

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Aeronautikas institūts

Sergejs BRATARČUKS
Doktora studiju programmas „Transports” doktorants

**SAUSZEMES TRANSPORTA OBJEKTU UN
KONSTRUKCIJU TEHNISKĀ STĀVOKĻA
NOVĒRTĒŠANA AR AKUSTISKĀS EMISIJAS METODI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
M. BANOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2017

Bratarčuks S. Sauszemes transporta objektu un konstrukciju tehniskā stāvokļa novērtēšana, ar akustiskās emisijas metodi. – R.: RTU Izdevniecība, 2017. – 39 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes „RTU P-22” 2016. gada 10. novembra lēmumu, protokols Nr. 05/2016.

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gada 14. septembrī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes MTAF Aeronautikas institūtā, Lomonosova ielā 1A, k-1, 218. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing. Andrey Shaniavski*
Avioreģistra Materiālu pētījumu nodaļa, Krievija

Profesors *Dr. habil. sc. ing. Valdis Priednieks*
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Asoc. profesore *Dr. sc. ing. Margarita Urbaha*
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Sergejs Bratarčuks (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 10 pielikumu, 91 attēls, 10 tabulas, kopā 200 lappuses. Literatūras sarakstā ir 161 nosaukums.

Satura rādītājs

Promocijas darba vispārējs raksturojums	5
1. nodaļa. Sauszemes transporta sistēmu tehniskā stāvokļa novērtēšanas metožu analīze.....	9
2. nodaļa. Sauszemes transporta konstrukciju BOJAJUMU uz akustiskās emisijas metodes balstītu eksperimentālo pētījumu metodoloģija	10
2.1. Tehniskā stāvokļa novērtēšanas objekti.....	10
2.1.1. Ķeguma HES tilts	10
2.1.2. Lokomotīves ratiņu rāmji un pagalvji	11
2.1.3. Spriegota betona gulšņi	12
2.2. Testēšanas uzdevumi	12
2.3. AE reģistrēšanas un mērīšanas aparatūra.....	13
2.4. Ķeguma tilts tehniskā stāvokļa novērtēšanas metodoloģija.....	13
2.5. 2M62 lokomotīves ratiņu rāmju un pagalvju tehniskā stāvokļa novērtēšanas metodoloģija	14
2.6. Spriegoto betona gulšņu testēšanas programma.....	16
3. nodaļa. Sauszemes transporta objektu bojājumu mehānismu eksperimentālie pētījumi un tehniskā stāvokļa novērtēšana ar akustiskās emisijas metodi	18
3.1. Ķeguma HES tilts tehniskā stāvokļa novērtēšanas galvenie rezultāti	18
3.2. Lokomotīves ratiņu rāmja un pagalvju tehniskā stāvokļa novērtējums.....	19
3.3. AE signālu īpašības spriegota dzelzsbetona gulšņos stenda izmēģinājumos.....	20
4. nodaļa. Moderno kompozītmateriālu bojājumu pētīšana un novērtēšanas kritēriju izstrāde, izmantojot AE-signalu spektrālās īpašības	24
4.1. Priekšmeta apraksts	24
4.2. Testējama materiāla īpašības.....	25
4.3. Pētījuma uzdevumi	25
4.4. Testēšanas metodes.....	25
4.5. Testēšanas rezultāti.....	28
4.6. Nodaļas apkopojums.....	28
5. nodaļa. AE signālu spektrālu un dinamisku raksturīpašību matemātiskā analīze un materiālu sagraušanas posmu identificēšanas matemātiskās metodes izstrāde.....	29
5.1. Problēmas apraksts	29
5.2. AE dinamikas analīzes programmatūras veidošana	29
5.3. Datu normalizācijas funkcija.....	29
5.4. Dinamisku α_1 un α_2 kritēriju noteikšana, izmantojot izlīdzināšanas metodi.....	30
5.5. Frekvences īpašību analīzes programmatūras izstrāde	31
5.6. Maksimālās spektrālās jaudas frekvences noteikšana	32
5.7. Dinamiskā kritērija saistība ar AE signālu spektrālajām īpašībām PES kompozīta sabrukšanas procesā	32
5.8. Metodes verifikācija	36
Secinājumi	37
Izmantotie informācijas avoti	38

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Transports ir viens no nozīmīgākajiem ekonomikas sektoriem, kas nosaka visu citu mūsdienīgas valsts nozaru attīstības virzienu un iespējas. Pastāvīgi augoša nepieciešamība pēc intensīvākajām, ātrākajām virszemes transporta sistēmām rada situāciju, ka visi transporta infrastruktūras elementi tiek izmantoti ar paaugstināto intensitāti un slodzi. Lokomotīvu un vagonu ritošās daļas elementi, dzelzceļu un autoceļu elementi, tilti un citi objekti ir pakļauti noguruma un sitiena slodzēm un citu veidu iedarbībai.

2014. gada janvārī tika akceptēta jaunā ES transporta infrastruktūras attīstības politika. Šīs politikas vadlīnijas ir saistītas ar pakāpenisku *TEN-T (Trans-European Transport Networks)* transporta projektu grupas, kas dibināta pagājušā gadsimta 90. gados, darbības izvēšanu. Plānotais projektu īstenošanas termiņš ir 2030. gads, un provizorisks budžets, kas tiks iztērēts līdz 2020. gadam, ir ap 24,05 miljardu eiro [7]. *TEN-T* projektu grupas uzdevums ir uzlabot ekonomiskās izaugsmes iespējas un savienot atsevišķu Eiropas valstu transporta tīklus. Plānotais rezultāts ir transporta sistēmu nestspējas palielināšana, jaunu transporta ceļu veidošana un jau esošo ceļu uzlabošana. Latvijai kā Eiropas Savienības dalībvalstij piedalīšanās *TEN-T* projektos ir svarīgs un aktuāls uzdevums. 30 *TEN-T* prioritātes projektu vidū ir arī *N27 Rail Baltica* projekts, kas tiešā veidā skar Latviju. Pēc dažiem gadiem parādīsies augstā ātruma dzelzceļa segmenti, kuros būs ievērojami intensīvākā vilcienu kustība, nekā Latvijā ir šodien.

Dzelzceļa pārvadājumu intensifikācija, kravu kustības virziena maiņa nenovēršami rada izmaiņas arī citās transporta sistēmās. Rezultātā palielināsies pieprasījums pēc jauniem autoceļiem. Tajā pašā laikā kļūst nepieciešama lielāka pārvadu, tiltu, dambju kontrole, jo to izmantošanas intensitāte pieaugs. Tiks aktualizēta arī nepieciešamība uzlabot diagnostikas metodes un transporta infrastruktūras un ritošā sastāva elementu kontroli.

Viena no tehnikām, kas ļauj veikt infrastruktūras iekārtu, konstrukciju un objektu noguruma bojājumu uzkrāšanās diagnostiku, ir akustiskās emisijas (AE) metode. Tā pieder pie nesagraujošās testēšanas metožu kopas. Šīs metodes pamatā ir augstas frekvences akustiskā signāla, kas tiek konstatēts materiālos zem slodzes, ieraksts un atšifrējums. Būtiska šīs metodes atšķirība no citām ir tas, ka AE monitoringu var veikt testējamā objekta normālā ekspluatācijas režīmā, novērtējot tehnisko stāvokli un nesabojājot objektu.

Pētījums ir aktuāls jo ekonomikā pastāv augošais pieprasījums paaugstināt transporta sistēmu drošību. Darbs ir veltīts uz akustiskās emisijas fenomena balstītu nesagraujošās testēšanas metožu izmantošanai un attīstībai

Darba mērķis un uzdevumi

Mērķis

Veikt dažāda veida materiālu un konstrukciju bojājumu mehānisma izpēti un izstrādāt daudzkritēriju akustiskās emisijas testēšanas metodoloģiju sauszemes transporta objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanai.

Uzdevumi

- 1) Veikt tradicionālo nesagraujošās kontroles un AE metožu salīdzinošo analīzi un pamatot iespējamību izmantot AE parametrus transporta objektu novērtējuma uzdevuma risināšanai.
- 2) Veikt sauszemes transporta objektu bojājumu mehānismu eksperimentālos pētījumus un noteikt to tehniskā stāvokļa novērtējuma AE kritērijus.
- 3) Noteikt kritērijus moderno kompozītmateriālu bojājumu novērtēšanai, izmantojot AE signālu spektrālās īpašības.
- 4) Veikt AE signālu spektrālu un dinamisku raksturīpašību matemātisko analīzi un izstrādāt materiālu sagraušanas posmu identificēšanas matemātisko metodi.

- 5) Izstrādāt daudzkritēriju akustiskās emisijas testēšanas metodoloģiju sauszemes transporta objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanai ekspluatācijā.
- 6) Pamatojoties uz iegūtajām spektrālajām un dinamiskajām AE signālu raksturīpašībām, izstrādāt AE datu analīzes programmatūru un veikt tās funkciju pārbaudi pētāmo objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanas procesā.

Pētniecības metodes

- 1) Literatūras analīze.
- 2) Salīdzināšanas metodes.
- 3) Empīriskās eksperimentālās metodes.
- 4) Matemātiskā analīze.
- 5) Matemātiskā programmēšana.

Pētījumu objekti

- 1) Auto/gājēju tilts pār Daugavas Ķeguma hidroelektrostaciju.
- 2) Lokomotīves ratiņu rāmji un pagalvji.
- 3) Spriegota betona gulšņi.
- 4) Epoksīdsveķu kompozīta paraugi.

Darba zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti

Promocijas darba rezultātā izstrādātie inovatīvie risinājumi:

- 1) izstrādāta daudzparametru AE signālu spektrālo un dināmisko raksturīpašību matemātiskās analīzes metode, kas ļauj veikt sauszemes transporta objektu un konstrukciju stāvokļa tehnisko novērtēšanu;
- 2) noteikta individuālo kompozīta materiālu sagraušanas posmu savstarpējā sakarība kombinētajam AE parametram, kas iekļauj summāro AE pieauguma ātrumu un AE signālu maksimālo spektrālo blīvumu;
- 3) izstrādāta jauna starpplatformu programmatūra, kas ļauj veikt AE intensitātes izmaiņas, tās otrā atvasinājuma, frekvences spektra īpašību analīzi saistībā ar parametriem, kas iegūti no testēšanas mašīnas, un viena tipa AE attēlu savstarpējās atbilstības vērtību. Tas ļauj uzlabot AE novērtēšanas informatīvu vērtību un realizēt efektīvākus AE eksperimentus.

Darba praktiskā nozīme

Darbā izstrādātie inovatīvie risinājumi tika izmantoti Ķeguma HES tilta gājēju pārejas, lokomotīves elementu, spriegota betona gulšņu tehniskā stāvokļa novērtēšanai, kā arī moderno kompozītmateriālu testēšanai. Darba rezultātiem ir praktiskais nozīmīgums, jo darbā tiek izstrādātas gan jaunā objektu sagraušanas posmu noteikšanas metodes, gan datu analīzes instruments, kas ļauj šīs metodes īstenot. Darba rezultāti atklāj jaunās iespējas daudzpusīgai AE metožu izmantošanai sauszemes transporta iekārtu un objektu tehniskā stāvokļa pārbaudei.

Darba aprobācija

Galvenie pētījuma zinātniskie un praktiskie rezultāti prezentēti astoņās zinātniskās konferencēs.

- 1) The 9th International Conference Information Technologies and Management 2011, Bratarchuk S, Sazonovs A, *Approaches for obtaining and Processing Snow Avalanche Acoustics Emission Data*. – April 14–15, 2011, Riga, Latvia.
- 2) Research and Academic Conference Research and Technology – Step into the Future, Urbahs A, Banov M, Turko V, Bratarchuk S, Khodos N, Feshchuks J, *Features of Behaviour of Acoustic Emission Signals at Dynamic Tests of pre-stressed concrete elements of railways*. – December 10–11, 2010, Riga, Latvia.

- 3) Riga Technical University 52nd international Scientific Conference, Urbahs A, Banovs M, Bratarčuks S, *Indication and Prediction of the Landslides Occurrence Process Based on the Acoustic Emission Method*. – Riga, 13–16 October 2011.
- 4) Riga Technical University 51nd international Scientific Conference, Urbahs A, Banovs M, Harbuz Y, Bratarčuks S, Khodos N, *The Applicability of the acoustic emission method to check the mill rolls*. – Riga, 11–15 October 2010.
- 5) Intelligent Transport Systems (ITS'12), Bratarčuk S, *Investigation of the weak vibrations effect on the deformation of rocks by the acoustic emission method*. – July 18–20, 2012 Riga, Latvia.
- 6) Intelligent Transport Systems (ITS'12), Urbahs A, Banov M, Bratarčuk S, Khodos N, Serebrjakovs P, Turko V *Diagnostics of aircraft elevator's skin zones after the impact of lightning using the method of acoustic emission*. – July 18–20, 2012 Riga, Latvia.
- 7) Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th Anniversary and the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute/ RTU alumni, A. Urbahs, M. Banov, S. Bratarčuk, N. Khodos, P. Serebrjakovs, V. Turko. *Diagnostics Of 7- Layer Composite Materials After The Impact Of Lightning Using The Method Of Acoustic Emission*, 11–12 October 2012, Riga, Latvia.
- 8) Riga Technical University 57th International Scientific Conference, Bratarčuk S., *Ways of improving methods of collecting and interpreting AE data*, 14–15 October 2016, Riga, Latvia.

Publikācijas

- Galvenie pētījuma zinātniskie un praktiskie rezultāti publicēti septiņos zinātniskajos rakstos.
- 1) Bratarčuk S. *Indication of stage of destruction of epoxy PES-filled composite using connected parameter of acoustic emission rate and the spectral characteristics of AE signals* Iesniegts uz: Transport and Aerospace Engineering, Vol. 4, Issue 1, 2017 ISSN 2255-9876.
 - 2) Bratarčuk S. *Assessment of technical condition of 2M62 locomotive bogie frames and bolsters using acoustic emission method*. Iesniegts uz: International Conference “Mechanika-2017” proceedings, Lithuania.
 - 3) Urbahs, A., Banovs, M., Bratarčuks, S., Serebrjakovs, P., Turko, V. *Diagnostics of Damaged Composite Skin Zones of Aircraft after the Impact of Lightning Bolt Using the Method of Acoustic Emission*. From: Proceedings of the 16th European Conference on Composite Materials (ECCM 2014), Spānija, Seville, 22.–26. jūnijs, 2014. Seville: 2014, pages 1–8.
 - 4) Bratarčuks, S., Dubovska, R. *Using Car Vibration Data for Road Prominency Identification*. From: Information Technologies, Management and Society: The 12th International Scientific Conference „Information Technologies and Management”, Latvija, Rīga, 16.–17. aprīlis, 2014. Riga: ISMA University of Applied Sciences, 2014, pages 36–37, ISSN 1691-2489.
 - 5) Bratarčuks, S., Sazonovs, A. *Approaches for Obtaining and Processing Snow Avalanche Acoustics Emission Data*. From: Information Technologies, Management and Society: The 9th International Conference Information Technologies and Management, Latvija, Riga, 14.–15. aprīlis, 2011. Riga: Information Systems Management Institute, 2011, pages 63–63. ISSN 1691-2489.
 - 6) Urbahs, A., Banov, M., Turko, V., Bratarčuks, S., Khodos, N. *Some Features of Behaviour of Acoustic Emission Signals at Dynamic Bench Test of Prestressed Concrete Sleepers*. From: Proceedings of the 14th International Conference "Transport Means 2010", Lietuva, Kaunas, 21.–22. oktobris, 2010. Kaunas: Technologija, 2010, pages 45–48.
 - 7) Urbahs, A., Banovs, M., Turko, V., Bratarčuks, S., Khodos, N., Feščuks, J. *Features of Behavior of Acoustic Emission Signals at Dynamic Tests of Prestressed*

Concrete Elements of Rail Ways. From: Research and Technology - Step into the Future.
Vol. 5, No. 3, Latvija, Rīga, 10. dec.–11. jan., 2010. Rīga: Transporta un Sakaru Institūts,
2010, pages 106–106.

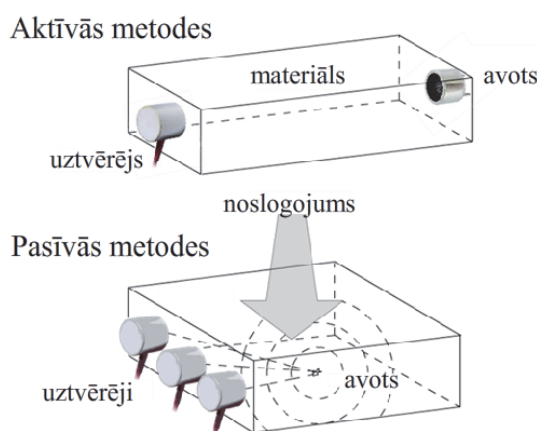
Promocijas darba apjoms un struktūra

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, desmit pielikumi, 91 attēls, desmit tabulas, 195 lappuses. Literatūras sarakstā ir 161 nosaukumi.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

1. NODAĻA: SAUSZEMES TRANSPORTA SISTĒMU TEHNISKĀ STĀVOKĻA NOVĒRTĒŠANAS METOŽU ANALĪZE

Nesagraujošās testēšanas metodēm (*NDT – non-destructive testing*) ir svarīga loma transportēšanas sistēmu un transporta infrastruktūras apkalpošanā. *NDT* metodes nodrošina objektu iekšējo defektu agrīnu atklāšanu. Viens no šo metožu uzdevumiem ir potenciāli bīstamo defektu, kas var radīt objekta avāriju, atklāšana. Akustiskās emisijas metode (AE) pieder pie nesagraujošas testēšanas metodēm un tiek izmantota defektu atrašanai to rašanas un attīstības agrīnās stadijās. Mūsdienās akustiskā emisija ir kļuvusi par plaši izmantojamu *NDT* metodi. AE metode ietver akustisko (parasti ultraskaņas) signālu īpašības analīzi, ņemot vērā to signālu rašanas vietu, slodzes intensitāti un frekvences raksturlielumus [10]. Būtiskāka starpība starp AE un citām *NDT* metodēm ir AE metodes pasīva daba (1.1. attēls). AE metode ļauj reģistrēt tikai tos signālus, kas ir radīti pašā materiālā ārējās iedarbības rezultātā.



1.1. att. Aktīvās un pasīvās ultraskaņas izmeklēšanas metodes.

Unikālās AE metodes īpašības dod šai metodei priekšroku transporta objektu un infrastruktūras monitoringa uzdevumā un veicina pie šīs metodes plašu izmantošanu. Pēdējo gadu panākumi datoru veiktspējas palielināšanā un jauno datu ietilpīgu glābšanas ierīču izstrāde ļauj efektīvi izmantot AE metodi objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanā, lai prognozētu to izturību visos virszemes transporta veidos.

Automobiļu transportā AE metode tiek izmantota materiālu pētīšanā, atsevišķu mehānismu un iekārtu kontrolē, ka arī lielā mēroga inženieru konstrukciju monitoringā. Pēdējiem vidū var minēt tuneļus, tiltus, betona un tērauda struktūras, saspriegtas dzelzsbetona struktūras [3], [19]. Relatīvi jauns AE izmantošanas veids ir saistīts ar ceļa konstrukciju zemūdens elementu stāvokļa novērtēšanu. Zemūdens tiltu balstu AE testēšana ļauj atklāt noguruma defektus apstākļos, kuros nav iespējama citu *NDT* metožu izmantošana [11].

Cauruļvadi nereti atrodas zem zemes, un noplūdes precīzas atrašanās vietas noteikšana ir ļoti svarīga remonta organizācijām, taču piekļuve objektam ir apgrūtināta [1]. Akustiskās emisijas pētījumi ļauj ne tikai strādāt ar jau esošajiem nopietniem cauruļvadu defektiem, bet arī noteikt citus mehāniskus bojājumus un koroziju tās sākuma posmā, lai prognozētu negadījumus un savlaicīgi novērstu defektus [24].

Dzelzceļa transportā AE metode ļauj noteikt defektus tērauda tiltos [9] un dzelzceļu konstrukcijās [25]. AE metodes izmantošana ļauj veikt reāla laika uzraudzību, lai noteiktu vārpstas gultņu, riteņpāru defektus [2], [14], [20]. AE palīdz identificēt strukturālas izmaiņas materiālu sakausējumos, kas ir izmantoti ātrgaitas vilcienu pārnēsmaķārbu korpusu konstrukcijā.

Dzelzceļa transporta jomā tiek arī izmantota jaunās AE paaudzes metodes, kas ļauj novērtēt supravadošu magnētu stāvokli magnētiskā „spilvena” (*maglev*) vilcienu “pakarināšanas” sistēmās.

AE sniedz informāciju par supravadītājiem, kas ir atgriezušies normālā pretestības stāvoklī [12]. AE metodes lietošana atrisina defektīvo magnētu lokalizācijas uzdevumu, tā nav invazīva un neprasa veselās struktūras demontāžu. Pamatojoties uz AE kontroles tehniku pašreizējā stāvokļa kritiskās analīzes, ir secināts, ka noguruma plaisu rašanas momentu uzskaites metodes ir svarīgas operatīvai kontrolei, bet grūti lietojamas dažos specifiskos transporta objektos. Ir nepieciešams uzlabot metožu aprakstu AE dinamisko parametru noteikšanai un papildu parametru, kas var sniegt informāciju par sagraušanas posmu, identificēšanai. AE datu vākšanas, apstrādes un analīzes metožu izstrāde un uzlabošana, dažādu materiālu, objektu un konstrukciju sagraušanas modeļu apraksts ir nozīmīgs darbs nesagraujošās testēšanas jomā.

1. nodaļā ir apskatītas nesagraujošās kontroles metodes un to izmantošanas iespējas un ierobežojumi transporta objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanai. Īpaši ir izcelta akustiskas emisijas (AE) metode, kas ir uzskatāma par pasīvo testēšanas metodi, un tas nozīmē, ka tās izmantošana balstās tikai uz tiem signāliem, kas tiek konstatēti pašā objektā ekspluatācijas laikā. AE metodei citu metožu vidū ir svarīga loma. Atsevišķos gadījumos AE metodes izmantošana ir vienīgā objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanas iespēja. Šai unikālajai metodei ir gan fizikālas, lietojot to dažiem objektiem (zemūdens betona konstrukciju pārbaude u. tml.), gan ekonomiskās (testēšanas laika ierobežojums un izmaksas) priekšrocības. Ir arī gadījumi, kad ir jāizmanto visas iespējamās nesagraujošās kontroles metodes viena un tā paša objekta kontrolei, lai garantētu tehniskā novērtējuma kvalitāti.

Nepieciešamība veikt nesagraujošo monitoringu objekta ekspluatācijas laikā ir saistīta ar uzdevumu novērst transporta objektu vadības sistēmu un strukturālo elementu sagraušanu. AE izmantošana uzlabo agrīnu defektu atklāšanu un to lokalizācijas iespējas. Dažos gadījumos metode ir vienīgā praktiskā iespēja monitoringa uzdevuma risināšanai.

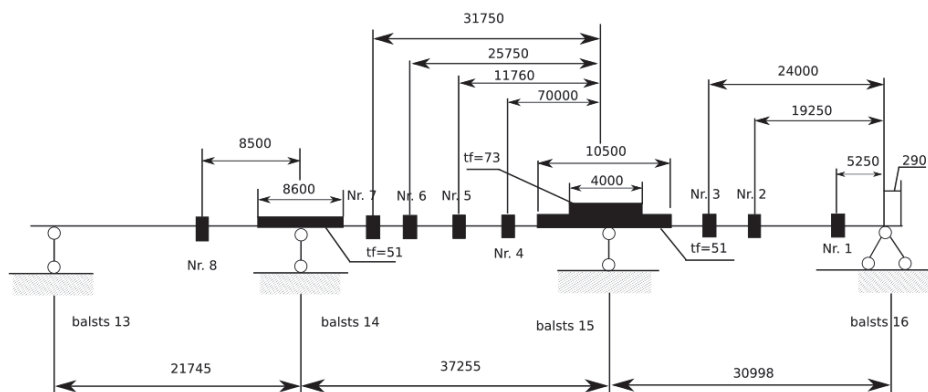
Balstoties uz AE kontroles mūsdienas stāvokļa kritisko analīzi, tika secināts, ka objektu ekspluatācijas laikā noguruma plaisu atklāšanas metodes ir svarīgas objektu stāvokļa kontrolei, bet dažreiz ir grūti lietojamas. Pastāv nepieciešamība attīstīt un uzlabot AE dinamisko kritēriju interpretāciju, ka arī citu AE parametru izmantošanu, kas sniedz informāciju par sagraušanas stadiju. AE datu vākšanas un apstrādes metožu attīstīšana, kā arī sagraušanas modeļu apraksts dažādiem jauniem materiāliem, kā arī tēlu apstrādes (*pattern processing*) [23] ir aktuāls un nepieciešams darbs nesagraujošās testēšanas metožu jomā.

2. NODAĻA. SAUSZEMES TRANSPORTA KONSTRUKCIJU BOJĀJUMU UZ AKUSTISKĀS EMISIJAS METODES BALSTĪTU EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU METODOĻĪJA

2.1. Tehniskā stāvokļa novērtēšanas objekti

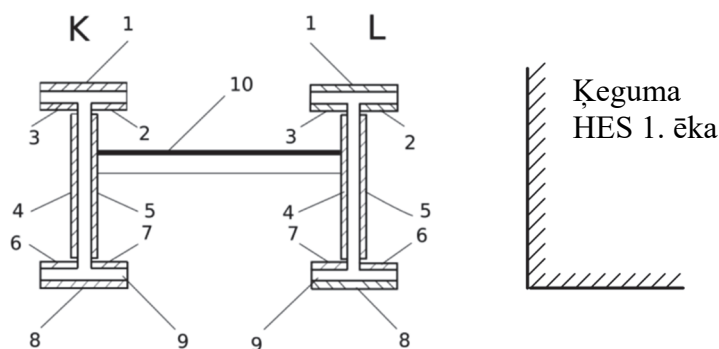
2.1.1. Ķeguma HES tilts

Bīstamo tehnisko objektu uzturēšana normālā tehniskajā stāvoklī ir organizācija, kas uztur šos objektus, darbības prioritāte. Bīstamie tehniskie objekti ir iekļauti bīstamā aprīkojuma klasē, un to ekspluatāciju regulē LR likums „Par bīstamo iekārtu tehnisko uzraudzību”, kas definē: bīstamās iekārtas – iekārtas un to kompleksi, kas neatbilstošas lietošanas un uzturēšanas rezultātā var apdraudēt cilvēku dzīvību un veselību, vidi un materiālās vērtības [5]. Otrajā nodaļā tiek attēloti AE izmantošanas metodika, testējot auto/gājēju tiltu pār Daugavas Ķeguma HES. Testēšanas objekts ir trīs dažāda garuma sekciju tilta pāreja, kas kalpo autotransporta kustībai (2.1. attēls).



2.1. att. Tilta shēma.

Braucamās sekcijas pamats ir divas nesošās I-formas sijas, kas sastāv no savienotām labās un kreisās puses fermām. Segums ir uzklāts virs pamata (2.1. attēls). Katra sija ir samontēta no divām līdzīgām daļām (2.2. attēls), kas ir savstarpēji savienotas “ar muguru pret muguru”. Katrs savienojumam uz abām pusēm ir astoņi uzliktņi, kā parādīts 2.2. attēlā ar numuriem 1, 2 ... 8. Seguma uzliktņi savieno blakusesošu siju galus, izmantojot kniedes.



2.2. att. Tilta braucamās daļas nesošās sijas
(K – kreisā puse, L – labā puse).

2.2. attēlā parādītie elementi: 1. – augšējie uzliktņi, 2. – labais apakšējais augšējās sijas uzliktnis, 3. – kreisais apakšējais augšējās sijas uzliktnis, 4. – kreisās malas plātne, 5. – labās malas plātne, 6. – labais augšējais apakšējās sijas uzliktnis, 6. – kreisais augšējais apakšējās sijas uzliktnis, 8., 9. – nesošās sijas, 10. – ceļa virsma.

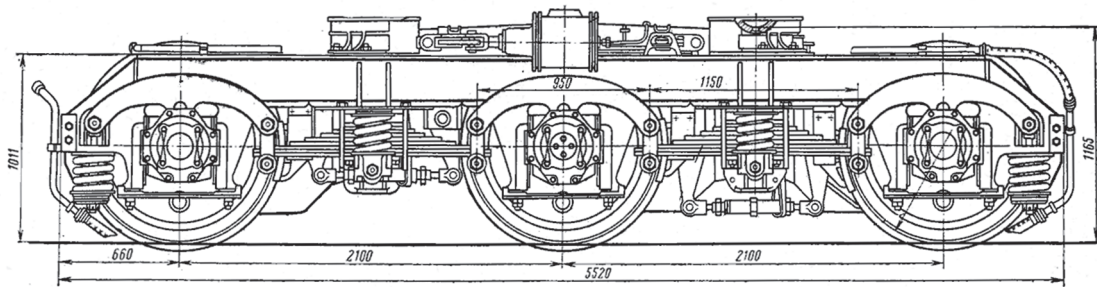
2.1.2. Lokomotīves ratiņu rāmji un pagalvji

Lokomotīvu pamatelementi un kravu vagonu lietie elementi tiek izmantoti, pakļaujot tos kritisku dinamisko un statisko slodžu iedarbībai. Tas īpaši attiecas uz tādiem elementiem kā ratiņu rāmji, balsti, sānu rāmji. Šo elementu bojājumi var radīt bīstamas sekas cilvēkiem, videi un infrastruktūrai. Lieto daļu lūzumu problēma dzelzceļa transportam nav jauna.

Pētāmo objektu īpašības

- 1) Ratiņi nr. 166 (1982. ražošanas gads); kopīgais nobraukums kopš ražošanas datuma – 1 516 761 km. Renovēts TR-3 (kārtējais remonts), ekspluatācijas termiņš pagarināts līdz 2021. gada aprīlim (2.3. attēls).
- 2) Ratiņi nr. 184 (1970. ražošanas gads) kopīgais nobraukums kopš ražošanas datuma – 1 149 520 km. Renovēts TR-3 (kārtējais remonts), ekspluatācijas termiņš pagarināts līdz 2015. aprīlim (līdz norakstīšanai).

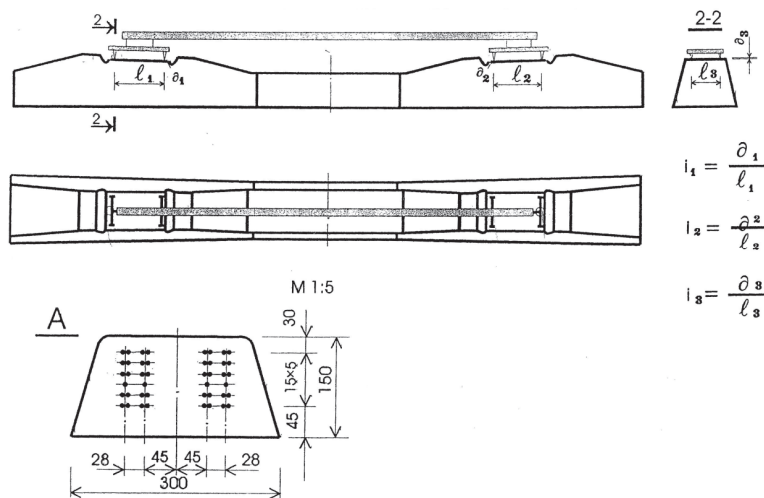
Piezīme. Noteiktais maksimālais ekspluatācijas laiks 2M62 lokomotīvei un tās ratiņiem ir 45 gadi.



2.3. att. 2M62 Lokomotīves ratiņu sānskats [13].

2.1.3. Spriegota betona gulšņi

Trešais pētījuma objekta tips ir Latvijā visbiežāk izmantots gulšņu veids – betona gulšņi. Tās ir iepriekš sasprīgtas betona sijas, pastiprinātas ar augstas stipres pakāpes tērauda 3.14 mm diametra stieņiem (2.4. attēls). Nominālais stieņu skaits saitē ir 44.



2.4. att. Pētāmo gulšņu rasējums.

Katrs no stieņiem ir izstiepts ar 8,1 kN spēku. Tāpēc summārā gulšņa noslodze pēc betona sacietēšanas sasniedz līdz 356,6 kN. Galvenie gulšņu defekti ir:

- 1) šķērsvirziena plaisas zemsleīžu gulšņa daļā;
- 2) gulšņu lūzums sliedes zonā;
- 3) šķērsvirziena plaisas gulšņa vidū;
- 4) lūzumi gulšņa vidus zonā;
- 5) gareniskās plaisas, kas iet caur skrūvju atverēm;
- 6) gulšņu šķelšanās.

Minēto defektu cēloņi ir atkarīgi gan no betona gulšņu ražošanas kvalitātes, gan arī no ekspluatācijas apstākļiem.

2.2. Testēšanas uzdevumi

Ķeguma HES tilts

- 1) Identificēt defektīvus uzliktņus katrā savienojumā.
- 2) Novērtēt nesošo siju savienojumu oderu korozijas nodilumu.
- 3) Novērtēt korozijas izplešanos kniežu savienojumos.
- 4) Novērtēt savienojumu korozijas iedarbību uz tilta nestspēju.
- 5) Piezīme: Pirmais uzdevums tika izpildīts, izmantojot nejaušu tilta noslogojumu, otrs un trešais – izmantojot AE testa signālus, ceturtais – izmantojot tilta testa slodzes pielikšanu.

Lokomotīves ratiņu rāmji un pagalvji

- 1) Novērtēt 2M62 lokomotīves ratiņu rāmju un balstu pašreizējo tehnisko stāvokli.
- 2) Identificēt nepieciešamību pēc citām *NDT* metodēm, novērtējot objekta stāvokli, izmantojot AE.
- 3) Pagarināt ekspluatācijas laiku lokomotīves ratiņu rāmjiem.
- 4) Ratiņu rāmja lietās konstrukcijas, kuru ekspluatācijas laiku nav iespējas pagarināt: pārbaudīt ražošanas tehnoloģijas kvalitāti.
- 5) Noskaidrot AE dinamiskā kritērija (“ α -kritērija”) rašanas dabu noguruma testos.

Spriegota betona gulšņi

- 1) Noteikt laušanas slodzi iepriekš saspriegtajos betona gulšņos.
- 2) Identificēt dinamiskā AE kritērija rašanos īpašības un noteikt iespējas šo kritēriju izmantot betona gulšņu tehniskā stāvokļa novērtēšanai.
- 3) Identificēt mehānismus, kas nosaka akustiskās emisijas rašanās īpašības testējamā objektā.

2.3. AE reģistrēšanas un mērīšanas aparatūra

Ķeguma HES tilts

- 1) *PAC 3000/3104 System* (frekvenču josla no 20 KHz līdz 2 MHz).
- 2) Kalibrēšanas ierīce *AECAL-2*.
- 3) Divu ierīču AF-15 komplekss.
- 4) Pirmspastiprinātāji.
- 5) AE sensori.

2M62 lokomotīves ratiņu rāmji un pagalvji

- 1) AE reģistrācijas iekārta: *Lel / A-Line 32D (DDM) / -DIGITAL* akustiskās emisijas sistēma *A-Line 32D*. Tā ir daudzkanālu modulāra AE datu vākšanas un apstrādes sistēma ar augsta ātruma seriālo datu pārraides portu.
- 2) Akustiskās emisijas signālu pārveidotāji: tika izmantoti GT200 rezonanses tipa AE pārveidotāji ar operācijas frekvenci 165 kHz un joslu no 130 kHz līdz 200 kHz.

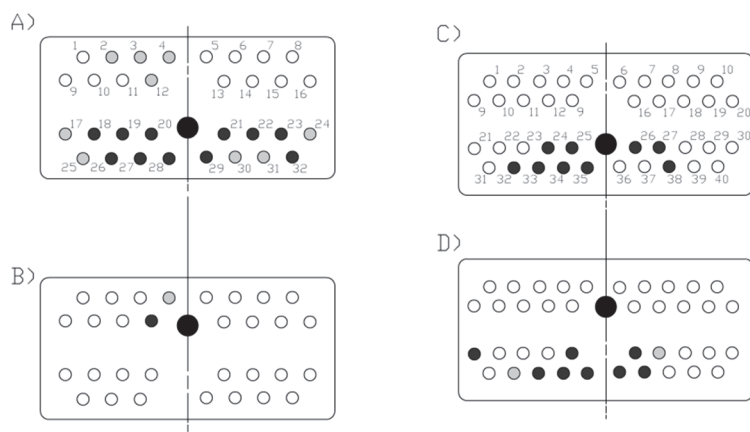
Spriegota betona gulšņi

- 1) PAC 3000/3104 AE sistēma (josla no 20 kHz līdz MHz).
- 2) Pirmspastiprinātāji.
- 3) *Physical Acoustics PocketAE acoustic emission* portatīvs AE dators ar iebūvētu *portable computer with built-in 26dB* pirmspastiprinātāju.
- 4) P-113 (0,02–0,2 MHz) piezo AE sensori.

2.4. Ķeguma tilts tehniskā stāvokļa novērtēšanas metodoloģija

Nejauša noslodze tika veidota ar normālu transporta kustību pāri tiltam. Mērījumi un AE signālu reģistrēšana tika veikta savienojumu vietās nr. 1 un 8, izmantojot PAC 3000/3104 AE mērīšanas iekārtu.

Tika konstatēts, ka „trokšņaināks” un tāpēc nodilis, defektīvs savienojums atrodas uzliktņu nr. 6, 7, 8 (2.2. attēls) apakšējā daļā. Savienojumu korozijas pakāpes novērtējums tika veikts, izmantojot AE īpašības, ņemot vērā AE signāla izplatīšanos caur savienojumu. Izmantojot vienu no AE sensoriem kā ultraskaņas izstarotāju (pulsārs), tika veidots testa AE signāls. Pulsārs tika piestiprināts uz vienu no savienojuma pusēm. Signālus reģistrēja ar AE sensoru, ko novietoja pretējā pusē. 2.5 attēls ilustrē kniežu atrašanās shēmu un testu rezultātus. Ir izmantota Latvijas patentā Nr. Cl.: G01N29/14 [21] aprakstītā metodoloģija.



2.5. att. Kniežu numerācijas shēma savienojumu nr. 3 un 6 apakšējā daļā.

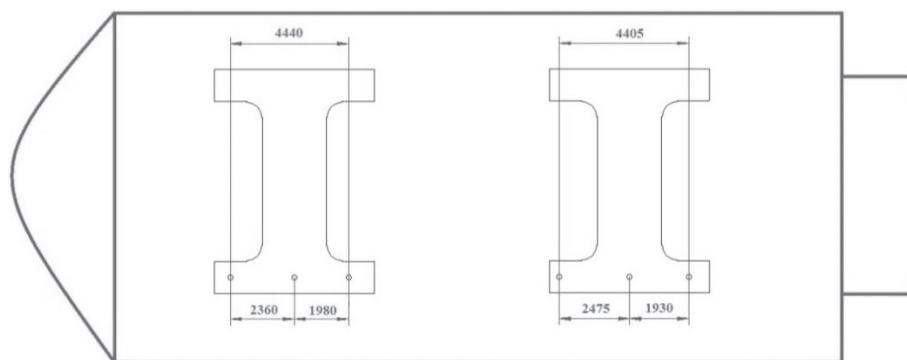
Lai novērtētu korozijas nodiluma ietekmi uz savienojumu nestspēju, ar kravas mašīnas kustību tika veidota testa mehāniskā slodze. Kravas mašīna (masa – 5 tonnas) brauca pāri tiltam ar ātrumu 16 m/s. Tika salīdzināts 3. un 6. savienojums, kuru korozijas nodilums tika atklāts iepriekšējā solī.

2.5. 2M62 lokomotīves ratiņu rāmju un pagalvju tehniskā stāvokļa novērtēšanas metodoloģija

Testi tika veikti divos posmos:

1. ratiņu rāmju stenda statiskā noslodze lokomotīvu depo;
2. ratiņu rāmju un balstu dinamiskie testi, dzīvīguma novērtēšanai kopš plaisas rašanās līdz objekta sagrūšanai.

Tika izvēlētas: stenda testa programma un reālas lokomotīves testa programma. Starpība bija tika maksimālajā noslogojumā: stendā tas pārsniedza maksimālo ekspluatācijas lokomotīves svaru par 10 %. Lokomotīve tika novietota depo uz četriem domkratiem. Tika veikts atsperu saspiedums pie pilnas darba slodzes svara vērtības. Datu vākšanai *A-Line 32DDM* sistēmas piezo elektriski pārveidotāji GT-200 AE tika novietoti šādi: trīs sensori gar ratiņa sānu sijas virsējas loksnes malu, kā parādīts 2.6. attēlā. Sensori un moduļi tika piestiprināti atbilstoši 2.7. un 2.8. attēlā redzamajam.



2.6. att. *LEL / A-Line 32 DDM* sistēmas sensoru novietojums uz lokomotīves ratiņu rāmjiem.

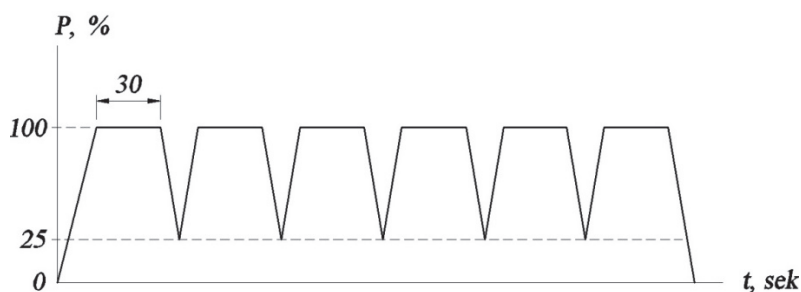


2.7. att. AE kontroles sistēmas moduļu novietošana uz lokomotīves ratiņu rāmjiem.



2.8. att. Sensoru stiprinājums uz lokomotīves ratiņu rāmja.

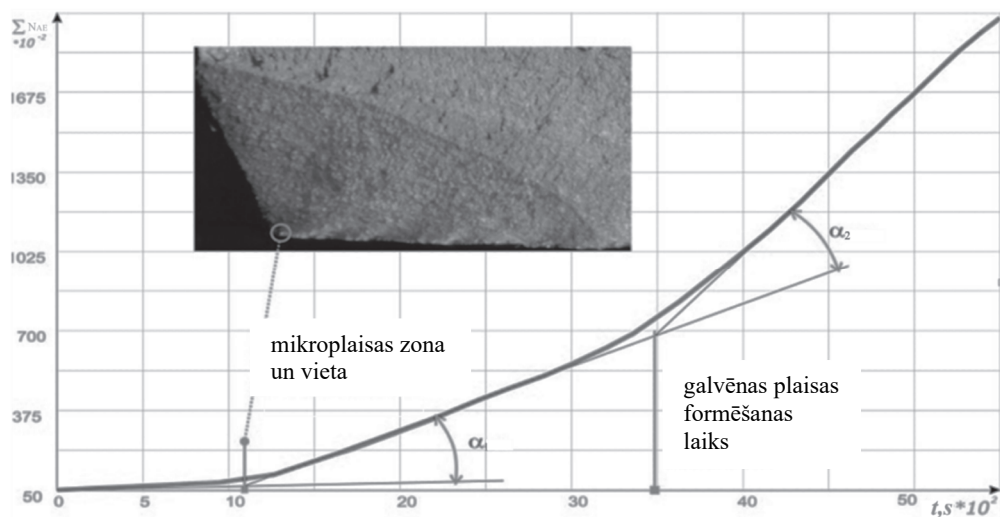
Visu sešu moduļu sistēma tika saslēgta līnijā. Sākotnējais diskriminēšanas sliekšnis tika uzstādīts uz 35dB. Pēc tam tika izpildīta kalibrēšana, izmantojot Su-Nilsena metodiku (0,5 mm diametra, HB stīvuma grafitā zīmuļa stieņa salaušana), lai noteiktu pastiprinājumu [22]. Kalibrēšanas rezultātā pastiprināšanas koeficients tika noteikts 40 dB. Lokomotīves virsdaļa tika pacelta līdz pilnajai ratiņu atslodzei. Šajā stāvoklī tika nomērītas atsperes. To saspiedums bija 25 % no ekspluatācijas slodzes. Tālāk tika ieslēgta *A-Line 32DDM* AE sistēma, un tika veikts ratiņa ciklisks noslogojums, izmantojot lokomotīves svaru (skat. 2.9. attēlu).



2.9. att. Statiski atkārtojošā noslogojuma programma.

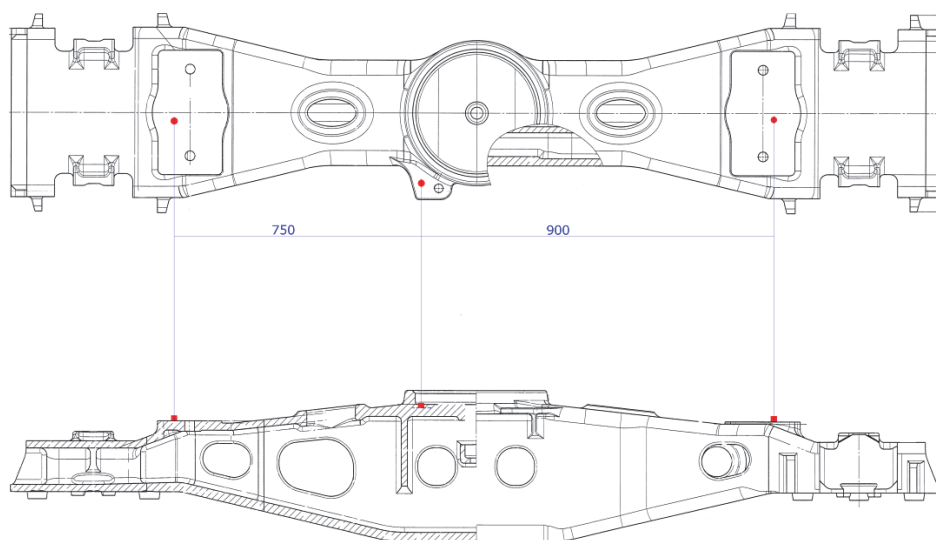
Kad operācijas laiks bija ap $5 \cdot 10^6$ cikliem, noguruma plaisas vēl netika vizuāli novērotas, un testa process tika mainīts. Tika pakāpeniski ieviesti griezuma koncentratori vienā no rāmja balstiem. Tas tika veikts, lai rastos agrīna noguruma plaisa.

2.10 attēlā redzams, ka pēc eksperimenta 1100–1200 sekundē no koncentratoru veidošanās momenta, AE sāk strauju pieaugumu. Tas norāda, ka ir sākusies noguruma plaisas veidošanās 2. sensora apgabalā, netālu no koncentratora. Šajā režīmā testēšana tika veikta vēl 80 000 sekundes. Periodiskā vizuālā inspekcija neatklāja neko noguruma plaisai līdzīgu. Taču, kad kumulatīvās AE grafikā varēja identificēt noguruma plaisu rašanās morfoloģiju, tad tika noteikts, ka kumulatīvās emisijas strauja pieauguma punkts, kas ir dēvēts α_1 , atbilst noguruma plaisas rašanās brīdim, bet α_2 – agrīnai makroplaisu rašanās un augšanai.



2.10. att. Kumulatīvas AE atkarība no noslogojuma kopš pirmās koncentratoru grupas ieviešanas, un lūzuma morfoloģija šajā punktā.

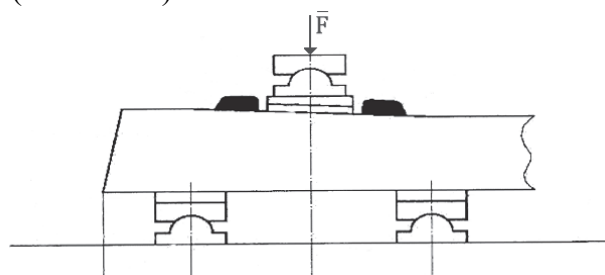
Balsta testēšanas programma bija tāda pati kā ratiņu rāmjiem. Balsts tika testēts, izmantojot trīspunktu mainīgo pastāvīgās zīmes ciklisko shēmu ar noslogojuma frekvenci 8 Hz, un amplitūdu $\Delta P=12,5$ t. AE sensora stiprinājuma shēma parādīta 2.11. attēlā.



2.11. att. AE sensoru novietojuma shēma.

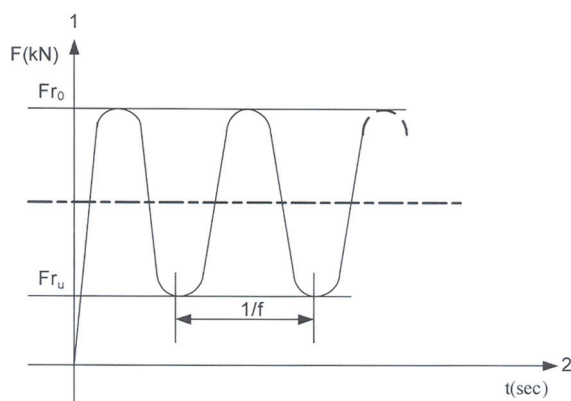
2.6. Spriegoto betona gulšņu testēšanas programma

Ekspluatācijas slodzes ir zemsliežu pastāvīgās zīmes cikliskās slodzes, kuras rada riteņpāra kustība. Tāpēc betona gulšņu izgatavošanas tehnoloģija tika testēta atbilstoši gulšņa ekspluatācijas slodzes pielikšanas shēmai. (2.12. attēls).



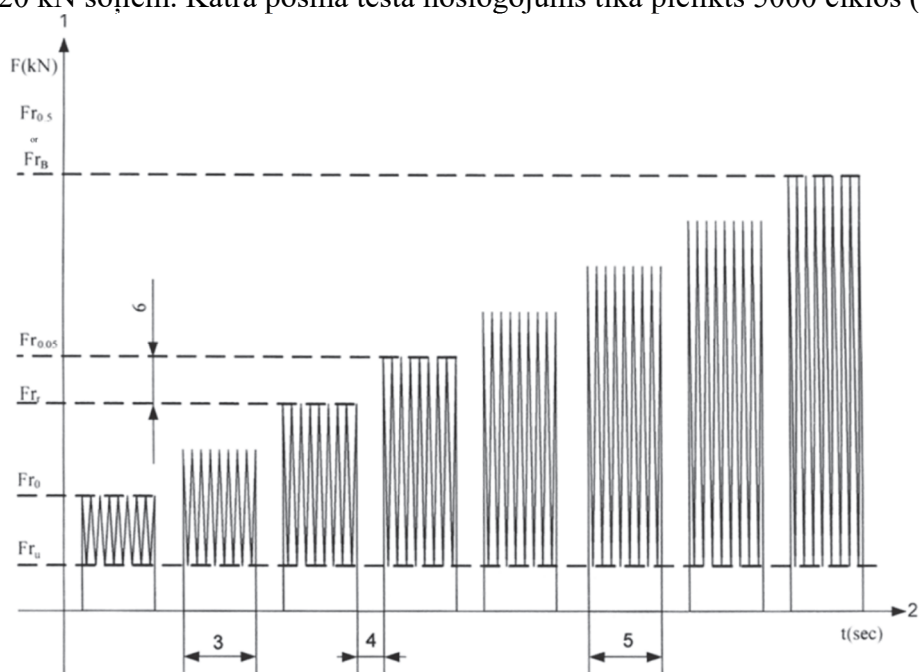
2.12. att. Monobloka betona gulšņa dinamiskās noslogošanas shēma.

Tipiskais noslogojuma amplitūdas variācijas cikls atgādina sinusoīdu (2.13. attēls).



2.13. att. Noslogošanas amplitūdas izmaiņas grafiks noguruma testos.

Testa cikliskā shēma līdz gulšņa sagraušanai tika veikta saskaņā ar [6], izmantojot dinamisko noslogojumu 20 kN soļiem. Katrā posmā testa noslogojums tika pielikts 5000 ciklos (2.14. attēls).

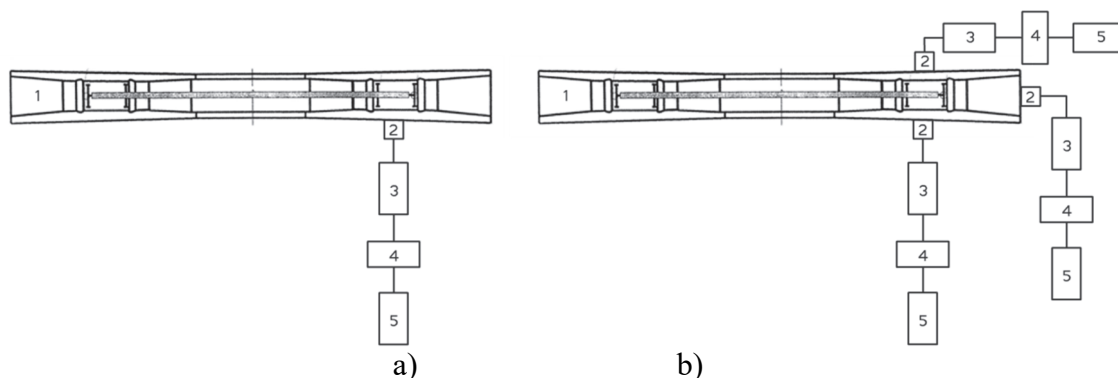


2.14. att. Amplitūdas maiņas grafiks noslogojuma testos dinamiskā.

Pēc katra posma noslogojums tika noņemts, un tika veikta vizuāla gulšņa inspekcija. Tika fiksēti šādi parametri:

1. dinamiskā slodze, pēc kuras noņemšanas gulšņa zemsliežu zonā parādās 0,05 mm platuma plaisa;
2. dinamiskā slodze, kas atbilst sagraušanas robežvērtībai, pēc kuras noņemšanai paliek 0,05 mm platuma plaisa, kas arī tiek uzskatīts kā gulšņa sagraušana.

Plaisas platuma mērījums tika veikts katra posma beigās, izmantojot Brineļa mikroskopu (palielinājums x24, skalas intervāls 0,05 mm). AE sensors tika piestiprināts pie gulšņa virsmas, izmantojot vibroizturīgu adhezīvu līmi ("superlīme"). Gulšņiem nr. 1–3 tika izmantots viens AE sensors (2.15. a attēls). Lai veiktu salīdzinošu novērtēšanu, 4. gulšņa testos tika vienlaikus izmantoti trīs sensori (2.15. b attēls). Sensori nr. 1 un 3 tika piestiprināti pie sānu gulšņa malām, savukārt sensors nr. 2 – pie gulšņa stiprinošā tērauda stieples gala. Analizējošā aparātūra bija AF-3 aparāts ar 20 kHz līdz 2 MHz frekvenču joslu (2.15. attēls).



2.15. att. Sensoru novietojums uz gulšņu virsmām
 a) sensoru uzstādīšanas shēma uz gulšņiem nr. 1, 2, 3;
 b) sensoru uzstādīšanas shēma uz gulšņa nr 4.

Apzīmējumi: 1 – gulsnis, 2 – AE sensors, 3 – pirmspastiprinātājs, 4 – AE iekārta, 5 – frekvences iekārta.

Par AE kontrolējošo parametru tika izvēlēta kumulatīvā AE. Skaita reģistrēšana tika veikta, izmantojot CH-3-36 frekvences skaitītāju.

3. NODAĻA. SAUSZEMES TRANSPORTA OBJEKTU BOJĀJUMU MEHĀNISMU EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI UN TEHNISKĀ STĀVOKĻA NOVĒRTĒŠANA AR AKUSTISKĀS EMISIJAS METODI

AE testēšanā tiek izmantotas dažas fizikālas parādības, kas norāda uz objekta materiāla īpašībām. Viena ir AE signālu rašanās materiāla mehāniska noslogojuma gadījumā. Cita īpašību grupa ir AE signālu izplatīšanās īpašības (refrakcija, atstarošana, rimšana, spektrālās izmaiņas un citi). Ar sensoru reģistrējamās akustiskās emisijas trūkumam var būt trīs iemesli:

1. aparatūrai trūkst jutīguma;
2. nav AE signālu;
3. nav AE signālu izplatīšanās starp AE avotu un AE sensoru.

Pirmo problēmu var novērst, izmantojot pareizās aparatūras kalibrēšanas procedūras. Emisijas trūkums var nozīmēt to, ka “Kaizera punkts” [15], testēšanas laikā vēl netika sasniegts. Trešais gadījums var liecināt par materiāla savienojuma bojājumu (korozija, tukšumi).

Ja emisija tiek normāli reģistrēta, tad ir iespējams izmantot dažādus piemērotus kritērijus, lai novērtētu objekta sagrūšanas stadiju. Daži kritēriji ir bāzēti uz AE plūsmas dinamikas analīzi (skaits, intensitāte). Dažas metodes var izmantot signālu spektrālās īpašības.

Šajā nodaļā ir parādīti sauszemes transporta objektu tehniskā stāvokļa AE novērtēšanas rezultāti.

3.1. Ķeguma HES tilta tehniskā stāvokļa novērtēšanas galvenie rezultāti

1. Netika atklāti tādfi defekti kā plaisas nesošajās sijās un kniežu iekšējie bojājumi.
2. Lielākais kniežu savienojumu korozijas bojājums bija pie 6. un it īpaši pie 7. uzliktņa (2.2. attēls);
3. 8. uzliktņa apakšējā daļā vislielākie korozijas bojājumi konstatēti kniežu savienojumos nr. 1L, 1K, 2L, 4K, 5L, 6L, 6K, 7L.
4. Ievērojama korozijas iedarbība uz tilta nestspēju netika konstatēta.

Veiktie testi parādīja AE metožu izmantošanas iespējas ceļa infrastruktūras bīstamo objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanā. Izmantotā AE signālu skaita analīzes metode ir salīdzinošā. Kā tika minēts 1. nodaļā, AE ir pasīva metodika. Tā pieļauj tikai to ultraskaņas signālu reģistrēšanu, kas tiek veidoti paša materiāla defekta attīstības laikā. Taču testa pirmā posma laikā AE sensori tika izmantoti kā ultraskaņas izstarotāji. Tā nav pretruna, jo testēšanas laikā bija nepieciešams saprast, kā interpretēt

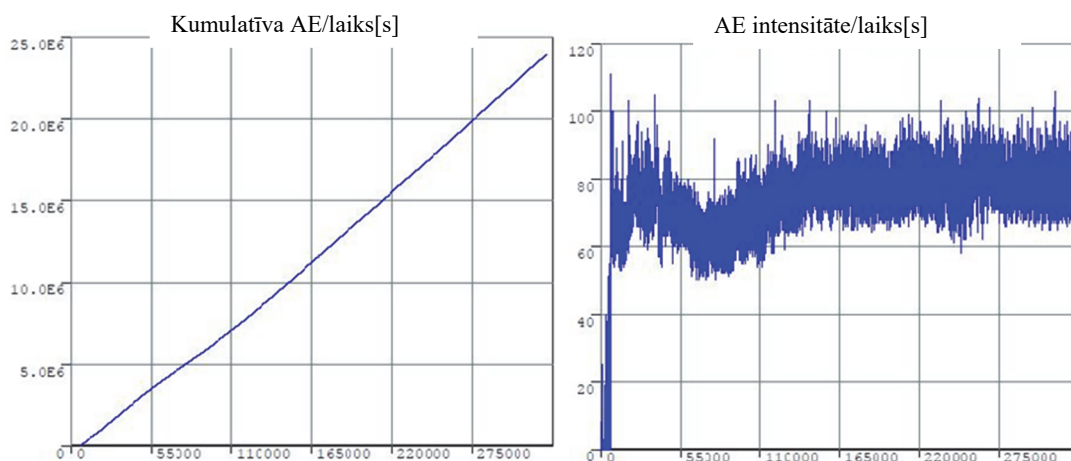
signālu trūkumu – emisijas trūkums vai kniežu savienojuma nespēja pārvadīt signālu savienojuma bojājuma dēļ.

Piedāvātā un izmantotā metode ir integrētā metode struktūras novērtēšanas ietvaros. Tas nozīmē, ka, izmantojot vienu un to pašu aparātūru, var panākt rezultātus gan defektus novērtējot vizuāli, gan novērtējot konstrukciju lielā mērogā, pat tajās vietās, kas nav tieši sasniedzamas. Otrais novērtēšanas posms ir atkarīgs no pirmā posma rezultātiem. Otrajā posmā, ja viena objekta AE attēls atšķiras no cita objekta AE attēla, kas var nozīmēt, ka objektam, kuram ir lielākas intensitātes AE, ir kāds iekšējs defekts. Tāpēc šim nolūkam ir nepieciešama pirmais posms: ir jāizslēdz ārējās korozijas un citu defektu ietekme uz AE attēlu.

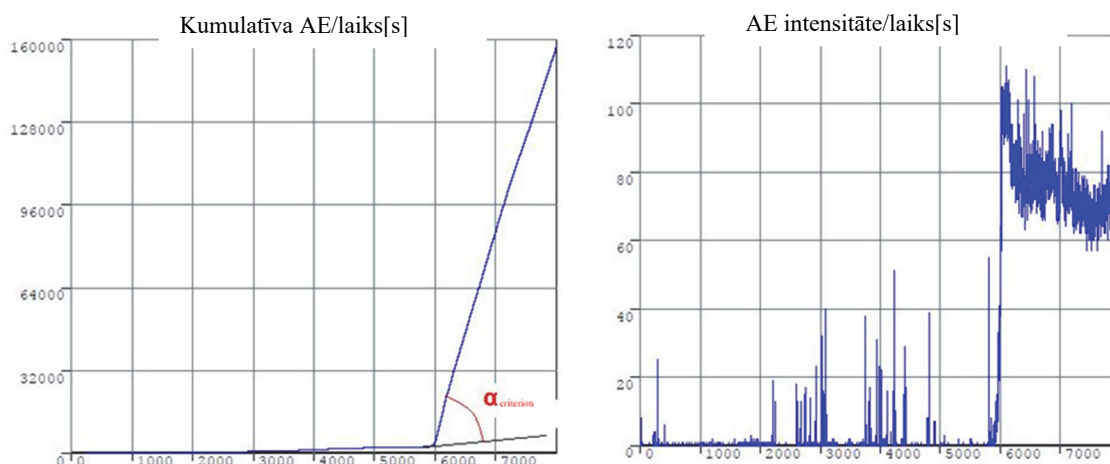
Piedāvātā metode vienlaikus ir gan pārbaudāmā objekta, gan šablona objektu AE datu izgūšanas process. Līdzīguma pakāpes skaitliskā izteiksme, ko var gūt, izmantojot attiecīgo matemātisko rīku, piemēram, RMS datu vektora un AE šablona salīdzināšanu, ir struktūras stāvokļa novērtēšanas kritērijs.

3.2. Lokomotīves ratiņu rāmja un pagaljū tehniskā stāvokļa novērtējums

Rezultāti un testu analīze: 3.1. attēlā redzama AE parametru variācijas atkarība no laika zem balsta cikliskās noslodzes līdz sagraušanas momentam. 3.2. attēls raksturo to pašu procesu, bet no sākotnējā noslodzes laika, ņemot vērā kopējo eksperimenta laiku. Ir redzams, ka kumulatīvās AE ātrs pieaugums parādās *a-criterion* punktā. AE intensitāte ātri paaugstinājās laikā kopš 48 000 ciklu laika momenta. Šī AE uzvedība ir aprakstāma šādi: laikā, kad sākas straujš AE pieaugums, parādās noguruma plaisa.



3.1. att. Balsta cikliskā noslogojuma līdz sagraušanas kumulatīvs AE grafiks (pa kreisi) un AE intensitātes grafiks (pa labi).

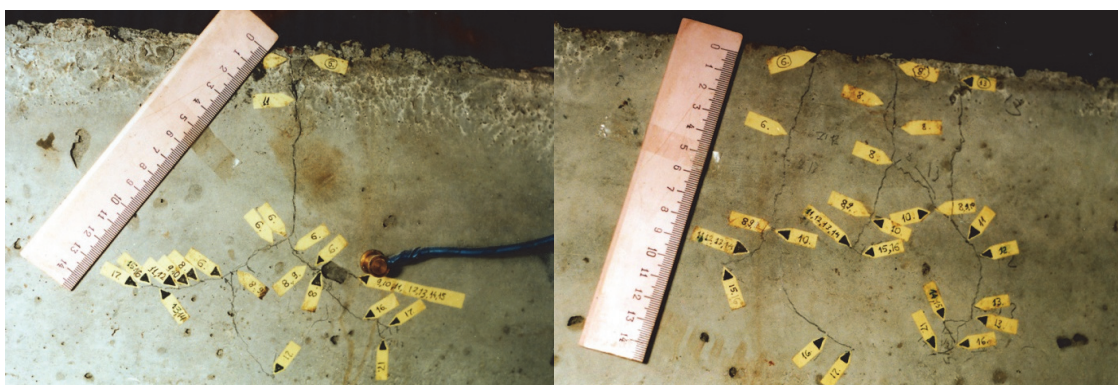


3.2. att. Balsta cikliskā noslogojuma kumulatīvs AE grafiks (pa kreisi) un AE intensitātes grafiks (pa labi) noguruma plaisas parādīšanās posmā.

Testēšanas rezultātu kopsavilkums: lieta detaļu tehniskā stāvokļa novērtēšanas uzdevums tika atrisināts ar AE metodi. Tika parādīts, ka ar AE metodi ir iespējams identificēt noguruma plaisas rašanos ievērojami agrāk nekā vizuāli-optiski. Testi parādīja dinamiskā jeb α -kritērija izmantošanas atbilstību noguruma plaisu detektēšanas uzdevumam balstu un ratiņu rāmju noguruma testos.

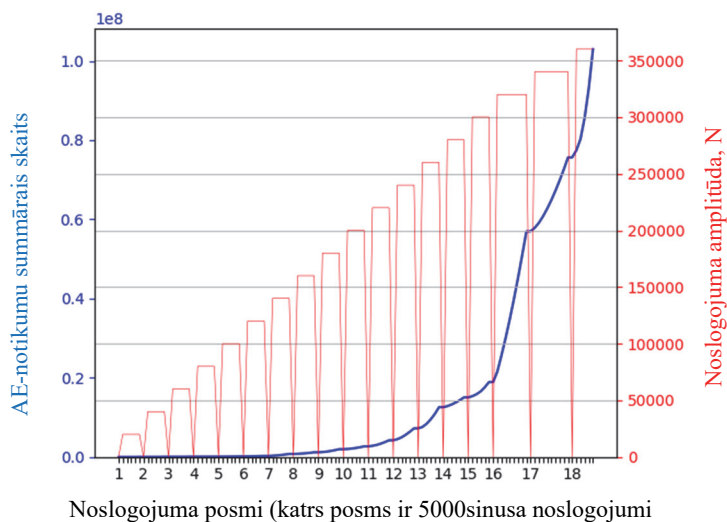
3.3. AE signālu īpašības spriegota dzelzsbetona gulšņos stenda izmēģinājumos

Testu rezultāti un analīze: gulšņu nr. 1, 2 un 3. sagraušana notika zem dinamiskām slodzēm 250 ± 200 KN 18. posmā. Gulšņa nr. 4 sagraušana notika 14. posmā zem 200 ± 150 KN slodzes. Vizuālā pārbaude atklāja plaisu ar 0,05 mm magnitūdas krastu atvēršanos rašanos 1. gulsnī pēc 8. dinamiskā noslogojuma posma. Gulšņos nr. 2 un 3 plaisa tika novērota pēc 15. posma. 4. gulsnī tik plašas plaisas netika fiksētas līdz sagraušanas momentam. 3.3. attēlā redzams gulsnis nr. 1 uzreiz pēc 17. noslogošanas posma.

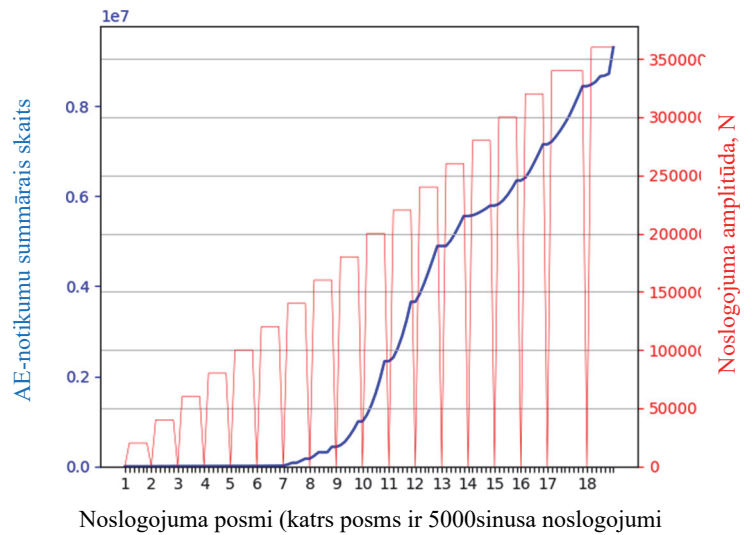


a) b)
3.3. att. Plaisas izskats uz nr. 1. gulšņa sāna malas pēc 17. posma
a) kreisā puse; b) labā puse.

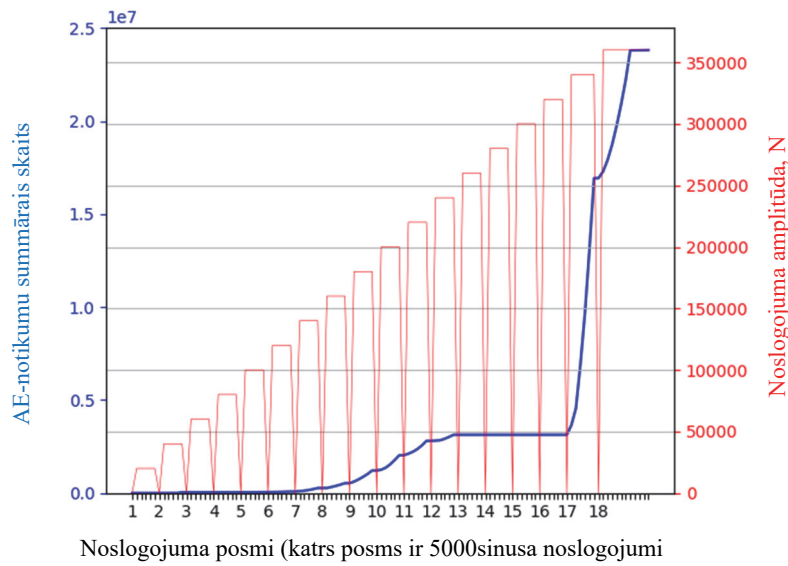
Kumulatīvas AE un AE intensitātes atkarībā no laika ir parādīta 3.4., 3.5., 3.6., 3.7. attēlos. Tas skaidri rāda saistību starp AE signālu rašanās dinamiku un testējamā gulšņa izturību.



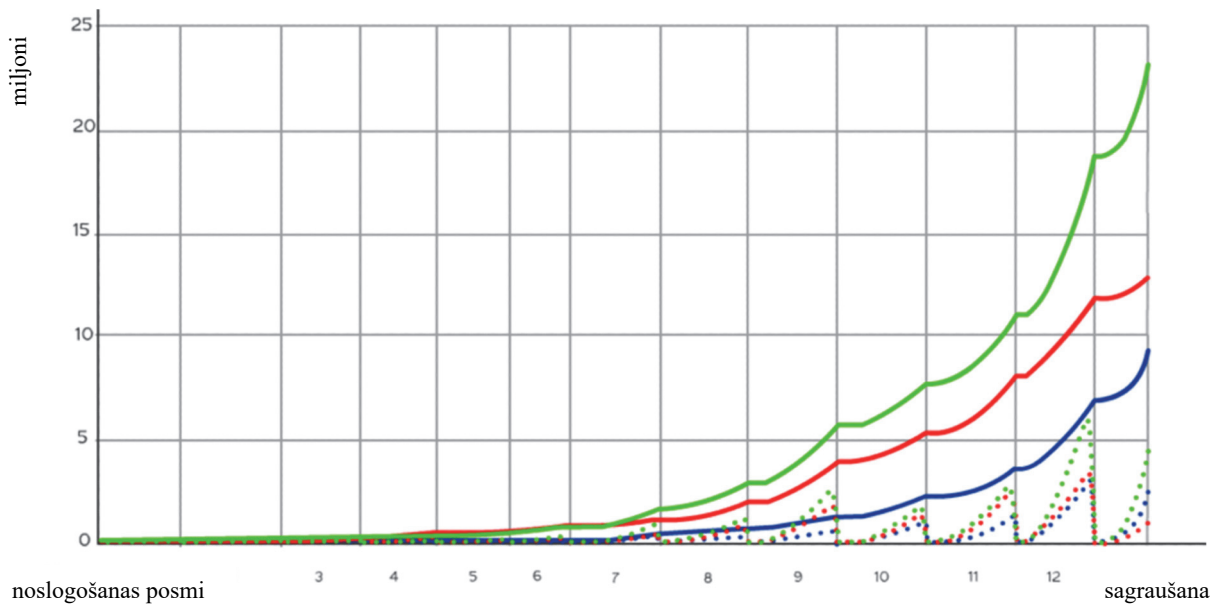
3.4. att. 1. gulšņa kumulatīvās AE un AE intensitātes grafiks.



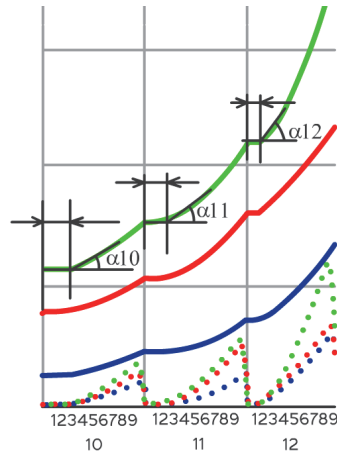
3.5. att. 2. gulšņa kumulatīvās AE un AE intensitātes grafiks.



3.6. attēls. 3. gulšņa kumulatīvās AE un AE intensitātes grafiks.



3.7. att. 4. gulšņa kumulatīvās AE un AE intensitātes grafiks (trīs sensori).



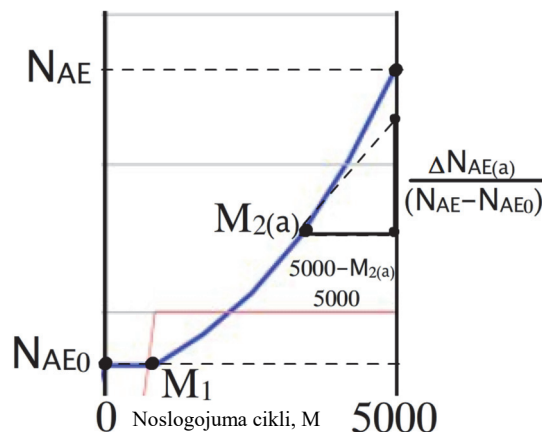
3.8. att. 4. gulšņa kumulatīvas AE izmaiņas noslogošanas posmos nr. 10, 11 un 12.

Jāuzsver, ka kumulatīvā AE visos posmos ir identiska (3.4, 3.5., 3.6., 3.7. attēls). Katru dinamiskās noslogošanas posmu var iedalīt divās daļās pēc AE dinamikas rakstura (3.8. attēls). Lēns (vājš) AE pieauguma posms un straujš (stiprs) pieaugums veido α leņķi.

Šo faktu var paskaidrot šādi: pētījumā [6] parādīts, ka α -leņķu formēšana metāliskajos materiālos ir saistīta ar mikroplaisu formēšanu, kas savukārt saistīts ar sagraušanas procesiem mikromērogā. Šajā gadījumā plaisas atvēršanās platuma kontroles laikā saspiešanas spēks spēj daļēji atjaunināt sākotnējo strukturālo veselumu atomu līmenī. Tāpēc katra posma sākumā nav ievērojamas kumulatīvas AE, jo vēl nenotiek jaunu plaisu veidošanās.

Testa rezultāti un analīze

Eksperimentāli iegūti dati ļauj izmantot trīs AE pazīmes (3.9. attēls). Pirmā pazīme ir noslogojuma ciklu skaits no 0 līdz M_1 , kas atbilst kumulatīvās AE grafika plato posmam. Otrā klasifikācijas pazīme ir noslogojuma ciklu skaits starp M_1 punktu un α -kritērija rašanās punktu. Trešais kritērijs ir α leņķa slīpums.



3.9. att. Klasificēšanas pazīmes.

18 klasificētas pazīmju grupas atbilst “vesela” gulšņa 18 noslogojuma fāzēm. Trenēšanas kopa balstās uz 11 paraugiem. Katram no 18 noslogojuma posmiem, jeb klasēm, atbilst v vektors.

Kad visi klasificēšanas šabloni tika iegūti, visu 11 gulšņu dati tika salīdzināti viens ar otru. Lai to īstenotu, tika saskaitītas varbūtības, ar kurām v atbilst j klasei. Ja varbūtība ϕ_j ir maksimālā kādai klasei, mēs piešķiram vektoram v klasi ϕ_j :

$$P(\varphi_i | v) > P(\varphi_j | v) \quad j = 1, \dots, C; \quad i \neq j \quad (3.1.)$$

kur: C – klašu skaits
 j – klases kārtējais numurs

3.1. tabula. Iepriekš noslogotu dzelzsbetona gulšņu dzīvības posmu klasifikatori (vidējās nozīmes) 11 gulšņiem

Klase	Klasificēšanas pazīme			Gulšņa strukturāls novērtējums
	Noslogojuma posms (pēc programmas)	1. pazīme. Plato garums, noslogojuma ciklos, N	2. pazīme. Ciklu skaits starp plato un α kritēriji stāšanos, N	
1	4583	251	1,4	94 %
2	4250	247	1,4	89 %
3	4167	241	1,4	83 %
4	1667	233	1,8	78 %
5	1500	223	2,2	72 %
6	1167	211	2,6	67 %
7	1083	190	3,0	61 %
8	1000	174	3,3	56 %
9	917	156	3,8	50 %
10	833	136	4,0	44 %
11	750	103	4,0	39 %
12	583	79	5,0	33 %
13	417	53	5,4	28 %
14	250	25	5,8	22 %
15	167	12	5,9	17 %
16	83	4	6,6	11 %
17	75	4	7,0	6 %
18	42	3	7,4	Tuvu sabrukšanai

Pēc klasifikācijas tabulas sastādīšanas minimālās kļūdas k atrašanai tika izmantota *Baye* metode (*Webb & Copsey*, 2011, p. 13)

$$P(k) = \sum_{i=1}^{18} P(k|v_i)P(v_i) \quad (3.2.)$$

Kļūda katram no 18 pārim “pazīmju vektors/trenēšanas kopas vektors” tika saskaitīts šādi:

$$k_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\left(\frac{|\varphi_{i,j} - v_i|}{\max(\varphi_{i,j} - v_i)} + 1 \right)} \quad (3.3.)$$

kur: n – klasifikācijas pazīmju skaits (v vektora garums);
 i – klasifikācijas pazīmes kārtējais numurs;
 j – klases kārtējais numurs;
 v_i – novērtējamā v objekta i -tā pazīme;
 $\varphi_{i,j}$ – atsilstošās klases φ vektora i -tā pazīme.

Metodes verifikācija

Lai verificētu aprakstīto pieeju, tika veikti šādi soļi:

- 1) identifikācijai tika izmantoti visi ierakstītie dati 10 “veseliem” gulšņiem un vienam “defektīvajam” gulsnim. Tā tika izdarīts katram no 18 noslogojuma programmas soļiem. Viens paraugs (*sample*) ir viens noslogojuma posms vienam gulsnim. Kopā $11 \times 18 = 198$ paraugu;
- 2) gulšņa *N* verifikācijas procesā šī gulšņa dati tika izņemti no trenēšanas kopas. Pēc tam katrs no 18 vektoriem *N*-tajam gulsnim tika salīdzināts ar atlikušiem trenēšanas paraugiem, izmantojot formulu 3.3.;
- 3) tika atrasts trenēšanas paraugs ar mazāko atbilstības kļūdu;
- 4) soļi 2 un 3 tika veikti visiem citiem gulšņiem. Klasifikācijas dati ir šādi:
 - pozitīvu paraugu skaits [17] (P): 161
 - negatīvu paraugu skaits (N): 20
 - patiesi pozitīvu paraugu skaits (TP): **180**
 - patiesi negatīvu paraugu skaits (TN): **18**
 - aplami pozitīvu paraugu skaits (FP): 2
 - aplami negatīvu paraugu skaits (FN): 19
 - aplami pozitīvo reitings (type I error): $FP/(FP+TN) = 10\%$
 - aplami negatīvo reitings (type II error): $FN/(TP+FN) = 9\%$
 - klasificēšanas precizitāte: $(TP+TN)/(TP+FP+FN+TN) = 90.4\%$

Noslēgums

Lai kvantificētu sagraujošās slodzes iepriekš spriegotām dzelzsbetona gulsnim, tika veikti noslogošanas testi. Testu laikā tika identificēti: sākotnējā plaisa, plaisas attīstīšanās un sabrukšana. Tas norāda, ka AE metode ļauj noteikt plaisu rašanās momentu pašā sākumā, kas ir agrāk nekā citas instrumentālās un vizuālās inspekcijas metodes.

Optiski vizuālās inspekcijas gaitā (laikā ne ilgākā par 5 minūtēm) starp noslogojuma posmiem notika gulšņa plaisu malu “saārstēšanās”. Šis efekts ir skaidri redzams AE diagrammās noslogošanas posmu pārejā. Pie tam – katrā nākamajā posmā “saārstēšanās” laiks kļūva arvien mazāks. Rezultāti ļauj nākotnē novērtēt armatūras un betona adhēzijas kvalitāti, kā arī ražošanas kvalitāti.

4. NODAĻA. MODERNO KOMPOZĪTMATERIĀLU BOJĀJUMU PĒTĪŠANA UN NOVĒRTĒŠANAS KRITĒRIJU IZSTRĀDE, IZMANTOJOT AE SIGNĀLU SPEKTRĀLĀS ĪPAŠĪBAS

4.1. Priekšmeta apraksts

Jēdziens “kompozītmateriāls” nozīmē divu vai vairāku materiālu kombināciju makro līmenī trešā – jauna materiāla – veidā, kuram piemīt jaunas īpašības. Kompozītmateriālu izmantošana transportā nodrošina drošību un izdevīgumu. Piemēram, tiek praktizēta daļēja vagonu struktūras elementu aizstāšana ar kompozītdaļām. Logu aizgriezņi, logu sliedes, rāmji, modulāras tualetes, galvenās durvis, baterijas nodaļumu daļas, lokomotīvu pārsegi jau šodien tiek izgatavoti no šķiedru pastiprinātām plastmasām (*FRP – fiber reinforced plastic*) [4]. Ir arī kompozīta gulšņu ražošanas piemēri. Indijā, kur ir ceturtais lielākais dzelzceļa tīkls pasaulē [16], veiksmīgi tiek praktiski testēti *FRP* kompozītu gulšņi dzelzceļa tiltu konstrukcijās, lai mazinātu koksnes izmantošanu. Austrālijā sākuši izmantot epoksīdsveķu gulšņus uz betona polimera matricas [8]. Minētie piemēri rāda arvien augošu nepieciešamību pēc kompozītmateriālu izmantošanas sauszemes transportā.

To apstākļu vidū, kas traucē kompozītmateriālu izplatīšanos transporta infrastruktūrā, pētnieki min kompozītu objektu inspekcijas vienkāršu un drošu metožu un remonta procedūru trūkumu [18]. Tas norāda, ka nepieciešams attīstīt reāla laika nesagraujošās testēšanas metodes, kas piemērotas

kompozītu objektiem. AE metode var kļūt par noderīgu instrumentu defektu atrašanai kompozītmateriālos agrīnos posmos.

4.2. Testējama materiāla īpašības

Pētījumam tika izmantoti šādi materiāli:

1. epoksīda kompozīts (epoksīdsveķi *Araldite® LY 1564/Aradur® 3486*) ar dažādām pildvielas koncentrācijām;
2. pildītājs: *polyethersulphone brand Ultrason® E 2020 P SR micro (PES)*.

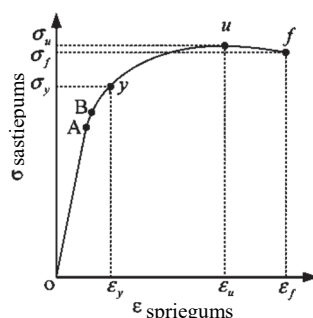
Pētāmajām epoksīda kompozīcijām *PES* pildītājā svara daudzums bija 0,0 %, 5,0 %, 7,5 %, 10,0 % un 12,5 %, kas tika sasniegts, sajaucot regulārajā mikserī istabas temperatūrā 30 minūšu laikā un sacietināts atbilstoši noteikumiem četru stundu laikā 100 ° C temperatūrā.

4.3. Pētījuma uzdevumi

1. Noteikt pildītāja koncentrācijas iedarbību uz laušanas īpašībām un noteikt iespējamās epoksīdsveķu ar dažādu pildītāja saturu matricā mikro sagraušanas mehānismus.
2. Izmantojot AE-signālu analīzi, noteikt tipisko mikro sagraušanas procesu secības scenāriju.
3. Noteikt dinamiskā kritērija (α -kritērija) uzvedības pazīmes kompozītmateriālos katrai *PES* pildītāja koncentrācijai.
4. Noteikt sagraušanas spektrālās AE īpašības.

4.4. Testēšanas metodes

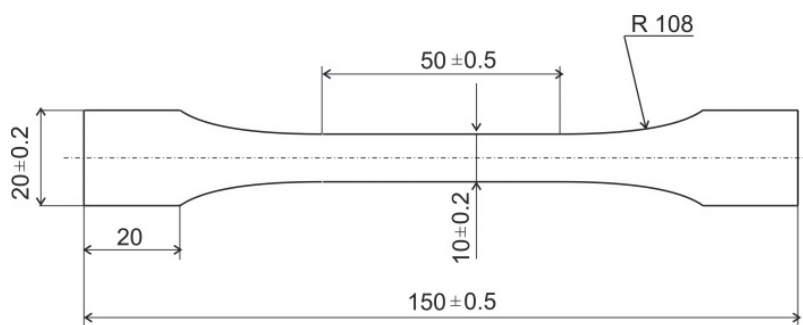
Lai noteiktu kompozīta objekta AE īpašības, ir svarīgi noteikt tos izgatavošanas materiālam. *PES* pildītu kompozīta paraugu testēšanas nolūkiem tika izmantota paraugu sastiepuma līdz lūzumam metode (4.1. attēls).



4.1. att. Sprieguma/sastiepuma diagramma.

- σ_u – stiepes izturība;
- σ_f – lūzuma spriegums;
- σ_y – plūstamības spriegums;
- ϵ_u – vienmērīga deformācija
- ϵ_f – lūzuma sastiepums;
- ϵ_y – plūstamības sastiepums;
- u – stingrības robeža;
- y – plūstamības robeža;
- f – lūzuma spēks.

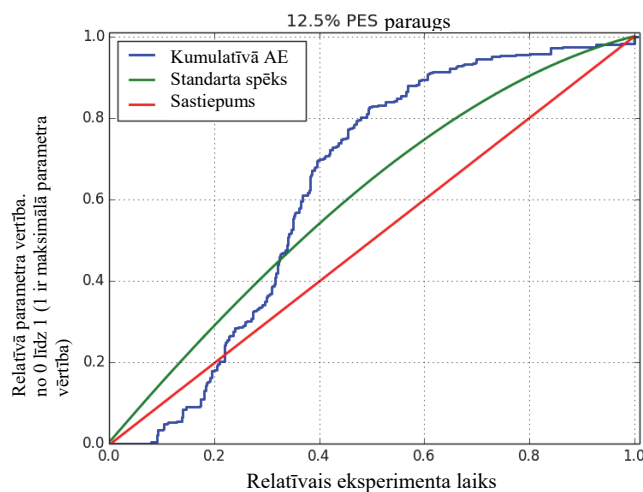
Paragi: testos tika izmantoti 2 mm x 10 mm x 150 mm izmēra 30 kompozīta paraugu (5.3. attēls) ar dažādu *PES* koncentrāciju (0,0 %, 5,0 %, 7,5 %, 10 % un 12,5 %).



4.2.att. Testa paraugi (izmēri milimetros).

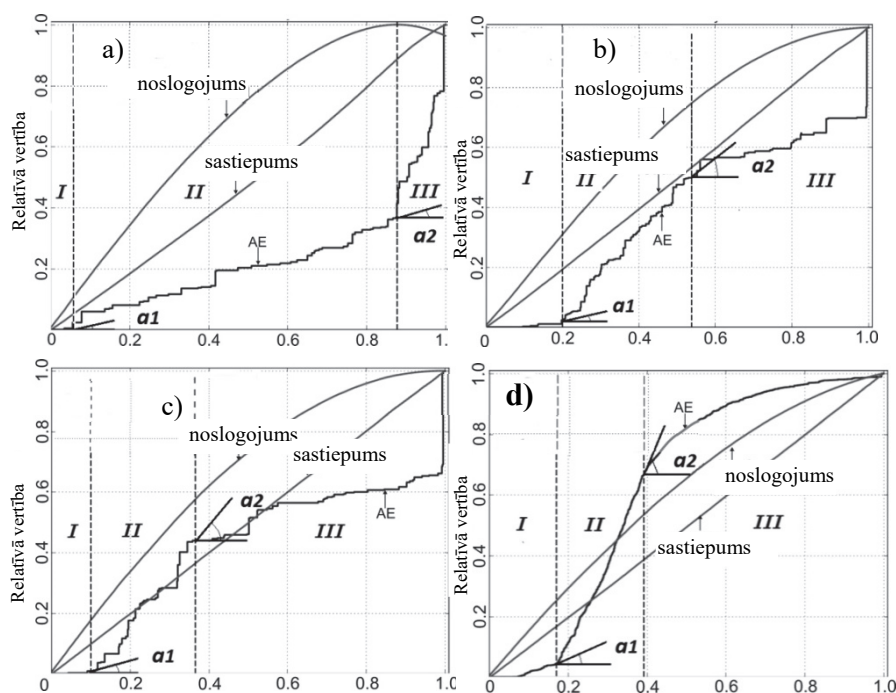
Paraugu sastiepuma testu procedūra: sastiepuma testi tika veikti, izmantojot *Zwick Roell 2,5* mašīnu, ar maksimālo spriegumu 2,5 KN. Sastiepuma testi tika izvēlēti dēļ sprieguma vienmērīgas izmaiņas testa gaitā. Testēšanas mašīnas saspraudes kustības ātrums ir 2 mm/min. Pirms testa *R6-Alpha Mistras* kompānijas AE sensors tika nostiprināts uz parauga. AE signālu reģistrēšanai tika izmantots *Mistras MICRO-II* AE dators. Pirms testēšanas paraugi tika atdzesēti līdz istabas temperatūrai $+22 \pm 2^\circ \text{C}$. Relatīvais mitrums bija 50 %. Testēšanas laika tika veikts šādu parametru ieraksts: parauga sastiepums, mehāniskais spriegums, AE signāli. Balstoties uz testa rezultātiem, tika aprēķināts elastības modulis.

Visos gadījumos eksperimenta ilgums bija dažāds. Gan paraugu pagarinājums, gan spriegums lūzuma momentā arī bija dažādi. Tas radīja paraugu AE dinamikas salīdzināšanas problēmas gan paraugiem dažādās koncentrācijas grupās, gan vienas grupas ietvaros. Lai atrisinātu šo problēmu, tika piedāvāts pārreķināt eksperimentu datus no absolūtām vienībām relatīvajās. Tika veikta datu normalizācija laika asij, sastiepuma asij un sprieguma asij, kur 0 ir eksperimenta sākums un 1 – lūzuma moments (metodes matemātiskais pamats ir aprakstīts 5. nodaļā). Šī uzdevuma realizācijai tika izstrādāta programmatūra. Kombinēto, normalizēto datu piemērs parādīts 4.3. attēlā.



4.3. att. 12,5 % koncentrācijas 1. eksperimenta normalizēts datu attēlojums.

Tālāk katrā eksperimentu grupā ar vienu to pašu *PES* koncentrāciju tika aprēķināti vidējie kumulatīvi AE rādītāji, sastiepuma un sprieguma rādītāji. Katrā koncentrācijas grupa tika noteikti α_1 un α_2 punkti. Iegūtie 0,0 %, 5,0 %, 10,0 %, 12,5 % koncentrācijas testu rezultāti parādīti 4.4. attēlā.



4.4. att. Vidējie eksperimentu rezultāti katrai paraugu grupai.
 a) tīrie epoksīdsveķi (0,0 % PES), b) PES 5,0 % c) PES 10,0 %, d) PES 12,5 %.

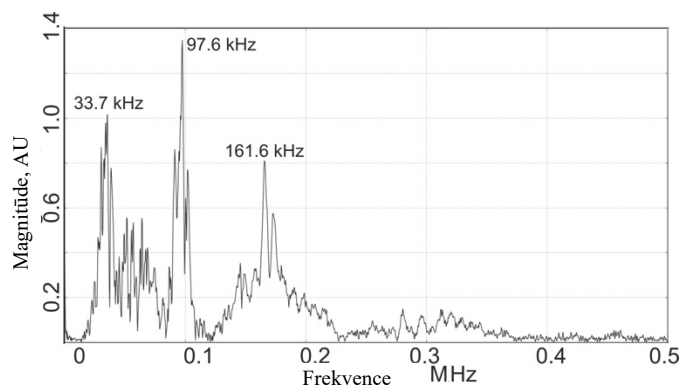
Rezultātu analīze lika secināt, ka dažādām PES koncentrācijām piemīt dažādi materiāla sagraušanas scenāriji. Papildus tika atklāts, ka pastāv vismaz trīs izteikti mikro lūzumu akumulācijas posmi: 1. sākotnējais (0,0–0,2 laika līdz parauga lūzumam, piemēram, 5.6. b attēls), kur nav ievērojamas materiāla defektu akumulēšanas; 2. posms – mērens defektu veidošanās posms. Kumulatīvā AE pieaug. Notiek vāju adhezīvu saišu pārtraukums starp pildītāju un matricu:

- 0,20–0,40, kā 5.6. d attēlā (PES 12,5 %);
- 0,20–0,55, kā 5.6. b attēlā (PES 5,0 %);
- 0,10–0,35, kā 5.6. c attēlā (PES 10,0 %);
- nav novērojams tīros epoksīdsveķos, bez PES.

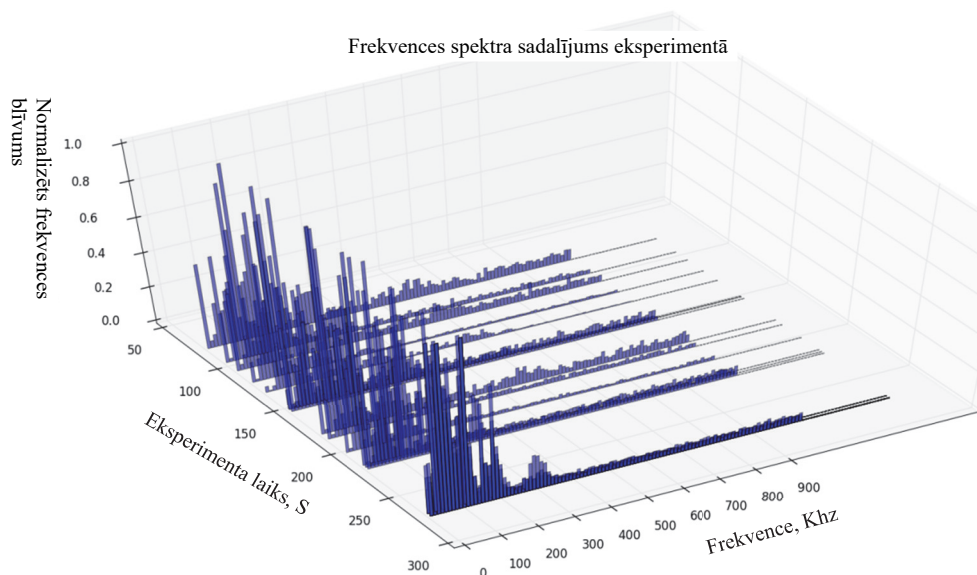
Papildus ar AE kā diskrētu notikumu plūsmas analīzi tika veikta AE signālu spektrālu īpašību analīze. Eksperimenta laikā tika ierakstītas un ar darba izstrādāto programmatūru analizētas AE signālu viļņu formas.

Tika pētīti:

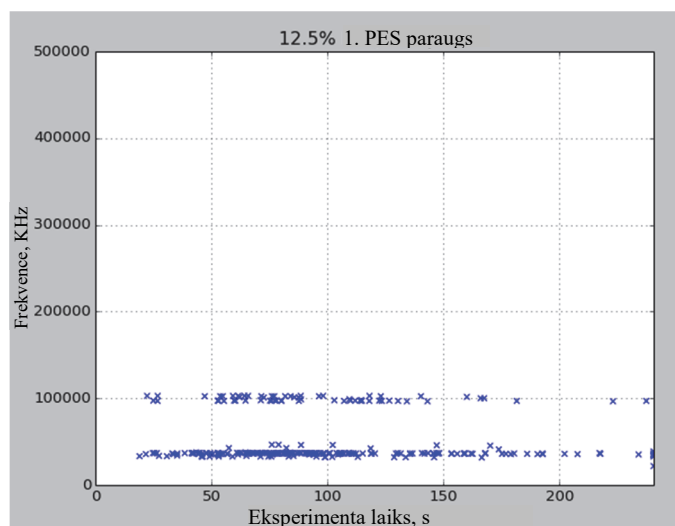
1. atsevišķu AE signālu spektrālās īpašības (4.5. attēls);
2. enerģijas sadalījums frekvenču spektrā eksperimenta laikā (4.6. attēls);
3. maksimālo enerģiju frekvenču sadalījums eksperimenta laikā (4.7. attēls).



4.5. att. Defekta rašanās kompozītā AE signāla spektrālais blīvums.



4.6. att. Frekvenču sadalījums enerģijas spektrā pilnā atsevišķa eksperimenta laikā.



4.7. att. Maksimālo enerģiju frekvenču sadalījums eksperimenta laika koordinātēs.

4.5. Testēšanas rezultāti

Pēc AE metodes izmantošanas rezultātiem ir izdarīti šādi secinājumi:

- kumulatīva AE norāda uz trim izteiktiem kompozīta materiāla sagraušanas posmiem; šos posmus nav iespējams identificēt, izmantojot tikai sastiepuma/sprieguma diagrammas, bet tie ir atšķirami uz AE diagrammām; tika noteikti α_1 un α_2 kritēriju rāšanas momenti;
- PES modificētajos kompozītos defektu uzkrāšanas process kļūst acīmredzams, sākot no 10 %–20 % stingrības robežas sprieguma; tajā pašā laikā tīrajos epoksīdsveķos šo procesu var novērot, tikai sākot no 85 % sprieguma;
- AE signālu spektrālās īpašības mainās atsevišķu sagraušanas posmu sākuma laikā, šo īpašību var izmantot kā papildu parametru objektu sagraušanas pakāpes novērtēšanā; tika atklāts, ka vidēja signālu maksimālā frekvence diagrammu sākumā ir augstāka nekā beigās.

4.6. Nodaļas apkopojums

Tika konstatēta α_1 un α_2 -kritēriju rašanās saistība starp tā paša kritērija uzvedību citos materiālos, kas tika aplūkoti 2. un 3. nodaļā, kā arī iepriekšējos pētījumos. Šādi var pieļaut, ka ir

pamatojums izmantot α -kritēriju kā universālo sagraušanas posma indikatoru daudziem transporta inženierijā plaši izmantojamiem materiāliem: betonam, metālam un polimēra kompozītiem.

Tika izstrādāta programmatūra AE spektrālo īpašību un AE intensitātes īpašību identificēšanai. Tas padara iespējamu saistīt šos divus AE parametrus ar kompozītmateriāla sagraušanas posmu laboratorijas testos. Šis jautājums apskatīts 5. nodaļā.

5. NODAĻA. AE SIGNĀLU SPEKTRĀLU UN DINAMISKU RAKSTURĪPAŠĪBU MATEMĀTISKĀ ANALĪZE UN MATERIĀLU SAGRAUŠANAS POSMU IDENTIFICĒŠANAS MATEMĀTISKĀS METODES IZSTRĀDE

5.1. Problēmas apraksts

Informatīvu AE datu vākšana ir svarīgs nosacījums, lai panāktu iespējamību prognozēt objekta izturību. Testējot gan 2.–4. nodaļā aprakstītos, gan arī citus objektus un materiālus, tika konstatētas šādas metodoloģiskas problēmas.

1. Lielā izmēra objektu AE testēšanas procesā (tilti, vagoni, cisternas u. c.) pastāv nepieciešamība izmantot daudzus sensorus vienlaikus. Pat tad, ja laboratorijas rīcībā ir AE ierīces ar lielu kanālu skaitu, tas negarantē, ka nepieciešamā mēroga eksperiments ir veicams. Vienlaikus izmantot vairākas AE ierīces nav iespējams, jo datu formāti parasti ir atšķirīgi, un tas ierobežo iespēju veidot ierīču tīklus.
 2. Darba ir parādīts, ka dinamiskā kritērija (“ α -kritērija”) izmantošana ļauj novērtēt objekta tehnisko stāvokli, tomēr šī kritērija identificēšana ir netriviāls uzdevums un prasa pētnieka analītisku darbību. Šobrīd nav programmatūras, kas spēj skaidri identificēt α -kritēriju eksperimentos.
 3. α -kritērija identifikācija pati par sevi neatbild uz jautājumu, kāds tieši objekta sabrukšanas posms ir panākts. Lai atbildētu uz šo jautājumu, ir nepieciešams vai nu novērot akustisko emisiju no paša objekta ekspluatācijas sākuma, vai veikt datu vākšanu līdz objekta sabrukšanai, kas nonāk pretrunā ar pašu ideju prognozēt objekta vitalitāti. Ir jābūt papildu parametram, kura izmantošana vienlaikus ar α -kritēriju dotu iespēju pēc iespējas īsajā laikā dot spriedumu par to, kāds ir aktuālais objekta tehniskais stāvoklis.
5. nodaļā veikti praktiskie soļi šo problēmu risināšanai.

5.2. AE dinamikas analīzes programmatūras veidošana

Darba gaitā izstrādāta programma *Python 2.7* vidē. Šī izstrādes vide ir vienā no lielākajām zinātniskās programmēšanas ekosistēmām līdzās *Matlab*, *MathCad*, *StatGraphic*, *Catman*. Scenārijs var tikt palaists burtiski jebkurā datorā, jebkurā no operētājsistēmām (*MacOs*, *Linux*, *Unix*, *Android*, *iOs* utt.). Programmatūra tika izmantota un notestēta pētījumā, kas ir aprakstīts 4. nodaļā, un visi tālāk minētie programmas darbības piemēri attiecas uz *PES* kompozītmateriālu eksperimentiem.

5.3. Datu normalizācijas funkcija

Katrā eksperimentā, katrā kompozītmateriālu grupā bija atšķirīgs laiks līdz parauga lūzumam. Lai veiktu salīdzinošu analīzi, bija nepieciešams saistīt vairāku eksperimentu datus vienā koordinātu sistēmā. Lai atrisinātu šo problēmu, tika izmantota normalizācijas metode, kas paredz AE reģistrācijas laika datu transformāciju no absolūta sekundēs izteikta laikā uz relatīvo laiku, kur 0 ir noslogojuma eksperimenta sākums un 1 ir parauga lūzums.

Tas tika realizēts šādi: AE signālu reģistrācijas laika masīvs ir vektors t_x ,

$$t_x = \langle t_{x,0}, t_{x,1}, \dots, t_{x,n-2}, t_{x,n-1} \rangle \quad (5.1.)$$

kur: x – eksperimenta kārtas numurs grupā;
 n – reģistrētu AE summas maiņu skaits.

Katra t_x vektora vērtība atbilst c_x vektora vērtībai (summētās emisijas skaits), kas nosaka summatīvo AE skaitu konkrētajā laika momentā.

$$c_x = \langle c_{x,0}, c_{x,1}, \dots, c_{x,n-2}, c_{x,n-1} \rangle \quad (5.2.)$$

kur: n – reģistrētu AE summas maiņu skaits;
 x – eksperimenta kārtas numurs grupā;
 $c_{x,i}$ – kumulatīva AE skaita vērtība laika momentā $t_{x,i}$.

Normalizēta laika vērtība ir aprakstīta ar vektoru t_x^{norm}

$$t_x^{norm} = t_x / \max t_x \quad (5.3.)$$

kur: x – eksperimenta kārtas numurs grupā;
 t_x – laika vērtību vektors pirms normalizācijas.

Normalizēta kumulatīva AE skaita vērtība ir noteikta ar vektoru c_x^{norm}

$$c_x^{norm} = c_x / \max c_x \quad (5.4.)$$

kur: x – eksperimenta kārtas numurs grupā;
 c_x – kumulatīva AE skaita vērtība pirms.

Tādējādi pēc normalizācijas operācijas izmantošanas laika dati un AE skaita dati ir pārveidoti relatīvās koordinātēs.

5.4. Dinamisku α_1 un α_2 kritēriju noteikšana, izmantojot izlīdzināšanas metodi

Sabrukšanas α -kritērijs tiek definēts kā pozitīvu AE summas pieaugumu līkne, kas noteiktajā punktā ir izlocīta. Šis pieaugums nosaka AE summatīva signāla dinamiku. Saistībā ar izteiktu lineāro zonu trūkumu kumulatīvās AE grafikā ir grūti izmantot α -kritēriji konkrēta noguruma plaisas rašanas momenta noteikšanai. Tāpēc ērtākais analīzes parametrs ir kumulatīvas AE otrais atvasinājums.

Lai to panāktu, var izmantot nevis grafisko diferencēšanu, bet tiešo diferencēšanu noteiktos laika intervālos, bet šajā gadījumā rezultāts ir ļoti jutīgs pret AE dinamikas izmaiņām. Tas rada lielu zīmes maiņas zonu rašanos noguruma plaisu rašanās posmā.

Lai atrisinātu šo problēmu, tika piedāvāta metode, kurā, izmantojot “inerces” īpašību, tika iegūts gludāks kumulatīvās AE otrā atvasinājuma grafiks. Nolīdzināts normalizēts kumulatīvas AE vērtību vektors c'_x tiek izteikts šādi:

$$c'_{x,j} = \frac{\sum_{i=j}^{k+j} c_{x,i}^{norm}}{k} \quad (5.5.)$$

$$c'_x = \langle c'_{x,j} \rangle; j = \langle 0, 1, \dots, n - k - 1 \rangle$$

kur: k – nolīdzināšanas loga elementu skaits;
 n – reģistrētu AE summas maiņu skaits;
 x – eksperimenta kārtas numurs grupā;
 $c_{x,i}^{norm}$ – kumulatīvās AE nozīme x -tajā eksperimentā, laika momentā $t_{x,i}$.

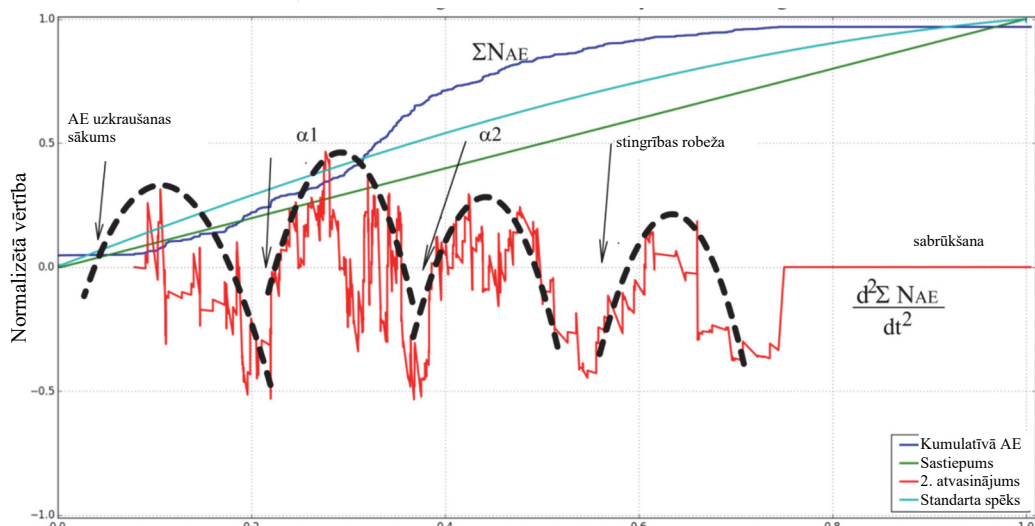
Pēc kumulatīvās AE vektora nolīdzināšanas rezultējošais vektors c'_x , kas sastāv no n elementiem, tiek nodots digitālās diferencēšanas funkcijas ievadā. Funkcija atgriež $n-2$ elementu garu vektoru, kurā tiek savākti otrās kārtas atvasinājuma elementi pēc laika ass.

$$\alpha_x = \frac{\partial^2 c'_x}{\partial t^2} \quad (5.6.)$$

kur: a_x – rezultējošais vektors.

Diferencēšana tiek veikta, izmantojot *numpy* bibliotēkas *diff* funkciju. Rezultāts ir vektors a_x , kur savukārt arī tiek apstrādāts ar iepriekš aprakstītu nolīdzināšanas funkciju. Pamatojoties uz rezultātu, grafiskais attēls, kas rāda otro atvasinājumu, kumulatīvu AE, objekta pagarinājumu un slodzi relatīvajās koordinātēs (5.1. attēls).

PES 12,5 % 1. paraugs. Sumārās AE grafiks un 2. atvasinājums kopā ar 6 % izlīdzināto kumulatīvu AE



5.1. att. Kumulatīvā AE un nolīdzināts otrā kārtā atvasinājums, kas iegūts ar tiešu diferencēšanu.

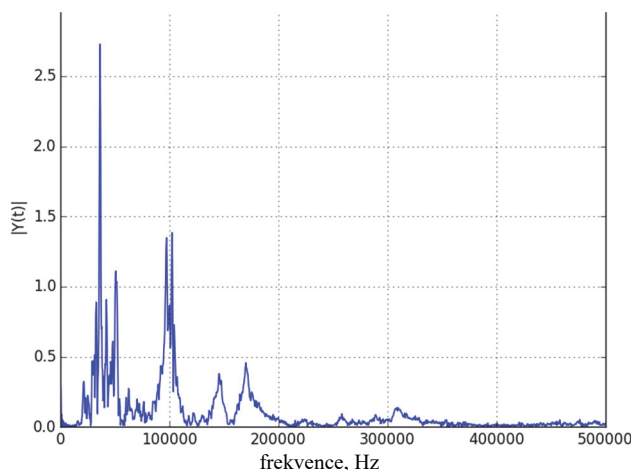
5.1. attēls rāda 12,5 % PES kompozīta eksperimenta rezultātu. Punktētā līnija rāda četras izteiktas zonas, kurās otrais atvasinājums pieaug un dilst. Šajā gadījumā tika izmantots 6 % nolīdzinājums. Pirmās zonas augošās vērtības atbilst AE akumulēšanas sākumam. Pēc pirmās zonas iestāšanās otrā, kas atbilst α_1 kritērijam. Uz robežas starp 2. un 3. zonām parādās α_2 kritērijs. Un pēdējās zonas sākuma laiks atbilst stingrības robežai. Ar šo pašu metodi tika apstrādāti visi citi kompozītmateriālu eksperimentālie dati PES koncentrācijai 0,0 %, 5,0 %, 7,5 %, 10,0 %, 12,5 %. Iegūtie rezultāti rāda pietiekamu saskaņotību starp 2. atvasinājuma dinamiku un visiem sabrukšanas posmiem. Tika atrisināta α -kritērija interpretēšanas problēma, kas padara α -kritēriju par informatīvāku.

5.5. Frekvences īpašību analīzes programmatūras izstrāde

Industriālā programmatūra spēj vizualizēt datus tikai tiem eksperimentiem, kuru datu ieraksts tika veikts, izmantojot tieši šo programmatūru. Lai īstenotu ar dažādām AE iekārtām ierakstīto datu spektrālo analīzi, tika izveidota otra programma. Tā ļauj veikt AE signālu spektrālu īpašību analīzi, kas ir nepieciešama, lai identificētu saistību starp normalizētu AE dinamiku un signālu frekvences datiem.

Spektrālā analīze tika veikta, izmantojot Furjē pārveidojumus. Furjē teorija postulē, ka jebkurš signāls var būt attēlots kā dažādu amplitūdu sinusa viļņu summa. Ievada signāls ir attēlots laika koordinātēs, bet izvada funkcijas rezultāts – frekvences koordinātēs. Rezultāts ir amplitūdas spektrs un fāzes spektrs. Pamatojoties uz diskrētās Furjē funkcijas, tiek attēlots grafiks, kura elements ir signāla jaudas blīvumu kopa (5.2. attēls).

PES 12.5% 1. parauga eksperimenta viena AE-siņnāla spektrs. Pīķa frekvence=36342 Hz

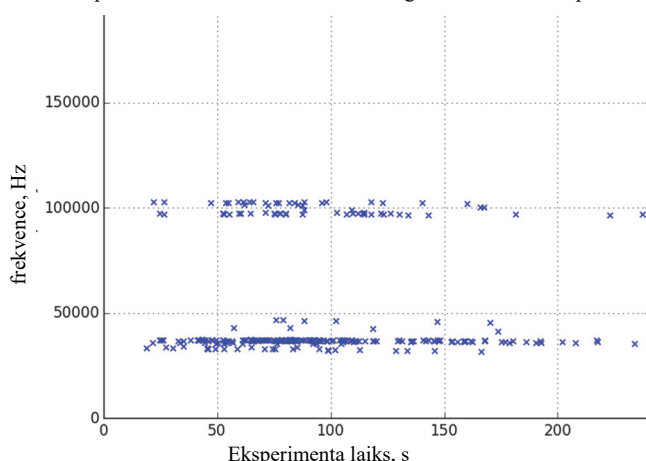


5.2. att. DFT^1 spektrālā dekompozīcija, izņemot imagināro daļu, ar “pīķa” spektra frekvences indikāciju.

5.6. Maksimālās spektrālās jaudas frekvences noteikšana

Furjē diskretā pārveidojuma rezultāts ir frekvenču amplitūdu skaitlisko vērtību vektors. Šis datu attēlošanas veids ļauj noteikt maksimālo nozīmi katram AE notikumam eksperimentā. Spektrālās jaudas blīvumu maksimālu frekvenču vērtību kopa veido eksperimenta tēlu.

Katrs punkts attēlo maksimālo katra AE siņnāla frekvenci eksperimentā



5.3. att. Spektrālā blīvuma maksimālo frekvencu sadale.

Katrs AE notikums diagrammā ir attēlots ar vienu punktu. Var novērot, kā visi notikumi ir sadalīti divās šaurās zonās, pie tam pilnīgi nav elementu starp tām. Ir saskatāmi arī dažādi kompozīta parauga sagraušanas posmi (testēšanas metode ir aprakstītā 4. nodaļā). Maksimālās frekvences raksturs mainās eksperimenta gaitā. Šī izmaiņa tika izmantota kā **jauns parametrs** kumulatīvas AE dinamikas pētīšanā.

5.7. Dinamiskā kritērija saistība ar AE siņnālu spektrālajām īpašībām PES kompozīta sabrukšanas procesā

Darbā izstrādāta programmatūra ļāva analizēt AE parametru dinamiku un to savstarpējo saistību. Frekvences analīze atklāja, ka PES kompozītos statistiskajos eksperimentos visos gadījumos kumulatīvas AE pieaugumu pavada spektrālās jaudas blīvuma maksimālās frekvences

¹ DFT – Discrete Fourier Transformation – diskrēts Furjē pārveidojums. Siņnāla spektra noteikšanas operācija.

samazināšanās. Tika novēroti divi izteikti kumulatīvās AE pieauguma punkti, kas darbā ir nosaukti α_1 un α_2 . Eksperimentu laikā AE maksimālās frekvences izmaiņas bija nevienmērīgas. Lai noteiktu maksimālās frekvences uzvedības raksturu, tika piedāvāta polinomiālas aproksimācijas izmantošana (fit-funkcija).

Vispārīgā fit-funkcija tiek aprakstīta šādi:

$$f(x) = a_0 + a_1x^1 + \dots + a_jx^j = a_0 + \sum_{k=1}^j a_kx^k \quad (5.7.)$$

kur: $a_0 \dots a_j$ – koeficienti;
 j – polinoma kārtā.

Lai minimizētu vidēji kvadrātisko aproksimējošās funkcijas kļūdu, daļējie izteiksmes atvasinājumi tika pielīdzināti nullēm.

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x^k)] = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x^k)] x^1 = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial \Pi}{\partial a_j} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x^k)] x^j = 0 \end{cases} \quad (5.8.)$$

Lai iegūtu skaitliskās koeficientu vērtības, $j+1$ vienādojums tiek pārveidots matricu formā:

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^j \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{j+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^j & \sum x_i^{j+1} & \sum x_i^{j+2} & \dots & \sum x_i^{j+j} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_j \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum (x_i y_i) \\ \sum (x_i^2 y_i) \\ \vdots \\ \sum (x_i^j y_i) \end{bmatrix} \quad (5.9.)$$

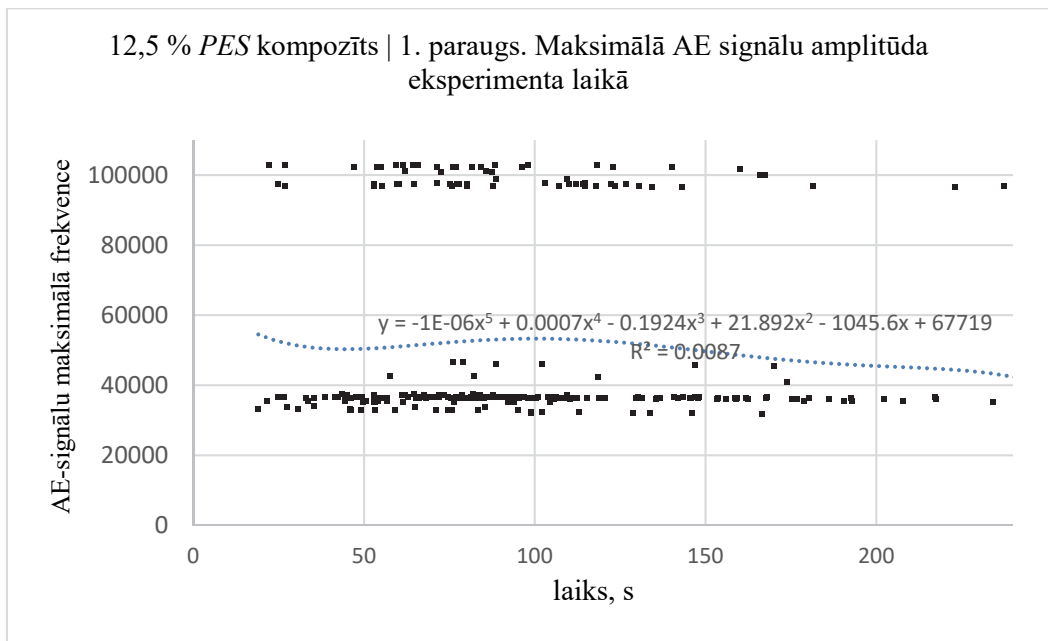
kur: n – AE signālu skaits eksperimentā;
 j – polinoma kārtā.

Lai iegūtu polinomiālās aproksimēšanas koeficientus, tika izmantota formula:

$$X = A^{-1}B \quad (5.10.)$$

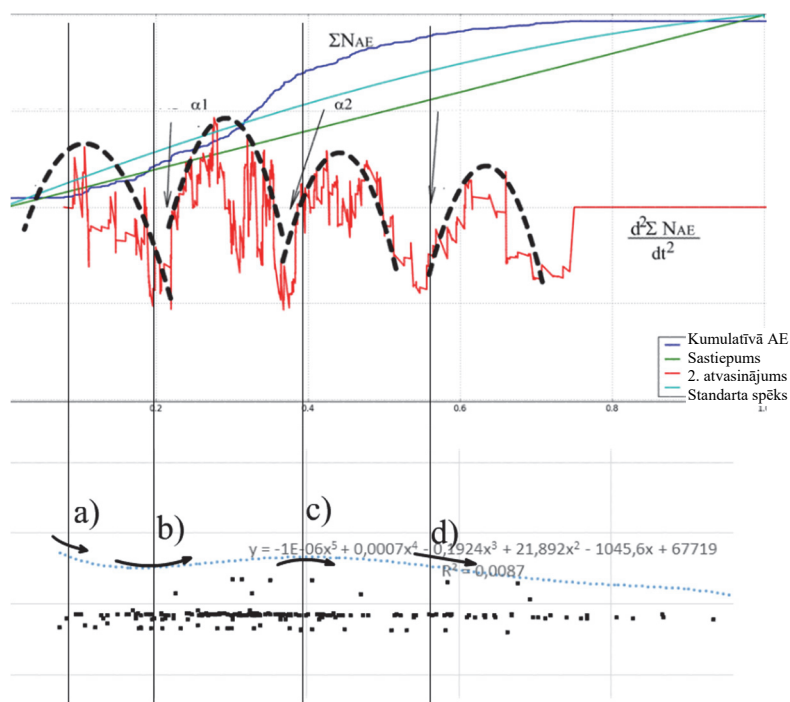
kur: X – risinājumu vektors.

Akustiskās emisijas attēlu veido divu tipu AE signāli. AE signāli ar maksimālās spektrālās jaudas frekvenci no 31 KHz līdz 38 KHz un signāli ar frekvencēm no 96 KHz līdz 103 KHz. Acīmredzot aproksimējošajai funkcijai tik izklaidētiem frekvenču ass datiem būs ļoti zemas vērtības.



5.4. att. Maksimālo frekvenču diagramma un funkcijas aproksimācija 1. eksperimentā ar 12,5 % PES koncentrāciju (polinoma kārtā $j = 5$).

Līknes raksturs, kas novērojams aproksimācijas funkcijas grafikā (5.4. attēls), atkārtojas, ja izmanto vērtības “j” no 4 līdz 6 ieskaitot. Kopā visā eksperimenta laikā funkcijas vērtība samazinās gan augsto un zemo frekvenču grupās, gan atsevišķi katrā grupā. Tajā pašā laikā pēc α_1 un α_2 kritēriju izrādes aproksimējošās funkcijas uzvedība mainās. Pēc α_1 rašanās fit-funkcija no monotonas samazināšanas pāriet pie monotonas paaugstināšanās. Tad maksimālās frekvences vērtības ieņem augstākās vērtības. Pēc tā, kad tiek reģistrēta jauna aktīvas emisijas signālu “pakete”, kas atbilst punktam α_2 , fit-funkcija atkal sāk samazināties un ieņem minimālās vērtības tieši pirms parauga lūzuma. Eksperimenta beigās, gandrīz pirms tecēšanas punkta, pēdējo reizi frekvences īslaicīgi pieaug.



5.5. att. Otrā atvasinājuma un kumulatīvas AE maksimālo frekvenču aproksimējošajai funkcijai atbilstības shēma. Attēlā parādīts 1. eksperiments ar PES saturu 12,5 %.

Tādējādi pastāv četri atšķirīgi AE dinamikas izmaiņas posmi (5.5. attēls). Katram posmam ir raksturīga unikāla divu parametru kombinācija: kumulatīvās AE otrā atvasinājuma dinamika un spektrālā blīvuma maksimālas frekvences dinamika. Minētie posmi ir apkopoti 5.1. tabulā.

5.1. tabula AE signālu dinamikas atbilstība paraugu sabrukšanas posmiem

Situācijas nr.	Posma raksturs	spektrālā blīvuma maksimālas frekvences fit-funkcijas uzvedība	kumulatīvās AE otrā atvasinājuma uzvedība	Posma apzīmējums
1	AE uzkrāšanas sākums	Samazinās ar izlīdzināšanu	Samazināšana tiek aizstāta ar palielināšanu	a)
2	α_1	Apakšējais ekstrēmums. Samazināšana aizstājās ar palielināšanu	Samazināšana tiek aizstāta ar palielināšanu	b)
3	α_2	Augšējais ekstrēmums. Palielināšana aizstājās ar samazināšanu	Samazināšana tiek aizstāta ar palielināšanu	c)
4	Stiprības robežas sasniegšana	Vienmērīga samazināšana	Samazināšana tiek aizstāta ar palielināšanu	d)
5	Zona, kurā 2. atvasinājumam ir lokālais minimums, tomēr sabrukšanas formas maiņas šajā posmā nenotiek. Bez frekvences parametra izmantošanas šis posms var būt kļūdaini identificēts kā viens no 1.-4. posmiem	Pieaugums	Samazināšana tiek aizstāta ar palielināšanu	Intervāls starp b) un c)
6	Visi pārējie intervāli	Notiek izmaiņa	Funkcijas dinamika neizrāda samazināšanas maiņu uz paaugstināšanu	Visi citi starp-intervāli

Papildus pie četriem kompozīta materiāla sabrukšanas posmiem, kas saistīti ar acīmredzamu kumulatīvās AE otrā atvasinājuma samazināšanos nomainītu uz paaugstināšanos, tika novērota arī fāze, kuru var kļūdaini identificēt kā sabrukšanas rakstura izmaiņas fāzi. Tas ir b-c posms (5.5. attēls). Lai izslēgtu šo kļūdainās klasifikācijas iespēju, tika izmantots frekvences parametrs.

Tika secināts, ka akustiskās emisijas α -kritērijs ir ar frekvences dinamiku saistīts parametrs. Lai to izmantotu, ir ieteicama šāda pieeja: sākot no patvaļīga laika momenta tieši pēc akustiskās emisijas signālu skaita intensīva pieauguma, jāseko signālu maksimālās frekvences izmaiņai. Pēc šīs izmaiņas rakstura ir iespējas noteikt konkrētu kompozītmateriāla sabrukšanas posmu, kas ir noticis intensīvās emisijas momentā.

Lai izveidotu divu parametru klasifikācijas trenēšanas kopu, tika izmantoti šādi dati (5.2. tabula).

5.2. tabula. Klasifikācijas šablona AE pazīmju kvantificēti dati

Klase	Klasifikācijas pazīmes		Kompozīta materiāla strukturālais stāvoklis sastiepuma testa laikā				
	1. pazīme. Kumulatīvas AE izlīdzināta 2. atvasinājuma zīme (kodi 1..2)	2. pazīme. Pīķa frekvences dinamikas uzvedība (kodi 1..6)	Relatīvā sagraujošā slodze [0 līdz 100 % no paraugu sagraušanas]				
Sagraušanas mehānisms			PES 0 %	PES 5 %	PES 7,5 %	PES 10,0 %	PES 12,5 %
1	1	1	< 5 %	< 20 %	< 15 %	< 10 %	< 18 %
2	1	2	≈ 5 %	≈ 20 %	≈ 15 %	≈ 10 %	≈ 18 %
3	1	3	≈ 85 %	≈ 55 %	≈ 45 %	≈ 38 %	≈ 40 %
4	1	4	> 85 %	> 55 %	> 45 %	> 38 %	> 40 %
5	1	5	5 %..85 %	20 %..55 %	15 %..45 %	10 %..38 %	20 %..55 %
6	2	1..5	Nav noteikts. Ir jāturpina ieraksts, tiklīdz parametrs mainīsies				

PES paraugu skaits: 30. Klasifikācijas paraugu skaits: 30x6 klases = 180. Klasifikācijas paraugs ir viens no [1...6] epoksīda kompozīta materiāla sagraušanas posmiem.

5.8. Metodes verifikācija

Verifikācijas process ir tāds pats kā 3.3. nodaļā.

Pozitīvu paraugu skaits (klases 1..5) (P): 194

Negatīvu paraugu skaits (6. klase) (N): 41

Patiesi pozitīvu paraugu skaits (TP): **180**

Patiesi negatīvu paraugu skaits (TN): **30**

Aplami pozitīvu paraugu skaits (FP): 14

Aplami negatīvu paraugu skaits *Nuber of false negative* (FN): 11

Aplami pozitīvo reitings (*type I error*): $FP/(FP+TN) = 31 \%$

Aplami negatīvo reitings (*type II error*): $FN/(TP+FN) = 5 \%$

Klasificēšanas precizitāte: $(TP+TN)/(TP+FP+FN+TN) = 89 \%$

5.3. tabula. Pazīmju klasifikācijas izmantošanas kopsavilkums

Objektu skaits	Objekta apraksts	Viļņa ieraksta programmas apstrāde	Klasifikācijas pazīmes	Klašu skaits
30	PES epoksīdsveķu kompozīts	Jā Pāreja uz relatīvajām koordinātēm. Spektrālā analīze	1. Pīķa frekvence 2. α -kritērija otrais atvasinājums	Sešas klases, atbilstoši sastiepuma programmai

Minētas metodes izmantošanas kopsavilkums parādīts 5.3. tabulā. Ir jāatceras, kā 11 aplami negatīvu klasificēšanas gadījumu skaits nenozīmē, ka klasifikācija ir notikusi bīstama posma kļūdaino atpazīšanu, uzskaitot šo posmu par drošu. Tas tikai nozīmē, kā 11 gadījumos bija jāturpina ierakstīt dati. Tālākās 10 līdz 20 ieraksta sekundēs jāizšķir, kāds sagraušanas posms ir noticis.

Nodaļas kopsavilkums

Izstrādātā programmatūra palīdzēja noteikt parametrus un sakarību starp AE rašanās dinamiku un frekvenču īpašībām kompozīta materiālā. Šo var pētīt arī tālāk, izmantojot citus materiālus:

dzelzsbetonu, sakausējumus u.c. Otrā atvasinājuma kritērija un maksimālas frekvences vienlaicīga izmantošana var palīdzēt parauga sagraušanas fāzes identificēšanai, veicot eksperimentu no brīvi izvēlēta laikā. Sagraušanas stadijas identificēšanas laiks nav liels, jo ir pietiekoši ierakstīt vairākus desmitus AE signālus.

Papildu eksperimenti tika veikti, izmantojot dažādu AE aparatūru (*Lel*, *PocketAE* un *PAC3000*). Izmantojot izveidoto programmatūru, tika panākta iespēja apvienot dažādo ražotāju AE datus vienā eksperimentā. Tas var veicināt tālāku diskusiju par nepieciešamību veidot kopējo AE datu industriālu standartu.

Darbā tika parādīts, ka α -kritērija izmantošana saistībā ar citiem parametriem ir nepieciešamais solis AE metodes uzlabošanai. Tas ir nepieciešams, lai veicinātu efektīvas AE metodes, kas ir pieejamas un vienkārši izmantojamas tehniskajam personālam. Par perspektīvu pieeju var uzskatīt AE šablonu klasificēšanas pieeju.

SECINĀJUMI

1) Tika veikta tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu un AE metožu analīze, kas parādīja AE metožu izmantošanas priekšrocības. AE metodes nodrošina drošu holistisku pieeju objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanai. AE signālu informatīva vērtība ir noteikta ar daudziem parametriem: dinamisko parametru, spektrālo parametru un citiem. Balstoties uz AE kontroles mūsdienu stāvokļa kritiskās analīzes datiem, tika secināts, ka objektu ekspluatācijas laikā noguruma plaisu atklāšanas metodes ir vērtīgas objektu stāvokļa kontrolei, bet dažreiz ir grūti lietojamas. Pastāv nepieciešamība attīstīt un uzlabot AE dinamisko kritēriju interpretāciju, kā arī citu AE parametru izmantošanu, kas sniedz informāciju par sagraušanas mehānismu. AE datu vākšanas un apstrādes metožu attīstīšana, kā arī sagraušanas modeļu apraksts dažādiem jauniem materiāliem, ir aktuāls un nepieciešams darbs nesargājošās testēšanas metožu jomā.

2) Tika izpētīti bojājumu mehānismi šādiem sauszemes transporta objektiem: Ķeguma HES tiltu pārejai, lokomotīves rāmjiem, dzelzsbetona gulšņiem. Tilta pārejai ir nedefinēts AE signāla izplatīšanās mehānisms ar koroziju bojātos un nebojātos savienojumos. Tika konstatēta bīstamo defektu neesamība konstrukcijā. Ir izstrādāta divu AE tēlu līdzīguma noteikšanas programma. Lokomotīves rāmju noguruma testos tika apstiprināta dinamiskā AE kritērija izmantošanas iespējamība. Tika piedāvāta un veiksmīgi aprobēta metode, kurā rāmja konstrukcija tiek pakāpeniski ieviesti koncentratori, kas ļauj ietaupīt etalona objekta AE ieraksta laiku. Dzelzsbetonā gulšņu noguruma testos tika izpētīts dinamiskais AE signālu rašanās mehānisms dažādās sagraušanās stadijās. Rezultāts pamato dinamiskā AE kritērija izmantošanu kā indikatoru arī tādiem modernajiem materiāliem kā polimēru kompozīti. Gulšņu testēšanas procesā summārā AE līknē tika atklāta "plato" parādība starp objekta noslogojuma sērijām. Šī parādība ļauj secināt par izturības atgūšanas efekta rašanos betonā zem armatūras savelcējošās slodzes.

3) Tika noteikti AE kritēriji *PES* pildīto kompozītu stiepes testiem. Izstrādāts sagraušanas posmu identificēšanas paņēmieni, kas izmanto AE signālu maksimālā spektrālā blīvuma frekvences spektra parametra izmaiņas. Tika atklāta šī parametra saistība ar dinamiskā AE kritērija uzvedību. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, tika konstatēts, ka, izmantojot gan spektrālo gan AE intensitātes parametru vienlaikus, tiek novērsta viena no sagraušanas posma identificēšanas kļūdām.

4) Tika veikta AE signālu spektrālo un dinamisko īpašību analīze un atklāts spektrālo AE īpašību izmaiņas raksturs. Tika izveidota materiāla sagraušanas posma identifikācijas matemātiskā metode. Lai interpretētu dinamisko AE kritēriju, tika piedāvāta un izmantota summārās AE līknes skaitliskās diferencēšanas metode ar 6 % izlīdzinājuma parametru. Minēta pieeja samazināja dinamiskā parametra interpretācijas neviennozīmību. Izmantojot šo metodi, tika veikta AE intensitātes parametra un spektrāla parametra analīze. Rezultātā tika sasniegta 89 % sagraušanas posma noteikšanas precizitāte kompozīta stiepes testos.

5) Ir izstrādāta daudzkritēriju akustiskās emisijas testēšanas metodoloģija sauszemes transporta objektu tehniskā stāvokļa novērtēšanai ekspluatācijā. Ķeguma HES tiltu pārejas testēšanai tika noteikti divi AE parametri: AE sēriju vidējā intensitāte un laika intervāli starp aktīvās AE sērijām.

Lokomotīves ratiņu rāmjiem tika izmantots kumulatīvās AE α -leņķa parametrs un AE intensitātes parametrs. Dzelzsbetona gulšņu testiem noteikti trīs testēšanas parametri: “plato” ilgums, ciklu starp plato beigšanas un dinamiskā kritērija rašanās skaits, summārās AE dinamiskā kritērija leņķa lielums (alfa kritērijs). Gulšņiem kā eksperimentāli pārbaudītiem vairākiem viena tipa objektiem tika novērtēta izmantotās metodes precizitāte, un tā bija 90,4 %. Izstrādātā metode ļauj īsajā laikā un ar pietiekamu ticamību atklāt objekta defekta esamību.

6) Pamatojoties uz iegūtajām spektrālajām un dinamiskām AE signālu raksturīpašībām, tika izstrādāta programmatūra, kas īsteno darbā aprakstītās funkcijas. Pirmais modulis veic dažādu eksperimentu AE parametru klasificēšanu. Otrais modulis ļauj veikt dinamiskā AE parametra uzvedības analīzi relatīvajās koordinātēs, kas ļauj salīdzināt dažāda ilguma eksperimentu rezultātus. Trešais modulis ļauj noteikt maksimālā spektrālā blīvuma frekvences uzvedību un šādi izmantot šo parametru daudzparametru sagraušanas stadijas AE klasificēšanai. Tika pārbaudīta visu moduļu funkciju darbība pētāmo objektu datu analīzei. Tika parādīta pietiekama programmatūras funkcionalitāte un atbilstība risinājumiem uzdevumiem.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Ai, Y. A., Sun, C. A., Que, H. B. & Zhang, W. A., 2015. Investigation of material performance degradation for high-strength aluminum alloy using acoustic emission method. *Metals*, 13. Februārī, 5 (1), pp. 228–238.
2. Amini, A., Entezami, M. & Papaelias, M., 2016. Onboard detection of railway axle bearing defects using envelope analysis of high frequency acoustic emission signals. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, November, Volume 6, pp. 8–16.
3. Baifeng, J. I. & Weilian, Q. U., 2008. The research of acoustic emission techniques for non destructive testing and health monitoring on civil engineering structures. s.l., CMD, pp. 782–785.
4. Baksi, S. & Biswas, S., 2009. Composites in Transportation - Indian Scenario. [Tiešsaitē] Pieejams: http://tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=564:composites-in-transportation-indian-scenario&catid=85:publications&Itemid=952
5. Banov, M. D., Konjaev, E. A. & Troyenkin, D. A., 1982. The defectoscopy of fatigue strength of gas turbine blades using method of Acoustic Emission. *Defectoscopy*, Volume 8, pp. 26–28.
6. Doroshko, S. & Banov, M., 2008. Acoustic emission testing of aircraft constructions. *Universidad de Sun Buenaventura*, Volume 14, pp. 5–13.
7. European Commission, 2012. *Priority projects*. [Tiešsaitē] Pieejams: http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t-policy/priority-projects_en [Skatīts: 28. februārī, 2017.].
8. Fedorus W, Manalo A, Thiru A, Van Erp, G., 2014, 23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), Design of epoxy resin based polymer concrete matrix for composite railway sleeper, p 137.
9. Ge, R. D., Yu, A. P. & Lu, H. B., 2011. The setting of Acoustic Emission detecting parameters in running of steel structure. s.l., MACE, p. 3696–3699.
10. Hellier, C., 2003. *Handbook of nondestructive evaluation*. s.l.:McGraw Hill.
11. Jiang, A. L., Zhao, Y. H. & Zhang, L. W., 2008. Experimental study of acoustic emission characteristics of underwater concrete structures. s.l., SPAWDA, pp. 252–257.
12. Marchevsky, M. et al., 2016. Localization of Quenches and Mechanical Disturbances in the Mu2e Transport Solenoid Prototype Using Acoustic Emission Technique. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (4).

13. Nesterov, E. I., Yegorov, A. T., Perfilov, A. A. & Gudkov, A. V., 1988. The Industry Directory of Locomotives in USSR. Locomotive carriages. Moscow: s. n.
14. Kaewkongka, T., 2016. A train bearing fault detection and diagnosis using acoustic emission. *Engineering Solid Mechanics*, 4 (2), pp. 63–68.
15. Kaiser, J., 1950. *Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. München: Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Universität.
16. Permal Wallace Pvt. Ltd, n. d. FRP Composite Sleepers for Application on Rail Tracks. [Tiešsaitē] Available at: http://www.powershow.com/view1/8efe0-ZDc1Z/FRP_Composite_Sleepers_for_Application_on_Rail_Tracks_powerpoint_ppt_presentat ion [Skatīts: 28. februārī, 2017.].
17. Powers, D. M. W., 2011. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2 (1), pp. 37–63.
18. RGS Europa, 2014. Polyurethane Baydur® 60. [Tiešsaitē] Available at: <http://www.rgseuropa.it/en/materials/polyurethane/polyurethane-baydur-60/> [Skatīts: 28. februārī 2017.].
19. Swit, G., 2009. *Diagnostics of prestressed concrete structures by means of acoustic emission*. s.l., ICRMS, p. 958–962.
20. Urbahs, A. et al., 2010. Acoustic Emission Diagnostics of Fatigue Crack Development during Undercarriage Bench Testing. Kaunas, Kaunas University of Technology, pp. 450–454.
21. Urbahs, A. et al., 2013. Konstrkciju skrūvju un kniežu savienojumu kombinētā akustiskās emisijas un ultraskaņas kontroles metode. Latvia, Patent No. G01N29/14.
22. Vallen, H., 2002. *AE Testing. Fundamentals, Equipment, Applications*. Munich: Vallen-Systeme GmbH.
23. Webb, A. R. & Copsey, K. D., 2011. *Statistical Pattern Recognition*. 3rd ed. Chichester: Wiley.
24. Ying, S. L., Bo, L. Y. & Ge, L. L., 2012. Comparison of Magnetic Flux Leakage (MFL) and Acoustic Emission (AE) techniques in corrosion inspection for pressure pipelines. s. l., s. n., pp. 5375–5378.
25. Zhang, X. et al., 2015. An investigation on rail health monitoring using acoustic emission technique by tensile test. Pisa, s. n.