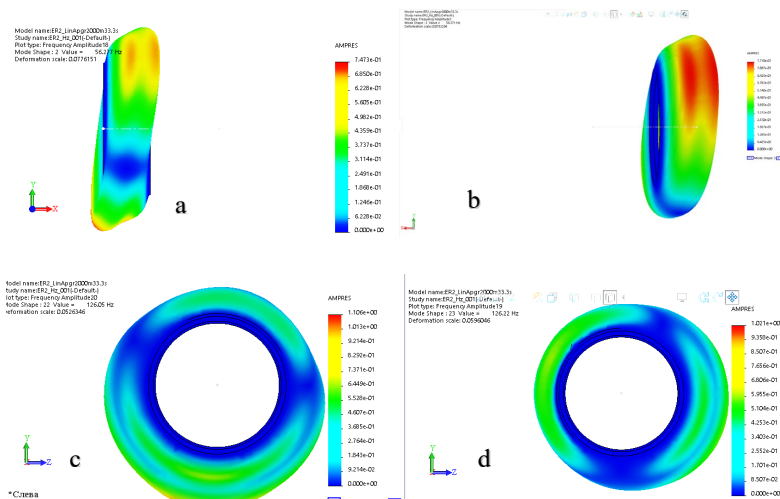


3.108. att. Sajūga vibrācijas pa Y asi ar frekvenci 88,25 Hz.



3.109. att. Sajūga vibrācijas pa Z asi ar frekvenci 88,36 Hz.

Pie frekvencēm 56,37 Hz; 56,27 Hz; 126,05 Hz un 126,22 Hz. sajūgs zaudē savu stabilitāti, bet masas devums šajās frekvencēs nav būtisks un vieta, kur sajūgs ir piestiprināts pie atlokiem, nav pakļauta spriedzei. Frekvenču iedarbības ietekme uz sajūgu parādīta (3.95. att.).



3.110. att. Rezonanses frekvenču ietekme uz sajūgu:  
a – 56,27 Hz; b – 56,37 Hz; c – 126,05 Hz; d – 126,22 Hz.

Pie rezonanses frekvenču lielumos 56,37 Hz, 56,27 Hz, 126,05 Hz un 126,22 Hz svārstības piedalās ne vairāk kā 5 % gumijas korda sajūga masas, un tas ieguldījums svārstības neietekmē.

### 3.14. Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju lūzumu rakstura un cēloņa veida apskats

Montāžas konstrukcijās bultskrūves tiek izmantotas kā stiprinājuma elementi, kuras izmanto dažādu detaļu un elementu savienošanai, kuras savukārt, var būt daļa no jebkuriem mehānismiem un ierīcēm. Bultskrūves tiek plaši izmantotas gandrīz jebkurā ražošanā un gandrīz visu inženierkonstrukciju izgatavošana. Stiprinājuma bultskrūvju savienojumi ļauj ērti un ātri savienot montāžas konstrukciju detaļas, kuras iekļautās ēku celtniecībā, detaļu savienošanai automašīnās, lidmašīnās, dzelzceļa ritošā sastāvā, cauruļvadiem, dažādu konstrukciju stiprinājumam, sarežģītu rūpniecībā izmantojamu mašīnu un iekārtu montāžā, kā arī ikdienā dzīvē.

Savukārt, bultskrūves kuras tiek izmantotas dzelzceļa ritošā sastāva dažādu konstrukciju un agregātu stiprināšanai, strādā diezgan smagos apstākļos. Tātad, strādājot pie dzelzceļa ritošā sastāva, uz stiprinājuma bultskrūvēm iedarbojas statiskās, dinamiskās, kā arī triecienslodzes, un triecienslodžu darbības rezultātā bultskrūvju materiāla stiprības spēja laika gaitā tiek izsmelta [45]. Pie tālākajām triecienslodžu darbībām bultskrūvēs pakāpeniski veidojas un attīstās mikroplaisas, kas pāraug plaisās. Tie kļūst par sprieguma koncentratoriem un, ņemot vērā pieaugošo bultskrūvju šķērsriezuma pavājināšanos, palielinās mikroplaisas un plaisas un bultskrūves kļūst par gumijas korda sajūga stiprinājuma galīgā lūzuma vietu [17]. Svarīgais pie plaisu rašanās un tas tālākajai attīstībai ir ne tikai metāla iekšējās struktūras defekti un izdedžu ieslēgumi, bet arī virsmas apstrādes defekti bultskrūvju ražošanā.

Bultskrūvju lūzuma piemēri ir parādīti (3.111. att.).



3.111. att. Bultskrūvju lūzuma piemēri.

Ir ļoti plaši izmantoti stiprinājuma savienojumi, ar bultskrūvju izmantošanu, un tie attiecas pie svarīgākajiem un atbildīgākajiem konstrukcijas elementiem. Dažādu tehnikas jomās stiprinājumu

elementu īpatsvars var sasniegt 15 – 20 % no kopējā savienojumu skaita. Drošajai bultskrūvju savienojumu ekspluatācijai jābūt nodrošinātai, ar konstrukciju stiprības rezerves prasībām, balstoties uz robežstiprinājumu aprēķiniem, stiprinājuma elementiem strādājošiem pie ilgstošas statiskās un dinamiskās slodzes, temperatūras un agresīvas apkartējas vides ietekmes apstākļos [18]. Jo bultskrūvju drošai ekspluatācijai tiek izvirzītas stingras drošību prasības. Šobrīd stiprinājuma bultskrūves ir standartizēti pēc dažādiem standartiem, tādiem ka, Eiropas *EN*, starptautiskā *ISO*, Vācijas *DIN*, Krievijas *GOST* un citiem.

### 3.14.1. Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju M-24 sagraušana cēloņu izpēte

Bultskrūves izmantojamas gumijas korda sajūga stiprināšanai ritošā sastāvā un, īpaši elektrovilcienos, ekspluatācijas laikā tiek daudzkārt pakļautas periodiski laika gaitā mainīgām slodzēm un impulsa, augstfrekvences periodiskām un neperiodiskām, kā arī mainīgām amplitūdas un triecienslodzēm. Atkārtotas mainīgas triecienslodzes iedarbes rezultātā bultskrūvju materiāla izturība samazinās un gumijas korda sajūga *M-24* bultskrūves varētu būt pakļautas sagraušanai [35] Zem sagraušanas jāsaprot materiāla neatgriezenisku sagraušanas procesu un spriedzes iedarbes rezultātā to sadalīšanos atsevišķās daļās [41]. Gumijas korda sajūga bultskrūvju *M-24* lūzuma piemēri redzami 3.112. attēlā.



3.112. att. Gumijas korda sajūga sagraušanas paraugi:

a – vienas bultskrūves lūzums; b – divu bultskrūvju lūzumi; c – trīs bultskrūvju lūzumi.

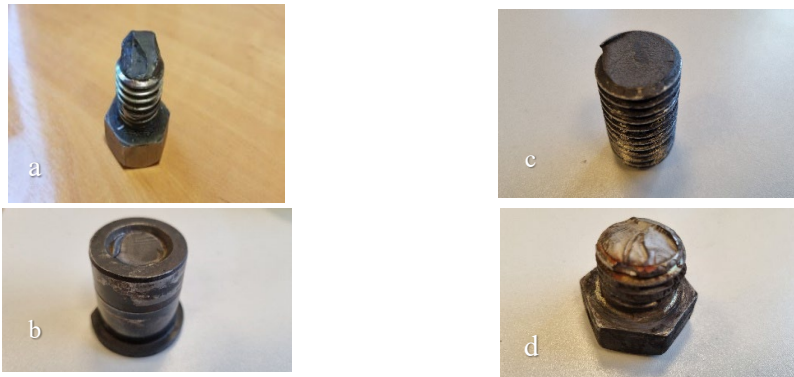
Pie tam sagraušana ir process, kas sastāv no virkni secīgiem posmiem, kas ietver:

- submikroskopisku izmēru plaisu rašanos;
- plaisu attīstība;
- plaisu galīgā makroskopiskā attīstība un parauga sadalīšanās uz atsevišķām daļām.

Ekspluatācijas laikā gumijas korda sajūga *M-24* bultskrūvēs, izņemot mikro un makro plaisu rašanos un veidošanos, bultskrūvju sagraušana var veidoties arī no mikrodefektu klātbūtnes visā tilpumā vai to uzkrāšanās darbības laikā, ar tālāko bultskrūvju sagraušanas iespēju, bez mikroplaisu veidošanos [68]...[17]. Visi iepriekš minētie faktori var būtiski ietekmēt gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju drošumu. Sakarā ar daudziem gumijas korda sajūga stiprināšanai *M-24* bultskrūvju atteikumiem (promocijas darbā 1. nodaļā), kā arī augstajām drošības prasībām pie stiprinājuma bultskrūvēm, asi pastāv jautājums par bultskrūves sagraušanas veida un rakstura cēloņu pētīšanu. Kā arī bultskrūvju atbilstība *ISO 898-1:2013* [19] un *EN 10083-3:2007-01* [6] standartu prasībām.

### 3.14.2. Gumijas korda sajūga stiprināšanas M24 bultskrūvju sagraušanas veidu noteikšana

Promocijas darba 3.14.2 daļā runa iet par *ER2* un *ER2T* sērijas elektrovilcienu gumijas korda sajūga stiprināšanas *M-24* bultskrūvju sagraušanas cēloņa pētīšanu, kā arī tos sagraušanas veidu un raksturu noteikšanu. Pēc liela skaita gumijas korda sajūgu salauzto *M-24* bultskrūvju paraugu vizuālās apskates rezultātiem nav iespējams viennozīmīgi noteikt bultskrūvju sagraušanas veidu un raksturu. Dažādi *M-24* bultskrūvju sagraušanas veidi parādīti (3.113. att.).



3.113. att. Gumijas korda sajūga bultskrūvju sagraušanas veidu piemēri:  
a - noguruma sagraušana plaisās parādīšanās dēļ; b – sagraušana plaisās parādīšanās dēļ; c –  
noguruma sagraušana; d – noguruma sagraušana plaisās parādīšanās dēļ.

Gumijas korda sajūga stiprinājuma *M-24* bultskrūvju sagraušanas cēloņu izpēte tika veikta RTU laboratorijā pēc sekojošiem virzieniem:

- sagraušanas veida un rakstura noteikšana trim paraugiem pie statiskās slodzes;
- sagraušanas veida un rakstura noteikšana trim paraugiem pie cikliskas slodzes;
- statisko un ciklisko izmēģinājumā iegūto datu salīdzināšana ar *ISO 898-1:2013* standartu;
- triecienvizkozitates noteikšana pie trīs dažādiem temperatūras diapazoniem  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  un iegūto datu salīdzināšana ar *ISO 898-1:2013* standartu;
- stiprinājuma *M-24* bultskrūvju pētīšana, uz standarta *ISO 898-1:2013* un *EN 10083-3:2007-01* to atbilstības prasībām, tērauda markai *4Cr41*, kura ietver sevī:
  - metāla cietības pētīšanu;
  - metāla ķīmiskā sastāva noteikšanu uz sakausējošo elementu un kaitīgo piemaisījumu klātbūtni;
- bultskrūvju paraugu metālografiskā analīze metāla struktūras defektu klātbūtnes noteikšanai;
- bultskrūvju paraugu metālografiskā analīze metāla struktūras defektu klātbūtnes noteikšanai atkarībā no nobraukuma.

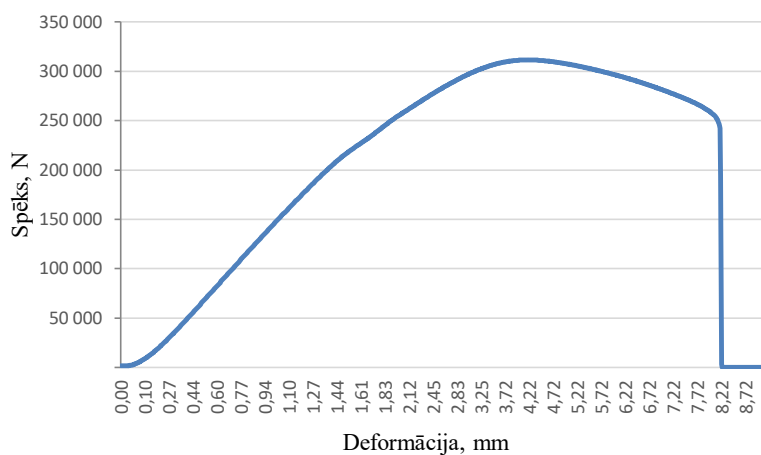
Pēc pētījumu rezultātiem, izdarīt pamatsecinājumus un slēdzienus par *M-24* bultskrūves sagraušanas cēloņiem un par bultskrūvju ražošanā izmantotā tērauda kvalitāti, gumijas korda sajūga stiprināšanai.

### 3.14.3. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot statisko slodzi

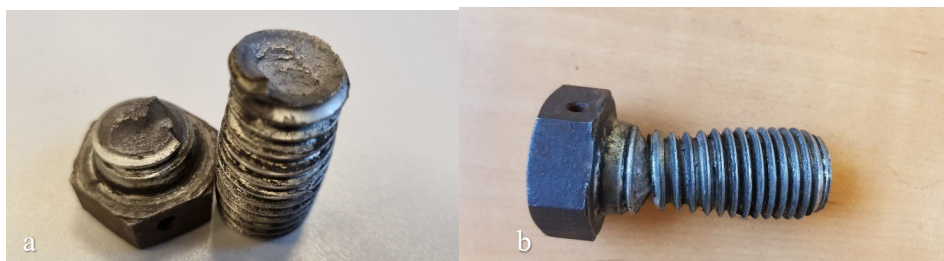
Lai noteiktu sagraušanas sprieguma veidu un raksturu, RTU laboratorijā tika veiktas trīs *M-24* bultskrūvju paraugu statiskās pārbaudes uz sagraušanu. Bultskrūvju paraugi tika paņemti no motorvagoniem ar šādiem nobraukuma datiem:

- 1. paraugs – nobraukums 214 596 km;
- 2. paraugs – nobraukums 105 764 km;
- 3. paraugs – bez nobraukuma (nobraukums 0 km).

Pārbaudes tika veiktas RTU laboratorijā, izmantojot “Zwick/Roell Z600” elektromehānisko testēšanas iekārtu ar slodzes palielināšanas ātrumu 1 mm minūtē. Pārbaudes laikā iegūtie rezultāti atspoguļoti diagrammās, kas uzrāda parauga relatīvo pagarinājumu atkarībā no slodzes, ka arī (3.115., 3.117., 3.119. att.); parādīti parauga sagraušanas veidi.

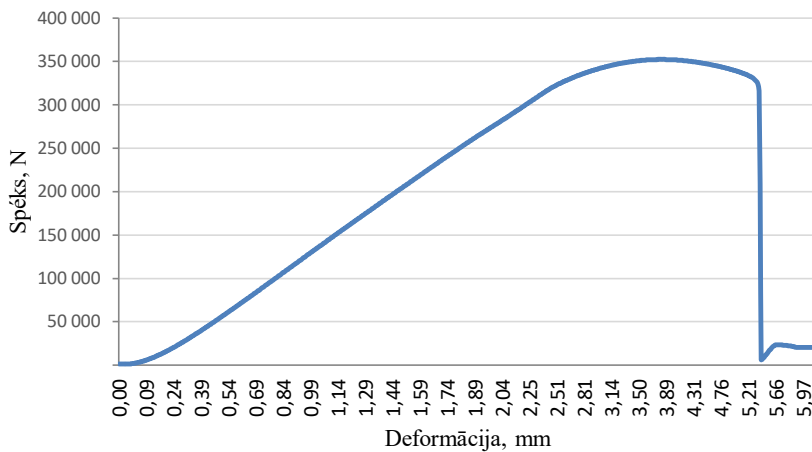


3.114. att. Stiepšanās diagramma 1. paraugs.

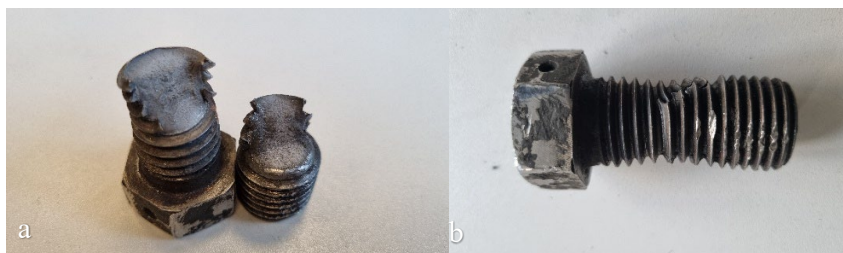


3.115. att. 1. paraugs:

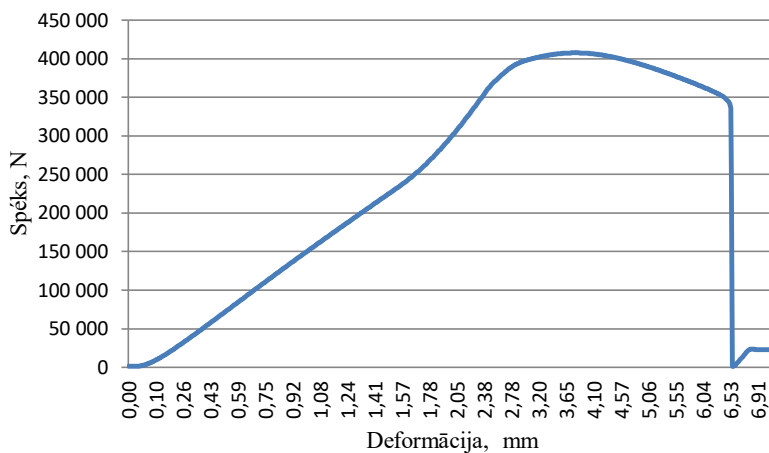
a - viskozitātes sagraušana; b - kopskats pēc pārrāvuma.



3.116. att. Stiepšanās diagramma 2. paraugs.

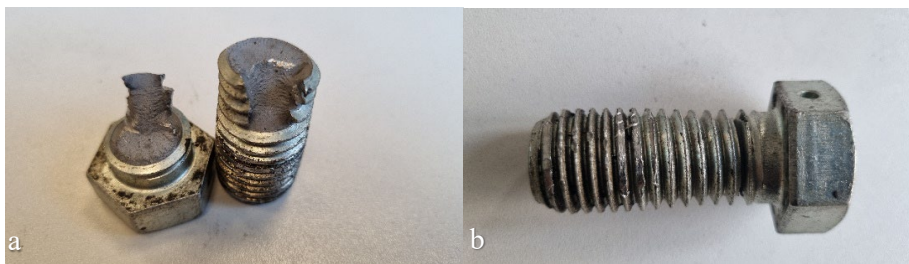


3.117. att. 2. paraugs:  
a - nogurumu sagraušana; b - kopskats pēc pārrāvuma.



3.118. att. Stiepšanās diagramma 3. paraugs.





3.119. att. 3. paraugs:  
a — nogurumu sagraušana; b - kopskats pēc pārrāvuma.

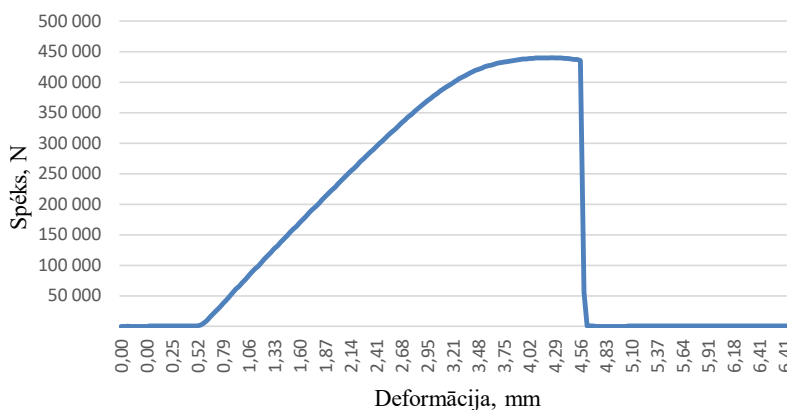
### 3.14.4. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana, piemērojot ciklisko slodzi

Lai bultskrūvēm *M-24* noteiktu sagraušanas veidu un raksturu, tika veikti cikliskie izmēģinājumi trim bultskrūves paraugiem (4., 5. un 6. paraugam; 10- testi – izstiepšana un slodzes noņemšana- un 11 tests – parauga izstiepšana līdz sagraušanai), ņemot vērā trīs dažādus nobraukuma diapazonus:

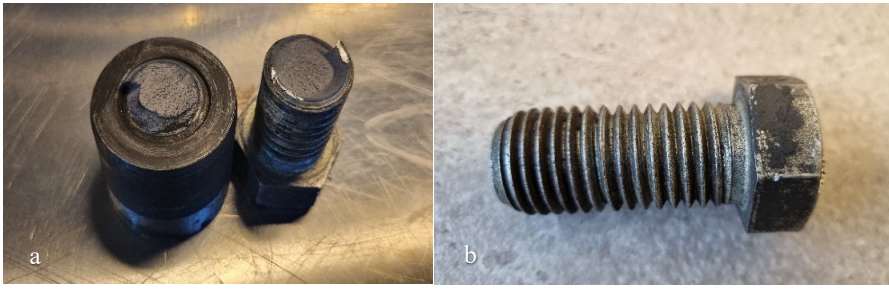
- 4. paraugs – nobraukums 22 543 km;
- 5. paraugs – nobraukums 155 365 km;
- 6. paraugs – nobraukums 210 298 km.

Ar spriedzes ciklu tiek saprasts mainīgas spriedzes vērtību kopums vienā izmaiņu periodā. Cikliskie izmēģinājumi tika veikti RTU laboratorijā, izmantojot “Zwick/Roell Z60010” elektromehānisko testēšanas iekārtu ar pakāpenisku slodzes palielināšanu un noņemšanu. Noslogojuma pakāpes attiecīgi: 25 k N; 50 k N; 75 k N 100 k N; 125 k N; 150 k N; 175 k N; 200 k N; 225 k N; 250 k N; sagraušana. Slodzes palielināšanas ātrums – 7 mm minūtē.

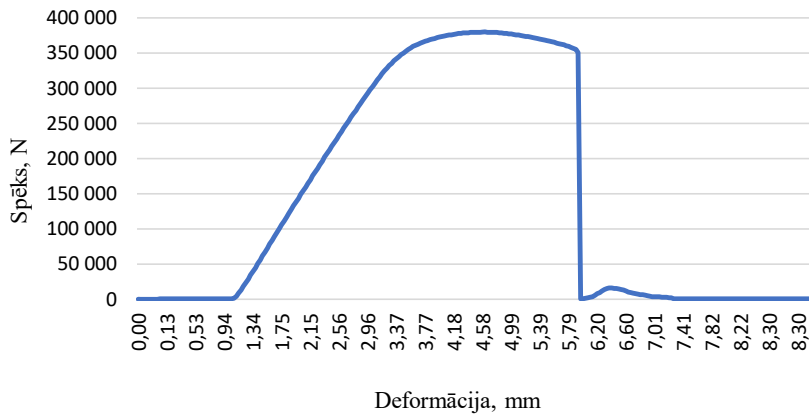
4., 5., 6. paraugu cikla veida pārbaudes un sagraušanas salīdzinošās diagrammas parādītas 9.pielikumā.



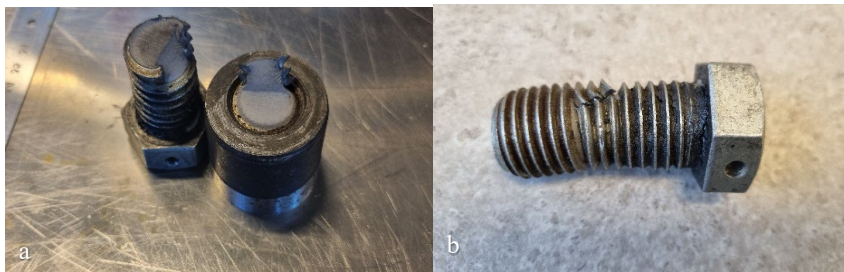
3.120. att. Stiepšanās diagramma 4.paraugs.



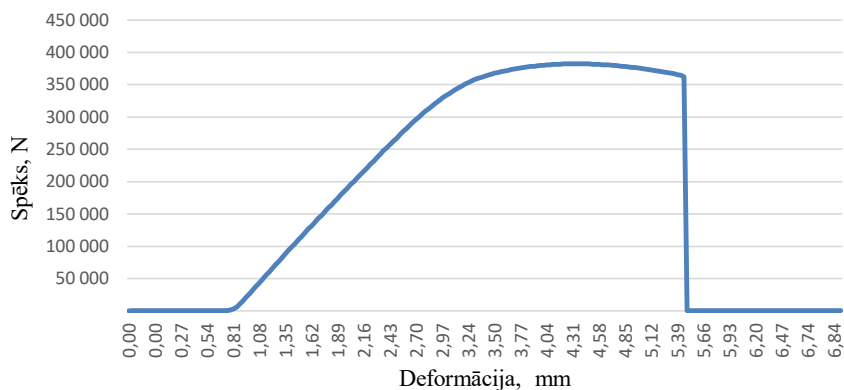
3.121. att. 4. paraugs:  
a - nogurumu sagraušana; b - kopskats pēc pārrāvuma



3.122. att. Stiepšanās diagramma 5. paraugs.



3.123. att. 5. paraugs:  
a - nogurumu sagraušana; b - kopskats pēc pārrāvuma.



3.124. att. Stiepšanās diagramma 6. paraugs.



3.125. att. 6. paraugs:  
a - nogurumu sagraušana; b - kopskats pēc pārrāvuma.

Iegūtie dati par bultskrūvju statistiskiem un cikliskiem izmēģinājumiem ir apkopoti (3.27. tab.) un tika salīdzināti ar *ISO 898-1:2013* [19] standartu.

3.27.tabula

Bultskrūvju *M-24* parametru noteikšana pēc sagraušanas.

Rādītāju nozīme	Nobraukums uz vagonam, km	Sagraušanas slodze $P$ , N	Sagraušanas spriegums $\sigma_s$ , MPa	Diametrs pēc sagraušanas $d_f$ , mm	Sagraušanas laukums $F_f$ , mm <sup>2</sup>	Garums pēc sagraušanas, mm	Relatīvais pagarinājums $\delta$ , %
1.paraugs	214 596	311 417	1238,14	17,9	251,52	73,2	12,61
2.paraugs	105 764	352 363	1205,07	19,3	292,40	70,5	8,46
3.paraugs	0	407 561	1285,11	20,1	317,14	71,5	10
4.paraugs	22 543	439 776	1372,69	20,2	320,31	69,7	7,23
5.paraugs	155 365	379 801	1221,77	19,9	310,86	70,7	8,76
6.paraugs	210 298	382 460	1218,02	20,0	314,00	70,4	8,30
<i>ISO898 1:2013</i>	---	Min 367 000	Min 1040	----	----	----	9%

Sagraušanas spriegumu noteikšana:

$$\sigma_{sairš} = \frac{P_{sairš}}{F_1} \quad (3.3.)$$

kur  $P_{sairš}$  - sagraušanas slodze, N.

$F_1$  - parauga šķērsgriezuma laukums sagraušanas vietā, mm<sup>2</sup>.

$$F_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad (3.4.)$$

kur  $d_1$  - parauga diametrs pēc sagraušanas, mm.

Relatīvo pagarinājumu noteikšana:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (3.5.)$$

kur  $l_1$  – parauga garums pēc sagraušanas, mm;

$l_0$  – oriģinālā parauga garums = 65 mm.

Pēc pārbaudes rezultātiem tika konstatēts, ka visu paraugu lūzumi notikusi bultskrūvju savienojuma vietā ar ieliktni, bez kausa (bedres) lūzuma. Visu bultskrūvju lūzumi notika ar nelielu plastisku deformāciju un ar mazo tecēšanas laukuma robežu. Pēc izmēģinājuma rezultātiem tika konstatēta paraugu nogurumu sagraušana. Noguruma sagraušana rodas no pakāpenisku defektu uzkrāšanās bultskrūvju materiālā, kuri pakļauti mainīgiem spriegumiem un trieciena slodzēm, kas izraisa mikroplaisu veidošanos, to attīstību, plaisu parādīšanos un galīgo sairšanu.

Pamatojoties uz bultskrūvju testa rezultātiem tika konstatēts, ka:

1. paraugam lūzuma diagrammai ir lielāks relatīvais pagarinājums un mazāka, salīdzinot ar citiem paraugiem, pārrāvuma slodze. Bultskrūve neatbilst standarta *ISO 898-1:2013* prasībām. 1. paraugam konstatēts viskozs lūzums, viskozs lūzums atšķiras ar tam raksturīgām struktūras īpašībām. Tipisks viskozu lūzumu piemērs ir "kausa" (iedobes) lūzuma veidošanās ar daudziem nelīdzenumiem un plastiskas deformācijas pēdām un ar rupju slīdošo joslu veidā. Šķiedrveida lūzums rodas graudu ķermeņa sagraušana s rezultātā, metālam lūzuma vietā nav kristāliska spīduma, lūzuma vietas neizkiedē gaisu un lūzuma virsma izskatās matēta. Eksploatācijā viskozu lūzumu izraisa spriegumi, kas pārsniedz materiāla tecēšanas robežu.
2. un 3. paraugam lūzumi pie statiskās slodzes notika bez kausa (iedobes) lūzuma un tecēšanas laukuma normālo spriegumu palielināšanās rezultātā. Parauga lūzumam ir matēta nokrāsa un tas tiek identificēts kā nogurumu sagraušana.
3. No 4., 5. un 6. paraugu ciklisko pārbažu rezultātiem ir redzams, ka paraugu sagraušana ir notikusi bultskrūvju savienojuma ar ieliktni vietā tangenciālo spriegumu pieauguma rezultātā.

Paraugu lūzumam ir matēta nokrāsa, un paraugu sadrupšana tiek uzskatīta par nogurušu sairšanu, ko pastiprina mikrodefektu klātbūtne un plaisu veidošanos.

Saskaņā ar pārbaudes rezultātiem, 1. un 2. paraugam, tika konstatēts samazināts sagraušanas slodžu lielums, kas 1. paraugam sastāda 311 417 N, kas ir par 55 583 N mazāk nekā *ISO 898-1:2013* noteiktie parametri, bet 2. paraugam sastāda 352 363 N, kas ir mazāk nekā *ISO 898-1:2013* noteiktie parametri par 14 637 N. 3., 4., 5., un 6. paraugam sagraušanas slodzes parametrs atbilst *ISO 898-1:2013* standarta prasībām.

### 3.14.5. Sagraušanas veida un rakstura noteikšana pie M-24 bultskrūvju triecienizturības pārbaudes

Viens no galvenajiem tērauda kvalitātes kritērijiem ir spēja pretoties trausliem lūzumiem. Šī spēja kvalitatīvi izpaužas triecienizturības izteiksmē. Triecienizturība ir viena no svarīgākajām tērauda konstrukciju īpašībām. Šis raksturlielums parāda enerģijas daudzumu, kurš jāiztērē, lai sabruktu standarta paraugs ar iecirtumu. Lai noteiktu sagraušanas raksturu un veidu un novērtētu gumijas korda sajūga bultskrūvju spēju izturēt trieciena slodzes, tika veikti izmēģinājumi triecienizturības noteikšanai trīs dažādos temperatūras diapazonos. Triecienizturības izmēģinājumi tika veikti “*KIWA Inspecta*” laboratorijā ar “*Sharpi*” metodes palīdzību [66]. Šī metodes pamatā ir atvēziena svārsta trieciens pa taisnstūrveida metāla ar iegriezumu paraugu. Patērēto darbu parauga sagraušanai nosaka pēc attāluma, kādā svārsts novirzās pēc trieciena.

Saskaņā ar uzrādītiem 1.nodaļā *M-24* bultskrūvju atteices statistiskajiem datiem ir zināms, ka pie zemām temperatūrām atteikumu skaits palielinās, tāpēc aktuāls ir uzdevums noteikt triecienizturības lielumu dažādos temperatūras diapazonos, lai noteiktu triecienizturību, sagraušana s veidu un raksturu, kā arī *M-24* bultskrūvju sagraušanas cēloņus. Šim nolūkam tiek piedāvāts veikt izmēģinājumu trīs bultskrūvju 7., 8., un 9. paraugam uz triecienizturību ar līdzīgiem nobraukuma datiem trīs dažādos temperatūras diapazonos (–20 °C; 0; +20 °C). Bultskrūvju nobraukuma un darbības laika dati ir apkopoti (3.28. tab.).

3.28.tabulā

Dati par M-24 bultskrūvju nobraukumu un darbības laiku

Parauga Nr.	Bultskrūves demontāžas datums	Bultskrūves darbības laiks, dienas	Bultskrūves nobraukums, km
7	22.10.2021	387	80 256
8	27.01.2022	185	85 894
9	27.01.2022	185	85 894

Izmēģinājuma mērķis ir noteikt gumijas korda sajūga stiprinājuma *M-24* bultskrūvju sagraušanas veidu un raksturu. Trieciena izmēģinājumi tiek veikti, lai novērtētu materiāla drošumu un darbības trieciena slodzes ietekmē un tā tendenci uz trausliem lūzumiem. Izmēģinājuma veikšanai no *M-24* bultskrūvēm tika izgatavoti trīs taisnstūra paraugi 55 mm garumā un 10 x 10 mm platumā, kas tika pakļauti sagraušanai trieciena rezultātā speciālā *Zwick/Roell RKP 450* svārsta iekārtā. *Zwick/Roell RKP 450* iekārtas darbības princips ir sekojošs: veseris ar masu  $m$  tiek pacelts augstumā  $h$ , nolaižoties ar uzkrātās potenciālās enerģijas palīdzību, salauž paraugu un ar atlikušo kinētisko enerģiju veseris paceļas līdz augstumam  $h_1$  ( $h > h_1$ ). Parauga sagraušanas patērētā enerģija tiek noteikta kā starpība starp svārsta enerģiju pirms un pēc trieciena [7].

$$A_1 = mg(h - h_1) = m\ell(\cos\beta - \cos\alpha), \quad (3.6)$$

kur  $A_1$  – parauga sagraušanai patērētā enerģija, J;

$m$  – vesera masa, kg;

$g$  – brīvās krišanas paātrinājums, m/s<sup>2</sup>;

$h$  – svārsta smaguma centra augstums pirms trieciena, m;

$h_1$  – svārsta smaguma centra augstums pēc trieciena, m;  
 $\ell$  - svārsta garums, m;  
 $\alpha$  – svārsta sākuma leņķis, grad;  
 $\beta$  - svārsta leņķis pēc parauga sagraušanas, grad.

Par raksturlielumu materiāla spējai izturēt trieciena slodzes iedarbību pieņemts raksturlielums, ko sauc par īpatnējo triecienizturību. Materiāla īpatnējā triecienizturība  $a_k$  ir attiecība starp enerģiju, ko svārsts patērē, lai sagrautu paraugu, un šķērsriezuma laukumu  $F$  lūzuma vietā.

$$a_k = \frac{A_1}{F} \quad (3.7)$$

kur  $A_1$  – parauga sagraušanai patērētā enerģija, J;  
 $F$  - parauga šķērsriezuma laukums, mm.

Īpatnējā triecienizturība  $a_k$  J/mm<sup>2</sup> parāda absorbētās enerģijas, kas iegūta parauga sagraušanas rezultātā, attiecību pret materiāla šķērsriezuma laukumu. Un jo lielāka  $a_k$  vērtība, jo labāk materiāls pretojas triecienam. Patērētās enerģijas noteikšanas un triecienizturības dati apkopoti 3.29 tabulā.

3.29. tabulā

Paraugu parametru noteikšana dažādās temperatūrās

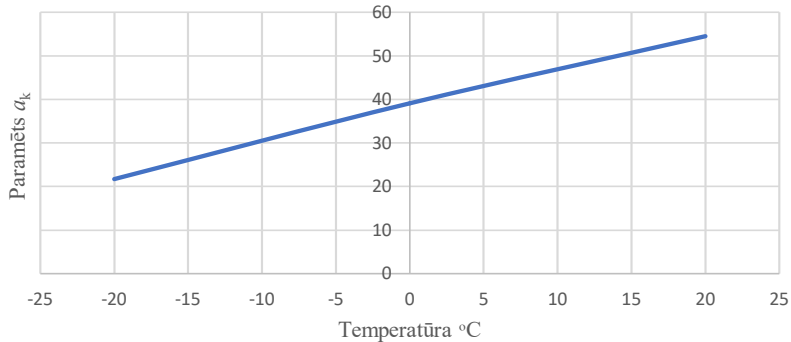
Parauga parametri	Parauga Nr.		
	7	8	9
Parauga garums, mm.	55	55	55
Parauga laukums sm <sup>2</sup> .	0,80	0,80	0,81
Testēšanas temperatūra, t° C	+20	0	-20
Potenciālā enerģija A, J.	450	450	450
*Absorbētā enerģija A <sub>1</sub> , J.	54,3	39,1	21,7
Nosacītā triecienizturība, a <sub>k</sub> J/cm <sup>2</sup> .	67,9	48,7	26,9
Vesera pacelšanas leņķi, α	149,29	149,29	149,29
Vesera leņķis pēc parauga sagraušanas, β	129,35	136,30	142,07

\*Prasības saskaņā ar ISO 898-1:2013 prasībām absorbētā enerģija - min 27J, pilna profila testējamam paraugam.

Iegūtie izmēģinājuma rezultāti tika apstrādāti atbilstoši ISO148-1:2017 standartam, kurš nosaka svārsta trieciena izmēģinājumus pēc Šarpi metodes (ar V-veida un U veida iegriezumu). Saskaņā ar (3.29. tab.) datiem īpatnējās triecienizturības  $a_k$  vērtība ir būtiski atkarīga no paraugu atdzesēšanas temperatūras. Lūzuma veids pēc parauga izmēģinājumiem parādīts (3.126. att.).



3.126. att. Paraugu sagraušanas veids pēc izmēģinājumiem:  
a – 7. paraugs; b – 8. paraugs; c – 9. paraugs.



3.127. att. Triecienvizkozitātes atkarība no temperatūras.

Vizuālās apskates rezultātā tika konstatēts:

- 7. paraugam lūzums konstatēts kā viskozs;
- 8., un 9. paraugam lūzums definēts kā trausls.

Veikto triecienvizkozitātes izmēģinājumu rezultātā tika konstatēts, ka triecienvizkozitātes lielumu nopietni ietekmē temperatūra. Ar temperatūras samazinājumu samazinās arī triecienvizkozitāte, un pēc īpatnējās triecienvizkozitātes  $\alpha_k$  noteikšanas rezultātiem tika konstatēts būtisks triecienvizkozitātes parametru samazinājums atkarībā no temperatūras. Pie paraugu atdzesēšanas no +20 °C līdz -20 °C, triecienvizkozitāte samazinājās par 41 vienībām, diapazonā no 67,9 līdz 26,9 J/mm<sup>2</sup>. Arī absorbētās enerģijas lielums samazinājās vairāk nekā 2,5 reizes. Pie temperatūras -20 °C 9.paraugam konstatēts absorbētās enerģijas parametra  $A_1$  samazinājums, kas neatbilst *ISO 148-1:2017* standarta parametram par 5,3 J.

### 3.15. M-24 bultskrūvju pētīšanas standarta *ISO 898-1:2013* un *EN 10083- 3:2007-01* atbilstība prasībām

Atbilstoši specifikācijas datiem [49] gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves jāizgatavo no tērauda 4Cr41 ar nosacītu stiprību 10.9. Bultskrūves stiprības klase ir tehniskās ekspluatācijas raksturlielums, kas atspoguļo maksimālo slodzi un uzrāda izturību pret deformāciju, triecieniem un sairšanu. Lai noteiktu bultskrūvju sagraušanas cēloņus, sagatavo uzdevumu, pārbaudīt paraugu atbilstību *ISO 898-1:2013* [19] un *EN 10083-3:2007-01* [6] standartu prasībām 4Cr41 markas tēraudam. Izpētes objektiem tika izvēlētas salauztas bultskrūves (10., 11., 12. un 13. paraugs), kas

demontētas no *ER2* un *ER2T* sērijas motorvagoniem, kā arī viena jauna bultskrūve (14. paraugs). Pētījumi tika veikti Rīgas Tehniskās universitātes laboratorijā šādos virzienos:

- cietības noteikšana;
- ķīmiskā sastāva analīze;
- metalogrāfiskā analīze.

Kā arī iegūtie dati tika aprobēti neatkarīgā laboratorijā *KIWA "Inspecta Latvija"*. Aprobācijas dati parādīti 8.pielikumā.

Izpētei ņemto *M-24* bultskrūvju vispārējs kopskats parādīts (3.128. att.).



3.128. att. Pētāmo *M24* bultskrūvju 10.–14. paraugs

Dati par nobraukumu un bultskrūvju darbības laiku motorvagonos parādīti (3.30. tab.).

3.30.tabula

Dati par bultskrūvju darbību

Parauga Nr.	Vagona Nr.	TR-3 remonta izpildes datums	Atteiču datums	Darbības laiks, dienas	Nobraukums, km
10.	Nr. 1342-02	12.12.2019.	29.06.2020.	201	59 348
11.	Nr. 3034-06	23.05.2020.	30.10.2020	160	64 078
12.	Nr. 7117-04	20.11.2020	02.01.2021.	43	17 124
13.	Nr. 7113-06	20.04.2020	03.06.2021.	408	114 400
14.	Jauna bultskrūve	-	-	-	-

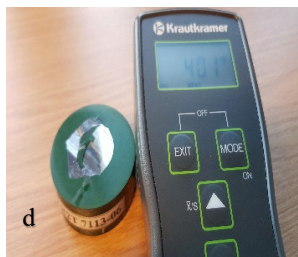
Pirmajā pētījuma posmā Rīgas Tehniskās universitātes laboratorijā tika veikta tērauda cietības pārbaude pēc Brineļa skalas *HB* [46] izmantojot ierīci "*MIC 10*" [30]. Lai iegūtu lielāku eksperimenta precizitāti, mērījumi tika veikti 5 punktos visā paraugu šķērsgrīzumā. Iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar *ISO 898-1:2013* [19] standarta datiem tērauda markai *4Cr41*. Cietības mērījumu rezultāti parādīti (3.129; 3.130 att.). un apkopoti (3.31. tab.).





3.129. att. Bultskrūvju cietības pārbaude.

a – 10. paraugs; b – 11 paraugs.



3.130. att. Bultskrūvju cietības pārbaude:

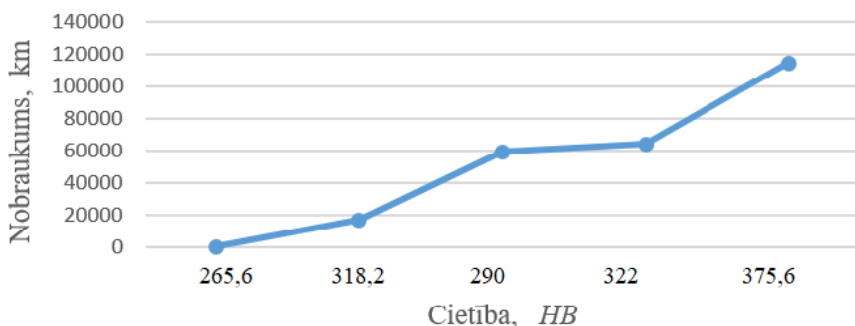
c– 12. paraugs; d – 13. paraugs; e 14. paraugs (jauna bultskrūve).

3.31. tabula

Bultskrūvju cietības pārbaude pēc Brinela metodes *HB*

Cietības mērījumi <i>HB</i>	Mērījuma skaits					Average
	1	2	3	4	5	
10.paraugs	281	284	322	278	285	290
11.paraugs	306	325	299	300	380	322
12.paraugs	338	325	313	294	321	318,2
13.paraugs	439	430	280	328	401	375,6
14.paraugs	266	259	271	265	267	265,6
<i>ISO 898-1:2013</i>	316-375 HB					

Cietības *HB* atkarība no bultskrūvju nobraukuma redzama 3.131. attēla grafikā.



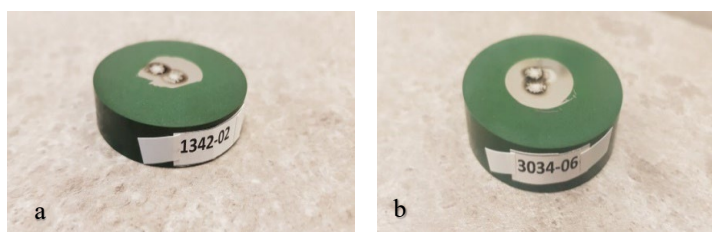
3.131. att. Sajūga bultskrūvju cietība atkarība no nobraukuma.

Pēc grafika rezultātiem varam konstatēt, ka pie nobraukumu palielināšanās, palielinās sajūgu bultskrūvju cietība, t.i., bultskrūvju materiāls kļuva stiprāks. Pie nobraukumu izmaiņas no 64 līdz 114 tūkstošiem, pētāmo bultskrūvju cietība palielinās vairāk nekā par 14 %.

Pēc cietības pārbaudes rezultātiem tika konstatēts, ka 10. paraugam vidējā cietība bija 290 HB, kas ir par 26 HB mazāk nekā noteikts ISO 898-1:2013 standartā. 14. paraugam vidējā cietība sastāda 265 HB, kas arī par 50,4 HB mazāks nekā noteikts ISO 898-1:2013 standartā. Atlikušajos 3 paraugos cietība atbilst ISO 898-1:2013 prasībām.

Pētījuma otrajā posmā tika veikta nolauztu bultskrūves 10.,11.,12. un 13. paraugam kā arī jaunas bultskrūves 14. paraugam, metāla ķīmiskā sastāva analīze un iegūto datu salīdzināšana ar EN 10083- 3:2007-01 [6] standarta datiem tērauda markai 4Cr41. Metāla ķīmiskā sastāva noteikšanai tika izmantots optiskās emisijas analizators PMI - Master PRO, kas darbojas pēc parauga virsmas lokālas izdedzināšanas principa, kam seko ķīmiskā sastāva noteikšana un iegūto datu izvide uz drukāšanas iekārtu [25]. Spektrometra precizitāte un mērījumu kļūda ogleklim un metālam sastāda 0,001 %, bet fosforam (P) un sēram (S) -0,01 %.

10., 11. paraugu kopskats pēc bultskrūvju ķīmiskā sastāva noteikšanas parādīts (3.132. att.).



3.132. att. Bultskrūvju ķīmiskā sastāva noteikšana.  
a – 10. paraugs; b – 11. paraugs.

Pēc tērauda ķīmiskā sastāva noteikšanas rezultātiem tika konstatēts, ka:

- 10. paraugam tērauda marka – nav noteikta;
- 11. paraugam tērauda marka – 34Cr4.

Paraugu ķīmiskā sastāva analīzes rezultāti parādīti (3.32. tab.).

3.32. tabula

Bultskrūvju 10. un 11. parauga metāla ķīmiskā analīze

Elementi	Mērījumi				EN 10083-3:2007-01 (41Cr4)
	10. paraugs (-----)		11. paraugs (34Cr4)		
	Min/Max	Average	Min/Max	Average	
Fe	-----	97.1	-----	97.6	
C	-----	0,505	0,300/0,370	0,366	0,38 – 0,45
Si	-----	0,187	0,000/0,400	0,186	< 0,4
Mn	-----	0,567	0,600/0,900	0,614	0,6 – 0,9
P	-----	>0,125	0,000/0,0250	0,0050	< 0,025
S	-----	0,0524	0,000/0,0250	<0,0050	< 0,025
Cr	-----	0,882	0,9/1,2	0,896	0,9 – 1,2
Mo	-----	0,0051	0,000/0,100	0,0030	-----
Ni	-----	0,0115	0,000/0,500	0,104	-----
Al	-----	0,0259	0,000/0,100	0,0250	-----
Co	-----	0,0219	-----	0,0150	-----
Cu	-----	0,016	0,000/0,200	0,167	-----
Nb	-----	<0,0093	0,000/0,0700	0,0030	-----
Ti	-----	0,0025	0,000/0,0700	<0,0020	-----
V	-----	0,0086	0,000/0,070	0,0026	-----
W	-----	<0,0250	0,000/0,100	<0,0250	-----
Pb	-----	<0,0100	0,000/0,0500	<0,0100	-----
Zr	-----	<0,0030	-----	<0,0030	-----

12., 13., un 14. parauga kopskats pēc bultskrūvju ķīmisko sastāvu noteikšanas, parādīts (3.133. att.).



3.133. att. Bultskrūvju ķīmiskā sastāva noteikšana.

a– 12. paraugs; b – 13. paraugs; c – 14. paraugs (jauna bultskrūve).

Pēc tērauda ķīmiskā sastāva noteikšanas rezultātiem tika konstatēts, ka:

- 12. paraugam tērauda marka - nav noteikta;
- 13. paraugam tērauda marka - nav noteikta;
- 14. paraugam tērauda marka - 34Cr4.

Paraugu ķīmiskā sastāva analīzes rezultāti parādīti (3.33. tab.).

## Bultskrūvju 12., 13. un 14.parauga metāla ķīmiskā analīze

Elementi	Mērījumi						EN 10083-3:2007-01 (41Cr4)
	12. paraugs . (----		13. paraugs . (----		14. paraugs . (34Cr4)		
	Min/Max	Average	Min/Max	Average	Min/Max	Average	
Fe	-----	97,9	-----	97,4	-----	97,6	
C	-----	0,261	-----	0,316	0,300/0,370	0,322	0,38 – 0,45
Si	-----	0,130	-----	0,198	0,000/0,400	0,191	< 0,4
Mn	-----	0,556	-----	0,613	0,600/0,900	0,594	0,6 – 0,9
P	-----	0,0813	-----	0,0898	0,000/0,0250	0,0671	< 0,025
S	-----	0,0130	-----	0,0193	0,000/0,0250	0,0099	< 0,025
Cr	-----	0,908	-----	0,910	0,9/1,2	0,898	0,9 – 1,2
Mo	-----	<0,0030	-----	0,0065	0,000/0,100	< 0,0030	-----
Ni	-----	0,0312	-----	0,109	0,000/0,500	0,0931	-----
Al	-----	0,0209	-----	0,0285	0,000/0,100	0,0237	-----
Co	-----	0,0051	-----	0,0157	-----	0,0134	-----
Cu	-----	0,0383	-----	0,196	0,000/0,200	0,172	-----
Nb	-----	0,0041	-----	0,0051	0,000/0,0700	< 0,0030	-----
Ti	-----	<0,0020	-----	<0,0020	0,000/0,0700	<0,0020	-----
V	-----	0,0034	-----	0,0050	0,000/0,070	0,0025	-----
W	-----	<0,0250	-----	0,0342	0,000/0,100	0,0025	-----
Pb	-----	<0,0100	-----	<0,0100	0,000/0,050	<0,0100	-----
Zr	-----	<0,0030	-----	<0,0030	-----	<0,0030	-----

Veicot tērauda ķīmiskā sastāva izpēti tika atklātas šādas neatbilstības standarta EN 10083-3:2007-01 [6] prasībām.

Oglekļa(C) saturs četros paraugos ir mazāks par normu un sastāda:

- 11. paraugam – 0,366 %;
- 12. paraugam – 0,261 %;
- 13. paraugam – 0,316 %;
- 14. paraugam – 0,322 %;

Bet 10. paraugā oglekļa saturs pārsniedz normu un ir 0,505 %.

Savukārt saskaņā ar EN 10083-3:2007-01 [6] standarta prasībām tērauda markai 4Cr41 oglekļa saturam jābūt 0,38-0,45 % robežās. Samazinoties oglekļa daudzumam tēraudā, uzlabojas tā plastiskums un palielinās stingrība (triēcienizturība). Palielinoties oglekļa saturam tērauda sastāvā, palielinās tērauda cietība, stiprība un stingrība, palielinās arī tecēšanas robeža  $\sigma_t$  un stiepes izturība  $\sigma_s$ , bet tajā pašā laikā samazinās plastiskums un triēcienizturība, un pasliktinās arī apstrādājamība un metināmība. [78]...[70].

Ķīmiskā elementa (Si) silīcija daudzums visos piecos paraugos atbilst pieļaujamajām normām un –11. paraugam – 0,187 %; 12. paraugam – 0,186 %; 13 paraugam – 0,130 %, 14 paraugam – 0,198 % un 15. paraugam – 0,191 %, un nepārsniedz procentuālo sastāvdaļu, kas saskaņā ar

EN 10083-3:2007-01 [6] nedrīkst būt lielāka par 0,4 %. Silīcijs palielina tērauda izturību, gandrīz nemazinot tā plastiskumu.

Ķīmiskais elements (*Mn*) mangāns visos paraugos atbilst pieļaujamajam procentam un attiecīgi sastāda 0,568 %; 0,614 %; 0,556 %, 0,613 % un 0,594 %. Saskaņā ar EN 10083-3:2007-01 [6] mangāna procentuālajam daudzumam jābūt no 0,5 līdz 0,8 %. Mangānu pielieto, lai atdalītu skābekli un sēru no tērauda, kā arī tas samazina sarkantrausluma risku.

Hroma (*Cr*) saturs visos paraugos atbilst pieļaujamajām normām un sastāda attiecīgi 0,882 %; 0,896 %; 0,908 %, 0,91 % un 0,898 %, saskaņā ar EN 10083-3:2007-01 [6] hroma saturam jābūt 0,8-1,10 %. Hroms palielina tēraudu spēju termiski sacietēt, un tā izturību pret koroziju un oksidāciju, kā arī nodrošina stiprības pieaugumu pie paaugstinātām temperatūrām. Papildus norādītajiem elementiem paraugos tika konstatēti arī šādi ķīmiskie elementi, kas *4Cr4I* tērauda markai nebija norādīti EN 10083-3:2007-01 [6] standartā:

Niķelis (*Ni*) – niķelis palielina tērauda stiprību un tā relatīvo viskozitāti. Niķelis aiztur tērauda graudu augšanu pie tā uzkaršējuma un veicina smalkas kristāliskas struktūras veidošanos. Procentuālais daudzums paraugos sastāda: 0,0115 %; 0,104 %; 0,0312 %, 0,109 %, 0,0931 %.

Varš (*Cu*) – varš samazina tērauda aukstuma trauslumu. Vara klātbūtne nelielos daudzumos uzlabo tērauda pretkorozijas īpašības, kā arī padara to izturīgāku, procentuālais daudzums paraugos sastāda: 0,167 %; 0,0383 %, 0,196 %, 0,172 %.

Kobalts (*Co*) – kobalts paaugstina karstumizturību, magnētiskās īpašības, paaugstina triecienizturību, procentuālais daudzums paraugos sastāda: 0,0150 %; 0,0051 %; 0,0157 %; 0,0134 %.

Titāns (*Ti*) – titāns palielina stiprību un blīvumu tēraudam, veicina graudu smalcināšanu, ir labs deoksidētājs, uzlabo apstrādājamību un izturību pret koroziju, procentuālais saturs paraugā Nr.10 sastāda – 0,0025 % pārējos četros paraugos ir mazāks par <0,0020 %.

Vanādijs (*V*) – palielina cietību un stiprību, graudu smalcināšanu. Palielina tērauda blīvumu, un ir labs deoksidētājs, procentuālais daudzums paraugos sastāda: 0,0086 %; 0,0026 %; 0,0034 %; <0,0050 %; <0,0025 %.

Alumīnijs (*Al*) – samazina graudu izmēru, dodot paaugstinātu karstumizturību, alumīnija saturs palielina tērauda fizikālās - mehāniskās īpašības, procentuālais daudzums paraugos sastāda: 0,0259 %; 0,0250 %; 0,0209 %; 0,0285 %; 0,0237 %.

Pētījuma procesā bultskrūvju materiālā tika konstatēti kaitīgi fosfora un sēra piemaisījumi. Fosfora (*P*) procentuālais daudzums 10. paraugā sastāda – 0,125 %, 11. paraugā – 0,0050 %, 12. paraugā – 0,0813 %, 13. paraugā – 0,0898 %, 14. paraugā – 0,0671 %. Četros paraugos fosfora saturs būtiski pārsniedz EN 10083-3:2007-01[6] standartā noteiktās normas, kam jābūt mazāk par 0,025 %.

- Fosfors (*P*) samazina metāla plastiskumu, veido ar dzelzi  $Fe_3P$  savienojumu. Šī savienojuma kristāli ir ļoti trausli, kā rezultātā tērauds iegūst augstu trauslumu aukstā stāvoklī - aukstumtrauslumu. Tas arī noved pie triecienizturības samazināšanās, īpaši zemā temperatūrā. Fosforam nokļūstot kristāliskajā režģī, palielinās metāla atoma kristāliskā režģa izmērs, kā rezultātā starpatomiskās saites vājinās, kas savukārt noved pie mikroplaisu veidošanās nemetālu ieslēgumu zonā un tālāk noved pie bultskrūvju sagraušanas. [57]...[41].
- Sērs (*S*) nešķīst dzelzi, tāpēc jebkurš tā daudzums savienojumā ar dzelzi veido dzelzs sulfīdu  $FeS$ , kurš parādās ieslēgumu veidā. Sēra klātbūtne tēraudā negatīvi ietekmē

plastiskumu, stingrību, palielina tērauda nodilumu, samazina noguruma izturību un samazina izturību pret koroziju.  $FeS$  savienojums padara tēraudu trauslu augstā temperatūrā, kas izraisa sarkantrauslumu. [52]...[41].

Pēc ķīmiskā sastāva pētījumu rezultātiem tika konstatēts, ka sēra ( $S$ ) procentuālais daudzums paraugos atbilst normai, bet fosfora ( $P$ ) procentuālais daudzums atbilst normai tikai 11. paraugā, bet četriem paraugiem pārsniedz pieļaujamo vērtību:

- 10. paraugam par 0,1 %;
- 12. paraugam par 0,0563 %;
- 13. paraugam par 0,0648 %;
- 14. paraugam par 0,0421 %.

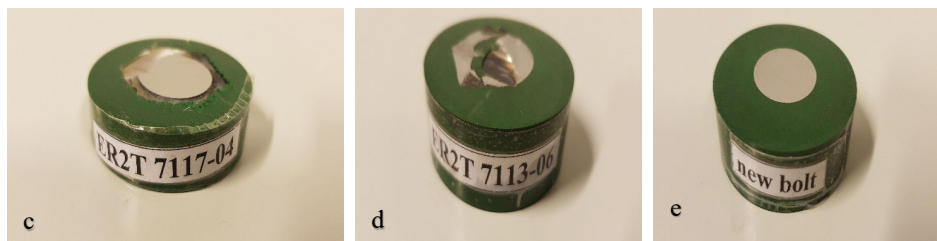
Pie paaugstināta fosfora satura klātbūtnes palielinās tērauda aukstuma trauslums, ko apstiprina atteicu statistisko datu analīze, kur redzams, ka lielākais skaits atteicu notiek ziemas periodā.

### 3.16. Bultskrūvju paraugu metalogrāfiskā analīze

Defektu izveidošanās mikrostrukturā noteikta ar metalogrāfiskās analīzes palīdzību, lai noteiktu bultskrūvju mikrostrukturā kritisko defektu veidošanos atkarībā no darbības laika vai nobraukuma. Metalogrāfiskā analīze ietver sevī metālu un sakausējumu mikrostrukturā, kā arī to makrostrukturā izpēti metalogrāfijas laboratorijā, izmantojot speciālu aprīkojumu un specializētas metodes. [15]. Metalogrāfiskās analīzes aprīkojuma pamatā ir metalogrāfiskais mikroskops. Tērauda paraugu struktūras metalogrāfiskās analīzes veikšanai tika izmantots moderns elektroniskais mikroskops *Carl Zeiss Axiovert 40 MAT* ar iegūto datu izvadi datorā [1]. Šim nolūkam bultskrūvju salauztās daļas tika nopulētas līdz spoguļstāvoklim (3.136 un 3.137 att.) uz *Mecattech 334* stenda, pielietojot trīs dažāda raupjuma abrazīvos diskus. Pulēšana līdz spoguļstāvoklim tika veikta, lai izpētītu defektu klātbūtni tērauda mikrostrukturā ieslēgumu veidā un plaisu klātbūtni [12]. Metāla piemaisījumi noteikti ar mikroskopu, izdarot palielinājumu ( $\times 50$ ), ( $\times 100$ ) un ( $\times 200$ ), un parādīti (3.138; 3.139; 3.140; 3.141; 3.142 att.). Pēc mikrodefektu un piemaisījumu pētījuma rezultātiem tika veikta tērauda mikrostrukturā izpēte, pielietojot atoglekļošanas metodi. Atoglekļošana veikta ar 5 %  $HNO_3$  slāpekļskābes šķīdumu. Mikrostrukturā pētīta, izmantojot *Carl Zeiss Axiovert 40 MAT* elektronu mikroskopu ar palielinājumu ( $\times 500$ ). Rezultāti parādīti (3.141 a, b att.) un (3.142. c, d, e att.).

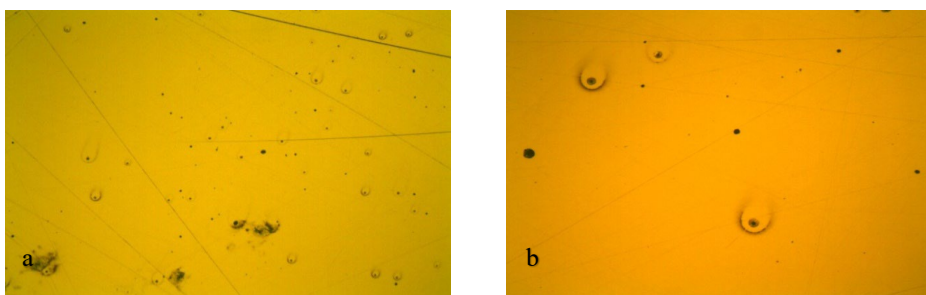


3.134. att. Paraugu sagatavošana metalogrāfiskai analīzei:  
a – 10. paraugs; b – 11. paraugs.

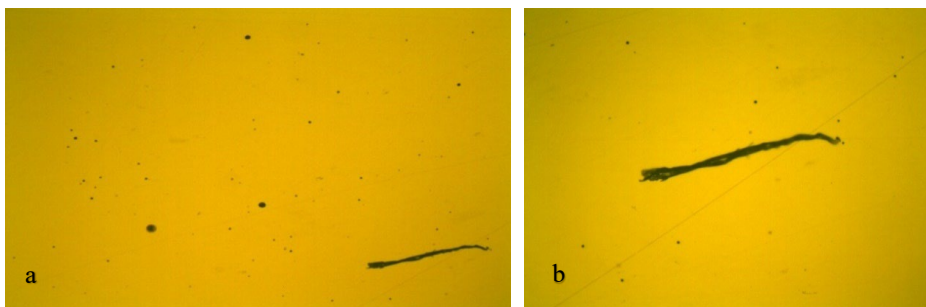


3.135. att. Paraugu sagatavošana metalgrafiskai analīzei:  
c 12. paraugs; d - 13. paraugs; e - 14. paraugs.

Pamatojoties uz pētījuma rezultātiem, bultskrūvju metalgrafiskajā struktūrā tika konstatēta piemaisījumu un plaisu esamība. Bultskrūvju *M-24* metalgrāfiskā struktūra parādīta (3.136; 3.137; 3.138; 3.139; 3.140 att.).

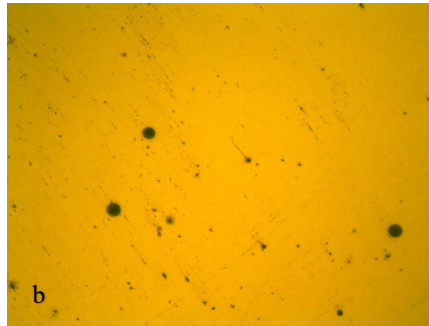


3.136. att. 10. paraugs pētāmo bultskrūves mikrostruktūra, palielinājums a –  $\times 50$ ; b –  $\times 200$ .

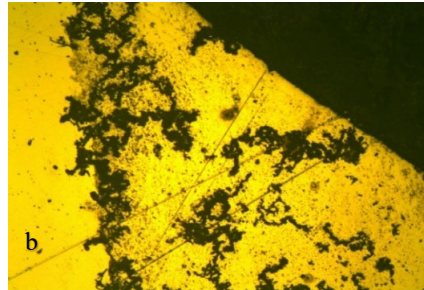


3.137. att. 11. paraugs pētāmo bultskrūves mikrostruktūra, palielinājums. a –  $\times 50$ ; b –  $\times 200$ .





3.138. att. 12. paraugs pētāmo bultskrūves mikrostruktūra, palielinājums: a –  $\times 50$ ; b –  $\times 200$ .

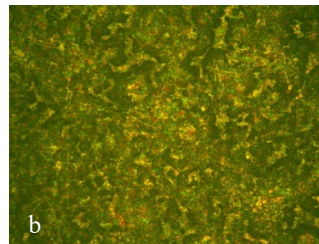
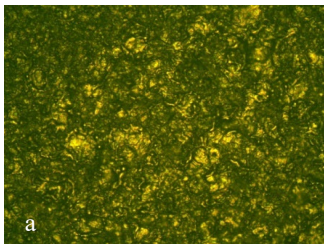


3.139. att. 13. paraugs. pētāmo bultskrūves mikrostruktūra, palielinājums a –  $\times 50$ ; b –  $\times 200$ .



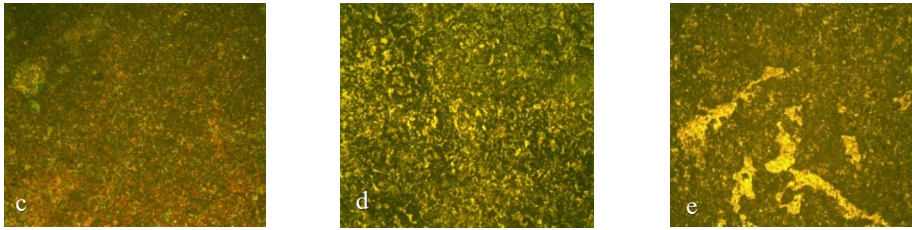
3.140. att. 14. paraugs pētāmo bultskrūves mikrostruktūra, palielinājums a –  $\times 50$ ; b –  $\times 200$ .

Pēc tam tika veikta visu piecu paraugu kodināšana ar 5 % slāpekļskābes ( $HNO_3$ ) šķīdumu, lai noteiktu visu paraugu tērauda struktūru, kodināšanas rezultāti parādīti (3.141; 3.142 att.).



3.141. att. Metāla struktūra pēc kodināšanas ar slāpekļskābi ( $HNO_3$ ), palielinājums  $\times 500$ .  
a – 10. paraugs; b – 11. paraugs.





3.142. att. Metāla struktūra pēc kodināšanas ar slāpekļskābi ( $HNO_3$ ), palielinājums  $\times 500$ .  
c – 12. paraugs; d.– 13. paraugs; e – 14. paraugs.

Tērauda mikrostruktūras pētīšanas rezultātā ar elektroniskā mikroskopa palīdzību tika konstatēta nemetālisku piemaisījumu klātbūtne paraugos. No 10., un 12. parauga izpētes iegūtajiem datiem (3.136 un 3.136 att.) konstatēta neliela daudzuma nemetālisku piemaisījumu klātbūtne. 11., un 13. parauga (3.137. un 3.139. att.) konstatēta liela skaita nemetālisku piemaisījumu klātbūtne, papildus piemaisījumu un defektu klātbūtnei paraugos tika konstatēta plaisas parādīšanās 11. paraugā, konstatēta mikroplaisa, un 13. paraugā makro plaisas klātbūtne, kuras rezultātā notika bultskrūves sagraušana. Pētot jaunas bultskrūves mikrostruktūru (3.140 att.) ar  $\times 50 \times 200$  palielinājumu, tika konstatēti nelieli defekti un piemaisījumu skaits.

Metalogrāfiskās analīzes rezultātā visos paraugos tika konstatēts liels skaits nemetālisku piemaisījumu. *M-24* bultskrūvju sagraušana ekspluatācijas laikā bieži var sākties no sākotnējiem metalurģiskas izcelsmes defektiem, ko izsauc nemetāliskie piemaisījumi. Kuri, palielinoties bultskrūves darbības laikam (nobraukuma), palielinās skaitā un izmēros, kas vēlāk izraisa lūzumus.

Pēc kodināšanas rezultātiem visu piecu paraugu struktūra ferīta-perlīta. Ferīta struktūra ar perlītu ir visizplatītākā starp oglekļa līdzteuktoīdiem tēraudiem. Šāda struktūra raksturīga gandrīz visiem konstrukciju tēraudiem. Ferīts ir ciets oglekļa šķīdums *ACR* (apjomīgs centrēts kristāliskais režģis) dzelzī. Perlīts ir plastisks, smalki izkliedēts ferīta maisījums ar dzelzs karbīdu (cementīts  $Fe_3C$ ). Šīs divas sastāvdaļas veido smalki izkliedētu maisījumu, kurā bez optikas palīdzības sastāvdaļas viena no otras nav atšķiramas, tāpēc tās tika apvienotas vienā struktūras komponentā - perlītā. Ferītam perlītā ir pārpalikuma, bet ne otrreizējs raksturs, tas ir, parādīšanās polimorfās pārvēršanās procesā, bet ne izšķīšanas izmaiņu rezultātā. Ferīta-perlīta struktūra ir struktūra, kas veidojas austenīta vienmērīgas sadalīšanās rezultātā oglekļa tēraudos, ar oglekļa saturu mazāku par 0,8 % [15]. Pēc paraugu kodināšanas ar 5% slāpekļskābes  $HNO_3$  šķīdumu, izmaiņas paraugu mikrostruktūrā nav konstatētas. Mikrostruktūras izpēte parādīja atšķirīga rakstura piemaisījumu un plaisu klātbūtni paraugos.

### 3.17. Bultskrūvju *M-24* mikrostruktūras defektu veidošanās analīze pie dažādiem motorvagonu nobraukuma diapazoniem

Pētījuma mērķis – pēc mikrostruktūras analīzes, ar dažādu bultskrūvju nobraukuma diapazonu, identificēt un noteikt defektu un mikroplaisu parādīšanos struktūrā, identificēt un noteikt iespējamo kritisko ieslēgumu un defektus veidošanos mikrostruktūras, kas var ietekmēt *M-24* bultskrūvju sairšanu. Kā arī veikt izpēti, kā mainās mikrostruktūra atkarībā no bultskrūves nobraukuma uz vagona.

Lai pētītu mikrostruktūras defektu veidošanos, tika ņemtas jaunas gumijas korda sajūga stiprināšanas bultskrūves, kā arī noņemtas bultskrūves no motorvagoniem ar pieciem dažādiem nobraukuma diapazoniem (no 0 līdz 240 000 km):

- 0 jauns km;
- 50 tūkst. km;
- 100 tūkst. km;
- 150 tūkst. km;
- 200 tūkst. km;
- 240 tūkst. km –TR-3 nobraukuma norma.\*

\* TR-3 remonta pieļaujamā augšējā robeža – 264 tūkst. km.

Tā kā ar precīzu nobraukumu lielumu nav iespējams noņemt bultskrūves no motorvagona, demontāža notika  $\pm 10\%$  robežās no noteiktajām nobraukuma normām.

Mikrostruktūras defektu noteikšana M-24 bultskrūvju metālā, kas noņemts ar dažādiem nobraukuma diapazoniem, tika veikta, lai noteiktu ieslēgumu un plaisu klātbūtni paraugos [13]. Bultskrūvju darba dati ir redzami 3.34. tabulā.

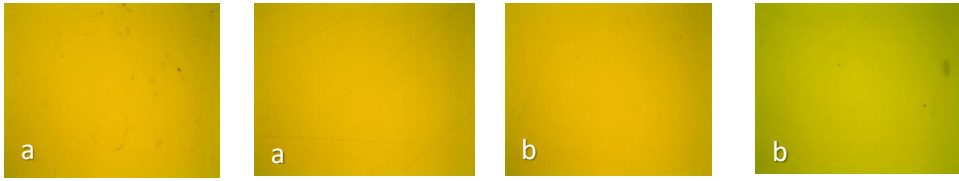
3.34.tabula

Dati par bultskrūvju darbību

Parauga Nr.	Vagona Nr.	TR-3 remonta izpildes datums	Bultskrūves darbības laiks uz vagonā, dienas	Bultskrūves nobraukums uz vagona, km
15	Jaunā bultskrūve	-	-	0
16	Jaunā bultskrūve	-	-	0
17	989-04	31.03.2021	126	54 510
18	8029-08	23.04.2021	130	59 378
19	1300-10	04.12.2020	257	109 016
20	7117-06	27.11.2020	274	104 132
21	991-04	28.08.2020	373	154 608
22	8004-02	13.07.2020	385	152 668
23	7113-08	31.03.2020	518	202 872
24	2207-02	29.10.2019.	487	192 918
25	1317-10	30.04.2019.	706	261 878
26	7113-04	26.08.2019.	698	251 236

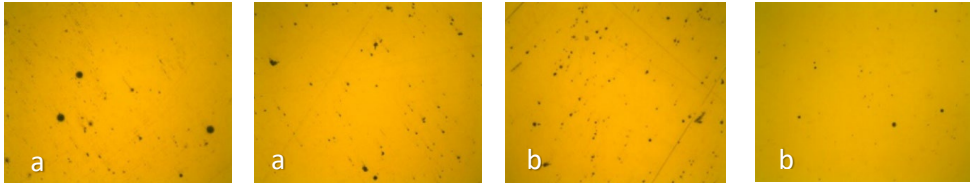
Defektu un plaisu esamības pētījumi tika veikti RTU laboratorijā, izmantojot *Carl Zeiss Axiovert 40 MAT* [14] elektronisko mikroskopu, ar palielinājumu  $\times 50$ ,  $\times 100$  un  $\times 200$ . Pētījuma rezultāti parādīti (3.143-3.148 att.).

1. Jaunas bultskrūves nobraukums 0 km.



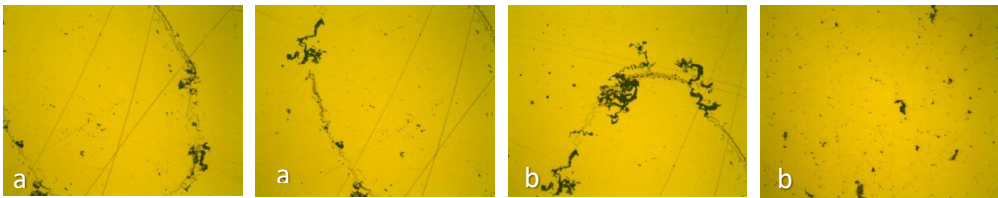
3.143. att. Jaunu bultskrūvju mikrostruktūra bez nobrukuma, palielinājums  $\times 50$ :  
a- 15. paraugs; b- 16. paraugs.

2. Nobraukums 50 tūkst. km.



3.144 att. Bultskrūvju mikrostruktūra ar nobrukumu, palielinājums  $\times 100$ :  
a- 17. paraugs; b- 18. paraugs.

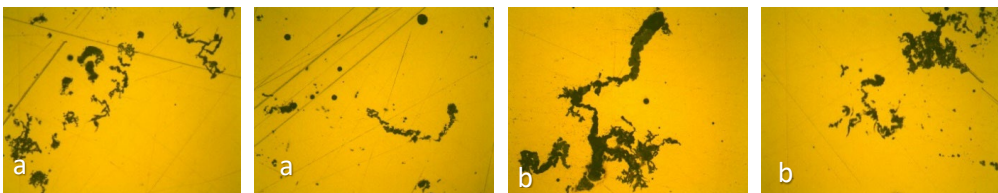
3. Nobraukums 100 tūkst. km.



3.145. att. Bultskrūvju mikrostruktūra ar nobrukumu, palielinājums  $\times 100$ :  
a - 19. paraugs; b - 20. paraugs.

Pie tālāka nobraukumu pieauguma parādās jaunas mikroplaisas un palielinās tos izmērs. Notiek tālāka defektu uzkrāšanās un palielināšanās, kā arī notiek defektu saplūšana un pāreja pie lielāku mikroplaisu veidošanas.

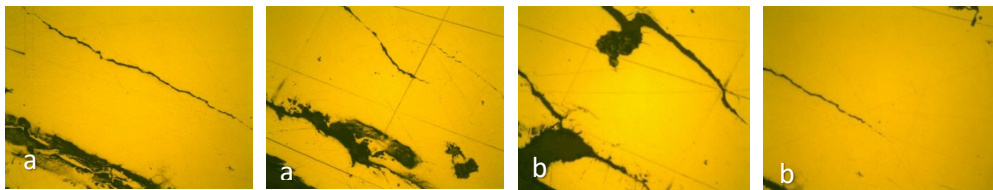
4. Nobraukums 150 tūkst. km.



3.146. att. Bultskrūvju mikrostruktūra ar nobrukumu, palielinājums  $\times 100$ :  
a – 21. paraugs; b – 22. paraugs.

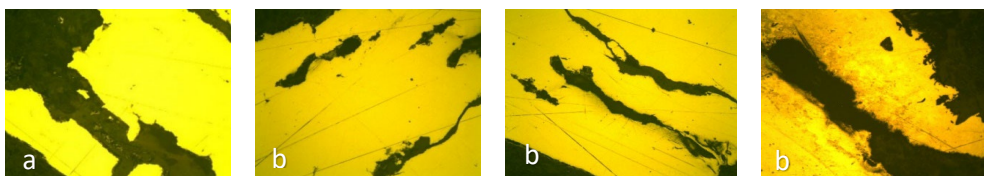
Notiek galveno plaisu veidošanās sagatavošanās stadija, kuras rezultātā notiek defektu palielināšanās un saplūšana, pāreja uz apjoma vai izkaisīto bultskrūvju materiāla sairšanu [68].

#### 5. Nobraukums 200 tūkst. km.

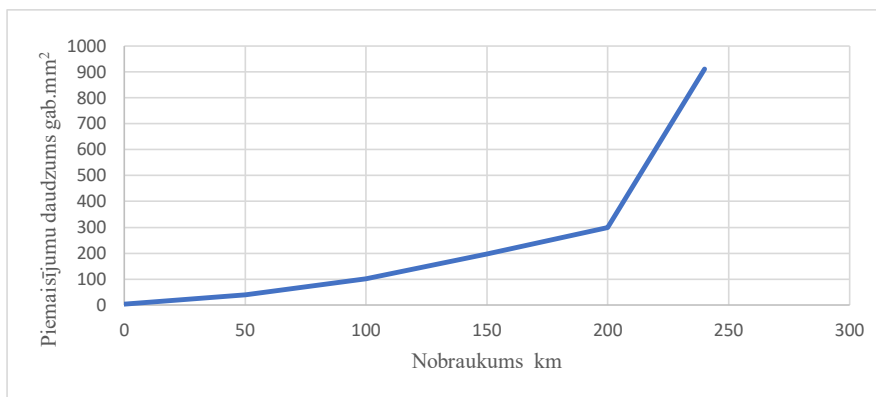


3.147. att. Bultskrūvju mikrostruktūra ar nobrukumu, palielinājums  $\times 200$ :  
a – 23. paraugs; b – 24. paraugs.

#### 6. Nobraukums 240 tūkst. km. un vairāk, demontēti TR-3 remontu laikā.



3.148. att. Bultskrūvju mikrostruktūra ar nobrukumu, palielinājums  $\times 200$ :  
a – 25. paraugs; b – 26. paraugs.



3.149. att. Piemaisījumu(defektu) daudzums  $\text{mm}^2$  atkarība no nobraukuma.

Pēc mikrostruktūras metalogrāfiskās analīzes rezultātiem pie dažādiem nobraukuma diapazoniem, tika konstatēts, ka bultskrūvju darbības sākumposmā, līdz 50 tūkst. km nobraukumam, būtiski ieslēgumi un mikrostruktūras izmaiņas netiek konstatētas. Tomēr, pētot bultskrūves, kuru nobraukums ir 100 tūkst. km vai vairāk, tiek novērota pakāpeniska mikrodefektu (ieslēgumu) uzkrāšanās, kas noved pie to kritiska daudzuma veidošanās un liela skaita mikroplaisu

parādīšanās mikrostruktūrā. Mikroplaisu un plaisu parādīšanās un attīstība būtiski ietekmē bultskrūvju drošumu, kas vēlāk noved līdz to sagraušanai.

Nemetāliskiem piemaisījumiem ir izšķiroša nozīme pie mikroplaisu parādīšanās, kas savukārt var izraisīt makroplaisu parādīšanos un attiecīgi bultskrūvju sairšanu. Jebkurš faktors, kas veicina plaisu rašanos un to attīstību nemetālisku piemaisījumiem tuvumā, rada lielu apdraudējumu, kas var izraisīt lēnu vai ātru bultskrūvju sairšanu [57]...[41]. Acīmredzams, ka tādi parametri kā temperatūra, ātrums, spēks, masa lielā mērā nosaka iedarbības metodes mehānismu mikrolūzumu rašanas raksturu un to attīstību nemetālisku piemaisījumu tuvumā.

### **1.18. Bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīču projektēšana**

Gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves visā kalpošanas laikā daudzkārt pakļautas periodiskai mainīgu slodžu iedarbībai. Pie ievērojamu mainīgo un triecienslodžu un sitienu slodžu iedarbības materiāla spēja sacietēt ir izsmelta, un bultskrūvju materiāls var tikt pakļauts noguruma slodzēm un kā rezultāta periodiski notiek augšējās virsmas slāņa izdrupšana [41]...[42]. Bultskrūvju materiāla izdrupšanas piemērs parādīts (3.150. att.).



3.150. att. Metāla izdrupums triecienslodzes iedarbību rezultātā.

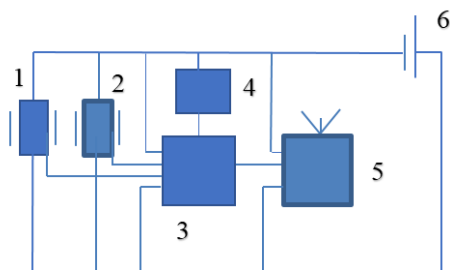
Tā kā stiprinājuma bultskrūves darbības laikā tika pakļautas trieciena vibrācijas slodzei, lai samazinātu gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju atteices skaitu, jāatrod risinājums M24 bultskrūvju atteices problēmai. Šiem mērķiem tiek piedāvāts izveidot ierīci, kas ļauj kontrolēt trieciena spēku, ko uztver gumijas korda sajūga bultskrūves, un ar šo ierīces ieviešanu ekspluatācijā, panākt atteices skaita samazināšanos starpremonta periodā.

Daudzi pētnieki Eiropā un ASV ir pētījuši vibrācijas sensoru darbības projektēšanas un uzlabošanas problēmas. Viens no svarīgiem aspektiem ir vibrācijas sensoru izmaksas, kas ir aprakstītas zinātniskajos rakstos [35]...[32].

Izgdrojums var tikt izmantots mašīnbūvē, kuģubūvē un citās nozarēs, lai kontrolētu vilces piedziņas un citu bultskrūvju konstrukciju deformācijas spēkus.

Izgdrojuma mērķis ir izveidot bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīci, kas dotu iespēju pastāvīgi uzkrāt un analizēt datus par trieciena spēku, ko uztver bultskrūves transportlīdzekļa ekspluatācijas laikā, lai samazinātu dzelzceļa transporta ritošā sastāva vai citu nozaru transportlīdzekļu neplānoto remontu skaitu tā bojājumu dēļ, kā arī lai

samazinātu avāriju vai citu negadījumu skaitu [40]. Izgudrojuma ierīču blokshēma redzama 3.151. attēlā.



3.151. att. Izgudrojuma ierīces blokshēma:

1 – vibrācijas devējs; 2 – trieciena devējs; 3 – mikrokontroleris; 4 atmiņas modulis; 5 datu pārraides bloks; 6 – barošanas bloks.

Izgudrojuma mērķis ir sasniegts šādi: bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīce sastāv no korpusa, kam iekšā uzstādīti šādi elementi – vibrācijas devējs (4) un trieciena devējs (5), mikrokontroleris (6), datu pārraides bloks (7) un barošanas bloks (8). Par vibrācijas devēju (4) un trieciena devēju (5) var tikt izmantots pjezoakselerometrs – sensors, kas pārvērš vibrācijas vai trieciena spēka vērtību elektroniskā signālā [32]...[27].

Izgudrojuma ierīce darbojas šādi: sasniedzot iepriekš noteiktu un uzstādītu trieciena spēku, kuru var noteikt, piemēram, saskaņā ar metodiku, aprakstītu informācijas avotā [35], nostrādā vibrācijas devējs (1) un/vai trieciena devējs (2), vai abi devēji (1) un (2). Signāls no vibrācijas un trieciena devējiem (1), (2) tiek nosūtīts uz mikrokontroleri (3), kas paredzēts, lai apstrādātu no vibrācijas un trieciena devēja (1), (2) saņemto elektronisko signālu un uzglabātu to mikrokontrolera (3) atmiņā ar turpmāku datu nosūtīšanu izmantojot vispārzināmu datu pārsūtīšanas protokolu (*IEEE 802.11g standarts*) Dati var tikt nosūtīti arī uz datu rādīšanas ierīcē instalētu mobilo lietojumprogrammu, izmantojot Bluetooth (raidtehnoloģija, kas izmanto mazas jaudas raidītājus un kas nodrošina pārnēsājamu datu pārraides ierīču savienošānu savā starpā Bluetooth tehnoloģijas ietvaros, ir radiuztvērējs, kas raida un uztver signālus 2.45 GHz joslā) sakaru kanālu (ar datu pārraides bloku (5)) [26]. Šie dati izmantojami ritošā sastāva tehniskās apkopes vai atjaunošanas remonta laikā. Izgudrojuma ierīces devēju (trieciena devējs (2) un vibrācijas devējs (1)) un elektronisko moduļu barošana veikta ar barošanas bloka (6) palīdzību.

Izgudrojuma ierīce bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēka kontrolei elektrovilciena motorvagona (piemēram, *ER2* vai *ER2T* sērijas elektrovilciena motorvagona) sastāv no korpusa ar iekšā uzstādītiem šādiem elementiem: vibrācijas devējs (1) un trieciena devējs (2), mikrokontroleris (3), atmiņas moduli (4) datu pārraides bloks (5) un barošanas bloks (6). Izgudrojuma ierīces korpusu ir izgatavots no tērauda ar cietību  $HB \geq 270$ , ieteicama korpusa cilindriska forma. Par vibrācijas un trieciena devējiem (1) un (2) izmanto pjezoakselerometrus – sensori, kas pārvērš vibrācijas vai trieciena spēka vērtību elektroniskā signālā. Pjezoakselerometrs satur pjezoelektrisko plēvi, kas deformējoties (liecoties), rada potenciālu starpību, kā rezultātā pjezoakselerometra izejā veidojas spriegums, kas atbilst vibrācijas līmenim vai trieciena spēkam[72]. Tiklīdz spriegums pārsniegs iepriekš iestatītu sliekšņa vērtību, radīto elektronisko signālu saņems mikrokontroleris (3).

Lai kontrolētu bultskrūvju stiprinājumu trieciena un vibrācijas spēku elektrovilciena motorvagona (piemēram, *ER2* vai *ER2T* sērijas elektrovilciena motorvagoni) ekspluatācijas laikā vai tehniskās apkalpošanas laikā korda sajūga atloku aprīko ar izgudrojuma ierīci. Izgudrojuma ierīce darbojas saskaņā ar šādu darbības principu:

1. Aprēķina un iestata trieciena spēka robežvērtību;
2. Pēc bultskrūves spēku aprēķiniem iegūst minimālo trieciena sagraušanas spēku. Iegūtie dati tiek salīdzināti ar bultskrūvju lūzuma spēku, veicot triecenviskozitātes testus;
3. Priciena devēju (2) ieregulē uz minimālo trieciena sagraušanas spēku;
4. Pēc trieciena devēja (2) vai vibrācijas devēja (1) nostrādāšanas trieciena vai vibrācijas dati elektroniskā signāla veidā tiek nosūtīti uz mikrokontrolleri (3);
5. Mikrokontrolleris (3) apstrādāto no trieciena devēja (2) un vibrācijas devēja (1) saņemto elektronisko signālu uzglabā atmiņas modulī (4)
6. Atkarībā no atmiņas moduļa(4) lieluma un aizpildījuma, informācija var tikt saglabāta no 4 mēnešiem līdz 2 gadiem;
7. Uzkrātie dati tiek nosūtīti uz mašīnista un/vai apkalpošanas personāla datu rādīšanas ierīci, piemēram, planšetdatora (mobilo telefonu) ar lietojumprogrammas palīdzību. Datu pārraide notiek saskaņā ar vispārzināmu pārsūtīšanas protokolu (*IEEE 802.11g standarts*), izmantojot Bluetooth sakaru kanālu ar datu pārraides bloku (7);
8. Uzkrātā informācija tiek apstrādāta, veicot tehnisko apkopi vai atjaunošanas remontu vienu reizi 8 dienās;
9. Izgudrojuma ierīces iebūvēto devēju (trieciena devējs (2) un vibrācijas devējs (1)) un elektronisko moduļu barošana notiek ar barošanas bloka (6) palīdzību. Barošanas bloku (6) nomaiņa tiek veikta 1 reizi 3–6 mēnešos (atjaunošanas remonta izpildes laikā).

Izgudrojuma ierīces ieviešana ekspluatācijā ļaus iegūt objektīvus datus par trieciena spēku un vibrācijas slodzēm uz bultskrūvēm. Uzkrājot informāciju un to regulāri apstrādājot, var novērst gumijas-korda sajūga bultskrūvju bojājumus un attiecīgi samazināt elektrovilcienā neplānoto remontu skaitu. Izgudrojums var tikt izmantots jebkura tipa dzelzceļa ritošajā sastāvā, kā arī metropolitēna vagoniem. Izgudrojuma ierīci var izmantot mašīnbūvē, kuģu būvē un citās nozarēs, lai kontrolētu gulšņu defektu, vārpstu novirzes, zobratu pārvažu stāvokli un citas konstrukcijas, uz kuru nostiprināšanas bultskrūvēm darbojas deformācijas spēki. Ja, apstrādājot no izgudrojuma ierīces saņemto informāciju tehniskās apkopes (vai atjaunošanas remonta) laikā, konstatētas daudzkārt pārsniegtas pieļaujamās slodzes, tad bultskrūves jānomaina pret jaunām. Tādējādi tiek novērsta nepieciešamība veikt neplānotus remontus bultskrūvju bojājuma dēļ, kas ir saistīti ar uzņēmuma lieliem finansiālajiem tēriņiem. [8]...[9].

Ekspluatācijā ar triecienvibrācijas ierīces palīdzību, tiek piedāvāts kontrolēt gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju kopējo sistēmu, izmērot gumijas korda sajūga vibrācijas frekvenci un trieciena spēku, ko uztver gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves.

Saskaņā ar informācijas avota [35] veikto aprēķinu, ja *LDz* uzņēmums kurš apkalpo elektrovilcienus ieviestu izgudrojuma ierīces izmantošanu visiem *ER2* vai *ER2T* sērijas elektrovilciena motorvagoniem un ieviešanas izmaksas nepārsniegtu 15 tūkstošus Euro, tad 2 gadu laikā izmaksas atmaksātos (izgudrojuma ierīces lietošana kļūst rentabla) neplānoto remontdarbu skaitu samazinājuma dēļ, un 3 gadā uzņēmums saņems peļņu ne mazāku par 15 tūkst. Euro. Tālākā perspektīvā gatavo produktu var piedāvāt Eiropas un citām valstīm, uzstādot triecienvibrācijas ierīci uz dzelzceļa ritošā sastāva un metropolitēna vagoniem vai izmantojot to citās rūpniecības nozarēs, kā arī var izskatīt triecienvibrācijas ierīces adoptācijas perspektīvu uz jaunajiem,

AS «Pasažieru vilciens» iegādātajiem elektrovilcieniem. Turklāt šo izgudrojumu var pielietot mašīnbūvē, lidmašīnu būvē, kuģubūvē un citās jomās bultskrūvju tehniskā stāvokļa kontrolei. Priekšlikumi projekta īstenošanai tika aprobēti RTU CoLab. programmā 05.2020-10.2020 un atzīti par darbšpējīgiem, ar iespēju projektam piesaistīt finansējumu.

### 3.19. Triecienvibrācijas ierīces testēšana

Viens no galvenajiem punktiem, kas nosaka triecienvibrācijas ierīces izmantošanas efektivitāti konstrukcijas stiprinājuma elementu stāvokļa novērtēšanai ekspluatācijas apstākļos, ir informatīvā parametra vērtības atkarība no triecienu spēka. Tika veikta triecienvibrācijas ierīces prototipa testēšana, lai iegūtu sagraušanas slodzes rezultātus un noteiktu triecienvibrācijas ierīces iegūtos datus. Veiksmīgai projekta īstenošanai triecienvibrācijas ierīces nodošanai ekspluatācijā nepieciešams veikt ierīces kalibrēšanu izmantojot ar datorprogrammas palīdzību iegūtos datus, salīdzinot tos ar sagraušanas slodzes lielumu.

#### • Triecienvibrācijas testēšana uz stenda.

1. Pirmajā posmā tika veikta triecienvibrācijas ierīces testēšana RTU laboratorijā uz *PENDULUM CHARPY 300J/D* aprīkojuma. Testēšanas mērķis bija noteikt reālo sagraušanas darbu un tajā pašā laikā ar programmas palīdzību noteikt sagraušanas slodzes līmeni. Eksperimenta precizitātei tika veikti bultskrūvju, ar nosacīto stiprību 10.9 un diametriem 5 mm; 6 mm; 8 mm; 10 mm; 12 mm, testi. Lai noteiktu sagraušanas slodzi, katram no iepriekšminētajiem bultskrūvju diametru paraugiem tika veikti 3 izmēģinājumi. Testa rezultāti ir parādīti (3.35. tab.).

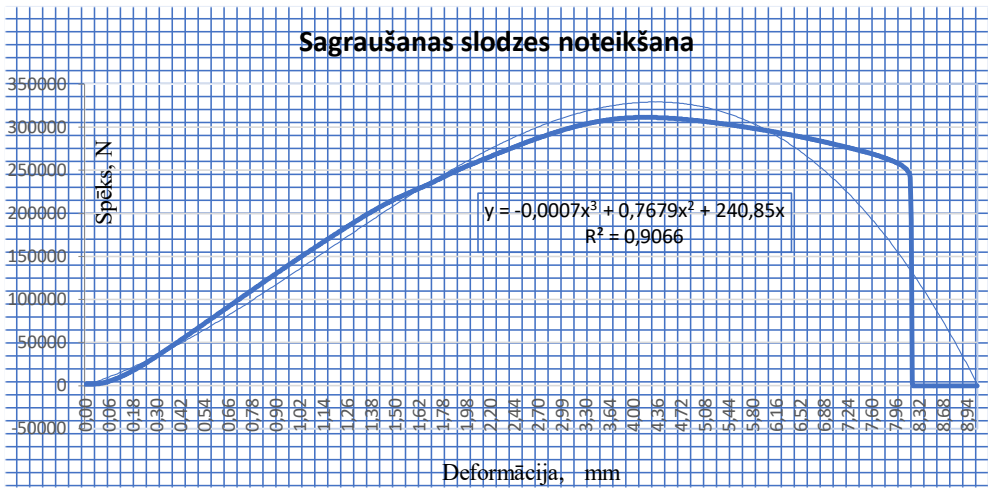
3.35.tabula

Bultskrūvju izmēģinājumu dati.

Bultskrūves diametrs, mm	Sagraušanas slodze, J			Triecienu devēja rādījumi, nosac. vien.		
	1. paraugs	2. paraugs	3. paraugs	1. paraugs	2. paraugs	3. paraugs
<i>M-5</i>	16,0	17,1	16,4	201	208	203
<i>M-6</i>	37,5	38,1	37,9	224	226	225
<i>M-8</i>	62,0	64,3	61,6	247	252	247
<i>M-10</i>	99,8	104,8	102,1	259	264	261
<i>M-12</i>	171,4	174,9	175,7	281	286	287

Liela diametra bultskrūvēm vairāk par *M-12* pārrāvuma slodzi *J* tiek ierosināts atrast pēc sagraušanas diagrammas, izmantojot laukumam atrāšanās metodi zem līknes. Lai atrastu un aprēķinātu funkciju, programmā *Excel* tiek piedāvāts izmantot polinoma aproksimācijas metodi. Laukuma atrāšanās piemērs parādīt (3.152. att.) un pēc (3.8. formulas).





3.152. att. Sagraušanas slodzes noteikšana.

$$\int_0^{8.32} -0,0007x^3 + 0,7679x^2 + 240,85x = 8,48 \cdot 10^3 J \quad (3.8)$$

2. Pēc izmēģinājumiem ar trieciena stenda palīdzību, tika noteikta bultskrūvju sagraušanas triecienslodze. Lai to realizētu bija nepieciešams ar aprēķināšanas palīdzību noteikt trieciena spēku  $F$ , kuru saņem bultskrūves mororvagonam pārbraucot dzelzceļa sliežu salaidnes. Trieciena spēks  $F$ , kuru uztver gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves, noteikts pēc (3.9 formula), lai to noteiktu, nepieciešams noteikt paātrinājumu ar kādu motorvagon pārbrauc pāri dzelzceļa sliežu salaidni. Šim nolūkam tika izmantota empīriskā formula (3.10. formula).

$$F = \omega_r \cdot q \quad (3.9)$$

kur  $q$  – riteņpāra pusmasa, kg;

$\omega_r$  – paātrinājums, ar kādu motorvagon pārbrauc dzelzceļa sliežu salaidni,  $m/sec^2$

$$\omega_r = \left[ 2 + 0,13 \frac{V}{\sqrt[3]{(2q)^2}} \right] \cdot g \quad (3.10)$$

kur  $V$  – vagona ātrums, km/h

$q$  – riteņpāra pusmasa, kg

$g$  – brīvās krišanas paātrinājums,  $m/s^2$

Paātrinājuma un trieciena spēka aprēķinu dati apkopoti 3.36.tabulā.

Paātrinājuma un triecienslodzes aprēķinu dati

Vagona ātrums V, km/h	Riteņpāra paātrinājums $\omega_r$ , m/s <sup>2</sup>	Sitiens spēks F, N
20	28,122	42 183
40	36,624	54 936
60	45,126	67 689
80	53,628	80 442
100	62,13	93 195
120	70,632	105 948

Tālāk, lai noteiktu triecienslodzi, "LDz" uzņēmumā, kas apkalpo elektrovilcienus, tika veikti gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju sagraušanas slodzes izmēģinājumi, kuros tika izmantota izstrādātā triecienvibrācijas ierīce ar atšķirīgiem tuvu aprēķinātajiem trieciena spēka  $F$  datiem. Izmēģinājuma dati apkopoti 3.37. tabulā.

3.37.tabula

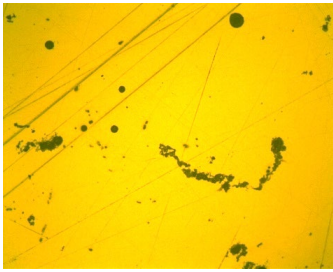
Triecienvibrācijas ierīces testēšana uz stenda

Izmēģinājuma Nr.	Bultskrūvju daudzums, gab.	Sitiens spēka lielums F, N	Sitiens daudzums, gab.	Trieciena līmeņa lielums, nosac vien.
1	16	20 000	1000	no 305–līdz 317
2	16	40 000	730	no 329 – līdz 338
3	16	60 000	467	no 354 – līdz 362
4	16	80 000	354	no 383 – līdz 395
5	16	100 000	136	no 418 – līdz 430

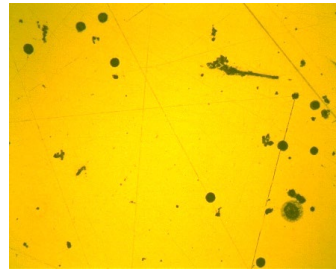
Analizējot bultskrūvju trieciena izmēģinājuma datus, tika konstatēts, ka ar trieciena spēku, kas vienāds ar:

- 20 000 N (2 tonnas) – bultskrūvju sagraušana nenotiek;
- 40 000 N (4 tonnas) – pēc 730. trieciena notika vienas bultskrūves sagraušana;
- 60 000 N (6 tonnas) – pēc 467. trieciena notika vienas bultskrūves sagraušana, pēc 500 triecieniem bultskrūvju apskates laikā tika konstatēta otras bultskrūves sagraušana.
- 80 000 N (8 tonnas) – pēc 354. trieciena notika vienas bultskrūves sagraušana, pēc 360 triecieniem bultskrūvju apskates laikā tika konstatēta otras bultskrūves sagraušana;
- 100 000 N (10 tonnas) – pēc 136. trieciena tika konstatēts, ka sagraušanai pakļautas uzreiz divas bultskrūves, pārbaudot pēc 150 triecieniem, tika konstatēts, ka sagraušana notikusi vēl divām bultskrūvēm, kas ir kritiski ekspluatācijā.

Bultskrūvju, kas pakļautas 20 000 N; 100 000 N trieciena slodzei, metalogrāfiskā analīze redzama 3.153. – 3.157. attēlā.



a

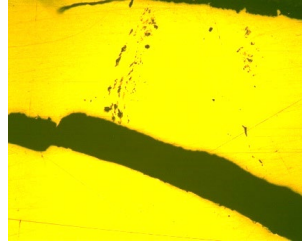


b

3.153. att. Metalogrāfiskā analīze pēc 1000 sitieniem ar spēku 20 000 N, palielinājums –  $\times 200$   
a – 27. paraugs; b – 28. paraugs.

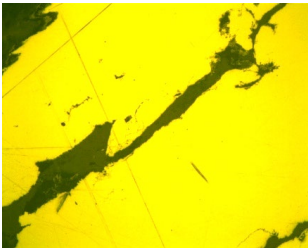


a

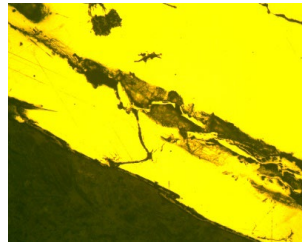


b

3.154 att. Metalogrāfiska analīze pēc 730 sitieniem ar spēku 40 000 N palielinājums –  $\times 200$ :  
a – 29. paraugs; b – 30. paraugs.

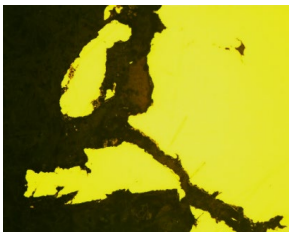


a

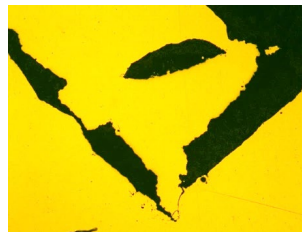


b

3.155. att. Metalogrāfiska analīze pēc 500 sitieniem ar spēku 60 000 N palielinājums –  $\times 200$ :  
a – 31. paraugs; b – 32. paraugs.

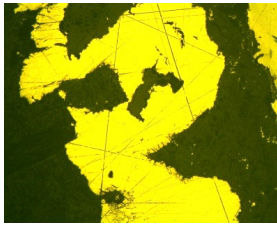


a



b

3.156. att. . Metalogrāfiska analīze pēc 360 sitieniem ar spēku 80 000 N palielinājums –  $\times 200$ :  
a – 33. paraugs; b – 34. paraugs.



a



b

3.157. att. Metalogrāfiska analīze pēc 150 sitieniem ar spēku 100 000 N palielinājums  $\times 200$ :  
a – 35. paraugs; b – 36. paraugs.

Triecienu-vibrācijas spēka kontroles ierīces ieviešana ekspluatācijā deva objektīvu informāciju par triecienslodzēm, ko uztver *M-24* bultskrūves gumijas korda sajūga stiprināšanai.

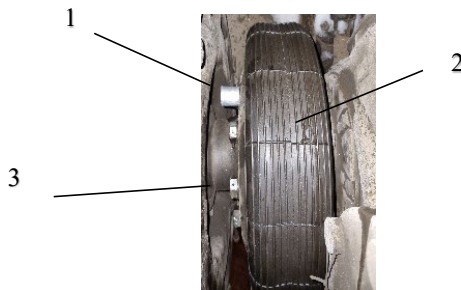
Pēc eksperimentu rezultātiem, tika noteikta triecienslodzes kritiskā vērtība un konstatēta vairākkārtējās pieļaujamās slodzes pārsniegšana uz gumijas-korda sajūga stiprināšanas bultskrūvēm, vairāk nekā:

- pie 300-330 triecienslodzes nosac. vienības – 500 sitienu daudzums;
- pie 331-350 triecienslodzes nosac. vienības – 300 sitienu daudzums;
- pie 351-380 triecienslodzes nosac. vienības – 200 sitienu daudzums;
- pie 381-410 triecienslodzes nosac. vienības – 90 sitienu daudzums.

Pie šādiem triecienslodzes lielumiem bultskrūves sasniedz kritisko sitienu daudzumu. Ja tehniskās apkopes laikā, no ierīces apkopošanas saņemtam datiem, tiek konstatēts, pieļaujamo slodžu noteiktas līmenis, kas pārsniedz kritisko līmeni tad gumijas korda sajūga stiprinājuma *M24* bultskrūvēm jābūt nomainītam pret jaunām. Tādējādi tas novērš nepieciešamību veikt neplānotos remontus gumijas korda sajūga stiprinājuma *M-24* bultskrūvju sagraušanas dēļ, kas izsauc lielus finansiālos ieguldījumus.

#### • Triecienvibrācijas ierīces testēšana uz ritošā sastāvā

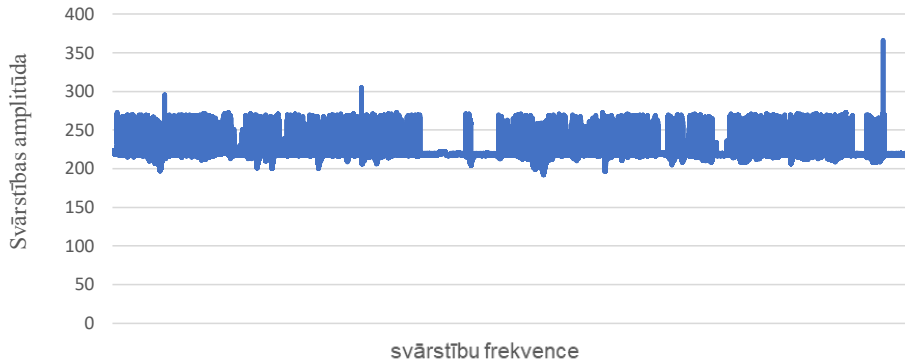
Lai kontrolētu triecienvibrācijas slodzi, ko uztver gumijas korda sajūga bultskrūves, triecienvibrācijas ierīce tika uzstādīta uz gumijas korda sajūga atloka. Ierīces uzstādīšanas vieta redzama 3.158. attēlā Triecienvibrācijas ierīces darbības pārbaude tika veikta uz elektrovilcienu motorvagona *Nr.7118 10* sākot no 15.03.2023. No triecienvibrācijas ierīces saņemtie rezultāti redzami 3.159; 3.160; 3.161; 3.162. attēlā.



3.158. att. Triecienvibrācijas ierīces izvietošanas vieta:

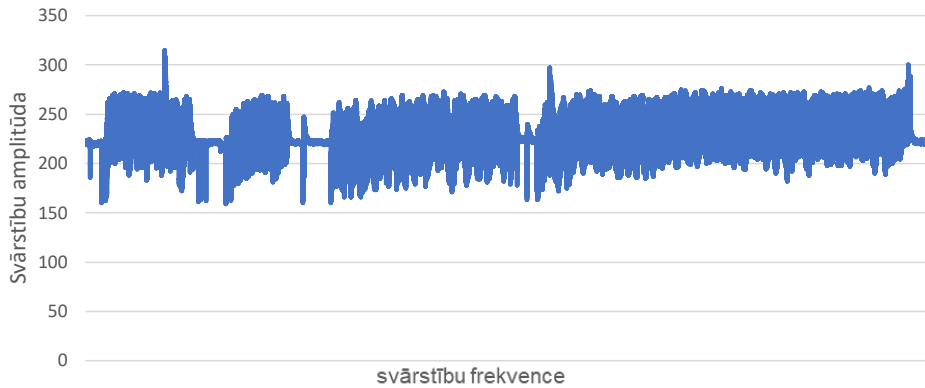
1 - triecienvibrācijas ierīce; 2 - gumijas korda sajūgs; 3 - stiprinājuma bultskrūves.

No triecienvibrācijas ierīces saņemtie rezultāti parādīti (3.159– 3.162. att.).



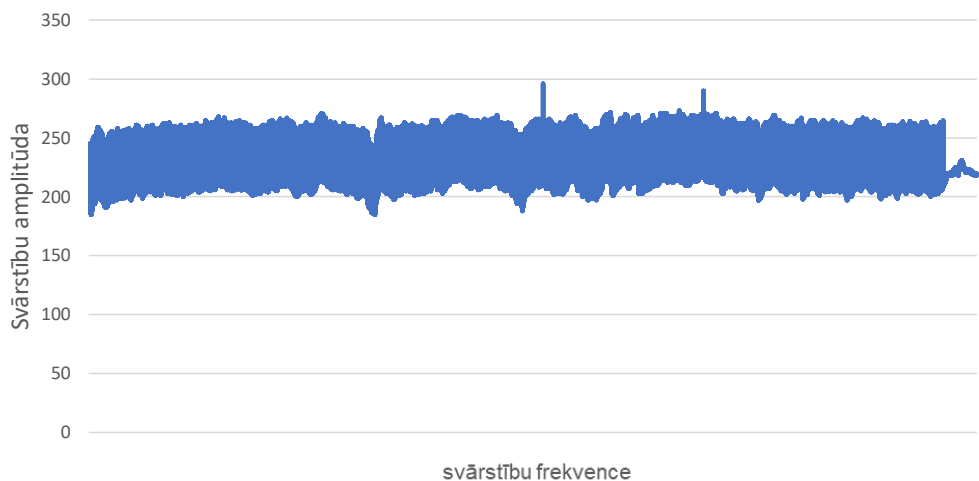
3.159. att. 17.06.2023.triecienvibrācijas slodzes grafiks.

Grafikā (3.159 att.) tika parādīta vagona Nr. 7118-10 darba diena un vagona nobraukums sastādā 432 km. konstatētais sitena daudzums vairāk par 300 nosac. vienības sastāda 2 gab.



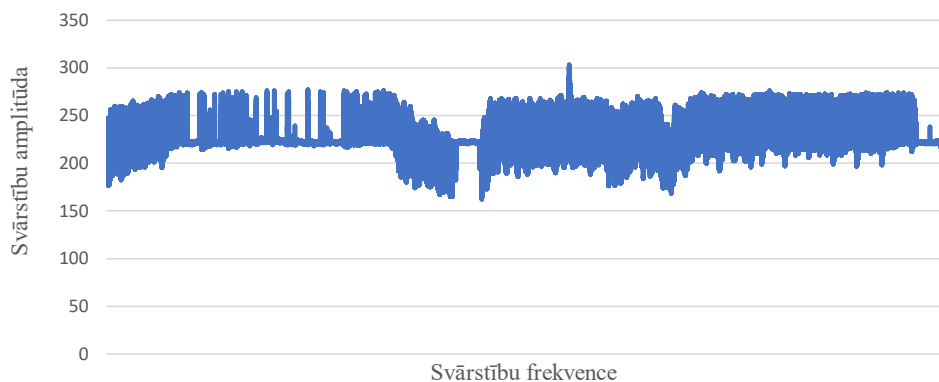
3.160. att. 01.07.2023.Trieienvibrācijas slodzes grafiks.

Grafikā (3.160. att.) tika parādīta vagona Nr. 7118-10 darba diena un vagona nobraukums sastādā 486 km. konstatētais sitena daudzums vairāk par 300 nosac. vienības sastāda 3 gab.



3.161.att. 20.07.2023. triecienvibrācijas slodzes grafiks.

Grafikā (3.161. att.) tika parādīta vagona *Nr. 7118-10* triecienvibrācijas slodžu līmenis par darba dienu. Nekonstatēts sitena daudzums vairāk par 300 nosac. vienības. Vagona dienas nobraukums sastādā 356 km.



3.162. 12.07.2023. triecienvibrācijas slodzes grafiks.

3.162. attēla grafikā redzama vagona *Nr. 7118-10* darba diena, vagona nobraukums ir 512 km. konstatētais sitēja daudzums vairāk par 300 nosac. vienības sastāda 1 gab.

Reizi mēnesī, pie motorvagona sasniegšanas 10-15 tūkst. km. nobraukuma, viena bultskrūve tika demontēta, lai veiktu metalogrāfisko analīzi. Metalogrāfiskās analīzes mērķis ir konstatēt un apstiprināt defektu un mikroplaisu veidošanās esamību mikrostruktūrā pie noteiktām un konstatētām lieluma triecienslodzēm un pie zināmam motorvagona bultskrūvju nobraukuma lielumu. Bultskrūvju darbības pētījuma dati, izmantojot triecienvibrācijas ierīci, apkopoti 3.38. tabulā.

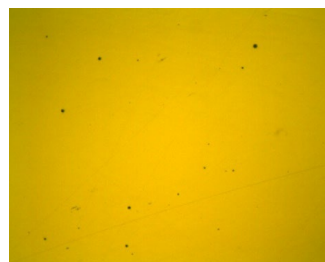
3.38.tabula

Triecienslodzes noteikšana

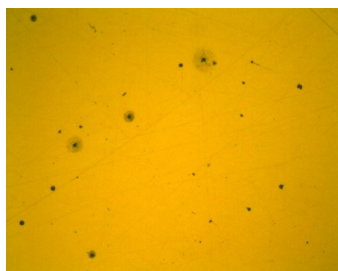
Parauga Nr.	M-24 bultskrūvju darbības rādītāji				
	Nobraukums, km	Triecienslodzes devēja rādījumi lielums, nosac. vien.			
		300-330	331-360	361-390	391-420
37	12 682	52	14	3	0
38	25 632	116	21	4	2
39	38 850	187	33	5	3
40	52 512	236	42	8	3
41	65 748	287	50	12	4
42	79 906	314	61	15	5
Kritiskais līmenis	264 000	700	250	150	40

Kontroles laikā triecienslodzes maksimālais triecienvibrācijas līmenis sastāda 396 nosac. vien.

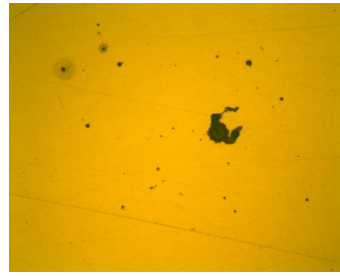
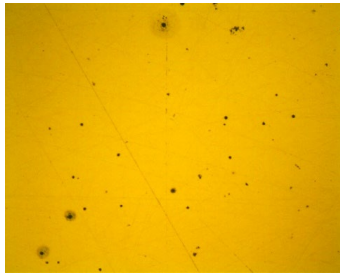
Bultskrūvju 37 – 42 paraugam metalogrāfiskas analīzes rezultāti redzami 3.163 –3.168. attēlā. Palielinājums –  $\times 100$ .



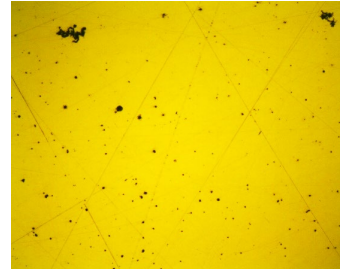
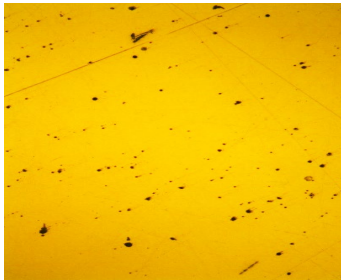
3.163. att. Bultskrūves 37. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 12 882 km.



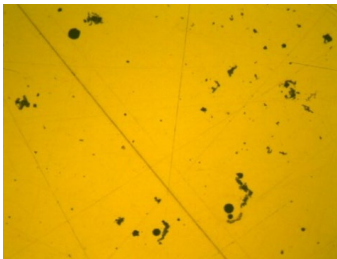
3.164. att. Bultskrūves 38. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 25 632km.



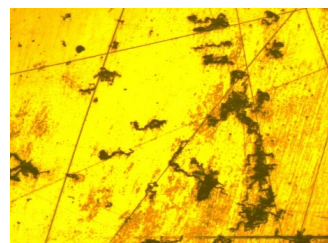
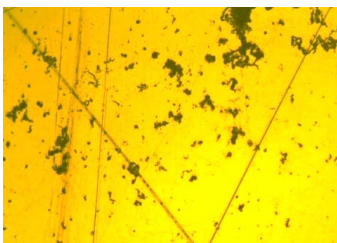
3.165. att. Bultskrūves 39. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 38 850 km.



3.166. att. Bultskrūves 40. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 52 512 km.



3.167. att. Bultskrūves 40. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 65 748 km.



3.168. att. Bultskrūves 41. parauga metalogrāfiskā analīze, nobraukums 79 906 km.

Pēc metalogrāfiskās analīzes rezultātiem tika konstatēta pakāpeniska defektu un mikroplaisu izveidošanās mikrostruktūrā.



### 3.20. Ekonomiskais efekts no metodikas ieviešanas un triecienvibrācijas ierīču ieviešanas ekspluatācijā

Metodikas ieviešanas ekspluatācija dot sekojošus rezultātus izmaksas uz neplānotiem remontiem nebūs, taču jāņem vērā cilvēciskais faktors, izmaksas būs saistītas tikai ar triecienvibrācijas ierīces un metodikas ieviešanu ekspluatācijā. Dati par neplānoto remontu izmaksām tika redzami 3.39. tabulā. Dati par triecienvibrācijas ierīču ieviešanu ekspluatācijā parādīti [35].

3.39. tabula

Neplānoto remontu izmaksas

Neplānota remonta nosaukums	1. neplānotais remonts, EUR(€)	Par 10. gadiem, EUR(€)	Triecienvibrācijas ierīču ieviešana ekspluatācijā, EUR(€)
Gumijas- korda bultskrūvju nomaiņa	429	103 895	15 000
Gumijas korda sajūga nomaiņa	575	58 842	

Pēc (3.39. tab.) rezultātu datiem izmaksas par triecienvibrācijas ierīces uzstādīšanu un metodikas ieviešanu atmaksāsies divu gadu laikā.

Triecienvibrācijas spēka kontroles ierīce deva objektīvu informāciju par triecienslodzēm, ko uztver gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūves, un tās sērījveida ieviešana ekspluatācijā dod iespēju kontrolēt bultskrūvju tehnisko stāvokli, un nepieļaut neplānoto remontu veikšanu, sakarā ar bultskrūvju bojājumu, un krietni samazināt bultskrūvju atteikuma skaitu ekspluatācijā.

## SECINĀJUMI

Apkopojot darba rezultātus un pamatojoties uz tiem, var izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Darbā detalizēti izpētīti statistikas dati par gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumi laikā perioda no 2012. līdz 2021. gadam. Gumijas korda sajūgu atteikumu skaits – 101 gadījums, bet to stiprinājuma bultskrūvju atteikumi – 298 gadījumi. Promocijas darbā tika veikta arī sajūgu un bultskrūvju atteikumu novērtējums pa sezonām, konstatējot, ka vislielākais atteikumu skaits attiecināms uz ziemas periodu:
  - gumijas korda sajūgu atteikumu skaits veido vairāk par 41 %;
  - gumijas korda sajūgu stiprinājuma bultskrūvju atteikumu skaits veido vairāk par 43 %.
2. Veicot gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju pētījumus, saskaņā ar izstrādāto metodiku un to aprobācijas laikā tika iegūti šādi rezultāti:
  - pēc vizuālas apskates tika konstatētas, ka 95 % gumijas korda sajūgu bojājumu ir sānu virsmās, kas atrodas 10–20 mm attālumā no sajūga nostiprinājuma vietas pie atlokiem, sagraušana;
  - pēc gumijas korda sajūgu temperatūras mērījumiem “Latvijas dzelzceļa” apstākļos tika konstatēts, ka 100 % tiek ievērots nosacījums sajūga nesasilšanai vairāk par<sup>o</sup> +75 °C saskaņā ar standarta *ISO 14691:2008* prasībām;
  - pēc gumijas korda sajūgu ģeometrisko izmēru mērīšanas rezultātiem tika konstatēts, ka 6 % gumijas korda sajūgu ārējais diametrs *D* neatbilst *ISO 14691:2008* standarta prasībām, tāpēc tika ierosināts gumijas korda sajūgus ar neatbilstošu ārējo diametru nomainīt pret jauniem;
  - pēc gumijas korda sajūgu cietības mērījumiem eksperimentāli pierādīts, ka temperatūras diapazonos:
    - –20 °C un 0 °C – 88 % sajūgu neatbilst standarta *ISO 14691:2008* prasībām, pārsniedzot standarta datus par 11,4–4,2 nosac. vien.;
    - +5 °C un +10 °C – 52 % sajūgu neatbilst standarta *ISO 14691:2008* prasībām, maksimāli pārsniedzot standarta datus par 9,2 nosac. vien.;
    - +15 °C un +20 °C – 20 % sajūgu neatbilst standarta *ISO 14691:2008* prasībām, maksimāli pārsniedzot standarta datus par 4,8 nosac. vien.

Pēc cietības mērījuma rezultātiem rekomendēts vienu no četriem gumijas korda sajūgiem nomainīt sakarā ar neatbilstību *ISO 14691:2008* standarta prasībām dažādos temperatūras diapazonos. Par pārējām gumijas korda sajūgu neatbilstībām *ISO 14691:2008* standarta prasībām izteikta rekomendācija ražotājam.

- Pamatojoties uz darbā veiktajiem eksperimentiem, tika pierādīts, ka gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju atteikumi ir saistīti ar sagraušanas procesiem, kas rodas metāla noguruma un defektu uzkrāšanās mikrostrukturā dēļ, ko apstiprina arī metalogrāfiskās analīzes sagraušanas diagrammas jaunu bultskrūvju bez defektiem mikrostrukturā un bultskrūvju ar nobraukumu un defektu klātbūtni mikrostrukturā.
- Pēc mikrostrukturā pētījumu rezultātiem ar metalogrāfiskās analīzes palīdzību tika konstatēts mikrostrukturā defektu veidošanās apjoms bultskrūvēs, kas palielinās, palielinoties bultskrūves darbības laikam (nobraukumam).

➤ Iegūtie bultskrūvju rezultāti ticamībā un precizitātē apliecināti sertificētā testēšanas laboratorijā *KIWA Inspecta Latvija*”.

3. Pēc aprēķināšanas modeļa izveides *SOLIDWORKS* programmā ar izvelēto *Mūnija–Rivlina* elastomēro materiālu modeļu palīdzību iegūti šādi rezultāti:

- modelējot maksimālos aksiālās, radiālās un leņķiskas novirzes datus, tika konstatēts, ka kopējā spriegumu darbība no aksiālām radiālām un leņķiskām novirzēm pie cikliskas slodzes ir bīstama sajūgiem un var izraisīt sānu virsmas sairšanu, jo veido 3,21 MPa, kas ir vairāk nekā 60 % no stiprības robežas  $\sigma_b$  (4,87 MPa), kas pie cikliska veida slodzes izraisa sānu virsmas sairšanu;
- modelējot dažādus leņķisko ātrumu diapazonus, tika konstatēts, ka pie 1670 apgr./min., kas ir vairāk par 110 km/h, spriegums sajūga nostiprinājuma vietā pie atlokiem vairāk nekā divas reizes pārsniedz stiprības robežu  $\sigma_b$  pie cikliskās slodzes un sāk izplatīties pa visu sajūga šķērsgrizumu;
- pētot pirmo 40 rezonanses frekvenču ietekmi *SOLIDWORKS* galīgās elementu modelēšanas programmā, noteiktas gumijas korda sajūga spriedzes zonas un konstatēts, ka rezonanses kritisko frekvenču ietekmē pa X, Y, Z asīm rodas sajūga svārstības, kurās iesaistās noteikts sajūga masas daudzums; visbīstamākās rezonanses frekvences ir pa X asi, kad svārstībās piedalās vairāk par 57 % sajūga pašmasas; pie šādas frekvences sajūga zonas pakļautas deformācijai un sakrīt ar bojājumu zonām, kas tiek konstatētas ekspluatācijā; lai samazinātu sajūga korpusa bojājumu risku, ir nepieciešams novērst sajūga ilgstošu darbību aprēķinātajās kritiskajās frekvencēs – 54,87 Hz; 88,25 Hz; 88,36 Hz;
- modelēšanas rezultāti *SolidWorks* programmā apstiprināja, ka pie liela griezes momenta un aksiālās, radiālās vai leņķiskās novirzes, kā arī pie lieliem apgriezieniem visvairāk noslogotā sajūga zona ir tā sānu siena netālu no ārējā diametra diska stiprinājuma vietas.

4. Lai samazinātu bultskrūvju atteikumu skaitu, tika izstrādāta ierīce triecienvibrācijas slodzes kontrolei, kas izmēģināta ritošajā sastāvā, un ar šīs ierīces palīdzību iegūti triecienvibrācijas slodžu līmeņu dati reālos ekspluatācijas apstākļos.

- Pētot triecienvibrācijas ierīces iegūtos datus, tika noteikta triecienslodzes kritiskā vērtība, pie kuras tika rekomendēts nomainīt gumijas korda sajūga nostiprinošās bultskrūves. Rezultāti apstiprinājās arī ar metalogrāfiskās analīzes palīdzību, kad tika konstatētas mikroplaisas un liels skaits mikrostrukturās defektu.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Arhun S., Borodenko Y., Hnatov A., Popova A., Hnavota H., Kuņicina N., Žiravecka A., Zabašta A., Ribickis L., Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2020, Vol. 57, No. 4, pp.3-11. ISSN 0868-8257. Available from: doi: 10.2478/lpts-2020-0017.
2. Baranowski P., Bogusz P., Glotowicki P., Assessment of Mechanical Properties of Offroad Vehicle Tire: Coupons Testing and FE Model Development. *acta mechanica et automatica*, 2012. 6(2).
3. Batdorf S.B., Chang D.J., (1979) On the between the facture statistics of volume distributed and surface distributed crack //Int. J. Fract. Vol. 15. N 2. P. 191-199.
4. Cheng, G., et al., Influence of Camber Angle on Rolling Radial Tire under Braking State. *Procedia Engineering*, 2011. 15(0): p. 4310-4315.
5. DIN EN 13913:2003-08 railway applications - rubber suspension components - elastomer-based mechanical parts, 54p.
6. EN 10083-3:2007-01 Technical delivery conditions for alloy steels English version of p.54.
7. Elias G. Abu-Saba., Design of steel structures, ISBN 978-1-4613-5864-0 ISBN 978-1-4615-2079-5 (eBook), DOI 10.1007/978-1-4615-2079-5, p. 391.
8. Gavrilovs, P., Dmitrijevs, 2016. A. Research in passenger car bogie central suspension roller and rod base metal and welded metal structure *Engineering for Rural Development*, 2016-January, p 618-623.
9. Gavrilovs, P., Ivanovs, V 2017. Research of the defective frog wing of 1/11 mark Transport Problems, 12 (4), p 119-126.
10. Gavrilovs P, Gorbacovs. D. Hardness Testing and the Chemical Composition Analysis of the ER2 And ER2t Series EMUs Traction Transmission Rubber-Cord Coupling Bolts 2020. Lpp. 326. – 330.
11. Ghosh, P., et al., Material property characterization for finite element analysis of tires. *Rubber World*, 2006. 233(4): p. 22.
12. Gorbacovs. D, Gavrilovs P, Eiduks J. Determination of the Metal Structure, Testing of Hardness of the Fastening Bolts of the Rubber-cord Coupling for Traction Gear of Electric Trains of the ER2 Series. 2021 Lpp 42-45.
13. Gorbacovs. D, Gavrilovs P, J Eiduks Determination of the Causes of the Series ER2T Electric Multiple Unit Trains Traction Gear Rubber-Cord Shell Damage 2021. Lpp281-287.
14. Gorbacovs. D, Mihailovs F, J Eiduks Analysis of the Formation of Defects in the Microstructure of the M-24 Bolts of the Rubber-Cord Coupling at Various Ranges of Mileage of Electric Trains Motor Cars 2021 lpp 1-4 IEEE raksti.
15. Evdokimov A.P., Shikhnabieva T.S Stress-strain behavior and specific friction of toric rubber-cord casings of flexible couplings *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* Volume 46, Issue 2, 1 March 2017, Pages 199-203
16. Hibbit, Karlsson, and Sorensen, ABAQUS/Standard Analysis User's Manual. 2007: Hibbit, Karlsson, Sorensen Inc.
17. Hu, Y., Chit Tan, A., Liang, C., Li, Y. (2021) Failure analysis of fractured motor bolts in high-speed train due to cardan shaft misalignment *Engineering Failure Analysis*, 122, art. no. 105246.

18. Ischuka, O., Lomotko, D., Gavrilovs, P., Freimane, J. Improvement of technology of operation for Daugavpils marshalling station by building the new receiving yard (2019) *Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2019-October*, pp. 841-846.
19. ISO 898-1:2013 Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel 27 p.
20. ISO 7619-1:2010 Rubber, vulcanized or thermoplastic -- Determination of indentation hardness -- Part 1: Durometer method (Shore hardness) 10 p.
21. ISO 14691:2008 Petroleum, petrochemical and natural gas flexible couplings for mechanical power transmission General-purpose applications 32p.
22. Kindt, P., P. Sas, and W. Desmet. Three-dimensional Ring Model for the Prediction of the Tyre Structural Dynamic Behaviour. in *ISMA*. 2008.
23. Kobayashi J., Ina D., Yoshikawa N., Sugimoto K. Effects of the addition of Cr, Mo and Ni on the microstructure and retained austenite characteristics of 0,2% C-Si-Mn-Nb ultrahighstrength TRIP-aided bainitic ferrite steels // *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. No. 10. P. 1894–1901].
24. Korneev V.S., Romanyuk D.A., Korneev S.A., Russkih G.S., Vaskova M.V. Finite Element Research of Rubber-cord Flat Coupling (2016) *Procedia Engineering*, 152, pp. 321-326. Cited 1 time.
25. Koval N. Devyatkov V. Shugurov V. Ivanov Y. E. Petrikova E. A. Teresov A. "Thermal Stability of Structure and Properties of Steel Surface Layer Containing Nitrides and Silicides of Refractory Metals Formed by Electron-Ion-Plasma Methods," 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 2020, pp. 800-803, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242078
26. Kondratjevs K., Kunicina N., Patlins A., Zabasta A., Galkina A. 2016. Vehicle weight detection sensor development for data collecting in sustainable city transport system 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2016.
27. Komorska I., (2011) *Vibroacoustic Diagnostic Model of the Vehicle Drive System*, 130 p., ISBN-10: 837789016X, ISBN-13: 978-8377890165.
28. Krmelova V., Pozovnyi O. Determination of material parameters of rubber and composites for computational modeling based on experiment data 2020 pp 1-10 DOI:10.1088/1742-6596/1741/1/012047.
29. Kucherskij, A. M. A promising method for measuring hardness of rubber / A. M. Kucherskij // *Polymer Testing*. – 1997. – No. 16. – pp. 481–490.
30. Kuzu C., Pelit E., Meral İ., A new design of Rockwell-Brinell-Vickers hardness standard machine at UME (2021) *Acta IMEKO*, 9 (5), pp. 230-234.
31. Levinson M. Burgess I.W. A comparison of some simple constitutive relations for slightly compressible rubber-like materials // *Int. J. Mech. Sci.* –1971. – Vol. 13. – P. 572.
32. Leonardson R, MacGugan D. Design and fabrication of a commercial triaxial accelerometer (1994) *Sensors (Peterborough, NH)*, 11 (8), pp. 22-23.
33. Majeed B., Basturk S. Analysis of polymeric composite materials for frictional wear resistance purposes, *Polymers and Polymer Composites*, 29 (2), 2021, pp. 127-137.
34. Medvecka - Beňova S., Mikova Ľ., Kaššay P. material properties of rubber-cord flexible element of pneumatic flexible coupling 2015.] pp 194-196. ISSN 0543-5846 *METABK* 54(1) 194-196 (2015)UDC – UDK 6 20.1.002.61:621.825:533.3=111.

35. Mihailovs F., Eiduks J., Gorbačovs D. Reducing the number of unscheduled repairs of traction gear of EMU trains by introducing modern technical solutions. 10th International Scientific Conference Rual Development 2021. Kaunas Lithuania., vol. 6, pp.
36. Pidaparti R. M. V. Analysis of cord-rubber composite laminates under combined tension and torsion loading // Composites: Part B. — 1997. — Vol. 28, No. 4. — pp. 433—438. — doi: 10.1016/S1359-8368(96)00064-9.
37. Sun, E.Q., Shear Locking and Hourglassing in MSC NAstran, ABAQUS, and ANSYS, in MSC Software's Virtual Product Development Conferences. 2006, MSC Software.
38. Shahriar D. Bekir A., Amin A. A novel nonlinear elasticity approach for analysis of nonlinear and hyperelastic structures DOI:10.1016/j.enganabound.2022.06.015 pp. 219-236.
39. Surendranath, H., Applying FEA to tire design: an integrated approach for transient rolling of tires. 2005, SIMULIA.
40. Stauffer, J.-M. Market opportunities for advanced MEMS accelerometers and overview of actual capabilities vs. required specifications (2004) Record - IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium, pp. 78-82.
41. Steels Microstructure and Properties, Fourth edition, Harshad Bhadeshia, Robert Honeycombe, 2017, eBook ISBN: 978-0-08-100272-8, Hardcover ISBN: 978-0-08-100270-4, p 488.
42. Taylor, J., Mehmanparast, A., Kulka, R., Moore, P., Farrahi, G.H., Xu, L. Compact crack arrest testing and analysis of EH47 shipbuilding steel (2021) Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 114, art. no. 103004.
43. Vinogradov, B.V. Flexible couplings with rubber-cord shells in dual pinion mill drives (2016) Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (1), pp. 42-46.
44. Yang, X., O. Olatunbosun, and E.O. Bolarinwa, Materials Testing for Finite Element Tire Model. Society of Automotive Engineers, 2010.
45. Zaripov, R., Gavrilovs, P., Sembaev, N., 2019. Study of the stressed-deformed condition of a railway tank wagon with shock loading taking into account the decrease of fastenings Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2019-October, pp. 1112-1116.
46. Zhang, Z.-J., Zheng, P.-F., Chen, H., Cai, L.-X. (2021) The method for hardness prediction of metal materials based on energy equivalence principle [Article@基于能量等效原理的金属材料硬度预测方法] Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics, 38 (3), pp. 17-26.
47. Elektrovilcienu neplāna remontu kopsavilkums AS "Pasažieru vilciens" (forma FT-19).
48. Ministru kabineta 2010.gada 3.augusta noteikumu Nr.724 „Dzelzceļa tehniskās ekspluatācijas noteikumi 84.lpp.
49. Elektrovilcienu tekošā remontu un tehniskas apkalpošanas noteikumi L31/97 Valsts akciju sabiedrība "Latvijas dzelzceļš" Rīga 1997g. 152lpp.
50. Elektrovilcienu nobraukumu atskaite AS "Pasažieru vilciens" (forma PVR-4).
51. AS "Pasažieru vilciens" vilces ritosā sastāva tehnisko apkopju un remontu sistēma Rikojims Nr.38-2021 2021g 5 lpp.
52. Белкин А.Е., Дураджи В.Ю. Большие упругие деформации эластомерной торовой оболочки (резиновой муфты) при совместном действии крутящих моментов стр. 3-11 2021г. doi: 10.18698/0536-1044-2021-8-3-11.
53. Бирюков И. В., Беляев А. И., Рыбников Е. К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. – М.: Транспорт, 1986. – 256 стр.

54. Власов И С, каиров А. С., Численное исследование частот и форм собственных колебаний оболочек вращения с присоединёнными твёрдыми телами 33-42 стр 2017] ISSN 2079–1836 2015.
55. Григоренко В.Б., Орлов М.Р., Морозова Л.В, Журавлева П.Л. Исследование статического разрушения болтов из стали 30ХГСА в условиях эксплуатации 125-135 стр DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-125-135.
56. Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Виноградов С.С. Особенности разрушения деталей крепежа из конструкционной стали стр 66-74 2018 DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-66-74.
57. Губенко С. Неметаллические включения и прочность стали. НАН Украины, Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова . - Киев, Наукова думка. 2016, 528 стр. ISBN: 978-966-00-1501-2.
58. ГОСТ 21424 – 93 муфты упругие втулочно-пальцевые е параметры и размеры 10 стр.
59. Тимофеев С.И. Детали машин – Ростов, Феникс, 2005 – 409 стр; ISBN 5 – 222 – 05122 – 6 ( в пер).
60. Задель Х.Э., Коген-Далин В.В., Крымов В.В., Электротехника Москва: Высшая школа 1985. 480 стр.
61. Ильичев В. А., Пеньков И. А., Корнеев В. С., КОРНЕЕВ С. А. Экспериментальный стенд для исследования нагрузочных характеристик резинокордной плоской муфты стр. 123-126; Омск 2015г. УДК 620.17:621.825.
62. Корнеев С. А., Корнеев В. С., Воронов Е. А., Чернявский Д. И, Романюк Д. А. Расчётно-экспериментальный метод построения нагрузочных характеристик высокоэластичных муфт с учётом несоосности валов стр. 44-48, Омск 2017г УДК 621.816:536.7.
63. Корнеев С. В., Долгих В. П. Коэффициенты модели Муни-Ривлина в пакете программ ANSYS, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент ДонГТУ, г. Алчевск, Украина стр 44-48 2014г. ISSN 2077-1738.
64. Логунов В. Н., Смагин В. Г., Доронин Ю. И. Устройство тепловоза ТГМ6А др.—2-е изд., перераб. и доп.— М.: Транспорт, 1989.—320 стр.
65. Лунев В. П Ахундов В. М. Расчетные и экспериментальные исследования резинокордных оболочек высокоэластичных муфт 35-42стр. 2011г. Украина ISSN 2079–1836 І МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ 2011.
66. Межецкий Г.Д., Загребин Г.Г., Решетник Н.Н; под общ. Ред.. Межецкого Г.Д., Загребина Г.Г. Сопrotивление материалов: - 5-е изд., Москва. 2016. 432стр.
67. Михайленко А.А. Дизельпоезда типа ДР Москва транспорт 1990 г. 336 стр.
68. Морозов Е.М. Зернин М.В Контактные задачи механики разрушения Москва: Машиностроение 1999 544стр.
69. Нотик З. Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ: Пособие машинисту. -2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1996. 444 стр.
70. Никифоров В.М. Технология металлов и других конструкционных материалов: Москва: 2015. 384стр.
71. Пегов Д.В., Бурцев П.В., Андреев В.Е., Электропоезда постоянного тока: ЭТ2, ЭТ2М, ЭР2Т, ЭД2Т Москва: Транспорт, 2003, 184 стр.
72. Попков, В.,И., Мышинский, Э.,Л. Виброакустическая диагностика в судостроении - 2е изд. Ленинград: Судостроение, 1989., 256 стр. ISBN: 5-7355-0111-9.

73. Романюк Д.А. Расчётно-экспериментальный метод построения нагрузочных характеристик высокоэластичных муфт с учётом несоосности валов. Омск 2018 151 стр.
74. Рубчинский З.М., Соколов С.И., Эглон Е.А., Лынюк Л.С., Электропоезда Москва Транспорт 1983. 415 стр.
75. Ряховский О.А. Иванов С.С справочник по муфтам Л. Политехника 1991 384 стр
76. Семенов И.Е., Поворов С.В., Демиденко Е.А. Определение коэффициентов муни-ривлина при деформировании армированного полиуретана. стр. 1-7, 2005г.
77. Спиридонова М.П. Эластомерные материалы, содержащие молекулярные комплексы и комплексные соединения с  $\epsilon$ -капролактамом Волгоград 2019 352 стр.
78. Сучков О.К., Пятигорский М.Г., Технология металлов и конструкционные материалы Москва: 1974. 446 стр.
79. Тепловоз ТЭМ2: Руководство по эксплуатации и обслуживанию ПО «Брянский маш - строит, з-д». Изд 2-е, перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1983 — 239 с.
80. Тагер А.А. Физикохимия полимеров Москва: Химия 1978. 544 стр.
81. Тепловозы ТГМ4 и ТГМ4А. Руководство по эксплуатации и обслуживанию. Изд 3-е., перераб. и доп. М ТРАНСПОРТ» 1985 186 стр.
82. Тепловоз ТЭМ2: Руководство по эксплуатации и обслуживанию ПО «Брянский маш - строит, з-д». Изд 2-е, перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1983 — 239 стр.
83. Устройство тепловоза ТГМ6А др.—2-е изд., перераб. и доп.— М.: Транспорт, 1989.—320 стр.
84. Хотько А.В., Шилько С.В., Бухаров С.Н. Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности стр 11-17 2020 г.
85. Цукало П.В., Просвирин Б.К., Эксплуатация электропоездов: Справочник – Москва; Транспорт 1994 383 стр.
86. Цукало П.В., Ерошкин Н. Г. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р - М.: Транспорт, 1986. — 359 стр.
87. Шаповалов Э. Л., Панфёрова О. Ю. Исследование прочностных характеристик высокопрочных болтов разрушающими и неразрушающими методами контроля стр 50-53 Магнитогорск, 2016г.
88. Шешенина С. В., Гритченко М. Э., Чистяков П. В. Осреднение вязкоупругих свойств резинокордного слоя при плоском напряженном состоянии 2021 673-688 стр.
89. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика старения полимеров.- Москва.: Наука, 1984. -342 стр.



## **PIELIKUMI**

## Gumijas korda sajūga atteikumu detalizētais apraksts par 2012-2021g

Nr. p.k.	Elektrovilcienu Sērija	Vagona Nr.	Atteikumu datums	Vagonu Dīkstāvē (dienas)	Nobraukums no pēdējā remontā ( km)
1	2	3	4	5	6
<b>2012</b>					
1	ER2	2022-02	14.02.2012	1	6266
2	ER2	964-02	29.02.2012	1	197808
3	ER2	8029-06	14.07.2012	2	217870
4	ER2	1342-04	24.07.2012	3	86446
5	ER2	8029-08	15.08.2012	6	228834
6	ER2T	7116-02	29.09.2012	7	143770
7	ER2T	7116-02	28.09.2012	1	138980
8	ER2T	7115-04	19.11.2012	1	154332
<b>2013</b>					
1	ER2	1342-04	25.01.2013	1	36626
2	ER2	8004-02	25.04.2013	2	169074
3	ER2	989-04	14.06.2013	1	183704
4	ER2	2024-02	03.08.2013	3	181608
5	ER2T	2207-02	27.08.2013	1	31448
6	ER2T	7113-04	17.12.2013	1	195250
<b>2014</b>					
1	ER2T	7114-04	23.01.2014	2	84056
2	ER2	1341-08	30.01.2014	2	25466
3	ER2	1300-02	30.04.2014	6	110026
4	ER2	1300-02	14.06.2014	4	127422
5	ER2T	7113-02	09.07.2014	1	137930
6	ER2	989-08	18.07.2014	2	139198
7	ER2	1342-04	24.07.2014	1	230100
8	ER2	605-06	08.08.2014	1	191240
9	ER2	1307-10	18.08.2014	2	77300
10	ER2	1300-02	26.10.2014	3	180266
11	ER2	2024-02	28.11.2014	3	128152
<b>2015</b>					
1	ER2	989-08	08.01.2015	2	218808
2	ER2T	7117-08	19.01.2015	1	86446
3	ER2T	7114-06	07.04.2015	2	86814
4	ER2	2022-02	30.04.2015	1	89146
5	ER2	8029-02	11.08.2015	1	49390
6	ER2T	7118-08	05.09.2015	3	200908
7	ER2T	7118-10	08.09.2015	3	54474
8	ER2T	2206-02	16.09.2015	2	64520
9	ER2	1317-06	07.12.2015	1	197326
10	ER2	1342-02	15.12.2015	1	98606

<b>2016</b>					
1	ER2T	2206-02	06.01.2016	2	112124
2	ER2T	2207-02	14.02.2016	4	1478
3	ER2T	7113-02	12.03.2016	4	130758
4	ER2T	7115-10	06.04.2016	0	162334
5	ER2	964-08	15.05.2016	2	54100
6	ER2	1294-06	09.06.2016	1	32748
7	ER2	1317-06	22.06.2016	1	138662
8	ER2T	7113-02	25.06.2016	1	173644
9	ER2	989-02	18.10.2016	2	160703
10	ER2	1341-08	10.11.2016	3	145287
11	ER2T	7114-08	16.11.2016	1	10402
<b>2017</b>					
1	ER2	1294-06	30.01.2017	4	176788
2	ER2	1341-06	01.03.2017	3	207722
3	ER2	1307-06	08.03.2017	1	9972
4	ER2	989-08	20.03.2017	4	228752
5	ER2T	7118-02	30.03.2017	1	176788
6	ER2	8029-06	15.04.2017	1	19306
7	ER2T	7116-10	23.05.2017	1	136604
8	ER2T	7116-10	12.06.2017	1	142762
9	ER2	989-02	14.11.2017	2	112814
10	ER2	8029-06	29.11.2017	4	184562
11	ER2T	7114-08	13.12.2017	2	169380
12	ER2	989-04	26.12.2017	3	45200
<b>2018</b>					
1	ER2	1307-10	20.01.2018	2	151116
2	ER2T	7117-06	24.01.2018	3	123722
3	ER2T	7118-10	28.03.2018	1	93720
4	ER2	8029-02	23.06.2018	2	161582
5	ER2T	7115-10	25.06.2018	1	207620
6	ER2	3034-04	13.11.2018	3	148262
7	ER2	8029-02	18.11.2018	3	14786
8	ER2	1310-10	05.12.2018	5	10692
9	ER2T	7114-08	06.12.2018	1	71787
10	ER2	3034-08	11.12.2018	3	43572
<b>2019</b>					
1	ER2T	7113-04	31.01.2019	1	180734
2	ER2	1307-10	17.03.2019	1	119110
3	ER2T	7113-08	31.03.2019	1	128390
4	ER2	991-08	29.06.2019	3	29384
5	ER2T	7113-04	03.08.2019	2	137222
6	ER2	1310-02	10.09.2019	2	135476
7	ER2	1341-10	14.10.2019	1	28050
8	ER2	989-02	19.10.2019	1	72648
9	ER2T	7114-04	01.11.2019	1	94588
10	ER2T	7115-06	16.11.2019	1	108434
11	ER2	991-08	28.11.2019	3	92026
12	ER2	8029-02	01.12.2019	1	170582
13	ER2	2022-02	04.12.2019	2	92590
14	ER2	1300-02	22.12.2019	5	94242
<b>2020</b>					

## Pielikuma 1 turpinājums

1	ER2	1342-02	10.01.2020	3	148168
2	ER2	8004-02	07.02.2020	2	195144
3	ER2	1310-10	18.02.2020	1	186050
4	ER2	8004-02	20.02.2020	1	210874
5	ER2	1310-02	13.03.2020	4	206676
6	ER2T	2207-02	11.04.2020	1	59118
7	ER2	989-02	30.04.2020	1	185289
8	ER2T	7113-02	06.06.2020	1	216714
9	ER2	2021-02	07.06.2020	1	197450
10	ER2T	2207-02	20.07.2020	2	95404
11	ER2	1342-02	07.10.2020	1	174518
12	ER2T	2207-02	14.10.2020	1	133110
			<b>2021</b>		
1	ER2	989-04	03.06.2021	1	24782
2	ER2	2021-02	07.06.2021	1	191450
3	ER2T	7113-04	03.08.2021	1	251236
4	ER2	989-04	13.11.2021	4	96332
5	ER2	1310-02	22.11.2021	1	172194
6	ER2	1341-08	23.11.2021	1	90022
7	ER2	3034-06	26.12.2021	3	151904

**Gumijas korda sajūga bultskrūves atteikumu detalizētais apraksts par 2012-2021g**

Nr. p.k.	Elektrovilcienu Sērija	Vagona Nr.	Atteikumu datums	Vagonu Dīkstāvē (dienas)	Atteikto bultskrūvju daudzums (gab.)	Nobraukums no pēdējā remontā ( km.)
<b>2012</b>						
1	ER2T	2206-02	12.01.2012	1	2	207938
2	ER2	1300-02	27.01.2012	1	1	38708
3	ER2	1341-08	15.02.2012	3	1	192864
4	ER2T	7116-02	05.04.2012	1	2	202044
5	ER2	3034-02	22.05.2012	2	1	153400
6	ER2	989-06	26.05.2012	2	1	139766
7	ER2	8029-08	05.07.2012	2	1	179406
8	ER2	1341-10	17.07.2012	1	1	181922
9	ER2	1310-06	08.08.2012	2	1	122536
10	ER2T	2207-02	10.08.2012	1	1	141674
11	ER2T	7117-08	14.08.2012	1	2	42576
12	ER2	1300-02	21.08.2012	1	1	128334
13	ER2T	7116-02	17.11.2012	1	1	226088
14	ER2T	7117-10	20.11.2012	1	1	110650
15	ER2	8029-08	06.12.2012	2	1	241998
<b>2013</b>						
1	ER2	1300-02	17.01.2013	2	3	197446
2	ER2T	7113-08	23.01.2013	1	1	144460
3	ER2	1342-10	08.02.2013	1	1	255884
4	ER2T	7117-06	11.02.2013	3	1	71694
5	ER2	8029-06	20.02.2013	1	1	237182
6	ER2	989-02	08.03.2013	6	1	29640
7	ER2	1317-10	15.03.2013	1	1	65758
8	ER2T	7114-06	06.05.2013	2	1	79104
9	ER2	8004-02	04.06.2013	2	1	184330
10	ER2T	7117-10	27.06.2013	1	2	181856
11	ER2T	2207-02	02.07.2013	1	1	11558
12	ER2	991-06	10.07.2013	2	1	179432
13	ER2	2024-02	13.07.2013	3	1	172968
14	ER2T	2207-02	30.07.2013	1	1	22572
15	ER2T	7117-10	01.08.2013	1	1	197850
16	ER2	2021-02	05.08.2013	4	1	169196
17	ER2	8029-02	15.08.2013	2	2	237806
18	ER2T	2207-02	19.08.2013	1	1	28908
19	ER2T	7118-06	02.10.2013	1	1	133942
20	ER2T	2207-02	15.10.2013	2	2	50790
21	ER2	991-06	19.11.2013	2	1	214918
22	ER2	989-02	21.11.2013	1	1	121208
23	ER2	964-08	19.12.2013	1	1	81564

2014						
1	ER2T	7115-08	04.01.2014	3	1	2590
2	ER2T	7116-08	16.01.2014	2	1	4582
3	ER2	1300-02	20.01.2014	2	1	70062
4	ER2	3034-04	19.02.2014	1	2	223620
5	ER2	1307-04	17.04.2014	2	1	149786
6	ER2	1341-06	29.04.2014	1	1	111388
7	ER2	8029-06	06.05.2014	2	1	174234
8	ER2T	7117-10	04.06.2014	1	1	75176
9	ER2T	7116-08	08.07.2014	1	1	67820
10	ER2T	7114-04	18.07.2014	1	1	159204
11	ER2T	7116-04	19.07.2014	4	3	18930
12	ER2	2024-02	04.08.2014	1	1	84038
13	ER2	3034-06	10.08.2014	2	1	19112
14	ER2	8029-02	12.08.2014	1	1	140022
15	ER2	1300-10	27.08.2014	5	1	218118
16	ER2T	7116-08	17.09.2014	1	2	97444
17	ER2	1341-06	04.10.2014	4	1	176380
18	ER2T	7113-02	08.10.2014	1	1	176380
19	ER2T	1317-10	14.10.2014	1	1	230262
20	ER2	3034-08	21.11.2014	3	1	171560
21	ER2	964-08	26.11.2014	2	1	171350
22	ER2T	7114-04	30.11.2014	7	1	211214
23	ER2	1300-10	21.12.2014	5	2	251336
24	ER2T	7115-08	27.12.2014	2	1	127160
2015						
1	ER2	1341-06	16.02.2015	1	1	228834
2	ER2T	7113-06	27.02.2015	1	1	152342
3	ER2	964-04	10.03.2015	6	1	30174
4	ER2T	7116-04	01.04.2015	1	2	119244
5	ER2T	7116-08	01.04.2015	1	1	175106
6	ER2T	7113-06	22.04.2015	1	1	170444
7	ER2T	7116-08	21.05.2015	1	1	193542
8	ER2T	7118-08	24.05.2015	4	1	161322
9	ER2T	2206-02	27.05.2015	1	1	15906
10	ER2T	7115-08	27.05.2015	1	1	154840
11	ER2T	7113-06	17.06.2015	3	1	191323
12	ER2T	7116-08	11.08.2015	2	2	223040
13	ER2	8004-06	21.08.2015	2	1	215904
14	ER2T	7113-06	19.09.2015	3	1	225731
15	ER2	1317-06	14.10.2015	2	1	53174
16	ER2	1341-10	20.10.2015	2	2	50110
17	ER2T	7114-06	23.11.2015	1	1	182986
18	ER2	3034-02	28.11.2015	2	1	246996
19	ER2	989-08	30.11.2015	2	1	37730
20	ER2	1317-06	28.12.2015	3	2	85406
21	ER2m	605-06	30.12.2015	3	1	23332
2016						
1	ER2T	7116-04	27.01.2016	0	1	230774
2	ER2T	7117-04	28.01.2016	0	2	107205
3	ER2T	2207-02	19.02.2016	1	1	1908

## Pielikuma 2 turpinājums

4	ER2T	2206-02	26.02.2016	2	1	136228
5	ER2m	605-02	01.03.2016	2	1	51756
6	ER2T	7114-10	02.03.2016	2	1	89420
7	ER2T	2206-02	06.03.2016	2	1	139414
8	ER2T	7117-04	11.03.2016	0	1	124495
9	ER2	1310-02	23.04.2016	4	2	94984
10	ER2T	7114-04	27.04.2016	1	1	169151
11	ER2	1307-06	10.05.2016	2	1	151826
12	ER2T	7115-08	17.05.2016	3	1	71274
13	ER2	1341-10	18.05.2016	2	1	148060
14	ER2	1307-06	12.06.2016	2	1	166568
15	ER2T	7115-08	06.07.2016	1	1	93968
16	ER2T	7117-06	06.07.2016	1	1	185955
17	ER2m	605-02	07.07.2016	1	3	113518
18	ER2	1341-10	26.07.2016	3	1	178292
19	ER2T	7118-02	04.08.2016	3	1	43688
20	ER2T	7115-06	06.09.2016	1	1	130452
21	ER2T	2207-02	02.10.2016	1	1	88121
22	ER2T	7116-10	23.11.2016	3	1	55122
23	ER2	1310-02	05.12.2016	2	1	193490
24	ER2T	7114-10	16.12.2016	1	2	200252
<b>2017</b>						
1	ER2	1310-04	04.01.2017	3	1	16858
2	ER2T	7115-06	23.01.2017	7	1	187644
3	ER2T	2207-02	24.01.2017	3	2	121271
4	ER2	1341-06	25.01.2017	3	1	175944
5	ER2T	7116-10	20.02.2017	2	1	92818
6	ER2T	7114-04	05.03.2017	1	1	21678
7	ER2T	7114-04	18.04.2017	1	2	37484
8	ER2T	7114-04	17.06.2017	1	1	58530
9	ER2	8029-06	05.07.2017	1	1	45450
10	ER2T	7114-04	23.07.2017	1	1	76762
11	ER2T	7114-08	25.07.2017	2	1	112752
12	ER2	1342-04	26.07.2017	1	1	104900
13	ER2	989-08	03.08.2017	4	1	32826
14	ER2T	2206-02	08.08.2017	3	1	98898
15	ER2	1310-10	10.08.2017	1	1	51992
16	ER2T	7117-06	18.08.2017	7	1	73892
17	ER2T	7114-04	17.09.2017	2	1	96672
18	ER2	1342-04	20.10.2017	2	2	136192
19	ER2T	7113-02	17.11.2017	1	1	99706
20	ER2	989-02	27.11.2017	4	1	70814
21	ER2	1310-10	28.11.2017	2	3	88252
22	ER2	8029-02	06.12.2017	2	2	112908
<b>2018</b>						
1	ER2T	7114-08	10.01.2018	2	1	179238
2	ER2	3034-08	23.01.2018	1	1	142046
3	ER2	1294-06	12.02.2018	2	1	60534
4	ER2T	7114-04	28.02.2018	1	1	163518
5	ER2	8029-02	02.03.2018	3	1	159904
6	ER2	989-02	03.03.2018	1	1	121768
7	ER2T	7114-04	07.03.2018	1	1	166428

## Pielikuma 2 turpinājums

8	ER2	1307-06	11.03.2018	2	1	166428
9	ER2T	1317-10	05.05.2018	2	1	101802
10	ER2	1307-10	06.05.2018	4	1	209512
11	ER2	1310-10	20.06.2018	2	2	183454
12	ER2T	7115-08	27.07.2018	3	3	160320
13	ER2	1317-06	13.08.2018	1	1	99446
14	ER2	8029-02	15.08.2018	1	2	210762
15	ER2	1307-06	21.08.2018	2	1	207476
16	ER2	1310-02	31.08.2018	3	1	215448
17	ER2	1342-04	02.09.2018	2	1	204364
18	ER2	3034-06	11.09.2018	1	1	140664
19	ER2T	7113-02	13.09.2018	1	1	211614
20	ER2T	2207-02	20.09.2018	1	3	108188
21	ER2T	7117-06	22.09.2018	1	1	205302
22	ER2	1317-06	23.09.2018	2	1	121024
23	ER2	989-02	23.11.2018	1	1	184457
24	ER2	989-08	23.11.2018	1	1	176063
25	ER2	1310-02	07.12.2018	4	1	226506
26	ER2	605-02	09.12.2018	1	1	215558
27	ER2T	7113-04	12.12.2018	1	1	139476
28	ER2	991-08	15.12.2018	4	1	195294
29	ER2	989-02	20.12.2018	3	1	213499
30	ER2	1317-06	21.12.2018	2	1	156716
31	ER2T	7113-10	31.12.2018	1	1	144524
<b>2019</b>						
1	ER2T	7116-06	03.01.2019	1	1	217254
2	ER2T	1317-10	22.02.2019	1	2	211472
3	ER2	8029-02	26.02.2019	4	1	61178
4	ER2	1307-02	01.03.2019	2	1	93428
5	ER2	1317-06	03.03.2019	4	2	190116
6	ER2T	7117-08	07.03.2019	1	1	186964
7	ER2	1317-06	11.03.2019	1	1	205160
8	ER2T	7115-10	05.05.2019	3	1	48698
9	ER2	1317-06	05.05.2019	1	1	211680
10	ER2	605-02	19.05.2019	1	1	73626
11	ER2	1307-02	28.05.2019	1	1	127542
12	ER2T	7117-08	12.06.2019	4	2	221870
13	ER2T	2207-02	16.06.2019	4	4	197494
14	ER2	1300-02	20.06.2019	1	1	97930
15	ER2T	7118-08	06.07.2019	1	1	200148
16	ER2	8029-06	16.07.2019	1	1	103628
17	ER2T	7117-06	24.07.2019	1	3	73640
18	ER2	989-02	10.08.2019	2	1	46098
19	ER2	989-06	21.09.2019	2	1	176232
20	ER2T	7113-02	29.09.2019	1	1	127582
21	ER2T	7117-04	20.10.2019	4	1	107088
22	ER2T	7118-08	16.11.2019	2	1	234320
23	ER2T	7116-06	19.11.2019	1	1	104708
24	ER2T	7113-10	20.11.2019	2	4	18190
25	ER2	8029-02	23.11.2019	1	1	169836
26	ER2	991-08	23.12.2019	1	1	98602
27	ER2T	7113-08	26.12.2019	1	1	222956



			<b>2020</b>			
1	ER2	1310-10	01.01.2020	1	1	179048
2	ER2	989-08	04.01.2020	1	1	102396
3	ER2	989-08	12.01.2020	1	1	103786
4	ER2	991-04	15.01.2020	1	1	194348
5	ER2	1307-04	24.01.2020	1	1	198844
6	ER2	1341-04	30.01.2020	1	1	67732
7	ER2T	7115-02	03.02.2020	1	2	12506
8	ER2	989-08	12.02.2020	2	1	126134
9	ER2	1342-02	18.02.2020	2	1	19332
10	ER2	1341-10	18.02.2020	1	1	89418
11	ER2	991-02	27.02.2020	1	1	222222
12	ER2	1342-02	02.03.2020	1	1	23688
13	ER2T	7115-02	06.03.2020	1	1	35060
14	ER2m	605-06	07.04.2020	1	2	209794
15	ER2	1342-02	14.04.2020	1	1	26796
16	ER2	1342-02	22.04.2020	1	1	29428
17	ER2	1307-04	11.05.2020	3	2	240452
18	ER2m	605-06	09.05.2020	3	1	225628
19	ER2T	7116-06	26.05.2020	1	1	175682
20	ER2	1341-04	06.06.2020	3	1	117128
21	ER2	991-02	11.06.2020	1	1	254646
22	ER2T	2207-02	14.06.2020	3	1	160848
23	ER2	1310-02	17.06.2020	1	1	247276
24	ER2	1342-02	29.06.2020	2	1	59348
25	ER2	989-08	06.07.2020	1	2	166559
26	ER2	8029-02	03.08.2020	2	1	244354
27	ER2T	7117-04	06.08.2020	3	1	205798
28	ER2T	2207-02	21.08.2020	1	1	116482
29	ER2	989-08	27.08.2020	2	1	193503
30	ER2	3034-06	30.10.2020	2	2	64078
31	ER2	989-06	22.11.2020	3	1	83736
32	ER2	989-08	29.11.2020	1	2	221873
			<b>2021</b>			
1	ER2T	7115-02	25.01.2021	1	1	153402
2	ER2	989-06	04.02.2021	2	1	116123
3	ER2	8004-06	19.02.2021	2	1	179350
4	ER2	1341-04	06.04.2021	1	1	233110
5	ER2	1342-08	16.04.2021	4	1	210733
6	ER2	1317-06	21.04.2021	1	1	220331
7	ER2T	2207-02	24.05.2021	1	2	212582
8	ER2	3034-04	25.05.2021	1	1	82598
9	ER2	989-06	07.07.2021	1	2	185017
10	ER2	1342-02	09.07.2021	6	1	213639
11	ER2T	7116-08	16.07.2021	3	1	160492
12	ER2	3034-08	05.08.2021	1	2	1628
13	ER2	991-04	03.09.2021	2	1	152940
14	ER2	1310-10	11.09.2021	4	1	169844
15	ER2	1307-02	23.09.2021	1	1	238002
16	ER2T	7113-06	20.11.2021	1	1	214596
17	ER2T	7113-06	25.11.2021	1	1	221438
18	ER2T	7114-08	27.11.2021	1	1	219043

## Pielikuma 2 turpinājums

19	ER2T	7114-04	05.12.2021	4	1	156155
20	ER2T	2207-02	13.12.2021	2	1	32450
21	ER2	989-04	18.12.2021	3	3	114310
22	ER2	3034-06	26.12.2021	3	1	155904

## Gumijas korda sajūgu ģeometrisko izmēru noteikšana

Parauga Nr	DIN EN 13913:2003-08, robežvērtības, mm		
	Sānu sienas biezums $\delta_2$ , mm	Ārējās virsmas diametrs D, mm	Iekšējais sēžas diametrs d, mm
	$30^{+2}_{-2}$	580 <sup>+2</sup>	$354^{+2}_{-2}$
	Paraugu mērījumu rādītāji, mm		
4	28,7	581,3	354,5
5	30,4	582,1	355,4
6	29,8	580,0	354,2
7	31,8	580,9	354,0
8	32,3	581,2	353,0
9	31,3	580,4	354,0
10	31,1	581,8	355,1
11	31,5	583,6	353,0
12	31,2	581,0	354,1
13	28,4	582,0	354,3
14	31,9	580,1	354,2
15	30,1	581,7	353,8
16	31,1	580,5	354,0
17	30,2	581,4	354,2
18	31,3	581,0	354,0
19	31,1	581,6	354,4
20	31,4	582,0	354,0
21	29,0	580,9	353,9
22	30,6	580,2	354,2
23	31,4	580,3	354,0
24	29,2	580,5	353,8
25	31,3	581,1	354,1
26	29,9	580,0	354,0
27	30,3	580,8	353,8
28	30,7	580,3	354,2
29	30,2	584,7	354,4
30	31,1	581,4	354,3
31	30,0	580,9	354,1
32	30,5	580,5	354,0
33	29,2	581,0	353,8
34	32,8	580,4	354,6

Parauga Nr	DIN EN 13913:2003-08, robēžētības, mm		
	Sānu sienas biezums $\delta_2$ , mm	Ārējās virsmas diametrs D, mm	Iekšējais sēžas diametrs d, mm
	$30^{+2}_{-2}$	$580^{+2}$	$354^{+2}_{-2}$
	Paraugu mērījumu rādītāji, mm		
35	31,8	580,0	354,0
36	31,6	585,1	355,1
37	29,4	580,0	355,1
38	31,8	581,0	354,0
39	33,4	580,0	354,2
40	29,0	580,0	353,8
41	29,1	580,0	355,0
42	29,6	582,0	355,2
43	29,0	582,0	353,4
44	32,4	580,0	354,3
45	29,0	582,4	354,1
46	29,4	581,0	354,8
47	31,0	581,8	355,4
48	29,0	580,0	354,1
49	29,3	581,2	356,0
50	30,4	582,0	354,8
51	33,1	580,6	354,1
52	33,4	581,0	354,4
53	30,3	581,2	354,7

## Cietības parbaude atkarība no gaisa temperatūras

Cietība pēc Šora A pārklājuma gumijai, nosac.vien		Cietības vidēja vērtība	ISO 14691:2008
		Gaisa temperatūra t -10±2,°C	
Pārbaugs Nr.4	Sānu mala A* augšdaļa	71,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	69,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	69,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	63,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	62,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	61,0	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t -10±2,°C	
Pārbaugs Nr. 5	Sānu mala A* augšdaļa	69,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	71,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	72,3	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	73,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	70,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	71,2	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t -10±2,°C	
Pārbaugs Nr.6	Sānu mala A* augšdaļa	75,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	73,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	75,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	74,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	73,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	71,9	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t -10±2,°C	
Pārbaugs Nr7	Sānu mala A* augšdaļa	74,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	73,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	70,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	73,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	73,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	71,5	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t 0±2,°C	
Pārbaugs Nr.4	Sānu mala A* augšdaļa	70,5	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	71,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	69,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	62,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	60,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	60,1	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t 0±2,°C	
PārbaugsNr. 5	Sānu mala A* augšdaļa	69,5	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	70,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	71,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	73,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	70,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	70,8	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t 0±2,°C	
Pārbaugs Nr.4	Sānu mala A* augšdaļa	74,3	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	73,1	no 50,0 līdz 65,0

	Sānu mala A apakšēja daļa	75,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	74,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	73,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	71,2	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t 0±2,°C	
Pārbaugs Nr.7	Sānu mala A* augšdaļa	68,3	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	70,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	70,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	69,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	68,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	68,2	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t +5±2,°C	
Pārbaugs 4	Sānu mala A* augšdaļa	65,3	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	68,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	66,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	60,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	59,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	58,5	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t +5±2,°C	
Pārbaugs 5	Sānu mala A* augšdaļa	68,3	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	69,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	69,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	70,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	68,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	68,2	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t +5±2,°C	
Pārbaugs 6	Sānu mala A* augšdaļa	72,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	72,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	74,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	73,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	73,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	70,7	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t +5±2,°C	
Pārbaugs Nr. 7	Sānu mala A* augšdaļa	65,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	66,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	64,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	65,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	63,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	62,5	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t +10±2,°C	
Pārbaugs Nr.4	Sānu mala A* augšdaļa	60,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	64,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	64,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	57,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	56,3	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	56,9	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t 1+10±2,°C	
Pārbaugs Nr.5	Sānu mala A* augšdaļa	64,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	65,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	65,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	64,1	no 50,0 līdz 65,0

	Sānu mala B vidusdaļa	64,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	63,9	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra $t+10\pm 2,^{\circ}\text{C}$	
Pārbaugs Nr.6	Sānu mala A* augšdaļa	69,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	69,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	71,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	71,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	70,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	70,1	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra $t+10\pm 2,^{\circ}\text{C}$	
Pārbaugs Nr.7	Sānu mala A* augšdaļa	59,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	64,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	60,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	60,3	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	59,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	60,1	no 50,0 līdz 65,0
			Gaisa temperatūra $t+15\pm 2,^{\circ}\text{C}$
Pārbaugs Nr.4	Sānu mala A* augšdaļa	60,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	62,5	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	60,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	55,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	55,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	54,8	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra $t+15\pm 2,^{\circ}\text{C}$	
Pārbaugs Nr.5	Sānu mala A* augšdaļa	63,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	61,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	64,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	60,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	61,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	62,4	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra $t+15\pm 2,^{\circ}\text{C}$	
Pārbaugs Nr.6	Sānu mala A* augšdaļa	69,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	68,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	69,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	68,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	69,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	66,7	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra $t+15\pm 2,^{\circ}\text{C}$	
Pārbaugs Nr.7	Sānu mala A* augšdaļa	59,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	59,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	58,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	58,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	59,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	60,0	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra $t+20\pm 2,^{\circ}\text{C}$	
Pārbaugs Nr.4	Sānu mala A* augšdaļa	59,7	
	Sānu mala A vidusdaļa	60,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	60,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	54,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	53,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	53,6	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra $t+20\pm 2,^{\circ}\text{C}$	

Paraugs Nr.5	Sānu mala A* augšdaļa	62,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	60,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	61,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	59,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	60,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	62,0	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t+20±2,°C	
Paraugs Nr.6	Sānu mala A* augšdaļa	68,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	67,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	69,0	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	67,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	68,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	66,1	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t+20±2,°C	
Paraugs Nr.7	Sānu mala A* augšdaļa	57,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	59,4	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	58,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	57,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	58,5	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	59,0	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t+30±2,°C	
Paraugs Nr.4	Sānu mala A* augšdaļa	55,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	54,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	55,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	51,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	50,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	50,1	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t+30±2,°C	
Paraugs Nr.5	Sānu mala A* augšdaļa	56,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	55,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	52,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	56,1	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	53,5	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	54,3	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t+30±2,°C	
Paraugs Nr.6	Sānu mala A* augšdaļa	63,7	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A vidusdaļa	65,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	64,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	65,2	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	63,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	65,1	no 50,0 līdz 65,0
		Gaisa temperatūra t+30±2,°C	
Paraugs Nr.7	Sānu mala A* augšdaļa	54,7	
	Sānu mala A vidusdaļa	54,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala A apakšēja daļa	52,8	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B* augšdaļa	51,9	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B vidusdaļa	53,6	no 50,0 līdz 65,0
	Sānu mala B apakšēja daļa	54,1	no 50,0 līdz 65,0

\* A puse (no vilces reduktora puses); B puse (no vilces dzinēja puses).



## Sajūga frekvenču analīze 25 rezonanses pašfrekvencēm.

Izmēginājuma Nr.	Pašfrekvences svarstība, Hz	Sajūga masas koeficientu līdzdalība pa asīm		
		X	Y	Z
1	54,875	0,57193	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$8,34 \cdot 10^{-9}$
2	56,277	0,019497	$2,66 \cdot 10^{-6}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$
3	56,371	0,026082	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$5,89 \cdot 10^{-7}$
4	60,988	$6,83 \cdot 10^{-5}$	$6,73 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$
5	61,338	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$
6	70,263	$1,47 \cdot 10^{-6}$	$4,87 \cdot 10^{-7}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$
7	71,088	$4,73 \cdot 10^{-6}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$	$1,62 \cdot 10^{-6}$
8	79,37	$2,55 \cdot 10^{-7}$	0,00051191	$5,13 \cdot 10^{-6}$
9	84,178	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-7}$
10	84,222	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$6,88 \cdot 10^{-5}$	$4,77 \cdot 10^{-6}$
11	88,258	$1,82 \cdot 10^{-8}$	0,053348	0,38829
12	88,363	$2,14 \cdot 10^{-9}$	0,38813	0,053214
13	100,12	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$1,94 \cdot 10^{-8}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$
14	100,31	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$	$3,43 \cdot 10^{-6}$
15	107,4	$9,34 \cdot 10^{-7}$	$3,30 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$
16	107,57	$1,85 \cdot 10^{-7}$	$2,66 \cdot 10^{-7}$	$4,98 \cdot 10^{-7}$
17	117,36	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$6,86 \cdot 10^{-9}$
18	117,57	$8,89 \cdot 10^{-6}$	$4,37 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
19	121,58	$2,84 \cdot 10^{-8}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$4,10 \cdot 10^{-5}$
20	121,96	$6,96 \cdot 10^{-7}$	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$
21	124,78	$1,23 \cdot 10^{-7}$	0,0012498	0,0069856
22	126,05	$4,85 \cdot 10^{-7}$	0,051109	0,0028651
23	126,22	$1,89 \cdot 10^{-7}$	0,0048182	0,048407

## Pielikuma 5 turpinājums

Izmēginājuma Nr.	Pašvrekves svārstība, Hz	Sajūga masas koeficientu līdzdalība pa asīm		
		X	Y	Z
24	130,19	$2,08 \cdot 10^{-7}$	0,00071017	0,00020342
25	130,26	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$1,79 \cdot 10^{-6}$	0,00014567
$\Sigma$		Sum X = 0,61767	Sum Y = 0,50007	Sum Z = 0,50021

## Sajūga frekvenču analīze 40 rezonanses pašfrekvencēm

Izmēginājuma Nr.	Pašvrekvences svarstība, Hz	Sajūga masas koeficientu līdzdalība pa asīm		
		X	Y	Z
1	54,875	0,57193	1,28 *10 <sup>-6</sup>	8,34 *10 <sup>-9</sup>
2	56,277	0,019497	2,66 *10 <sup>-6</sup>	3,23 *10 <sup>-6</sup>
3	56,371	0,026082	1,97*10 <sup>-8</sup>	5,89 *10 <sup>-7</sup>
4	60,988	6,83*10 <sup>-5</sup>	6,73 *10 <sup>-7</sup>	1,11 *10 <sup>-8</sup>
5	61,338	3,25*10 <sup>-5</sup>	1,77 *10 <sup>-5</sup>	2,80 *10 <sup>-6</sup>
6	70,263	1,47 *10 <sup>-6</sup>	4,87 *10 <sup>-7</sup>	1,26 *10 <sup>-6</sup>
7	71,088	4,73 *10 <sup>-6</sup>	2,80 *10 <sup>-6</sup>	1,62 *10 <sup>-6</sup>
8	79,37	2,55 *10 <sup>-7</sup>	0,00051191	5,13 *10 <sup>-6</sup>
9	84,178	1,94 *10 <sup>-6</sup>	3,23 *10 <sup>-6</sup>	1,99 *10 <sup>-7</sup>
10	84,222	2,47 *10 <sup>-5</sup>	6,88 *10 <sup>-5</sup>	4,77 *10 <sup>-6</sup>
11	88,258	1,82 *10 <sup>-8</sup>	0,053348	0,38829
12	88,363	2,14 *10 <sup>-9</sup>	0,38813	0,053214
13	100,12	1,05 *10 <sup>-6</sup>	1,94*10 <sup>-8</sup>	1,71 *10 <sup>-6</sup>
14	100,31	1,40 *10 <sup>-7</sup>	2,39 *10 <sup>-6</sup>	3,43 *10 <sup>-6</sup>
15	107,4	9,34 *10 <sup>-7</sup>	3,30 *10 <sup>-5</sup>	1,94 *10 <sup>-6</sup>
16	107,57	1,85 *10 <sup>-7</sup>	2,66 *10 <sup>-7</sup>	4,98 *10 <sup>-7</sup>
17	117,36	1,26 *10 <sup>-5</sup>	1,26 *10 <sup>-5</sup>	6,86 *10 <sup>-9</sup>
18	117,57	8,89 *10 <sup>-6</sup>	4,37 *10 <sup>-8</sup>	1,01 *10 <sup>-5</sup>
19	121,58	2,84 *10 <sup>-8</sup>	1,47 *10 <sup>-5</sup>	4,10 *10 <sup>-5</sup>
20	121,96	6,96 *10 <sup>-7</sup>	2,91 *10 <sup>-5</sup>	1,36 *10 <sup>-5</sup>
21	124,78	1,23 *10 <sup>-7</sup>	0,0012498	0,0069856
22	126,05	4,85 *10 <sup>-7</sup>	0,051109	0,0028651
23	126,22	1,89 *10 <sup>-7</sup>	0,0048182	0,048407

## Pielikuma Nr.6 turpinājums

Izmēginājuma Nr.	Pašvrekves svārstība, Hz	Sajūga masas koeficientu līdzdalība pa asīm		
		X	Y	Z
24	130,19	$2,08 \cdot 10^{-7}$	0,00071017	0,00020342
25	130,26	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$1,79 \cdot 10^{-6}$	0,00014567
26	131,38	$6,24 \cdot 10^{-7}$	$2,41 \cdot 10^{-7}$	$7,80 \cdot 10^{-7}$
27	131,65	$1,34 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$8,46 \cdot 10^{-5}$
28	135,2	$3,97 \cdot 10^{-7}$	$2,40 \cdot 10^{-7}$	$2,09 \cdot 10^{-6}$
29	135,33	$1,76 \cdot 10^{-7}$	$5,58 \cdot 10^{-5}$	$4,77 \cdot 10^{-5}$
30	139,61	$2,28 \cdot 10^{-7}$	$6,27 \cdot 10^{-5}$	$7,46 \cdot 10^{-6}$
31	140,13	$1,88 \cdot 10^{-8}$	$6,42 \cdot 10^{-7}$	0,00011461
32	145,89	$8,81 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$8,53 \cdot 10^{-7}$
33	146,61	$9,67 \cdot 10^{-9}$	$2,71 \cdot 10^{-10}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$
34	150,68	$2,40 \cdot 10^{-10}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$2,58 \cdot 10^{-7}$
35	151,21	$7,33 \cdot 10^{-7}$	$5,17 \cdot 10^{-6}$	2,33E-06
36	153,26	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$4,31 \cdot 10^{-7}$	$8,31 \cdot 10^{-7}$
37	153,32	$3,62 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-7}$
38	163,53	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$6,81 \cdot 10^{-6}$	$9,77 \cdot 10^{-7}$
39	163,63	$9,35 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
40	165,91	$2,40 \cdot 10^{-6}$	$1,73 \cdot 10^{-8}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$
$\Sigma$		Sum X = 0,61767	Sum Y = 0,50007	Sum Z =0,50021



## Chemical Results

Probe Nr. / sample ID: BULTSKRUVĒ ER2 1342-02

Grundwerkstoff / material:

Kunde / customer:

Abmessung / dimension:

Kom.-Nr. / commission:

Zusatzwerkstoff / filler metals:

Labor Nr. / lab-no.:

Wärmebehandlung / heat treatment:

PTQ-Nr. / PTQ-no.:

Schmelze-Nr. / heat-no.:

Spektralanalyse Foundry-MASTER

Werkstoff / grade:

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97,3	0,462	0,211	0,606	0,0940	0,0148	0,940	< 0,0030
2	97,0	0,547	0,175	0,552	> 0,125	0,0720	0,856	0,0076
3	97,1	0,506	0,175	0,547	> 0,125	0,0704	0,849	0,0077
Ave	97,1	0,505	0,187	0,568	> 0,125	0,0524	0,882	0,0051

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0,107	0,0280	0,0146	0,171	0,0033	< 0,0020	0,0049	< 0,0250
2	0,117	0,0249	0,0260	0,155	0,0117	0,0032	0,0110	< 0,0250
3	0,121	0,0249	0,0252	0,154	0,0129	0,0036	0,0100	0,0303
Ave	0,115	0,0259	0,0219	0,160	0,0093	0,0025	0,0086	< 0,0250

	Pb	Zr
1	< 0,0100	< 0,0030
2	0,0106	< 0,0030
3	0,0109	< 0,0030
Ave	< 0,0100	< 0,0030

Ort / town

Datum / date

Prüfer / tester

Sachverständiger / expert. Dr.sc.ing. assoc. prof. P. Gavrilovs

05.11.2020

RTU, Transport institute  
Paula Valdena 1  
Riga (Latvia)  
Tel.: +371 29247769  
Web: www.dzti.edu.lv  
e-mail: pavels.gavrilovs@rtu.lv

1.1.att. Bultskrūvju parauga ķīmiskā analīze 1 lapa



## Chemical Results

Probe Nr. / sample ID: BULTSKRUVĒ ER2 3034-06

Grundwerkstoff / material:

Kunde / customer:

Abmessung / dimension :

Kom.-Nr. / commission :

Zusatzwerkstoff / filler metals:

Labor Nr. / lab-no. :

Wärmebehandlung / heat treatment :

PTQ-Nr. / PTQ-no. :

Schmelze-Nr. / heat-no. :

Spektralanalyse Foundry-MASTER Werkstoff / gradl.7033 34Cr4

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Min		0,300	0,0000	0,600	0,0000	0,0000	0,900	0,0000
Max		0,370	0,400	0,900	0,0350	0,0350	1,20	0,100
1	97,5	0,398	0,208	0,631	< 0,0050	< 0,0050	1,0,899	< 0,0030
2	97,6	0,356	0,180	0,603	0,0075	< 0,0050	1,0,894	< 0,0030
3	97,6	0,344	0,168	0,608	0,0059	< 0,0050	1,0,893	< 0,0030
Ave	97,6	0,366	0,186	0,614	< 0,0050	< 0,0050	1,0,896	< 0,0030
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
Min	0,0000	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Max	0,500	0,100		0,200	0,0700	0,0700	0,0700	0,100
1	0,113	0,0266	0,0191	0,175	0,0038	< 0,0020	0,0041	< 0,0250
2	0,101	0,0244	0,0142	0,169	< 0,0030	< 0,0020	0,0024	< 0,0250
3	0,0983	0,0239	0,0117	0,156	< 0,0030	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0250
Ave	0,104	0,0250	0,0150	0,167	< 0,0030	< 0,0020	0,0026	< 0,0250
	Pb	Zr						
Min	0,0000							
Max	0,0500							
1	< 0,0100	< 0,0030						
2	< 0,0100	< 0,0030						
3	< 0,0100	< 0,0030						
Ave	< 0,0100	< 0,0030						

Ort / town

Datum / date  
26.11.2020

Prüfer / tester

Sachverständiger / expert: Dr.sc.ing. asoc. prof. P. Gavrilovs

RTU, Transport institute  
Paula Valdena 1  
Riga (Latvia)  
Tel.: +371 29247769  
Web: www.dzti.edu.lv  
e-mail: pavels.gavrilovs@rtu.lv

1.2.att. Bultskrūvju parauga ķīmiskā analīze 2 lapa

Riga Technical university  
Transport institute



### Chemical Results

Probe Nr. / sample ID: BULTSKRUVĒ ER2T 7117-04

Grundwerkstoff / material:

Kunde / customer:

Abmessung / dimension:

Kom.-Nr. / commission:

Zusatzwerkstoff / filler metals:

Labor Nr. / lab-no.:

Wärmebehandlung / heat treatment:

PTQ-Nr. / PTQ-no.:

Schmelze-Nr. / heat-no.:

Spektralanalyse Foundry-MASTER Werkstoff / grade:

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97,9	0,268	0,124	0,561	0,0851	0,0123	0,906	< 0,0030
2	97,9	0,254	0,132	0,550	0,0793	0,0123	0,907	< 0,0030
3	97,8	0,263	0,135	0,558	0,0796	0,0142	0,909	< 0,0030
Ave	97,9	0,261	0,130	0,556	0,0813	0,0130	0,908	< 0,0030

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0,0249	0,0185	< 0,0050	0,0364	0,0031	< 0,0020	0,0034	< 0,0250
2	0,0329	0,0209	< 0,0050	0,0380	0,0045	< 0,0020	0,0030	< 0,0250
3	0,0358	0,0234	0,0055	0,0404	0,0047	< 0,0020	0,0038	0,0325
Ave	0,0312	0,0209	0,0051	0,0383	0,0041	< 0,0020	0,0034	< 0,0250

	Pb	Zr
1	< 0,0100	< 0,0030
2	< 0,0100	< 0,0030
3	< 0,0100	< 0,0030
Ave	< 0,0100	< 0,0030

Ort / town

Datum / date  
09.03.2021

Prüfer / tester

Sachverständiger / expert: Dr.sc.ing. assoc. prof. P. Gavrilovs

RTU, Transport institute  
Paula Valdena 1  
Riga (Latvia)  
Tel.: +371 29247769  
Web: www.dzti.edu.lv  
e-mail: pavel.gavrilovs@rtu.lv

1.3.att. Bultskrūvju parauga ķīmiskā analīze 3 lapa.

Riga Technical university  
Transport institute



### Chemical Results

Probe Nr. / sample ID: BULTSKRUVĒ ER2T 7113-06

Grundwerkstoff / material:

Kunde / customer:

Abmessung / dimension :

Kom.-Nr. / commission :

Zusatzwerkstoff / filler metals:

Labor Nr. / lab-no. :

Wärmebehandlung / heat treatment :

PTQ-Nr. / PTQ-no. :

Schmelze-Nr. / heat-no. :

Spektralanalyse Foundry-MASTER Werkstoff / grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97,4	0,293	0,196	0,613	0,0915	0,0189	0,912	< 0,0030
2	97,4	0,301	0,196	0,615	0,0841	0,0170	0,923	0,0114
3	97,4	0,353	0,201	0,612	0,0937	0,0219	0,894	0,0069
Ave	97,4	0,316	0,198	0,613	0,0898	0,0193	0,910	0,0065

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0,108	0,0293	0,0165	0,193	0,0047	< 0,0020	0,0041	0,0320
2	0,105	0,0286	0,0164	0,196	0,0054	< 0,0020	0,0050	0,0379
3	0,115	0,0276	0,0143	0,198	0,0051	< 0,0020	0,0058	0,0326
Ave	0,109	0,0285	0,0157	0,196	0,0051	< 0,0020	0,0050	0,0342

	Pb	Zr
1	< 0,0100	< 0,0030
2	< 0,0100	< 0,0030
3	< 0,0100	< 0,0030
Ave	< 0,0100	< 0,0030

Ort / town

Datum / date  
09.03.2021

Prüfer / tester

Sachverständiger / expert: Dr.sc.ing. asoc. prof. P. Gavrilovs

RTU, Transport institute  
Paula Valdena 1  
Riga (Latvia)  
Tel.: +371 29247769  
Web: www.dzti.edu.lv  
e-mail: pavel.gavrilovs@rtu.lv

1.4.att. Bultskrūvju parauga ķīmiskā analīze 4 lapa.



Riga Technical university  
Transport institute



### Chemical Results

√ Probe Nr. / sample ID: JAUNA BULTSKRUVE Grundwerkstoff / material:  
Kunde / customer: GALVINA Abmessung / dimension :  
Kom.-Nr. / commission : Zusatzwerkstoff / filler metals:  
Labor Nr. / lab-no. : Wärmebehandlung / heat treatment :  
PTQ-Nr. / PTQ-no. : Schmelze-Nr. / heat-no. :

Spektralanalyse Foundry-MASTER Werkstoff / gra1.7033 34Cr4

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Min		0,300	0,0000	0,600	0,0000	0,0000	0,900	0,0000
Max		0,370	0,400	0,900	0,0350	0,0350	1,20	0,100
1	97,6	0,352	0,193	L 0,594	H 0,0676		0,0074	L 0,870
2	97,5	0,326	0,190	L 0,598	H 0,0671		0,906	< 0,0033
3	97,6	L 0,288	0,190	L 0,591	H 0,0667		0,0111	< 0,0030
Ave	97,6	0,322	0,191	L 0,594	H 0,0671		0,0099	L 0,898

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
Min	0,0000	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Max	0,500	0,100		0,200	0,0700	0,0700	0,0700	0,100
1	0,0815	0,0205	0,0168	0,166	< 0,0030	< 0,0020	0,0033	< 0,0250
2	0,0958	0,0242	0,0111	0,176	< 0,0030	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0250
3	0,102	0,0265	0,0123	0,176	< 0,0030	< 0,0020	0,0025	< 0,0250
Ave	0,0931	0,0237	0,0134	0,172	< 0,0030	< 0,0020	0,0025	< 0,0250

	Pb	Zr
Min	0,0000	
Max	0,0500	
1	< 0,0100	< 0,0030
2	< 0,0100	< 0,0030
3	< 0,0100	< 0,0030
Ave	< 0,0100	< 0,0030

Ort / town Datum / date Prüfer / tester Sachverständiger / expert: Dr.sc.ing. assoc. prof. P. Gavrilovs  
09.03.2021

RTU, Transport institute  
Paula Valdena 1  
Riga (Latvia)  
Tel.: +371 29247769  
Web: www.dzti.edu.lv  
e-mail: pavel.gavrilovs@rtu.lv

1.5.att. Bultskrūvju parauga ķīmiskā analīze 5 lapa.



DTI

EN ISO/IEC 17025  
T:032Pārskats par svārsta triecientestēšanu  
Pendulum Impact Testing ReportTestēšanas laboratorija  
Testing Laboratory

Pasūtījuma datums Order reception date	01.11.2021.	Pasūtījuma Nr. Order No. P-28819	Pārskata Nr. Report No. 4-4.4.-950-2021	Līguma Nr. Contract No. -	Lapa Page	2 of	no 7							
Pasūtītāja Client	Rīgas Tehniskā universitāte		Izpildītāja Contractor	A/S „Inspecta Latvia” Testēšanas laboratorija										
Pasūtītāja adrese Client address	Kaļķu iela 1, Rīga, LV-1050		Izpildītāja adrese Contractor address	Skanstes 54a, Rīga, Latvija, LV-1013										
Īpašnieka Owner	Rīgas Tehniskā universitāte		Testēšanas vieta Test location	Skanstes 50b, Rīga, Latvija, LV-1013										
Objekts Object	Bultskrūve M24, lietota.													
Pamatmetāls Parent metal	Stiprības klase 10.9 saskaņā ar LVS EN ISO 898-1:2013		Pildmetāls Filler metal	-										
Metināšanas process Welding process	-		Termiskā apstrāde Heat treatment	-										
Inspecta Latvia Testēšanas laboratorija visos gadījumos nevar apliecināt peļņajos laucīņos uzrādītās informācijas patiesumu Information in grey fields cannot in all instances be verified by Inspecta Latvia Testing Laboratory														
Testēšanas metode Testing method	LVS EN ISO 148-1:2017		Koncentratora tips Type of notch	V	Parauga ņemšanas metode Sampling method	LVS EN ISO 898-1:2013								
Testēšanas iekārta Testing machine	Zwick/Roell RKP450		Testēšanas iekārta Nr. Testing machine ID No.	231080/2015	Svārsta tips Pendulum type	"C"	Beļzija rādītājs, mm Striker radius, mm							
Kondicionēšanas vietas tips Conditioning medium	Šķidrums Liquid		Termometra tips Thermometer type	TM-917	Termometra ID Nr. Thermometer ID No.	M40377								
Parauga Nr. Testing piece No.	Parauga izmēri Test piece dimensions				Potenciālā enerģija Potential energy $K_p, J$	Kondicionēšanas / testēšanas temperatūra Conditioning/Testing temperature $T, ^\circ C$	Absorbētā enerģija Absorbed energy $KV_p, J$	Absorbētā enerģija parprofilu paraugam Absorbed energy / total cross section test piece $KV_t, J^0$	Triecienizturība Impact toughness KCV, J/cm <sup>2</sup>	Viesera stara pozīcijas leņķis $\alpha_0, ^\circ$	Viesera beigu pozīcijas leņķis pēc parauga sabrukšanas $\alpha_0, ^\circ$	Testēšanas datums Date of testing	Papildināta mērījumu nenoliktība U(KV), KV Extended uncertainty U(KV), KV	
	Garums / Length L, mm	Augstums / Height h, mm	Platums / Width w, mm	Augstums šķērsgriezuma noapaļotā gabarītā Height above notch 8,011										Šķērsgriezuma laukums Cross section area $S_n, cm^2$
1	55,0	10,013	10,012	8,011	0,80	450	+20	54,5	-	67,9	149,29	129,35	01.12.2021.	2,6

Prasības saskaņā ar LVS EN ISO 898-1:2013 (3. tabula) min 27J pilna profila testējamam paraugam (10,0x10,0 mm)

1) - parametrs tiek aprēķināts nominālā šķērsgriezuma paraugam ar izmēriem  $w=2 \times 10,00 \times 8,00$  (mm).  
parameter recalculated for nominal cross section test piece with dimensions  $w=2 \times 10,00 \times 8,00$  (mm)  
Aptiprināšanas datums 14.09.2027.  
Dokumenta reģ. Nr. 4-1.7/53  
Revisija Nr.02

Izpildītāja Operator

Ē. Dīlbeks

Atbildīgais Responsible person

V. Buzinskis

Datums Date

07.12.2021.

Datums Date

07.12.2021

Paraksts Signature

Paraksts Signature

Baz laboratorijas vadītāja rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana nepilnā apjomā.  
It is not allowed to reproduce the test report partially without a written approval of laboratory manager.

1.7.att. Svarsta triecientestēšanas pārskats 2 lapa

DTm

## Pārskats par makro/mikroskopisko testēšanu

Testēšanas laboratorija

## Macro/microscopic Testing Report

Testing Laboratory

Pasūtījuma datums Order reception date	01.11.2021.	Pasūtījuma Nr. Order No. P-28819	Pārskata Nr. Report No. 4-4.4.-950-2021	Līguma Nr. Contract No. -	Lapa Page	3 of	7	
Pasūtītājs Client	Rīgas Tehniskā universitāte			Izpildītājs Contractor	A/S „Inspecta Latvia” Testēšanas laboratorija			
Pasūtītāja adrese Client address	Kaļķu iela 1, Rīga, LV-1050			Izpildītāja adrese Contractor address	Skanstes 54a, Rīga, Latvija, LV-1013			
Ipašnieks Owner	Rīgas Tehniskā universitāte			Testēšanas vieta Test location	Skanstes 50b, Rīga, Latvija, LV-1013			
Objekts Object	Bultskrūve M24, lietota.							
Pamatmetāls Parent metal	Stiprības klase 10.9 saskaņā ar EN ISO 898-1:2013			Pildmetāls Filler metal	-			
Metināšanas process Welding process	-			Termiskā apstrāde Heat treatment	-			
Inspecta Latvia Testēšanas laboratorija visos gadījumos nevar apliecināt pelēkajos laucīņos uzrādītās informācijas patiesumu Information in grey fields cannot in all instances be verified by Inspecta Latvia Testing Laboratory								
Testēšanas metode Testing method	Mikroskopiskā (metalogrāfiskā) testēšana				Testēšanas temperatūra, °C Testing temperature, °C	+21,0		
Mērinstruments, Nr. Equipment ID	Olympus GX53				Palielinājums Magnification	500x-1000x		
Virsmas stāvoklis Surface condition	Pulēta Polished	Kodināšanas veids Etching method	legremdēšana Immersing	Kodinātājs Etchant	Tabula A.1 saskaņā ar LVS CEN ISO/TR 16060			
Kvalitātes prasības Quality requirements	-				Papildus prasības Additional requirements	-		
Parauga Nr. Test piece No.	Izmēri, mm Dimensions, mm	Testēšanas datums Date of testing	Metinātāja zīmogs Welder ID	Konstatētie rādītāji Results			Atbilst Comply	Neatbilst Does not comply
1	M24	03.12.2021.	-	Ir redzama rūdīta struktūra - apakšējais beinīts. Bultskrūves ass zonā ir redzami smalki (3-3µm) atsevišķi izveidēti nemetāliski ieslēgumi, kuru izcelsme ir tērauda liešanas process. Iekšēji mikrostrukturās ekspluatācijas defekti (mikroplaisas) nav novērojami.			-	-
Skices, Fotogrāfijas, piezīmes/ Sketches, photographs, notes								
Aptiprināšanas datums 14.09.2017. Dokumenta reģ. Nr. 4-1.7./42 Redakcija Nr.4		Izpildītājs Operator Sertifikāta Nr. Certificate No	V. Buzinskis 2-4.4.1/698NDT/2020 VT2	Atbildīgais Person Sertifikāta Nr. Certificate No	V. Buzinskis 2-4.4.1/698NDT/2020 VT2	Datums Date 07.12.2021.		
		Datums Date Paraksts Signature	07.12.2021.	Datums Date Paraksts Signature	07.12.2021.	Siv./Seal		

Bez laboratorijas vadītāja rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana nepilnā veidā.  
It is not allowed to reproduce the test report partially without a written approval of laboratory manager.

1.8.att.Mikroskopiskā testēšana pārskats 3 lapa.

**DTm**

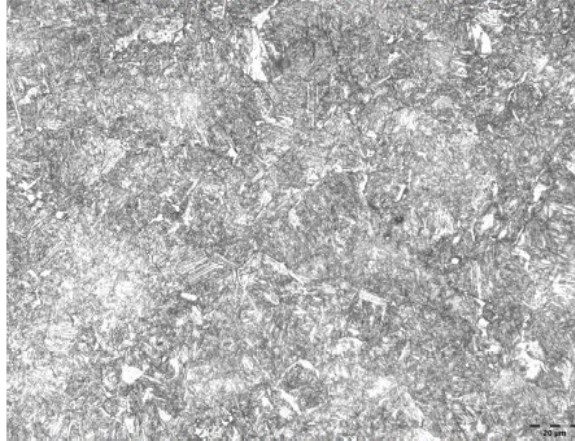


**Pārskats par makro/mikroskopisko testēšanu**  
**Macro/microscopic Testing Report**

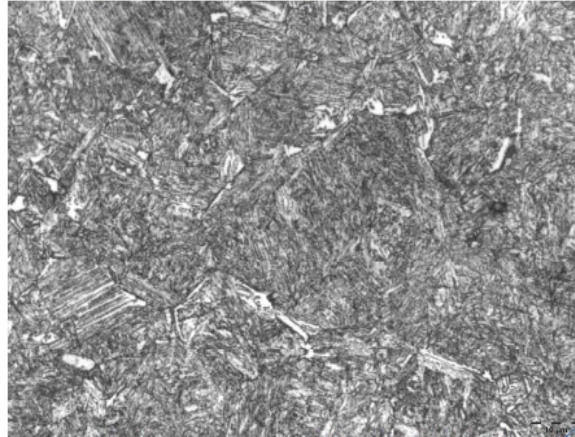
**Testēšanas laboratorija**  
**Testing Laboratory**

Pasūtījuma datums Order reception date	01.11.2021.	Pasūtījuma Nr. Order No. P-28819	Pārskata Nr. Report No. 4-4.4.-950-2021	Līguma Nr. Contract No. -	Lapa Page	4 of	7
---	-------------	-------------------------------------	--	------------------------------	--------------	---------	---

**Paraugs Nr. 1. Mikrostruktūra parauga centrā, palielinājums 500x**



**Paraugs Nr. 1. Mikrostruktūra parauga centrā, palielinājums 1000x**



Izpildītājs Operator	V. Buzinskis	Atbildīgais Responsible person	V. Buzinskis
Sertifikāta Nr. Certificate No	2-4.4.1/698NDT/2020	Sertifikāta Nr. Certificate No	2-4.4.1/698NDT/2020
Datums Date	07.12.2021.	Datums Date	07.12.2021.
Paraksts Signature	<i>[Signature]</i>	Paraksts Signature	<i>[Signature]</i>

Auslīpēšanas datums 14.09.2017.  
 Dokumenta reģ. Nr. 4-1.7./42  
 Redakcija Nr.4



Bez laboratorijas vadītāja rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana nepilnā apmērā.

1.9.att.Mikroskopiskā testēšana pārskats 4 lapa.



**DTm**

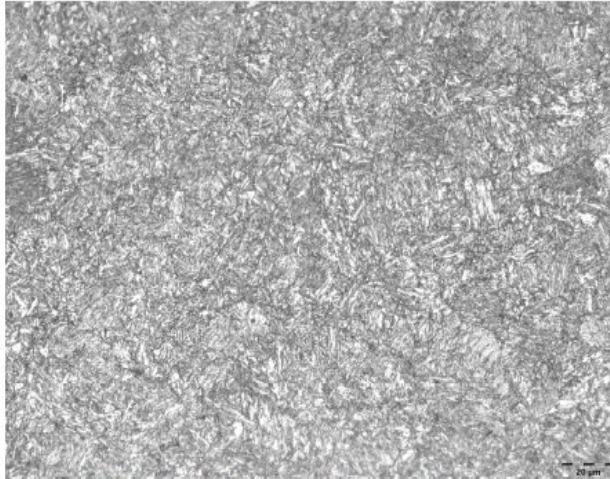


**Pārskats par makro/mikroskopisko testēšanu**  
**Macro/microscopic Testing Report**

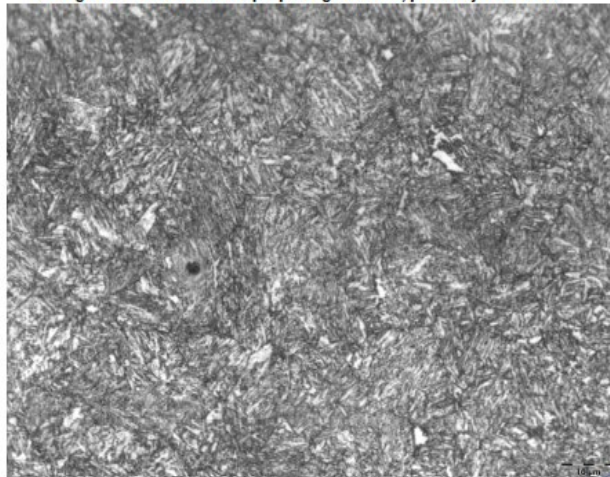
**Testēšanas laboratorija**  
**Testing Laboratory**

Pasūtījuma datums Order reception date	01.11.2021.	Pasūtījuma Nr. Order No. P-28819	Pārskata Nr. Report No. 4-4.4.-950-2021	Līguma Nr. Contract No. -	Lapa Page	5 of	7
---	-------------	-------------------------------------	--	------------------------------	--------------	---------	---

**Paraugs Nr. 1. Mikrostruktūra pie parauga virsmas, palielinājums 500x**



**Paraugs Nr. 1. Mikrostruktūra pie parauga virsmas, palielinājums 1000x**



Izpildītājs Operator Sertifikāta Nr. Certificate No 2-4.4.1/698NDT/2020 Datums Date 07.12.2021. Paraksts Signature	V. Buzinskis Atbildīgais Responsible person Sertifikāta Nr. Certificate No VT2 07.12.2021. Paraksts Signature	V. Buzinskis Atbildīgais Responsible person Sertifikāta Nr. Certificate No VT2 07.12.2021. Paraksts Signature



Bez laboratorijas vadītāja rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana nepilnā apmērā.

1.10.att.Mikroskopiskā testēšana pārskats 5 lapa.

DTh


**Pārskats par cietības noteikšanu**  
**Hardness Testing Report**
**Testēšanas laboratorija**  
**Testing Laboratory**

Pasūtījuma datums Order reception date	01.11.2021.	Pasūtījuma Nr. Order No. P-28819	Pārskata Nr. Report No. 4-4.4.-950-2021	Līguma Nr. Contract No. -	Lapa Page	6 of	7
Pasūtītājs Client	Rīgas Tehniskā universitāte		Izpildītājs Contractor	A/S „Inspecta Latvia” Testēšanas laboratorija			
Pasūtītāja adrese Client address	Kaļķu iela 1, Rīga, LV-1050		Izpildītāja adrese Contractor address	Skanstes 54a, Rīga, Latvija, LV-1013			
Ipašnieks Owner	Rīgas Tehniskā universitāte		Testēšanas vieta Test location	Skanstes 50b, Rīga, Latvija, LV-1013			
Objekts Object	Bultskrūve M24, lietota.						
Pamatmetāls Parent metal	Stiprības klase 10.9 saskaņā ar EN ISO 898-1:2013		Pildmetāls Filler metal	-			
Metināšanas process Welding process	-		Termiskā apstrāde Heat treatment	-			
Inspecta Latvia Testēšanas laboratorija visos gadījumos nevar apliecināt pelēkajos laucīņos uzrādītās informācijas patiesumu Information in grey fields cannot in all instances be verified by Inspecta Latvia Testing Laboratory							
Testēšanas metode Testing method	LVS EN ISO 6507-1:2006			Testēšanas temperatūra, °C Testing temperature, °C	+21,0		
Cietības mērītājs/ Nr. Hardness gauge/ ID.	Gness A30+/Q01530912	Indentors (Zonde)/ Nr. Indenter (Probe)/ID.	2511	References bloks / Nr. Reference material / No.	153,7 HV10 / EP161842		
Testēšanas spēks, N Test Force, N	98,07	Izturēšanas laiks, sek Duration time, sec	12	Objektīvs Objective	10:1		
Kvalitātes prasības Quality requirements	320+380 HV10 atbilstoši LVS EN 898-1:2013			Papildus prasības Additional requirements	-		
Parauga Nr. Test piece No.	Materiāls Material	Izmērītā cietība, HV Measured hardness, HV			Paplašinātā mērījumu nenoteiktība U, HV Expanded uncertainty* U, HV	Testēšanas datums Testing date	Novērtējums Assessment
		min	max	vidēja average			
1	Stiprības klase 10.9	354	375	369	2,2	01.12.2021.	Atbilst
Piezīme: * paplašinātā mērījumu nenoteiktība ir noteikta pie ticības līmeņa 95% un pārklāšanās koeficienta k=2. Extended uncertainty calculated for a 95 % level of confidence with coverage function k=2. Aptiecināšanas datums 14.09.2017. Dokumenta reģ. Nr. 4-1.7./54 redakcija Nr.01		Izpildītājs Operator		Ē. Dīlbeks	Atbildīgais Responsible person		
		Datums Date		07.12.2021.	Datums Date		
		Paraksts Signature			Paraksts Signature		

Bez laboratorijas vadītāja rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reprodūkcija neilnā formā.

1.11. att. Cietības noteikšanas pārskats 6 lapa

**MC**



**Pārskats par metāla sakausējuma analīzi**  
**Report on Metal Alloy Composition Examination**

**Testēšanas laboratorija**  
**Testing Laboratory**

Pasūtījuma datums Order reception date	01.11.2021.	Pasūtījuma Nr. / Order No.	P-28819	Pārskata Nr. / Report No.	4-A-480-2021	Līguma Nr. / Contract No.	-	Lapa / Page	7 of 7
Pasūtītājs Client	Rīgas Tehniskā universitāte	Izpildītājs Contractor	AIS „Inspecta Latvia” Testēšanas laboratorija	Izpildītāja adrese Contractor address	Skanstes 54a, Rīga, Latvija, LV-1013	Testēšanas vieta Test location	Skanstes 50b, Rīga, Latvija, LV-1013		
Pasūtītāja adrese Client address	Kaļiņu iela 1, Rīga, LV-1000								
Īpašnieks Owner	Rīgas Tehniskā universitāte								
Objekts Object	Būvstruktūra M24, Rētola.								

Inspecta Latvia Testēšanas laboratorija nevienam paraugam atļauj testēšanas procedūru

Inspecta Latvia Testing Laboratory doesn't provide sampling procedure

Objekta saņemšanas datums:  
Date when object was receipt:

Testēšanas procedūra Testing procedure	<input checked="" type="checkbox"/> AIS "Inspecta Latvia" testēšanas procedūra Nr: 4-1.402 AIS "Inspecta Latvia" test procedure Nr 4-1.402	<input type="checkbox"/> Citi normatīvie dokumenti Other regulations	<input type="checkbox"/> LVS CR 10216	<input type="checkbox"/> Citi Other	<input type="checkbox"/> ISO 10113
---	---	---	---------------------------------------	--	------------------------------------

Mērītāja / Ident. Nr. Gauge / ID No.	<input checked="" type="checkbox"/> RETACH OE750 / 78A1010	Māksa mērījuma mēģinājuma & termometrija Humidity gauge & thermometer:	<input checked="" type="checkbox"/> IWSM00No: M 40411
Mērīšanas iekārtas Equipment:	<input type="checkbox"/> Biežumskaure Thickness gauge	<input type="checkbox"/> Sēdnieks Calliper	<input type="checkbox"/> Mērķeris Type
Temperatūra objektā, °C Temperature of object, °C:	+21,4	Gaisa mitrums, % Humidity, %:	44,0%
Testējamā materiāla biezums, mm Thickness of test material, mm:	-	Testēšanas programma: Testing matrix:	Fe_100

Identifikācija Identification	Paraugs Nr. Sample No:	1	Mārka Grade	Sērijas Nr.ise 10.3 serial no EN ISO 898-1:2013
----------------------------------	---------------------------	---	----------------	--

Īsiskais elements Chemical element	Identifikācija Identification		Mārka Grade	Sērijas Nr.ise 10.3 serial no EN ISO 898-1:2013
	Paraugs Nr. Sample No:	1		
	% no sastāva % percentage	* Pajūkātā mērījuma nenoteiktība, U Estimated uncertainty, U	Norma % no sastāva % percentage norm	Novērtējums Assessment

Īsiskais elements, kas ir būtiski metāla sakausējuma sastāva analīzes procesā  
Chemical elements essential to the metal alloy composition analysis process

C	0,40	0,0099	0,20 + 0,05	Atbilst
Si	0,19	0,0162	-	-
Mn	0,82	0,0300	-	-
P	0,0063	0,0035	max 0,025	Atbilst
S	0,0008	-	max 0,025	Atbilst
Cu	0,17	0,0063	-	-
Ni	0,10	0,0370	-	-
Cr	0,82	0,0468	-	-
Mo	0,021	-	-	-

Īsiskais elements – papildus informācija mērļa sakausējuma sastāva analīzes procesā  
Chemical elements – additional information to the metal alloy composition analysis process

Al	0,029	-	-	-
Co	0,010	0,0081	-	-
Ti	0,0017	-	-	-
V	0,0044	-	-	-
W	0,0038	-	-	-
Nb	0,0017	-	-	-
B	0,0002	-	max 0,003	Atbilst
Fe	97,5	-	-	-
Ceq	-	-	-	-

Paklāvis/Remarks:

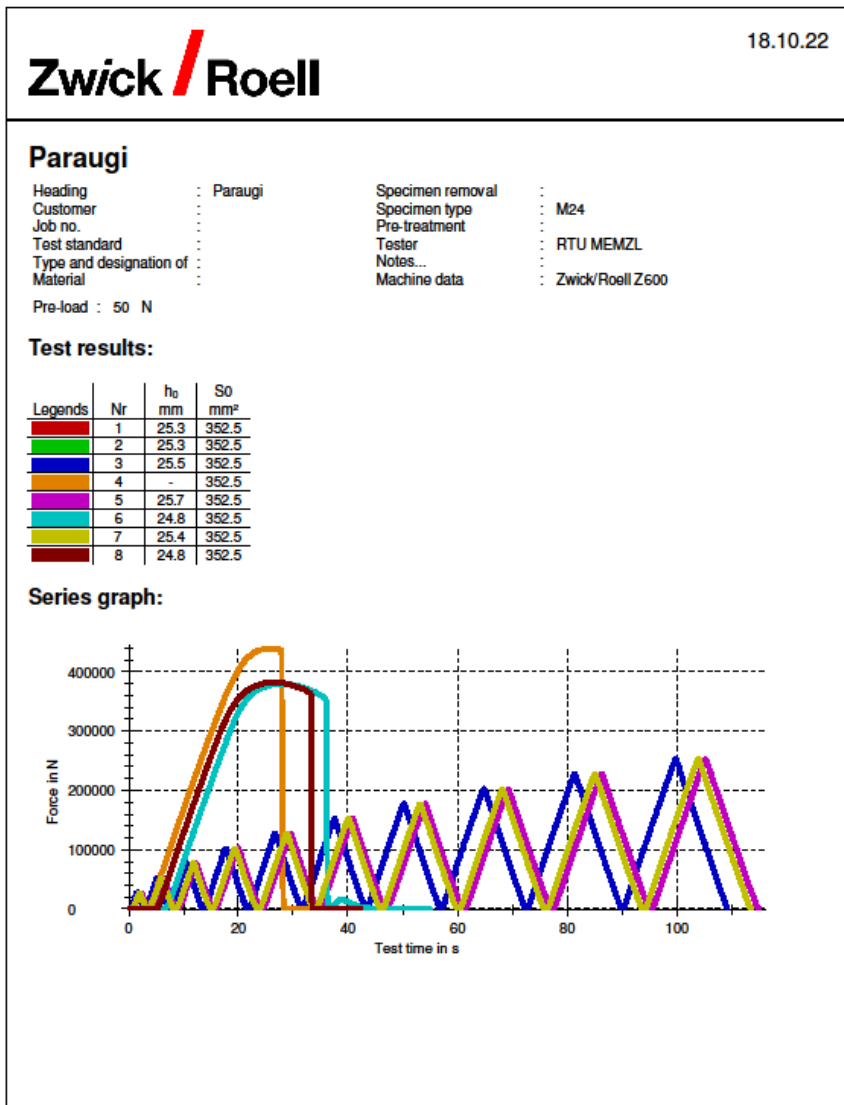
* Pajūkātā mērījuma nenoteiktība, U tai aprēķināta ņemot vērā 90% ticamības līmeni un pārtēšanas koeficientu k=2	Testēšanas datums Date	07.12.2021.	Atbildīgais Person Responsible person	J. Buzhinskaya
Aptērtības datums 14.09.2017. Dokumenta pag. Nr. 4-1.7.44 Redakcija Nr. 06	Pārskata Paraksts Signature		Pārskata Paraksts Signature	

Testēšanas rezultāti ir atļauts atkārtot tikai uz testēto objektu / The test results apply only to the tested object  
Bez laboratorijas vadītāja rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana neplūnā atkārtot.  
Without written approval of laboratory manager it is not allowed to reproduce the test report except in full



1.12. att. Metāla sakausējuma analīzes pārskats 7 lapa





Page1/2

1.13.att Bulstrūvju dinamiska noslogošnas un sairšnas slodzes grafiki.

## Rekomendācijas

Gumijas korda sajūgu un to stiprinājuma bultskrūvju atteikumu novēršanai:

1. Pirms katra gumijas korda sajūga uzstādīšanas obligāti jāveic to vizuālo apskati uz bojājuma pazīmēm, kā arī gumijas korda sajūga vizuālo apskati jāveic katru reizi pēc agregāta apstāšanās. Bojājumu pazīmju konstatēšanas gadījumā gumijas korda sajūgu jānomaina.
2. Labākai gumijas korda sajūgu noviržu aksiālā, radiālā un leņķiskā virzienā mērīšanai, tā obligāti jāveic trijās vietās - pie 0°; 90°; 180° pa sajūga loku.
3. Pamatojoties uz atteices statistikas datiem, ierosināts selektīvi pārbaudīt 5 % no gumijas korda sajūgu partijās, to ģeometriskos izmēru un cietības parametru noteikšanai. Ja parametri neatbilst standarta prasībām, atkārtoti pārbaudīt 10 % no korda sajūga partijās. Ja atkārtoto periodisko pārbaudu rezultāti ir pozitīvi, sajūgu partiju tiek piedāvāts atļaut nodot ekspluatācijā. Ja 10 % gumijas korda sajūgu pārbaudes rezultātā tiek konstatēts, ka vairāk nekā 1 sajūgs neatbilst standarta parametriem, visa partija ir jāatgriež ražotājam ar reklamāciju.
4. Pēc temperatūras paaugstināšanās virs normas robežas, pārbaudīt gumijas korda sajūgu uz bojājuma pazīmēm un veikt cietības pārbaudi. Ja periodiski tiek konstatēts, ka tiek pārsniegta pieļaujamā temperatūra, organizēt pasākumus gumijas korda sajūga uzsildīšanas temperatūras samazināšanai. Temperatūras režīma pārsniegšanas gadījumā jāveic pasākumi, lai piespiedu kārtā samazinātu sajūga temperatūru, nodrošinot tā dzesēšanas iespēju pielietojot dažāda veida ventilēšanu.
5. Pēc gumijas korda sajūgu cietības mērījumu rezultātiem eksperimentāli pierādīts gumijas korda sajūga cietības palielinājums no 0 °C līdz -20 °C temperatūras diapazonos. Līdz ar to ir izteikta rekomendācija ierosināt gumijas korda sajūgu ražotājiem veikt izmaiņas ķīmiskajā sastāvā ar mērķi samazināt cietības parametru pie zemām temperatūrām.
6. Balstoties uz SolidWorks modelēšanas rezultātu datiem, tiek piedāvāts ierobežot gumijas korda sajūgu darbu virs 110 km/h (1670 apgr./min). Vai arī jauniem sajūgiem modificēt gumijas korda apvalka ģeometriskos parametrus, kā arī nepieļaut sajūga ilgstošu darbību ar mazu apgriezīenu skaitu, diapazonā līdz 130 apgr/min.
7. Pamatojoties uz bultskrūvju atteices statistikas datiem, tika ierosināts selektīvi pārbaudīt 1% no gumijas korda sajūga stiprinājuma bultskrūvju partijās un attiecīgi jāveic:
  - atlasīto bultskrūvju partijas ķīmiskās analīzes kontrole attiecībā uz pieņemamu oglekļa (*C*) satura līmeni un kaitīgu piemaisījumu, fosfora (*P*), klātbūtni metālā un datu salīdzināšana ar ISO un EN standartu datiem;
  - jaunām bultskrūvēm un bultskrūvēm ar noteiktu nobraukumu (darbības laiku) atlasīti jāpārbauda ārējās un iekšējās virsmas cietība *HB* un jāsalīdzina dati ar ISO un EN standarta datiem;
  - ja pārbaudes rezultātā konstatēta neatbilstība ISO vai EN standartu prasībām, tad 5 % no partijas atkārtoti veikt padziļinātu pārbaudi;
  - ja 5 % bultskrūvju padziļinātas pārbaudes rezultātā tiek konstatēts, ka vairāk nekā 1 % no kopējās pārbaudu partijas bultskrūvju daudzuma neatbilst ISO vai EN standarta parametriem, visa partija ir jāatgriež ražotājam ar reklamāciju.
8. Lai kontrolētu triecienvibrācijas slodžu līmeni, tiek ierosināts aprīkot atbildīgos mezglus, kuri pakļaujas triecienvibrācijas slodzēm, ar triecienvibrācijas ierīci.

## Atsauksme par Dmitrija Gorbačova promocijas darbu

Rīgas Tehniskā Universitāte Transporta institūta doktoranta Dmitrija Gorbačova ziņojums par promocijas darbu, kura tēma "**Gumijas korda elastīgā sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu pētījums**".

Uzstājās ar promocijas darba ziņojumu, kura ietvaros tika sniegti dažādi pētījumi, ar mērķi samazināt gumijas korda sajūga un to stiprinājuma bultskrūvju atteikuma skaitu. Sevišķu interesi SIA "LDZ ritošā sastāva serviss" inženiertehniskiem darbiniekiem izsauca promocijas darba tēmas, kuras aprakstīti gumijas korda sajūga eksperimentālie pētījumi izpildīti ar Solid Work programmas pakotnes palīdzību. Izpildīti promocijas darbā eksperimentālie pētījumi ir zinātniski nozīmīgi, gan teorētiskajos, gan praktiskajos līmeņos.

Uzskatām, ka doktoranta Dmitrija Gorbačova piedāvātas rekomendācijas un izstrādāta metodika ļaus samazināt gumijas korda sajūga atteikumu skaitu un tos var izmantot ar turpmāku ieviešanu ekspluatācijā SIA "LDZ ritošā sastāva serviss" uzņēmumā.

Ar cieņu,  
SIA "LDZ ritošā sastāva serviss"  
Lokomotīvu remonta centra vadītājs



A. Naumovs


A. Naumovs,  
SIA "LDZ ritošā sastāva serviss"  
Lokomotīvu remonta centra  
Vadītājs

### Atsauksme par Dmitrija Gorbačova promocijas darbu

AS "Pasažieru vilciens" inženiertehniskie darbinieki 2023.gada maijā noklausījās un novērtēja Rīgas Tehniskās universitātes Transporta institūta doktoranta Dmitrija Gorbačova ziņojumu par promocijas darbu, kura tēma "Gumijas korda elastīgā sajūga un tā stiprinājuma bultskrūvju atteikumu pētījums". AS "Pasažieru vilciens" inženiertehnisko darbinieku īpašu interesi izsauca pētījumi par bultskrūvju stiprinājuma trieciena un vibrācijas spēka kontroles ierīces projektēšanu un testēšanu. Izpildītie promocijas darba eksperimenti un teorētiskie pētījumi pierāda, ka ar šo ierīču palīdzību agrīnās stadijās var noskaidrot trieciena un vibrācijas bīstamos līmeņus, kas savukārt dod iespēju pastāvīgi uzkrāt datus un analizēt trieciena un vibrācijas līmeni, un gala rezultātā veicot preventīvus pasākumus samazināt vilces piedziņas elementu atteikuma skaitu.

Tiek uzskatīts, ka promocijas darbā atspoguļotajiem pētījumiem ir ievērojama gan zinātniska, gan arī praktiska nozīme un to ieviešana ļaus efektīvi samazināt gumijas korda elastīgo sajūgu atteices ritošajā sastāvā, kur šādi sajūgi tiek pielietoti. Šobrīd AS "Pasažieru vilciens", ņemot vērā to, ka tuvākajā laikā tiek plānota ritošā sastāva nomaiņa, šādas metodikas pielietošanu neizskata, bet var rekomendēt tās pielietošanu citos dzelzceļa transporta uzņēmumos, kuri izmanto riteņus vai mehānismus aprīkotos ar gumijas kordas elastīgu sajūgu.

19.05.2023.

  
Dr.sc.ing. Fjodors Mihailovs  
AS "Pasažieru vilciens"  
FJODORS MIHAILOVS  
Tehniskā departamenta vadītājs



**Dmitrijs Gorbačovs** dzimis 1974. Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura grādu mašīnzinībās (2008) un maģistra grādu dzelzceļa transportā (2012). No 1994. līdz 2001. strādājis Rīgas lokomotīvu depo, no 2001. līdz 2007. gadam – SIA "LDZ ritošā sastāva serviss", ieņemot atslēdznieka amatu. Kopš 2007. gada ir AS "Pasažieru vilciens" vecākais inženieris tehnologs. Saņēmis dažādus Latvijas dzelzceļa transporta uzņēmuma apbalvojumus: "Par ilggadēju darbu dzelzceļa nozarē" (2009); "Labākais LDZ inženieris" (2012); Pateicības raksts "Par profesionālo prasmju paaugstināšanu un jauno darbinieku sagatavošanu" (2012).

Zinātniskās intereses saistītas ar pētījumiem dzelzceļa transporta nozarē.