

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Aeronautikas institūts

***Yevhen HARBUS***  
Doktora studiju programmas «Transports» doktorants

**AVIĀCIJAS MATERIĀLU UN KONSTRUKCIJU  
NOGURUMA BOJĀJUMU NOVĒRTĒJUMS UZ  
AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU MĒRĪJUMU  
PAMATA**

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mēraparāti un metroloģija

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
**A. URBAHS**

**RTU Izdevniecība**  
**Rīga 2015**

Harbuz Y. Aviācijas materiālu un konstrukciju noguruma bojājuma novērtējums uz akustiskās emisijas signālu mērījumu pamata. Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015. — 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar AERTI institūta 2015. gada 2. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 02/2015.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 13. oktobrī, plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ezermalas ielā 6, 405. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors *Dr. sc. ing.* Juris Krizbergs  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

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

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Jonas Stankūnas  
Viļņas Ģediminas Tehniskā universitāte,  
Antanas Gustaitis Aviācijas institūts, Lietuva

**APSTIPRINĀJUMS**

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

*Yevhen Harbuz* .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 6 pielikumi, 114 zīmējumu un ilustrāciju, kopā 174 lappuses. Literatūras sarakstā ir 148 nosaukumi.

## SATURS

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....                                                                                                                | 6  |
| Darba aktualitāte .....                                                                                                                                      | 6  |
| Darba mērķi un uzdevumi .....                                                                                                                                | 6  |
| Pētnieciskās metodes .....                                                                                                                                   | 7  |
| Pētījumu objekts .....                                                                                                                                       | 7  |
| Darba zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti .....                                                                                               | 7  |
| Darba praktiskā nozīme .....                                                                                                                                 | 7  |
| Aizstāvamās tēzes .....                                                                                                                                      | 8  |
| Darba aprobācija .....                                                                                                                                       | 8  |
| Publikācijas .....                                                                                                                                           | 8  |
| Promocijas darba struktūra un apjoms .....                                                                                                                   | 9  |
| PROMOCIJAS DARBA SATURS .....                                                                                                                                | 10 |
| Ievads .....                                                                                                                                                 | 10 |
| 1. nodaļa AVIĀCIJAS KONSTRUKCIJU TEHNISKĀ STĀVOKĻA UN PALIEKOŠĀS<br>STIPRĪBAS NOVĒRTĒŠANAS METOŽU ANALĪZE .....                                              | 10 |
| 2. nodaļa MATERIĀLU BOJĀJAMĪBAS MODELĒŠANA CIKLISKO SLODŽU<br>PROCESĀ, BALSTOTIES UZ AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU MĒRĪJUMU<br>DATIEM .....                    | 10 |
| 2.1. Metālisku materiālu akustiskās emisijas avotu un noguruma sagrūšanas mehānisma<br>analīze .....                                                         | 10 |
| 2.2. Materiālu bojājamības modelēšana ciklisko slodžu procesā, balstoties uz akustiskās<br>emisijas signālu mērījumu datiem .....                            | 12 |
| 3. nodaļa EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU VEIKŠANAS METODOLOĢIJA UN<br>PIELIETOJAMĀIS APRĪKOJUMS .....                                                               | 13 |
| 3.1. Pētījumu objektu raksturojums .....                                                                                                                     | 13 |
| 3.1.1. Kompozītmateriāla paraugu raksturojums .....                                                                                                          | 14 |
| 3.1.2. VML pamata statnes konstrukcijas īpatnības .....                                                                                                      | 14 |
| 3.1.3. TML elerona konstrukcijas īpatnības .....                                                                                                             | 14 |
| 3.2. Eksperimentālo pētījumu veikšanas metodoloģija .....                                                                                                    | 15 |
| 3.2.1. Kompozītmateriāla paraugu pētījumu veikšanas eksperimentālais stends un<br>metodoloģija .....                                                         | 15 |
| 3.2.2. VML šasijas statnes pārbaudes veikšanas stends un izmēģinājumu metodoloģija .....                                                                     | 16 |
| 3.2.3. Elerona statisko izmēģinājumu veikšanas stenda un metodikas apraksts .....                                                                            | 17 |
| 3.3. Pielietojamās akustiskās emisijas aparatūras tehniskais raksturojums .....                                                                              | 18 |
| 4. nodaļa AVIĀCIJAS KONSTRUKCIJU NO METĀLISKIEM MATERIĀLIEM<br>SAGRŪŠANAS MEHĀNISMA IZPĒTE UN BOJĀJAMĪBAS NOVĒRTĒŠANA AR<br>AKUSTISKĀS EMISIJAS METODI ..... | 19 |
| 4.1. Aviācijas konstrukciju metālisku materiālu sagrūšanas mehānisma izpēte, balstoties<br>uz lidmašīnas amortizatora balsta izmēģinājumu rezultātiem .....  | 19 |
| 4.2. Metālisku materiālu noguruma bojājumu novērtēšanas kritēriji, balstoties uz<br>akustiskās emisijas kontroli .....                                       | 19 |
| 4.2.1. Bojājumu laukuma novērtējuma kritērijs pēc AE mērījumu datiem .....                                                                                   | 20 |
| 4.2.2. Konstrukciju paliekošās stiprības kompleksais kritērijs pēc slodzes parametra .....                                                                   | 22 |
| 5. nodaļa AVIĀCIJAS KOMPOZĪTMATERIĀLU UN KONSTRUKCIJU<br>SAGRŪŠANAS MEHĀNISMU IZPĒTE UN BOJĀJAMĪBAS NOVĒRTĒŠANA .....                                        | 22 |
| 5.1. Aviācijas konstrukciju kompozītmateriālu sagrūšanas mehānisma analīze uz<br>eksperimentālo datu pamata .....                                            | 22 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.1. Kompozītmateriālu sagrūšanas mehānismu eksperimentālie pētījumi izmantojot akustiskās emisijas mērījumu datus .....                | 22 |
| 5.1.2. KM paraugu sagrūšanas procesa analīze .....                                                                                        | 25 |
| 5.1.3. Eksperimentālo pētījumu rezultātu statistiskā analīze .....                                                                        | 25 |
| 5.1.4. Iegūto rezultātu vispārējs raksturojums .....                                                                                      | 26 |
| 5.1.5. Materiālu bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumi .....                                                                   | 26 |
| 5.1.5.1. Vienā virzienā vērsta kompozītmateriāla bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumu kritēriji statistiskajā slogojumā ..... | 26 |
| 5.1.5.2. KM sagrūšanas intensitātes novērtēšanas akustiskās emisijas kritērijs .....                                                      | 27 |
| 5.1.5.3. Kompozītmateriāla konstrukciju sagrūšanas veida noteikšanas akustiskā emisijas metode .....                                      | 28 |
| 5.2. Reālu kompozītmateriālu aviācijas konstrukciju bojājamības novērtējums .....                                                         | 28 |
| SECINĀJUMI .....                                                                                                                          | 30 |
| LITERATŪRA .....                                                                                                                          | 32 |

## PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### Darba aktualitāte

Mašīnu (gaisa kuģu, kosmisko aparātu u. c. transportlīdzekļu) resurss parasti tiek noteikts, balstoties uz stenda noguruma testu rezultātiem. Stenda izmēģinājumu gaitā nosaka «visvājākos» konstrukcijas elementus, kas limitē resursu visam objektam kopumā; nosaka elementu ilgzinātību un dzīvotspēju. Turklāt viena no svarīgākajām un sarežģītākajām problēmām ir nepieciešamība atklāt izmēģinājumu procesā konstrukcijas materiālā radušos defektus to agrīnajā rašanās stadijā. Svarīga problēma ir arī plaisas izplatīšanās kinētikas kontrole.

Kontrolei un diagnostikai noguruma testos tiek izmantotas tradicionālās nesagraujošās kontroles metodes: vizuāli optiskā, ultraskaņas, virpuļstrāvas, pulvermagnetisko, kā arī kapilāras metodes (krāsu un luminiscentā).

Visām šīm metodēm pastāv ierobežojumi, kas saistīti ar to, ka noguruma plaisas parasti rodas dažādu daļu savienojumu vietās, kurām vairumā gadījumu, neizjaucot savienojumu, ir grūti vai pat neiespējami piekļūt. Tāpat tās nevar pielietot, lai kontrolētu defektus, kas rodas objekta elementu iekšienē, t.i., tradicionālās metodes ir efektīvas, ja ir iespējama konstrukcijas demontāža. Turklāt šīs metodes ir ļoti laikietilpīgas, jo ir nepieciešams skenēt praktiski visu objekta virsmu.

Viena no metodēm, kurai ne piemīt augstāk minētie trūkumi ir akustiskās emisijas (AE) metode. Šī metode ir balstīta uz elastīgo viļņu (sprieguma viļņu) rašanās un izplatīšanās procesu, ko izraisa izmaiņas cieta ķermeņa iekšējā struktūrā pie dažādām slodzēm, analīzi. Šīs izmaiņas ir saistītas galvenokārt ar materiāla sabrukšanas procesiem, tāpēc pastāv iespēja noteikt gan dažādu defektu rašanos, gan attīstību. Turklāt AE metode ļauj veikt integrētu objekta bojājumu novērtējumu un defektu atrašanās vietas.

Aviācijas konstrukciju bojājamības kontrole ar akustiskās emisijas metodi stenda izmēģinājumu procesā ļaus atklāt tādos bīstamus defektus kā noguruma plaisas to rašanās stadijā, novērtēt konstrukcijas ilgzinātību un prognozēt tās resursu ekspluatācijas procesā.

### Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir aviācijas metālisko un kompozītmateriālu un konstrukciju sagrūšanas mehānisma izpēti un bojājamības novērtējuma metožu izstrāde resursa izmēģinājumos, balstoties uz AE signālu mērījumiem:

Lai sasniegtu šo mērķi, ir nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

1. Izstrādāt matemātisko modeli, kas apraksta metālisku materiālu noguruma bojājamības novērtējuma mehānismu, balstoties uz akustiskās emisijas mērījumu datiem.
2. Izpētīt aviācijas konstrukciju no metāliskiem materiāliem noguruma sagrūšanas mehānismu stenda izmēģinājumos un izstrādāt metālisku materiālu noguruma bojājumu novērtējuma kritērijus, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumiem.
3. Izpētīt aviācijas kompozītmateriālu sagrūšanas mehānismu un izstrādāt kompozītmateriālu bojājumu pakāpes novērtējuma kritērijus, pielietojot AE signālu reģistrācijas datus.
4. Izpētīt reālu kompozītmateriālu konstrukciju sagrūšanas mehānismu un pārbaudīt bojājamības novērtēšanas metodikas efektivitāti, izmantojot AE mērījumu datus.

## **Pētnieciskās metodes**

Dotajā darbā ir izmantotas sekojošas pētījuma metodes:

- 1) Akustiskās emisijas signālu mērīšana ar *AF-15* un *POCKET AE-2* mēraparātiem saskaņā ar standarta *Euro Standard EN 1330-9:2000 «Terms. Acoustic Emission Conceptions»* vadlīnijām;
- 2) Datorprogrammu *AEWin*, *Catman* un *Akusto* izmantošana AE signālu mērījumu rezultātu apstrādei;
- 3) Datorprogrammas *EXCEL* izmantošana eksperimentālo rezultātu apstrādei;
- 4) Varbūtības teorijas un statistikas metodes pielietošana kļūdu (nenoteiktības) analīzei.

## **Pētījumu objekts**

Nepieciešamie dati tika iegūti, pārbaudot paraugu grupu no kompozītu materiāliem, kā arī uz pilna mēroga konstrukcijas - lidmašīnas spārna eleronu, kura izgatavošanā ir izmantots kompozītu materiāls. Daļa rezultātu ir veltīta metālisko materiālu bojājumu mehānismu pētījumam uz lidmašīnas šasijas piemērā.

Eksperimentālā daļa tika veikta uz Rīgas eksperimentālajā centra «AVIATEST LNK» bāzes, testējot aviācijas materiālus un pilna mēroga konstrukcijas.

## **Darba zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti**

Promocijas darbā rezultātā radītie inovatīvie risinājumi:

1. Izstrādāts matemātiskais modelis materiālu noguruma bojājumu mehānisma novērtējumam, balstoties uz AE mērījumu datiem. Modelī tiek ņemta vērā noguruma bojājumu uzkrāšanās stādīju secība, ieskaitot materiālu plastisko deformāciju, kā arī mikro- un makroplaisu veidošanos un izplatību.
2. Piedāvāta jauna konstrukcijas metālu noguruma bojājumu platības kvantitatīvās novērtēšanas metode, balstoties uz AE mērījumiem.
3. Piedāvāts jauns kritērijs pārbaudāmā objekta atlikušās izturības noteikšanai — slodzes lielums, kas atbilst objekta sagrūšanas sākuma momentam, kas tiek reģistrēts akustiskās emisijas mērījumu rezultātā.
4. Piedāvāta kompozītu konstrukciju bojājumu procesa novērtējuma metode, balstoties uz AE mērījumu datiem.

Šie inovatīvie risinājumi sekmē mašīnzinātnes nozares un ražošanas integrāciju, un pētniecības rezultātu ieviešanu atbilstoši valstī izvirzītajam prioritārajam zinātnes virzienam — inovatīvie materiāli un tehnoloģijas.

## **Darba praktiskā nozīme**

Izstrādāto aviācijas materiālu un konstrukciju bojājumu novērtējuma metodi var izmantot gan zinātniskiem, gan praktiskiem mērķiem, veicot noguruma un atlikušās izturības stenda testēšanu ne tikai aviācijas tehnikai, bet arī citās mašīnbūves jomās: automobiļiem, dzelzceļa un jūras transportam, kosmiskajiem aparātiem un tml. Šie atlikušās izturības kritēriji ir aktuāli arī citu potenciāli bīstamu inženiertehnisko veidojumu ekspluatācijā, piemēram, kodoliekārtām, degvielas krātuvēm, augstspiediena tvertnēm utt.

## **Aizstāvamās tēzes**

Autors šajā darbā aizstāv:

- 1) Matemātisko modeli, kas apraksta metālisku materiālu noguruma bojājamības novērtējuma mehānismu, balstoties uz akustiskās emisijas mērījumu datiem;
- 2) Aviācijas konstrukcijas no metāliskiem materiāliem noguruma bojājumu novērtēšanas kritērijus, balstoties uz akustiskās emisijas kontroli;
- 3) Aviācijas kompozītmateriālu bojājumu pakāpes novērtējuma metodes;
- 4) Reālu gaisa kuģu konstrukciju no kompozītmateriāliem bojājamības novērtējuma eksperimentālas rezultātus.

## **Darba aprobācija**

**Par darba rezultātiem ziņots 11 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs:**

1. 15<sup>th</sup> international conference «Mechanika – 2010», April 8–9, 2010, Kaunas, Lithuania.
2. 14<sup>th</sup> international conference «TRANSPORT MEANS 2010», Oktober 21–22, 2010, Kaunas, Lithuania.
3. 2<sup>nd</sup> International Symposium «Space & Global Security of Humanity», 5–9 July, 2010, Riga, Latvia.
4. RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference, 2010. gada 11.–12. oktobrī, Rīga, Latvija.
5. 8. starptautiskā konference «AES-ATEMA'2011», 2011. gada 18.–20. jūlijā, Rīga, Latvija.
6. 16<sup>th</sup> international conference «Mechanika – 2011», April 8–9, 2011, Kaunas, Lithuania.
7. 15<sup>th</sup> international conference «TRANSPORT MEANS 2011», Oktober 21–22, 2011, Kaunas, Lithuania.
8. 17<sup>th</sup> international conference «Mechanika – 2012», April 12–13, 2012, Kaunas, Lithuania.
9. 16<sup>th</sup> international conference «TRANSPORT MEANS 2012», Oktober 25–26, 2012, Kaunas, Lithuania.
10. Starptautiskā konference «Intelligent Transport Systems 2012», 2012. gada 18.–20. jūnijā, Rīga, Latvija.
11. 20<sup>th</sup> international conference «Mechanika – 2015», April 23–24, 2015, Kaunas, Lithuania.

## **Publikācijas**

**Darba rezultāti publicēti 9 zinātniskos rakstos, ir saņemti 3 patenti:**

1. Urbahs A., Banovs M., Harbuz Y., Doroshko S., Turko V. «Acoustic emission diagnostics of fatigue crack development during undercarriage bench», Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference «Mechanika – 2010», Kaunas, Lithuania, KTU, April 8–9, 2010, pp. 450–454.
2. Urbahs A., Banovs M., Harbuz Y., Turko V., Feščuks Y., Hodos N. «Estimation of mechanical properties of the anisotropic reinforced plastics with application of the method of acoustic emission», Transport and Telecommunication, Vol. 5, No. 2, 2010, pp. 68–75, SCOPUS.



3. Nasibulins A., Harbuz Y., Doroško S. «Acoustic emission characteristics of fatigue crack development in a pitch control arm of helicopter lifting propeller blades». Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference «Transport Means – 2010», Kaunas, Lithuania, KTU, October 21–22, 2010, pp. 49–52, SCOPUS.
4. Urbahs A., Banovs M., Harbuz Y., Turko V., Feščuks Y., Hodos N. «Investigation of Mechanical Properties of Composite Materials Using the Method of Acoustic Emission». Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference «Mechanika – 2011», Kaunas, Lithuania, KTU, April 8–9, 2011, pp. 306–310.
5. Urbahs A., Banovs M., Harbuz Y., Feščuks Y., Čepusovs A. «Evaluation of residual strength of aircraft aileron construction». Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference «AES-ATEMA'2011», Riga, Latvia, July 18–20, 2011, pp. 29–33, SCOPUS.
6. Urbahs A., Banovs M., Harbuz Y., Feščuks Y., Sologubovs J. «Evaluations of degree of damage and probability of forecasting of destructing load in anisotropic composites by means of acoustic emission in materials under static loading», Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference «Transport Means – 2011», Kaunas, Lithuania, KTU, October 21–22, 2010, pp. 270–273, SCOPUS.
7. Doroško S., Harbuz Y. «Acoustic emission analysis of fatigue crack development», Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference «Mechanika – 2012», Kaunas, Lithuania, KTU, April 12–13, 2012, pp. 73–76.
8. Harbuz Y., Čepusovs A. «Methods of acoustic emission diagnostics of pre-destruction state», Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference «Transport Means – 2012», Kaunas, Lithuania, KTU, October 25–26, 2010, pp. 228–231, SCOPUS.
9. Urbahs A., Harbuz Y., Urbahs J. «Evaluating of Damageability of Materials at Fatigue Loading Based on Signals of Acoustic Emission», Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference «Mechanika – 2015», Kaunas, Lithuania, KTU, April 23–24, 2015, pp. 257–261.

#### **Patenti:**

1. Doroško S., Harbuz Y. «Plaisas lieluma noteikšanas paņēmieni noguruma pārbaudēs», LR Patents Nr. 14488, 2012.
2. Doroško S., Harbuz Y. «Maksimāli pieļaujamās slodzes noteikšanas paņēmieni izmēģinājumos uz paliekošo stiprību», LR Patents Nr. 14531, 2012.
3. Doroško S., Harbuz Y. «Kompozītmateriāla sagrūšanas tipa noteikšanas metode», LR Patents Nr. 14585, 2012.

#### **Promocijas darba rezultāti tika izmantoti 2 zinātniskajos projektos:**

1. ERAF projekta Nr. 2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/135 «Industriālās tehnoloģijas prototipa izstrāde daudzkomponentu nanostrukturētu jonu-plazmas nodilumizturīgu pārklājumu iegūšanai», sākot no 2010. g.
2. ERAF projekta Nr. 2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/070 «Bezpilota aviācijas kompleksa izstrāde un lidaparātu industriālo prototipu izveide Latvijas tautsaimniecības uzdevumu risināšanai».

#### **Promocijas darba struktūra un apjoms**

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 6 pielikumi, 114 attēlu, kopā 174 lappuses. Literatūras sarakstā ir 148 nosaukumi.

## **PROMOCIJAS DARBA SATURS**

### **Ievads**

Kontrolei un diagnostikai noguruma testos tiek izmantotas tradicionālās nesagraujošās kontroles metodes: vizuāli optiskā, ultraskaņas, virpuļstrāvas, pulvermagnetisko, kā arī kapilāras metodes (krāsu un luminiscentā). Visām šīm metodēm pastāv ierobežojumi un trūkumi. Viena no metodēm, kurai ne piemīt trūkumi augstāk minētam metodēm ir akustiskās emisijas metode.

### **1. nodaļa AVIĀCIJAS KONSTRUKCIJU TEHNISKĀ STĀVOKĻA UN PALIEKOŠĀS STIPRĪBAS NOVĒRTĒŠANAS METOŽU ANALĪZE**

Darba pirmajā nodaļā apskatītas no metāliskiem un kompozītmateriāliem izgatavotu aviokonstrukciju paliekošā resursa novērtējuma iespējas. Tajā skaitā tika veikta aviotehnikas ekspluatācijā izmantojamo materiālu defektu analīze.

Pēdējā laikā aviokonstrukciju būvniecībā aizvien vairāk izmanto kompozītmateriālus, kuriem piemīt virkne unikālu īpašību, kas arī nosaka to izvēli par labu metāliskiem sakausējumiem. Tāpēc tika apskatītas aviācijas kompozītmateriālu galvenās īpašības, kā arī konstrukciju, kas tika veidotas no šiem materiāliem, defektu veidi un to rašanās iemesli.

Defektu atklāšanai aviācijā izmanto dažādus paņēmienus. Visizplatītākās ir nesagraujošās kontroles metodes (NKM), jo tās ļauj veikt aviotehnikas defektāciju ekspluatācijas laikā, lidojumu starplaikos, vai arī veikt pilnīgu visu detaļu un agregātu monitoringu plānoto tehnisko apkalpošanu gaitā. Bet detalizētākai planiera konstrukcijas galveno mezglu un dzinēja agregātu tehniskā stāvokļa izpētei ir nepieciešama to s izjaukt.

Atrisināt šo, kā arī virkni citu problēmu, kas ir saistītas ar darba, finanšu un laika zudumiem, veicot lieku agregātu un mehānismu izjaukšanu-salikšanu, to sagatavošanu diagnostikai un tml. saistītus darbus, var ar akustiskās emisijas (AE) metodes palīdzību. Šai metodei ir virkne priekšrocību, salīdzinājumā ar citām NKM.

### **2. nodaļa MATERIĀLU BOJĀJAMĪBAS MODELĒŠANA CIKLISKO SLODŽU PROCESĀ, BALSTOTIES UZ AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU MĒRĪJUMU DATIEM**

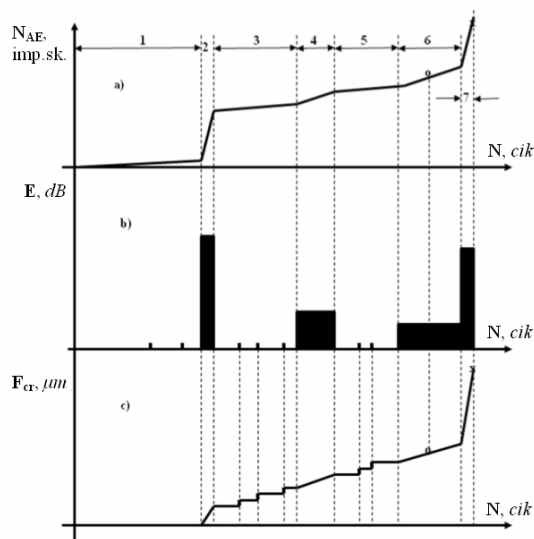
#### **2.1. Metālisku materiālu akustiskās emisijas avotu un noguruma sagraušanas mehānisma analīze**

AE signālu avotu analīze ļauj identificēt materiāla defektu veidošanās un attīstības procesus dažādās noguruma slogojuma stadijās. AE avots ir materiāla apgabals, kurā notiek dinamiska struktūras pārkārtošanās, ko pavada AE [36].

Vairāku darbu rezultātā, kurus veica arī šā darba autors [14,17,19,26,36], noskaidrots, ka noguruma plaisas attīstība notiek vairākos etapos. Pirmajā etapā (1. att.) notiek dažādi procesi, kas ir saistīti ar materiāla iekšējo defektu (dislokāciju) transformāciju: dislokāciju attīstība vai anihilācija, to kustība, formas izmaiņas utt. Slogojuma spēku darba rezultātā materiālā akumulējas noteikta enerģija. Otrais etaps — mikroplaisas (brīvās virsmas materiāla vienlaidības) veidošanās process, kuru pavada enerģijas izdalīšanās. Visbiežāk sastopamais variants: vispirms rodas vairākas mikroplaisas, kas etapa beigās apvienojas vienā plaisā. Trešais etaps — maģistrālās plaisas pieauguma apstāšanās un atkārtota enerģijas akumulācija (šajā etapā veidojas nobīdes atsevišķajos slogojuma ciklos un lēns plaisu pieaugums šajos ciklos). Noteiktā brīdī notiek uzkrātās enerģijas izdalīšanās: šī enerģija nodrošina plaisas pieauguma darba nodrošināšanu, kas notiek katrā slogojuma ciklā — tas ir ceturtais etaps. Tad

atkal notiek plaisas attīstības apstāšanās vai palēnināšanās. Etapi 3 un 4 var atkārtoties vairākas reizes (1. att. tie ir etapi 5 un 6). Noslēguma etaps (etaps 7) — katastrofiska plaisas attīstība, kas noslēdzas ar izmēģinājumu objekta sagrūšanu.

Šāds AE uzvedības variants ir raksturīgs lielākajai daļai metālisku konstrukcijas materiāliem, kam piemīt gan trauslums, gan arī plastiskās īpašības. Rezultātā noguruma plaisu attīstību «aptur» plastisku zonu veidošanās. Šajā gadījumā noguruma plaisu attīstības modelis kļūst par daudzpakāpju modeli: vienā stadijā ierosinājuma enerģija tiek patērēta intensīvam plaisas pieaugumam; otrajā — to absorbē plastiskā zonas, un defekta attīstība palēninās.



1. att. Enerģijas izdalīšanās procesu shēmas:

a) AE summārā skaita  $N_{AE}$  izmaiņas cikliskā slogojuma procesā; b) enerģiju  $E$ , kas tiek patērēta plaisas pieauguma darbam, izdalīšanās; c) plaisas pieauguma izmaiņas atkarībā no enerģijas  $E$

Tāda veida, ja reģistrē tikai AE plastiskās deformācijas un plaisas lēcienveidīgā pieauguma sastāvdaļas, var atzīmēt sekojošus galvenos plaisas izplatīšanās mehānismus metāliskajos materiālos:

- noguruma plaisas attīstība noris vairākos etapos. Balstoties uz veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem, var izdalīt trīs galvenās stadijas: mikroplaisas veidošanās (izmērs 1...50  $\mu\text{m}$ ) ar ātru sagrūšanas pieaugumu; mikroplaisas pārveidošanās mezoplaisā (50...500  $\mu\text{m}$ ) ar lēnāku tās attīstību; mezoplaisas transformācija makroplaisā (500...5000  $\mu\text{m}$ ), kuras pieaugums noslēguma etapā noved līdz objekta sagrūšanai;
- plaisas pieaugumam ir diskrets raksturs (plaisas pieaugums nenoris tajos ciklos, kur enerģija neizdalās. Rezultātā visus slogojuma ciklus var iedalīt aktīvajos (ar AE signāliem) un pasīvajos (bez AE signāliem);
- aktīvajos ciklos var rasties gan gadījuma impulsi, gan impulsu kopas. Šīs īpatnības atspoguļo noguruma plaisas attīstības nevienmērīgumu un tās lēcienveidīgā pieauguma iespējamību slodzes maksimuma rajonā;
- plaisas pieaugumu nosaka darbs, kas tika patērēts tās veidošanai (enerģija, kas izdalās tās pieauguma procesā), t. i., plaisas izmērs ir atkarīgs no šīs enerģijas vērtības. Enerģijas vērtību var noteikt, balstoties uz AE mērījumu rezultātiem.

Minētās īpatnības veido pamatu piedāvājamajam materiālu bojājamības novērtēšanas modelim noguruma slogojuma procesā, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumu datiem [25]. Teorētiskais pamatojums kalpo par pamatu praktisko metožu izstrādei, kuru novitāti apstiprina atbilstošie patenti.

## 2.2. Materiālu bojājamības modelēšana ciklisko slodžu procesā, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumu datiem

Diskrētās AE impulsu secību viena slogojuma cikla ietvaros var raksturot ar sekojošajiem galvenajiem parametriem [5,6,17,19,21,22,24,25,26,36]:

- AE impulsu skaits  $n$ -tajā slogojuma ciklā —  $N_{in}$ , imp.sk.;
- konkrētā  $i$ -tā AE impulsa amplitūda  $n$ -tajā slogojuma ciklā —  $A_{in}$ , dB;
- AE signālu enerģija  $n$ -tajā slogojuma ciklā —  $E_n$ , dB.

Nepārtrauktās AE gadījumā parametra  $N_{in}$  vietā materiāla bojājumu novērtēšanai izmanto AE summāro skaitu  $n$ -tajā slogojuma ciklā  $N_{AEn}$  (imp.sk.) pie izvēlēta signāla diskriminācijas (robežvērtības) līmeņa [5,6,17,19,21,22,24,25,26,36].

*Avots 1: materiāla plastiskā deformācija.*

Lai vienkāršotu teorētisko definīciju sakarībai starp AE parametriem un noguruma bojājumu avotiem materiālā, pieņemsim šādu hipotēzi [36]: AE summārais skaits materiāla plastiskās deformācijas laikā ir proporcionāls plastiski deformējamajam apjomam, citiem nosacījumiem paliekot nemainīgiem.

Šajā gadījumā iegūsim:

$$N_{AEn}^* = N_{AE0}^* \cdot V, \quad (2.1.)$$

Kur  $N_{AEn}^*$  — AE summārais skaits  $n$ -tajā slogojuma ciklā materiāla plastiskās deformācijas procesā, imp.sk.;

$N_{AE0}^*$  — AE signālu, kurus ģenerē materiāla plastiski deformējamā apjoma  $V$  lokālā vienība, summārais skaits, imp.sk.·mm<sup>2</sup>.

Nosacījumu (2.1.) var attēlot diferenciālā formā, nosakot skaitīšanas ātrumu:

$$\dot{N}_{AEn}^* = \frac{dN_{AEn}^*}{dt} = N_{AE0\epsilon}^* \cdot \dot{\epsilon} \cdot V + N_{AE0}^* \frac{dV}{dt}, \quad (2.2.)$$

kur  $N_{AE0\epsilon}^* = \frac{dN_{AE0}^*}{d\epsilon}$  — AE summārais skaits, kura cēlonis ir plastiskās deformācijas apjoma izmaiņas;

$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  — materiāla plastiski deformējamā apjoma  $V$  lokālās vienības deformācijas ātrums.

Tādējādi, balstoties uz AE parametru reģistrācijas datiem, var novērtēt plastiski deformējamā materiāla lokālo apjomu vērtību  $V$ .

*Avots 2: noguruma plaisas pieaugums.*

Plaisas pieauguma elementārais akts ir tās garuma  $l$  palielināšanās par mazu vērtību  $dl$ . Šo procesu pavada augstas amplitūdas AE signāla izstarošana. Dotā impulsa amplitūdas novērtējumu veiksīm, izmantojot zināmu sakarību, kas ļauj noteikt materiāla daļiņu pārvietošanos ap plaisu vispārinātā veidā [34,35,36]:

$$\delta_{ijn} = \frac{K_j}{I} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \phi_{ijn}(\theta, \mu, \tilde{r}), \quad (\mu\text{m}) \quad (2.3.)$$

kur sprieguma intensitātes koeficients (SIK)

$$K_j = P_j \sqrt{\pi l} Y_j(\lambda) \quad (2.4.)$$

Sakarībās (2.3.) un (2.4.):

$r, \theta$  — materiāla apskatāmā punkta polārās koordinātes attiecībā pret plaisas virsotni;  
 $\varphi_{ijn}(\theta, \mu, r)$  — leņķa  $\theta$  bezdimensiju funkcija, Puasona koeficients  $\mu$ , relatīvās koordinātes koeficients  $\bar{r} = \frac{r}{h}$ ;

$h$  — konstrukcijas ar plaisu sienas biezums;

$J$  — bīdes modulis;

$p_j$  — ārējās īpatnējās slodzes sastāvdaļa, kas atbilst plaisas tipam;

$Y_j(\lambda)$  — plaisas relatīvā garuma bezdimensiju korekcijas funkcija;

$\lambda = \frac{l}{L}$  — absolūtā plaisas garuma  $l$  ( $\mu\text{m}$ ) un konstrukcijas raksturīgā izmēra  $L$  ( $\mu\text{m}$ ) (garuma vai platuma — atkarībā no plaisas orientācijas) attiecība.

Funkcija  $Y_j(\lambda)$  ir atkarīga no faktoru virknes: plaisas tipa, tās konfigurācijas un orientācijas attiecībā pret koordinātu asīm, objekta ģeometriskajiem parametriem, slogojuma īpatnībām un tml.

Pieņemot, ka AE signālu amplitūda ir proporcionāla attiecīgam pārvietojumu palielinājumam plaisas virsotnes apkārtne  $A_{ijn} = \delta_{ijn}$ , plaisas lineārā garuma palielinājuma gadījumam iegūsim:

$$\Delta A_{ijn} = \frac{\partial \delta_{ijn}}{\partial l} dl \quad (2.5.)$$

Tādējādi, noguruma plaisas lineārā izmēra palielinājumu var kontrolēt reģistrējot gan amplitūdu, gan caur AE signālu summārā skaita un enerģijas parametrus.

Turklāt izteiksmē (2.4.) esošā ārējās slodzes sastāvdaļa ļauj novērtēt plaisas pieaugumu arī pēc šīs slodzes vērtībām, ņemot vērā to, ka cikliskajā slogojumā plaisas pieaugums  $dl$  lokalizējas slodzes maksimuma rajonā, t. i.,  $p_j = p_{jmax}$ . Tas sniedz iespēju novērtēt konstrukciju materiāla noguruma bojājumu lielumu gan ar AE terminiem, gan ar slodzes parametru terminiem.

Parametru  $S_{cr}$  nosaka saskaņā ar formulu:

$$S_{cr} = \frac{N_{AE2} - N_{AE1}}{(N_2 - N_1) \cdot P_{max} \cdot A} \quad (2.6.)$$

kur  $S_{cr}$  — bojājuma laukuma vērtība,  $\text{mm}^2$ ;

$N_{AE1}, N_{AE2}$  — AE summārais skaits, imp.sk.;

$N_1, N_2$  — slogojuma ciklu skaits, cik;

$P_{max}$  — maksimālā slodze, kN;

$A$  — integrētais radītājs, kas ņem vērā AE parametrus noslogojuma ciklā, kā arī ārējās slodzes lielumu un noguruma plaisas laukumu,  $\frac{\text{imp.sk.}}{\text{cik} \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}^2}$ .

Parametru  $A$  var noteikt eksperimentāli, veicot paraugu izmēģinājumus līdz to pilnīgai sagrūšanai, kad ir zināms bojājumu laukuma lielums ( $S_{cr}$ ), summārais AE skaits ( $N_{AE1}, N_{AE2}$ ), slogojuma ciklu skaits ( $N_1, N_2$ ), kā arī slogojuma parametri ( $P_{max}$ ).

### 3. nodaļa EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU VEIKŠANAS METODOLOĢIJA UN PIELIETOJAMĀS APRĪKOJUMS

#### 3.1. Pētījumu objektu raksturojums

Par pētījumu objektiem šajā darbā tika izvēlēti:

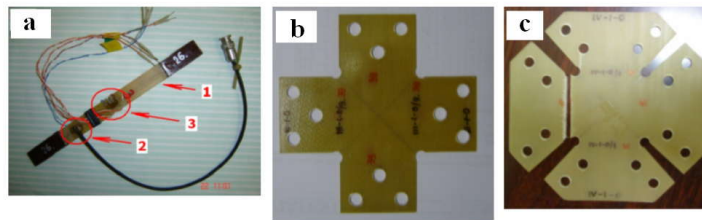
- 1) kompozītmateriāla paraugi;
- 2) vidējas maģistrāles lidmašīnas (VML) šasijas pamata statne;
- 3) tuvās maģistrāles lidmašīnas (TML) spārna elerons.

### 3.1.1. Kompozītmateriāla paraugu raksturojums

Lai izpētītu KM bojājamības mehānismu, tika pētītas trīs paraugu grupas, kurās paraugi izgatavoti no vienā virzienā vērstiem kompozītmateriāliem [Harbuz Y., Urbahs A., Nasibullins A., Banovs M., Feščuks J. u. c.]:

- KM paraugi ar gareniski un transversāli orientētām šķiedrām attiecībā pret slodzes vektoru. Paraugi veidoti kā taisnstūra formas plāksnes ar galos iestiprinātiem uzliktniem, kas paredzēti stiepes pārbaudes veikšanai līdz pilnīgai paraugu sagrūšanai (2. att., a);
- KM paraugi, kas ir veidoti kā krusteniskas formas plāksnes un paredzēti stiepes pārbaudes veikšanai līdz pilnīgai paraugu sagrūšanai (2. att., b);
- KM paraugi, kas ir veidoti kā Maltas krusta formas plāksnes un paredzēti stiepes pārbaudes veikšanai līdz pilnīgai paraugu sagrūšanai (2. att., c).

Paraugi tika izgatavoti saskaņā ar ГОСТ 12019 - 66, 11262 - 80 ar auduma pamatni Т-50(ВМП) – 18, kas ir izgatavota saskaņā ar ТУ 6 – 48 – 5786902 - 9 – 88, un saistvielu 5-211Б ПИ 1.2.266 – 84, kurai ir septiņi kopējie slāņi.

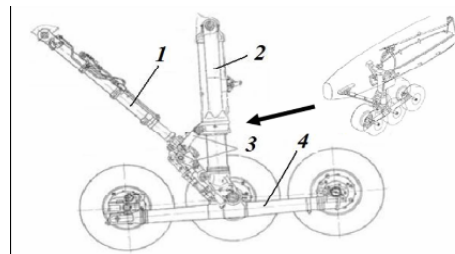


2. att. Kompozītmateriāla paraugu kopskats

### 3.1.2. VML pamata statnes konstrukcijas īpatnības

Visbīstamākais šasijas statnes defekts ir noguruma plaisu rašanās materiālā un metinātajās šuvēs, kas veicina turpmāko materiāla sagrūšanu. Parasti plaisa rodas spriegumu koncentrācijas vietās — zonās ar būtiskām stiprības izmaiņām, urbumu vietās, noapaļotās pārejās, sarežģītas konfigurācijas vietās un tml.

Par pētījumu objektu tika izvēlēta VML šasijas pamata statne (3. att.).



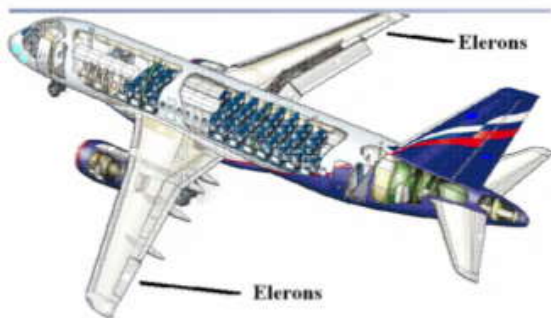
3. att. VML šasijas pamata statnes komponentes:

1 — slīpuma cilindrs, 2 — pamata amortizācijas balsts, 3 — rievots šarnīrs, 4 — riteņu ratiņi

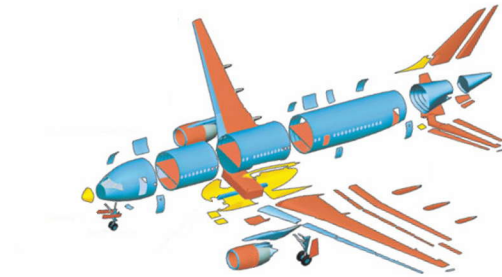
### 3.1.3. TML elerona konstrukcijas īpatnības

Šajā darbā par pētījumu objektu tika izvēlēts lidmašīnas TML spārna elerons (4. att.).

Tas, ka par pētījumu objektu tika izvēlēts šis mehānisms, ir skaidrojams arī ar to, ka tieši TML elerona veidošanā tika izmantoti kompozītmateriāli. 5. attēlā ir parādīta dažādu materiālu izmantošanas shēma šīs lidmašīnas ražošanas procesā.



4. att. Pētāmo eleronu izvietojuma shēma uz TML



5. att. Dažādu materiālu izmantošanas shēma TML ražošanas procesā:  
zilā krāsā — metāls; oranžā — oglekļa šķiedra;  
dzeltenā — stikla šķiedra

### 3.2. Eksperimentālo pētījumu veikšanas metodoloģija

#### 3.2.1. Kompozītmateriāla paraugu pētījumu veikšanas eksperimentālais stends un metodoloģija

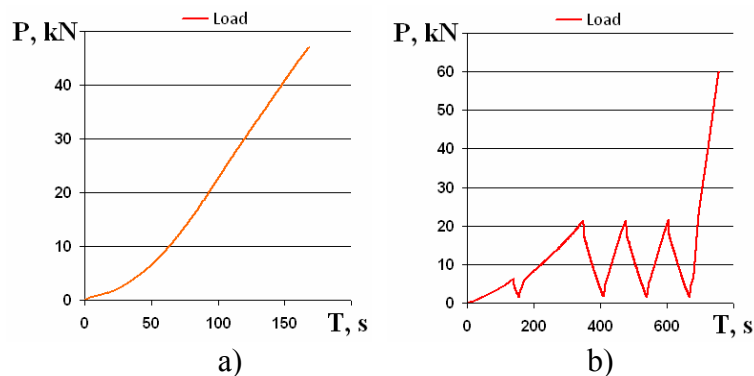
Kompozītmateriāla paraugu izmēģinājumi tika veikti termostatiskajā stendā, kas aprīkots ar hidraulisku cilindru un tenzometrisku sistēmu. Slogojuma režīms tika uzdots un kontrolēts ar speciāli izstrādātu «Aviatest» sistēmu. Stends ir Vācijas ražota eksperimentālā iekārta WPM – 2 [17,21,22,23], kas tika pilnveidota laboratorijā SIA «AVIATEST LNK» (6. att.).



6. att. Izmēģinājumu stenda termostatiskā kamera

Paraugu izmēģinājumu veikšanas laikā obligāts nosacījums bija apkārtējās vides temperatūras uzturēšana  $t = +22 \dots 24^{\circ}\text{C}$  robežās.

Paraugus, kas ir veidoti kā taisnstūra formas plāksnes ar galos iestiprinātiem uzliktņiem un paraugi, kas ir veidoti krusteniskas formas un Maltas krusta formas plāksnes, izmēģinājumu programma paredzēja, ka daļa paraugu tika slogota vienu reizi līdz pilnīgai sagrūšanai, bet pārējiem paraugiem bija slogojuma programma, kas paredzēja trīsreizēju paraugu slogojumu līdz līmenim, kas ir 10–30 % no sagrūšanas slodzes, un turpmāku slogojumu līdz paraugu sagrūšanai (7. att.).



7. att. Slogojuma programma kompozītmateriāliem ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu

Katrai KM grupai sākotnējās slodzes vērtība atbilda šādam vērtību diapazonam:

- kompozītmateriāli ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu — no 20 līdz 23 kN;
- kompozītmateriāli ar transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu — no 2 līdz 4 kN;
- krusteniskas formas KM — no 12 līdz 15 kN;
- KM Malta krusta formas veidā — no 7 līdz 10 kN.

### 3.2.2. VML šasijas statnes pārbaudes veikšanas stends un izmēģinājumu metodoloģija

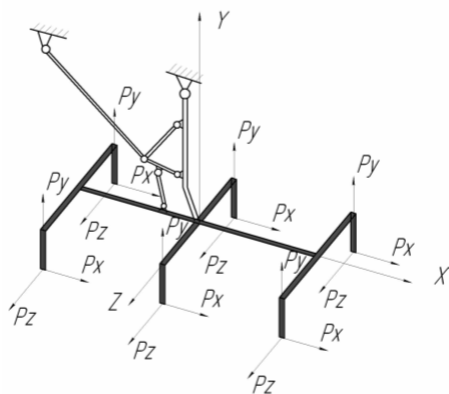
Šasijas izmēģinājumiem tika izmantots «AVIATEST LNK» stenda komplekss.

Slodžu ietekmes darbības shēma uz šasijas balstu ir parādīta 8. att.

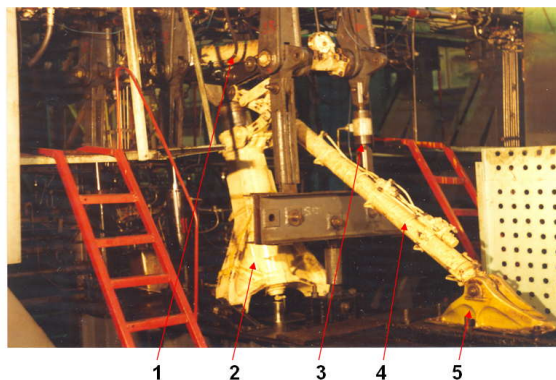
Kopējais šasijas noguruma izmēģinājumu stenda izskats ir parādīts 9. attēlā.

Noguruma izmēģinājumu slogošanas programma imitēja šasijas tipveida slodzi lidojuma procesā. Vienā slogošanas blokā tiek imitēts viens pamata slogošanas cikls — «pacelšanās — nosēšanās».

Slodžu lielumi ir izvēlēti, pamatojoties uz mērījumiem, kas veikti šasijas izmēģinājumos izgatavotājrūpnīcā, kā arī vadoties pēc datiem, kas iegūti ekspluatācijas procesā. Izmēģinājumu veikšanai no koncentratora, kas tika novietots uz amortizatora kāta iekšējās virsmas, bija jāiegūst noguruma plaisa.



8. att. Slodžu ietekmes shēma uz šasijas galveno balstu



9. att. Kopējais šasijas izmēģinājumu stenda izskats:

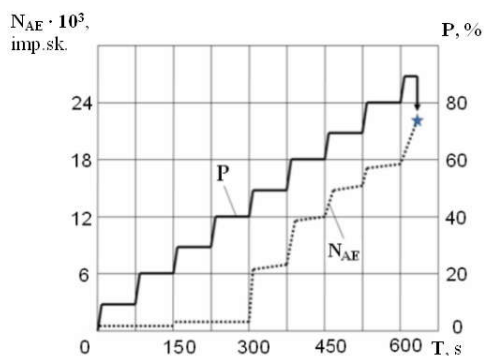
- 1 — ratiņi; 2 — amortizators;  
3 — slogošanas sistēmas hidrocilindrs;  
4 — atgāznis; 5 — kronšteins



Lai samazinātu plaisas rašanās laiku, tika izvēlēta šāda programma — slogošana tika veikta ar pulsējošiem sānu spēkiem  $P_z = 0 \dots 10,6$  tonnas (8. att.) ar pastāvīgām vertikālām slodzēm  $P_y = 45,0$  tonnas. Sānu spēku  $P_z$  pielikšana attiecībā pret iezāģējumu tika izvēlēta tādā veidā, lai radītu iezāģējuma atvēršanos.

Reālās slogošanas parametru mērījumi uzrādīja, ka minimālā sānu slodzes vērtība bija  $P_{z \min} = 0,1$  tonna; maksimālā sānu slodze bija  $P_{z \max} = 10,5$  tonnas (pie tādas pašas vidējās vērtības  $P_{z \text{ mid}} = 5,3$  tonnas). Vidējais slodzes pielikšanas periods bija 50 sekundes (izmēģinājumu procesā laiks mainījās no 30 līdz 60 sekundēm).

Pēc tam statne tika pakļauta izmēģinājumiem ar palielinātu slodzi (10. att.): slodze tika palielināta pakāpeniski (katrā slogojuma posmā par 10 % no aprēķinātās sagrūšanas slodzes). Balsts pilnīgi sagruva pie slodzes, kas bija 90 % no aprēķinātās. Vienlaikus sinhroni ar slogojuma izmaiņām tika mērīti AE signāli.



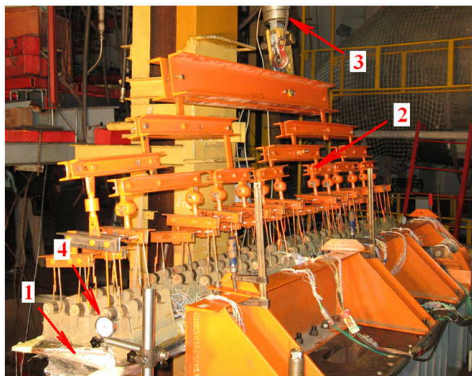
10. att. Summārā AE skaita  $N_{AE}$  un slodzes  $P$  atkarības shēma laikā  $T$  (★ — sagrūšanas brīdis)

### 3.2.3. Elerona statisko izmēģinājumu veikšanas stenda un metodikas apraksts

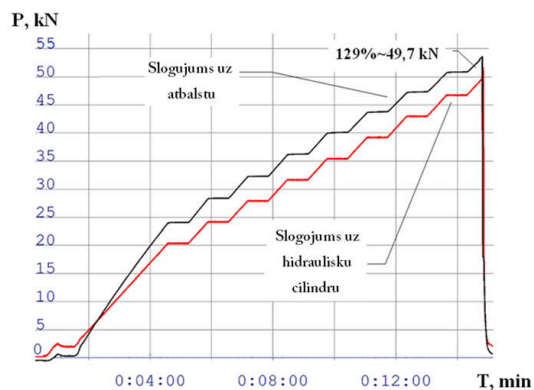
Elerona izmēģinājumos izmantoja Rīgas zinātniski-eksperimentālā centra, «AVIATEST LNK» stendu kompleksu.

Izmēģinājumu stenda kopskats parādīts 11. attēlā [20].

Elerona statisko izmēģinājumu programma uz izolētā stenda mitruma piesātinājuma apstākļos tika izstrādāta, lai aprēķinu un eksperimentu ceļā pamatotu elerona statisko stiprību.



11. att. Elerona skats izmēģinājumu stendā:  
1 — elerons; 2 — slogošanas stends;  
3 — slogošanas hidrociļndrs;  
4 — pulksteņindikators



12. att. Elerona slogojuma ciklogramma statiskos izmēģinājumos

Izmēģinājumu gaitā tika uzdotas šādas parametru vērtības: elerona aizmugurējā mala novirzīta uz leju par  $11,6^\circ$ , kas atbilst lidojuma apstākļiem  $H = 7560$  m augstumā ar ātrumu  $V = 660$  km/h, lidojuma masa  $G = 45880$  kg un pārslodze  $n_y = 1,67$ ; aprēķina aerodinamiskā slodze uz eleronu šajā gadījumā ir vienāda ar  $P_p = 3668$  kg; uzstādīts ārējais busters (imitators).

Elerona sloojuma līdz sagrūšanai ciklogramma parādīta 12. att.

Elerona mitrumpiesātinājums tika veikts speciālajā kamerā (ražotājs — *JEIO TECH*).

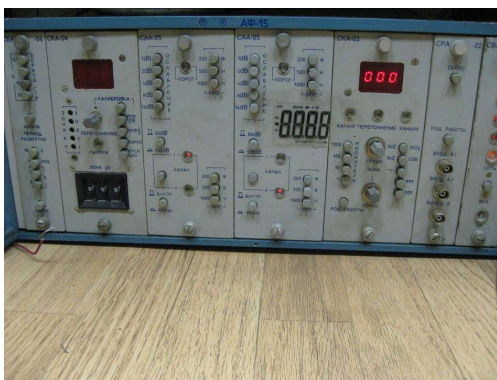
Mitrumpiesātinājuma programma bija šāda:

- mitrumpiesātinājuma ilgums — 2,5 mēneši bez pārtraukumiem;
- temperatūra —  $80^\circ\text{C}$ ;
- mitrums — 85 % HR.

### 3.3. Pielietojamās akustiskās emisijas aparātūras tehniskais raksturojums

Izmēģinājumu gaitā tika izmantoti divi AE signālu reģistrācijas un apstrādes kompleksi, kas tika veidoti uz bāzes iekārtas *AF-15* (Moldova) (13. att.) un *POCKET AE – 2* *Phisical Acoustics Corporation (PAC; ASV)* (14. att.) pamata.

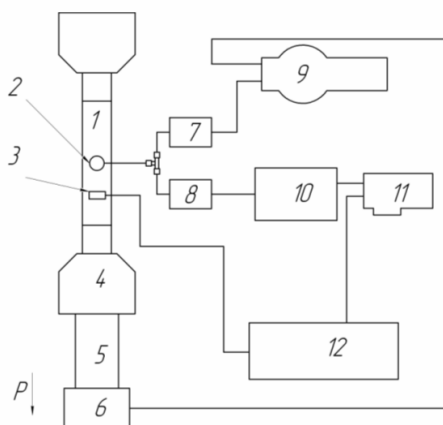
Izmēģinājumu mēraparatūras komutācijas shēma ir parādīta 15. attēlā.



13. att. Analizators *AF-15*



14. att. Firmas *PAC POCKET AE – 2* ierīce



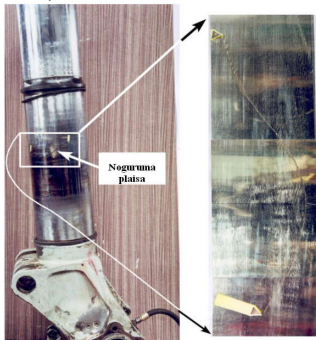
15. att. Izmēģinājumu mēraparatūras komutācijas shēma kompozītmateriālu paraugiem ar garenisku un transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret sloojuma vektora virzienu:

- 1 — paraugs; 2 — AE devējs; 3 — tenzometrijas devējs; 4 — spīle; 5 — hidrocilindrs;  
6 — dinamometrs; 7, 8 — priekšpastiprinātāji; 9 — *PAC POCKET AE – 2*; 10 — *AF-15*;  
11 — *Lcard L-783*; 12 — tenzometriskā sistēma

#### **4. nodaļa AVIĀCIJAS KONSTRUKCIJU NO METĀLISKIEM MATERIĀLIEM SAGRŪŠANAS MEHĀNISMA IZPĒTE UN BOJĀJAMĪBAS NOVĒRTĒŠANA AR AKUSTISKĀS EMISIJAS METODI**

##### **4.1. Aviācijas konstrukciju metālisku materiālu sagrūšanas mehānisma izpēte, balstoties uz lidmašīnas amortizatora balsta izmēģinājumu rezultātiem**

Šasijas galvenā balsta izmēģinājumos, kuru laikā tika pētīti atgāžņa-pacēlāja cilpu noguruma parametri [4,8,15,18], uz amortizatora kāta virsmas parādījās C-veidīga caurejoša plaisa (16. att.).



16. att. Plaisa amortizatora kātā



17. att. Koncentrators-iezāģējums (iegūts pēc sagraušanas)

Plaisa atrodas uz kāta virsmas posmā ar apakšējo cilindra buksi pie tā apspiešanas vietas. Saskares pēdas noberzumu veidā ar daudzām garenvirziena rievām atrodas gan šajā virsmas posmā, gan arī uz bukses virsmas.

Sakarā ar augsto amortizatora kāta sabrukšanas bīstamību ekspluatācijas apstākļos tika turpināta šāda defekta attīstības novērtēšanas un tā konstatēšanas iespēju pētījumi. Šim nolūkam amortizatora kāta konstrukcijā tika ievadīts mākslīgs defekts — koncentrators.

Koncentratoru amortizatora kātā ievadīja tajā vietā, kur iepriekšējo noguruma pētījumu laikā bija parādījusies noguruma plaisa. Tas bija 21 mm garš un 8 mm plats iezāģējums (17. att.).

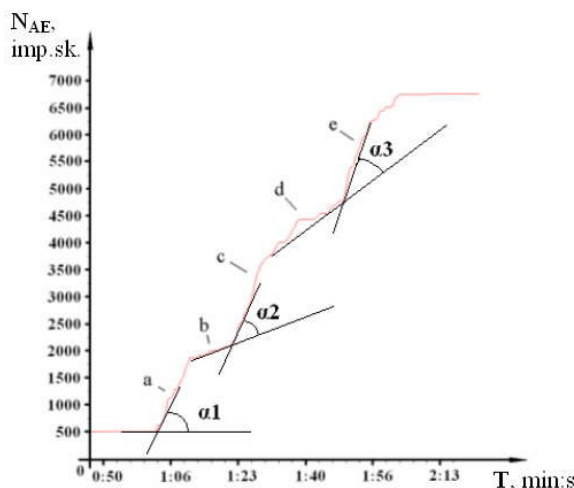
Tā kā tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu pielietošana bez mezgla izjaukšanas bija ierobežota, tad kā galvenā noguruma plaisas rašanās un attīstības kontroles metode tika lietota AE metode. Paralēli bija veikta periodiska US kontrole ik pēc 200...400 sloģošanas cikliem, lai to veiktu, izmēģinājumi tika apturēti, un kāts tika izbīdīts no amortizatora cilindra.

Pēc 3550 sloģošanas ciklu nostrādes amortizatora kātā ar US kontroles metodi tika konstatēta 0,6...1,7 mm liela noguruma plaisa. Lai iegūtu pārliecinošu noguruma plaisu, izmēģinājumus turpināja 1000 bloku laikā (kopējā nostrāde sastādīja 4550 ciklus) ar US kontroli ik pēc 200 sloģošanas blokiem. Plaisas novērtējuma izmērs pēc izmēģinājumu beigām bija 0,2...1,8 mm. Pēc lūzuma atvēršanas tika konstatēts, ka plaisa no abiem iezāģējuma galiem bija palielinājusies par 0,6...0,7 mm.

##### **4.2. Metālisku materiālu noguruma bojājumu novērtēšanas kritēriji, balstoties uz akustiskās emisijas kontroli**

Virknē gadījumu kā materiāla stāvokļa izmaiņas kritēriju izmanto vērtību, kuru sauc par  $\alpha$  — kritēriju [9,10,16]. Piedāvātais kritērijs ir leņķis starp divām līnijām, kas aproksimē summārās AE izmaiņas divos blakus esošajos posmos (18. att.). Visbiežāk šo kritēriju izmanto mikroplaisas rašanās un attīstības indikācijai. Piemēram, 18. att. parādīta summārā AE skaita  $N_{AE}$  atkarība no laika  $T$  ar trīs atzīmētiem  $\alpha$  kritērijiem, kas attēlo trīs mikroplaisu

parādīšanos. Šā kritērija izmantošana ir saistīta ar vizuālu identificēšanu un ir būtiski atkarīga no izvēlēta mēroga (tas praktiski izslēdz iespējamību normēt parametru un automatizēt kontroli).



18. att. AE summārā skaita  $N_{AE}$  izmaiņas mikroplaisas veidošanās procesā

Kā tika parādīts iepriekš, noguruma sagrūšanai ir daudzetaļu raksturs. Šajā gadījumā mikroplaisas rašanās brīdi var noteikt vairākos veidos: to parasti pavada krass summārās AE vai AE enerģijas palielinājums (šo efektu apstiprina fraktogrāfiskie pētījumi). Šim nolūkam var izmantot  $\alpha$ -kritēriju.

Kas attiecas uz turpmāko plaisas attīstību, tad enerģijas dēļ, kas ir nepieciešama tās attīstībai (salīdzinot ar enerģiju, kas tiek patērēta mikroplaisas veidošanai), samazinājuma,  $\alpha$ -kritērija izmantošana ir maz efektīva. Daļēji pirmsagrūšanas novērtējuma problēmu var atrisināt, veicot AE analīzi slogojuma ciklā. Darbā tiek parādīts, ka, ja mikro- un mezoplaisas attīstības etapos AE signāli dažādos slogojuma ciklos atšķiras viens no otra vairākas reizes, tad, pārejot pie makroplaisas, atšķirības būtiski samazinās (t. i., plaisas attīstības process stabilizējas).

Acīmredzams, ka labāko pirmsagrūšanas kritērija variantu varētu izveidot, ja būtu zināmi plaisas izmēri. Tomēr dēļ lielas sagrūšanas enerģijas diferences dažādās plaisas attīstības stadijās atrisināt šo jautājumu visā slogojuma diapazonā nav iespējams. Tajā pašā laikā, ja apskata plaisas attīstību pēc tās sākotnējās veidošanās (t. i., pēc mikroplaisas stadijas), tad enerģiju attiecība dažādos etapos būtiski samazinās, un tas var tikt izmantots plaisas izmēru noteikšanai. Turklāt plaisas garuma vietā lietderīgi izmantot tās atklātās virsmas platību  $S$ , kas precīzāk ir saistīta ar sagrūšanas enerģiju. Šajā gadījumā paveras iespējas prognozēt ne tikai caurejošo, bet arī zem virsmas esošo plaisu attīstību [3,11].

#### 4.2.1. Laukuma bojājumu novērtējuma kritērijs pēc AE mērījumu datiem

Šasiju balsta izmēģinājumos iegūtie eksperimentālie dati tiek izmantoti noguruma plaisas laukuma novērtējumam. Balstoties uz formulu 2.6. (sadaļā 2.2.), izteiksim parametru  $A$ :

$$A = \frac{N_{AE2} - N_{AE1}}{(N_2 - N_1) \cdot P_{\max} \cdot S_{cr}} \left( \frac{\text{imp.sk.}}{\text{cik} \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}^2} \right) \quad (4.1.)$$

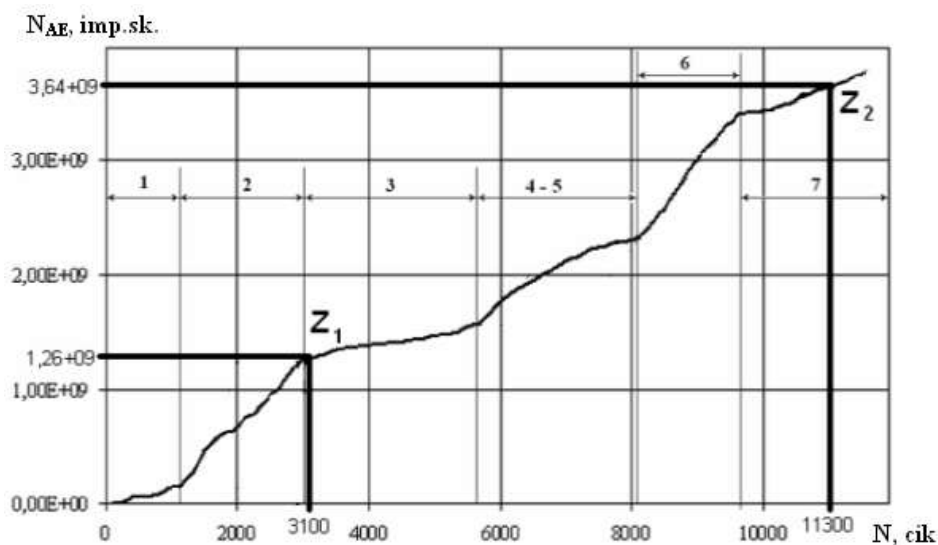
VTL galvenās šasijas resursu izmēģinājumu rezultāta piemērā, kas ir aprakstīts rakstā [7], tiek aprēķināts parametrs  $A$  (19. att.):

$$N_{AE1} = 1,26 \times 10^9 \text{ (imp.sk.)}; N_{AE2} = 3,64 \times 10^9 \text{ (imp.sk.)}; N_I = 3,1 \times 10^3 \text{ (cik)};$$

$N_2 = 11,3 \times 10^3$  (cik);  $P_{max} = 51,5$  (t);  $S_{cr} = 50$  (mm<sup>2</sup>).

Ievietosim šīs vērtības formulā (4.1.) un noteiksim vērtību  $A$ :

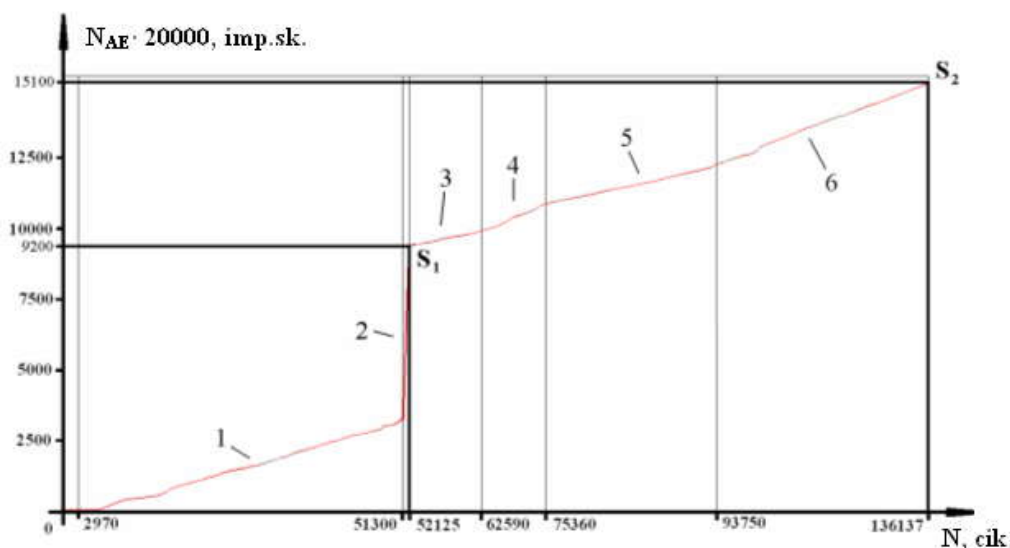
$$A = 0,112 \quad \left( \frac{\text{imp.sk.}}{\text{cik} \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}^2} \right)$$



19. att. Summārās AE ( $N_{AE}$ ) atkarība no slogojuma ciklu skaita ( $N$ ):

1...7 — plaisas attīstības etapi;  $Z_n = (N_n, N_{AE n})$

Nemot vērā iegūto parametru  $A$  un zinot gaisa skrūves soļa vadības sviras izmēģinājumu rezultātus, kas ir aprakstīti rakstā [13], noteiksim plaisas lielumu  $S_{cr}$  pēc formulas 2.6. (20. att.):



20. att. Summārās AE ( $N_{AE}$ ) atkarība no slogojuma ciklu skaita ( $N$ ):

1...6 — plaisas attīstības etapi;  $Z_n = (N_n, N_{AE n})$

$N_{AE1} = 18,4 \times 10^8$  (imp. sk.);  $N_{AE2} = 30,2 \times 10^8$  (imp. sk.);  $N_1 = 52125$  (cik);

$N_2 = 136137$  (cik);  $P_{max} = 46,2$  (t).

Rezultātā  $S_{cr} = 2,7$  mm<sup>2</sup>, savukārt iegūtā plaisas platība — 2,9 mm<sup>2</sup>.

Piedāvātā paņēmiena pielietojuma kļūda sastāda 6,9%, kas nozīmē, ka iegūtais rezultāts parāda pietiekamu piedāvājamā paņēmiena efektivitāti.

#### 4.2.2. Konstrukciju paliekošās stiprības kompleksais kritērijs pēc slodzes parametra

Šajā darbā piedāvātās un patentētās metodes ideja balstās uz šādiem faktiem (10. att.) [2]:

- 1) objektam ir defekts (apskatītajā šasijas izmēģinājumu piemērā tā ir noguruma plaisa), kas iegūts iepriekšējo noguruma izmēģinājumu gaitā (vai iepriekšējās ekspluatācijas gaitā);
- 2) saglabājot ierasto slodzes līmeni, defekts praktiski neattīstās (vai attīstās ļoti lēni) — tādējādi ekspluatācijā esošā objekta sagrūšana var notikt pēc noteiktā resursa nostrādes (t. i., normālajos ekspluatācijas apstākļos sagrūšana nenotiek);
- 3) paliekošās stiprības izmēģinājumos slodze pakāpeniski palielinās, un noteiktā slogošanas līmenī defekts sāk ātri attīstīties (ja objekts atrodas ekspluatācijā, tas var notikt pie slodzes, kas pārsniedz normālu ekspluatācijas slodzi vai īpašos ekspluatācijas apstākļos);
- 4) izmēģinājumu laikā sinhroni tiek mērīti slodzes līmeņi un AE parametri. Defekta attīstības sākšanos pavada stabils summārās AE pieaugums;
- 5) tiek fiksēta slodze, pie kuras noris šī parādība. Dotā slodze ir kā papildu paliekošās stiprības (robežslodzes vai kritiskas slodzes) kritērijs objektiem, kuru funkcionēšana ar bojājumiem ir ierobežota vai nepieļaujama (pasažieru transports, aerokosmiskie aparāti, atomenerģētiskās iekārtas u. tml.).

Tādā veidā piedāvāta metālistisku materiālu un konstrukciju nogurumizturības novērtējuma metode, kas balstīta uz AE parametru mērījumiem, ko izmanto, lai noteiktu kritisko slodzi (robežslodzi), kas atbilst konstrukcijas katastrofiskās sagrūšanas sākumam. Metodi var lietot reālu konstrukciju akustiskās emisijas monitoringam GK ekspluatācijā.

### 5. nodaļa AVIĀCIJAS KOMPOZĪTMATERIĀLU UN KONSTRUKCIJU SAGRŪŠANAS MEHĀNISMU IZPĒTE UN BOJĀJAMĪBAS NOVĒRTĒŠANA

#### 5.1. Aviācijas konstrukciju kompozītmateriālu sagrūšanas mehānisma analīze uz eksperimentālo datu pamata

Šajā nodaļā sniegti KM mehānisku īpašību un sagrūšanas mehānisma eksperimentālo pētījumu rezultāti, izmantojot AE metodi.

##### 5.1.1. Kompozītmateriālu sagrūšanas mehānismu eksperimentālie pētījumi izmantojot akustiskās emisijas mērījumu datus

21. attēlā sniegti dažādas formas un šķiedru orientācijas kompozītmateriālu paraugi pēc izmēģinājumiem ar statisko slodzi līdz to sagrūšanai.

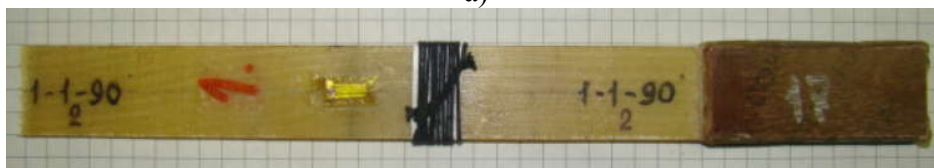
Pēc eksperimentālo datu mērījumu rezultātu apstrādes rezultātiem tika uzbūvēti AE parametru un slodzes izmaiņām laikā grafiki.

Daļu paraugu izmēģinājumu laikā pakļāva iepriekšējai slogošanai ar mērķi atklāt to ietekmi uz KM bojājumu mehānismu un reģistrējamo AE signālu raksturu (sk. 3. nodaļu). Sākotnējie summārās AE ( $N_{AE}$ ) no laika ( $T$ ) atkarības grafiki paraugu grupai, kas tika pakļauta sākotnējai slogošanai, AE parametru izmaiņu raksturs liecina par Kaizera efekta iedarbību, kas izpaužas kā straujš AE signālu izstarpes samazinājums atkārtotās slogošanas laikā līdz iepriekšējam slodzes līmenim. Tā kā šis slogojuma diapazons nav informatīvs, tāpēc tas tika izslēgts no turpmākās analīzes (22. att.).

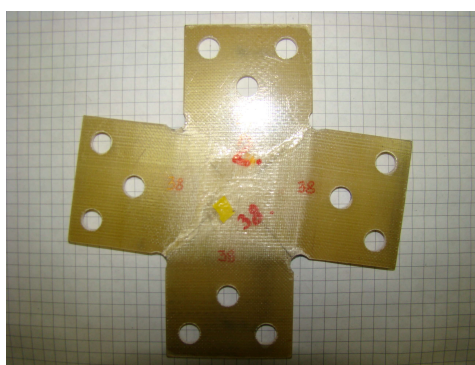




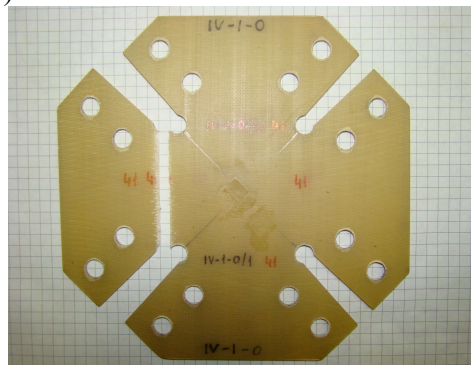
a)



b)



c)

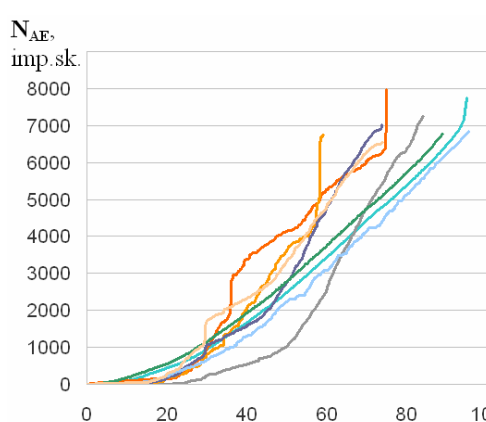


d)

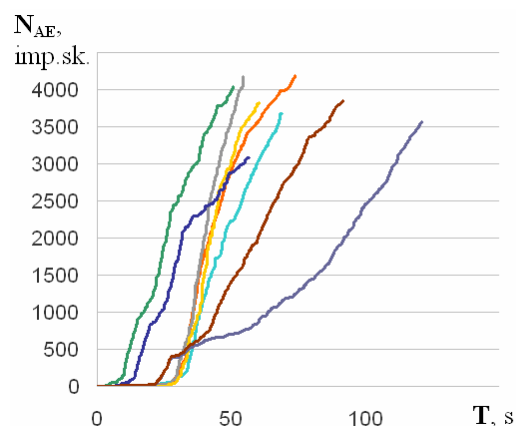
21. att. Eksperimentālo paraugu izskats pēc izmēģinājumiem:

- a) taisnstūra formas plāksnes paraugi ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu ar galos iestiprinātiem uzliktņiem; b) taisnstūra formas plāksnes paraugi ar transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu ar galos iestiprinātiem uzliktņiem; c) krusteniskas formas paraugs; d) Malas krusta formas paraugs

Zemāk tiek doti sakarību dati, kas tika iegūti, izmantojot AE aparāturu *PAC POCKET AE-2*. Datiem, kas tika iegūti ar iekārtas *AF-15*, eksperimentālo sakarību raksturam bija tāds pats raksturs [21,22,23].



a)



b)

22. att. Koriģētie summārās AE ( $N_{AE}$ ) no laika ( $T$ ) atkarības grafiki paraugu grupai, kas tika pakļauti sākotnējai slogošanai:

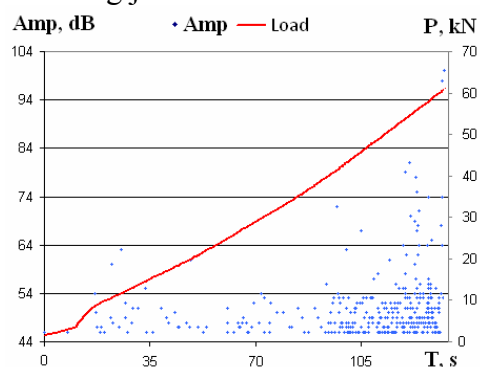
- a) taisnstūra formas plāksnes paraugi ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu ar galos iestiprinātiem uzliktņiem; b) taisnstūra formas plāksnes paraugi ar transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu ar galos iestiprinātiem uzliktņiem

## Eksperimentālo paraugu, kas netika pakļauti sākotnējai slodžošanai, izmēģinājumu rezultāti

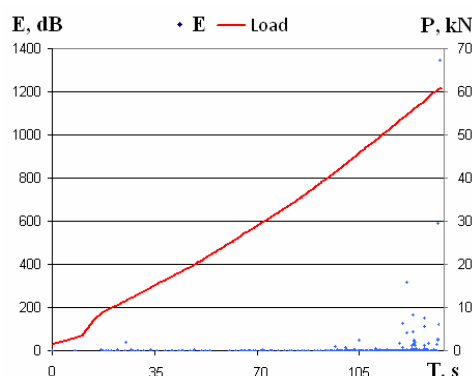
### Paraugi ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slodzes vektoru

AE signālu amplitūdas vērtības *Amp* (23. att.) slodžošanas procesa sākumā atsevišķajiem signāliem sasniedza 63 dB, bet vidēji nepārsniedza 50 dB. Pēc tam, kad slodze sasniedza 66 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 70 dB, bet pēdējā slodžošanas etapā, paraugam sagrūstot, sasniedz 100 dB.

Enerģijas *E* (24. att.) vērtības sākotnējā etapā vidēji sasniedz 20 dB un praktiski nemaina savu vērtību līdz 66 % no sagrūšanas slodzes. Sasniedzot 66 % no sagrūšanas slodzes, enerģija sāk krasi palielināties un sasniedz 170 dB. Parauga sagrūšanas etapā AE signālu enerģijas vērtības sasniedz 1300 dB.



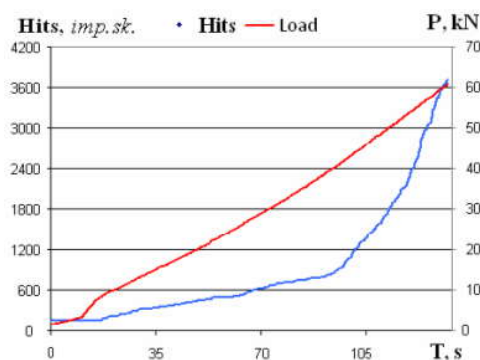
23. att. AE signālu amplitūdas (*Amp*) un slodzes (*P*) izmaiņas laikā (*T*)



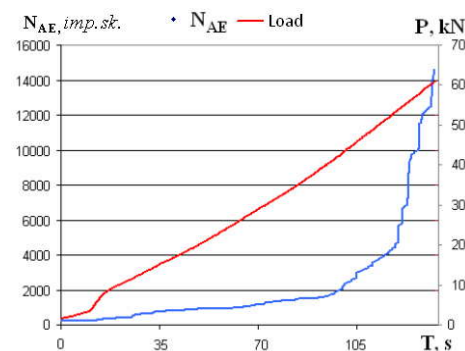
24. att. AE signālu enerģijas (*E*) un slodzes (*P*) izmaiņas laikā (*T*)

AE impulsu summas *Hits* atkarības no laika *T* analīze (25. att.) uzrādīja krasu impulsu skaita pieaugumu, sākot ar slodžošanas momentu, kas sastāda 66 % no sagrūšanas slodzes.

Summārā AE skaita  $N_{AE}$  atkarība no laika *T* (26. att.), sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 66 % no sagrūšanas slodzes, tiek novērota pēkšņa  $N_{AE}$  palielināšanās.



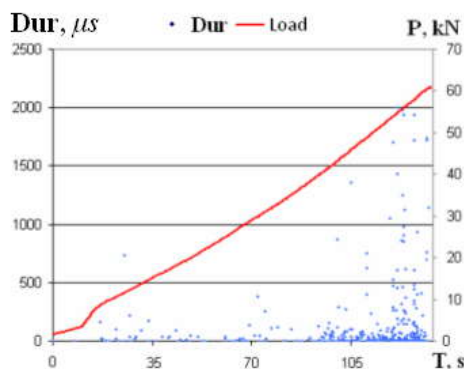
25. att. AE impulsu summas (*Hits*) un slodzes (*P*) izmaiņas laikā (*T*)



26. att. Summārā AE skaita ( $N_{AE}$ ) un slodzes (*P*) izmaiņas laikā (*T*)

Tajā pašā laikā vairākuma signālu ilgums *Dur* (27. att.) sākotnējā slodžošanas etapā palielinās no 100  $\mu$ s līdz 200  $\mu$ s. Sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 66 % no sagrūšanas slodzes, parametrs *Dur* palielinās no 500  $\mu$ s līdz 800  $\mu$ s. Sagrūšanas etapā AE signālu ilgums sastāda 2000  $\mu$ s.





27. att. Signāla ilgums ( $Dur$ ) un slodzes ( $P$ ) izmaiņas laikā ( $T$ )

### 5.1.2. KM paraugu sagrūšanas procesa analīze

#### Eksperimentālie paraugi, kas netika pakļauti sākotnējai slogošanai

Taisnstūra formas paraugu *ar garenisku šķiedru izvietojumu* sagrūšanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano- un mikrolīmenī (līdz 30 % no sagrūšanas slodzes paraugiem, kas netika pakļauti iepriekšējai slogošanai (BIS), un attiecīgi līdz 30 % paraugiem, kas tika iepriekš slogoti (IS)), un turpinās ar matrices plaisāšanu (līdz 66 % no sagrūšanas slodzes paraugiem BIS un līdz 58 % IS paraugiem). Otru etapu raksturo nesošo šķiedru delaminācija, kas noslēdzas ar to pārrāvumu — pilnīgu paraugu sagrūšanu (trešais etaps).

Taisnstūra formas paraugu *ar transversālu šķiedru izvietojumu* sagrūšanas procesu arī raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano- un mikrolīmenī (līdz 30 % no sagrūšanas slodzes paraugiem BIS un attiecīgi līdz 38 % paraugiem ar IS), un turpinās ar matrices plaisāšanu (līdz 74 % no sagrūšanas slodzes paraugiem BIS un līdz 61 % paraugiem ar IS). Otru etapu raksturo nesošo šķiedru delaminācija, kas noslēdzas ar to pārrāvumu — pilnīgu paraugu sagrūšanu (trešais etaps).

Krusteniskas formas paraugiem raksturīgi divi sagrūšanas etapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano- un mikrolīmenī (līdz 45 % no sagrūšanas slodzes paraugiem BIS un ar IS) un turpinās ar matrices plaisāšanu (līdz 80 % no sagrūšanas slodzes paraugiem BIS un līdz 90 % paraugiem ar IS). Otru etapu raksturo nesošo šķiedru delaminācija un relatīvi nelielu nesošo šķiedru pārrāvumu skaitu (vairākums šķiedru nebija sabojāti).

Maltas krusta formas paraugu sagrūšanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano- un mikrolīmenī (līdz 48 % no sagrūšanas slodzes paraugiem BIS un ar IS) un turpinās ar matrices plaisāšanu (līdz 90 % no sagrūšanas slodzes paraugiem BIS un līdz 92 % paraugiem ar IS). Otru etapu raksturo nesošo šķiedru delaminācija, kas noslēdzas ar to pārrāvumu — pilnīgu paraugu sagrūšanu (trešais etaps).

Analizējot KM sagrūšanas robežas (pirmā un otrā etapa robežas), redzams, ka tās ir lielākas taisnstūra paraugiem ar garenisku un transversālu šķiedru izvietojumu, kas netika pakļauti iepriekšējai slogošanai.

### 5.1.3. Eksperimentālo pētījumu rezultātu statistiskā analīze

Lai novērtētu iegūto rezultātu ticamību, tika veikta eksperimentālo datu statistiskā apstrāde, balstoties uz zināmām pieejām [27,29,30,31,32,33].

Balstoties uz varbūtisko pieeju, darbā tika noteikti šādi statistiskie raksturojumi:

- vidējā vērtība ( $\bar{X}$ ),
- statistiskā dispersija ( $S^2$ ),

- vidējā kvadrātiskā novirze ( $S$ ),
- mazās izlases vidējā kļūda ( $\mu$ ),
- mazās izlases robežkļūda ( $\Delta$ ).

Ņemot vērā to, ka autora rīcībā bija neliels pētījumiem izmantojamo paraugu skaits (8 no katra veida paraugiem), statistiskajai analīzei tika izmantota mazo izlašu teorija.

Mazo izlašu teoriju izstrādāja angļu statistiķis V. Gossets (darbojās ar pseidonīmu Stjūdents) 20. gadsimta sākumā. 1908. gadā viņš izstrādāja speciālu sadalījumu, kas ļauj korelēt  $t$  un ticamo varbūtību  $F(t)$  arī mazās izlasēs. Ja  $n > 100$ , tad Stjudenta sadalījuma tabulas sniedz tāds pašus rezultātus, kā Laplasa varbūtību integrāļa tabulas, pie  $30 \leq n \leq 100$  atšķirības ir nebūtiskas. Tāpēc praktiski pie mazām izlasēm pieskaita izlases ar apjomu, kas ir mazāks par 30 vienībām (par lielu tiek uzskatīta izlase ar apjomu virs 100 vienībām).

Eksperimentālo datu vērtības ir apkopotas *EXCEL* programmā un parādītas promocijas darbā Pielikumā 1.

Statistisko raksturlīknes aprēķinu rezultāti parādīti promocijas darbā Pielikumā 2.

#### **5.1.4. Iegūto rezultātu vispārējs raksturojums**

Veikto eksperimentālo izmēģinājumu rezultātā tika noteikta skaidra kompozītmateriālu sagrūšanas procesa stadialitāte. Bojājamības pakāpi viennozīmīgi raksturo AE parametru vērtības.

Kompozītmateriāla matricēs plaisāšanas procesus pavada signāli ar amplitūdu līdz 75 dB, delaminācijas stadijai raksturīgs signālu amplitūdas vērtību palielinājums līdz 85...95 dB, pēdējā etapā, kurā noris šķiedru sagrūšana, amplitūdas vērtības ir no 85 dB līdz 100 dB. Pēdējos divos etapos eksistē arī AE signāli ar amplitūdas vērtībām, kas ir raksturīgas matricēs plaisāšanas, t. i. šie procesi noris vienlaikus.

Kā tika noskaidrots veikto eksperimentālo izmēģinājumu gaitā, kompozītmateriālu paraugu sagrūšanas raksturs ir atkarīgs no šķiedru izvietojuma un paraugu formas (aprakstīts nodaļā 5.1.2.).

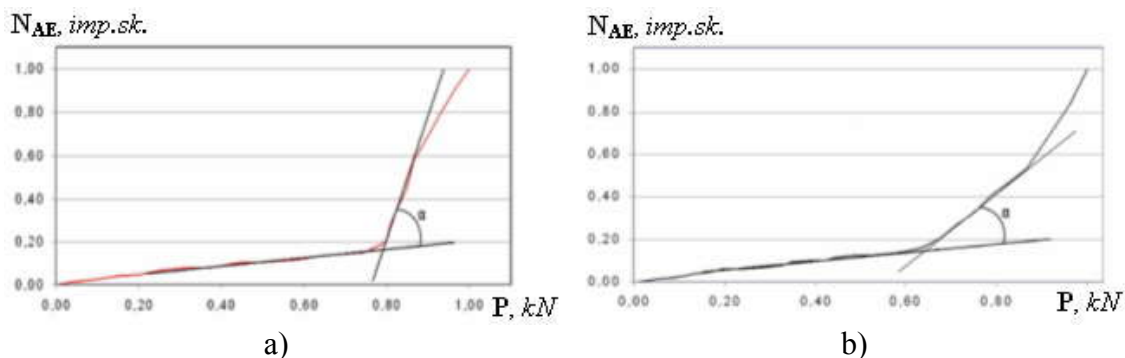
Visos paraugos matricēs sagrūšanu, delamināciju un šķiedru pārāvumu pavadīja AE signālu intensitātes, ilguma un enerģijas palielinājums, turklāt matricēs sagrūšanai atbilst mazākas intensitātes, ilguma un enerģijas signāli. AE signāliem šķiedru sagrūšanas brīdī ir maksimālā intensitāte, ilgums un enerģija, bet AE signāliem delaminācijas procesā ir būtiski lielāka intensitāte, ilgums un enerģija nekā matricēs sagrūšanas procesā, bet nedaudz mazāka nekā šķiedru sagrūšanas procesā.

Visprecīzāk šķiedru sagrūšanas procesu raksturo AE signālu enerģijas izmaiņas, jo AE signāliem slogojuma procesa sākumā ir neliels ilgums.

#### **5.1.5. Materiālu bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumi**

##### **5.1.5.1. Vienā virzienā vērstā kompozītmateriāla bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumu kritēriji statiskajā slogojumā**

Iegūtajām summārā skaita atkarībām no slogojuma ir vienāds AE summārā skaita izmaiņu raksturs katram izmēģinājumu paraugam: lēnā AE pieauguma posmus nomaina posms ar tā strauju palielināšanos (28. att.). Daži autori atklāja šīs likumsakarības gan statiskajiem, gan cikliskajiem slogojumiem [28,36].

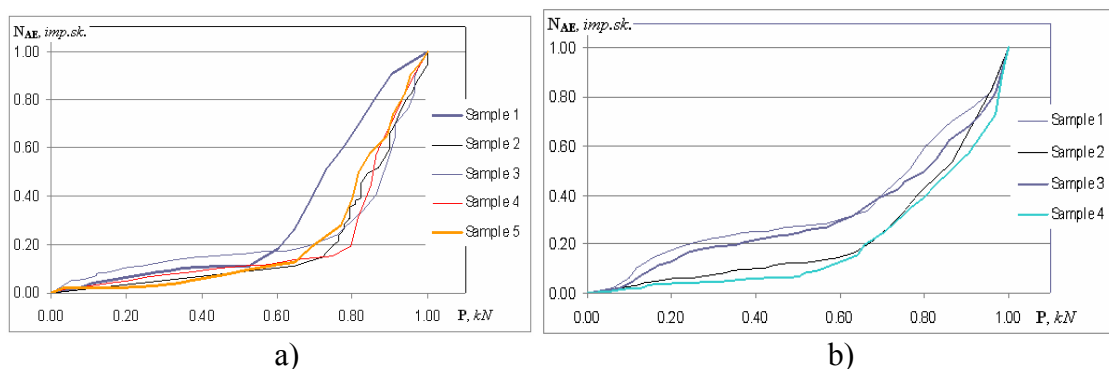


28. att. Summārā skaita ( $N_{AE}$ ) atkarības no slodzes ( $P$ ) grafiks relatīvās vienībās paraugiem ar iezīmētu leņķi  $\alpha$ :

a) ar transversālu šķiedru izvietojumu; b) ar garenisku šķiedru izvietojumu

Minēto posmu krustošanos veido leņķi  $\alpha$  [22,23,28,36]:

- paraugiem ar garenisku šķiedru orientāciju šis lūzums sākas rajonā no 60 līdz 70 % (29. att., a);
- paraugiem ar transversālu šķiedru orientāciju šis lūzums sākas rajonā no 60 līdz 75 % (29. att., b);
- krusteniskas formas paraugiem šis lūzums sākas rajonā no 80 līdz 90 %;
- Malta krusta formas paraugiem šis lūzums sākas 90 % rajonā.



29. att. Summārā skaita ( $N_{AE}$ ) atkarības no slodzes ( $P$ ) grafiks relatīvās vienībās:

a) paraugiem ar garenisku šķiedru izvietojumu; b) paraugiem ar transversālu šķiedru izvietojumu

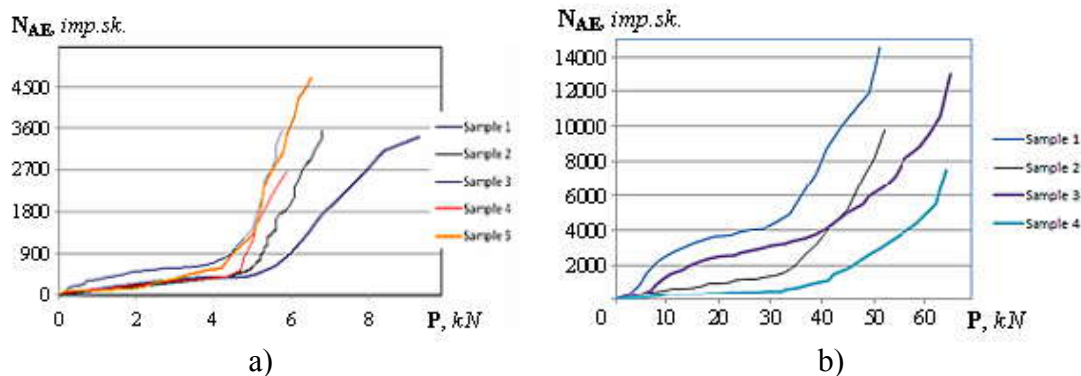
Šā leņķa veidošanās raksturo degradācijas procesa sākšanos, tas saglabājas līdz pat sagrašanās.

Tādā veidā akustiskās emisijas metode ļauj noteikt vienā virzienā vērstā kompozītmateriāla neatgriezeniskās sagrašanās sākuma brīdi.

#### 5.1.5.2. KM sagrašanās intensitātes novērtēšanas akustiskās emisijas kritērijs

AE signālu intensitāte (izteikta kā summārā skaita ( $N_{AE}$ ) izmaiņas atkarībā no slodzes ( $P$ )) tiešā veidā ir saistīta ar sagrašanās intensitāti.

Grafiks 30. att. raksturo šo likumsakarību, apstiprinot, ka pie mazākām leņķa  $\alpha$  vērtībām paraugs sagraust pie lielākām slodzēm [21].



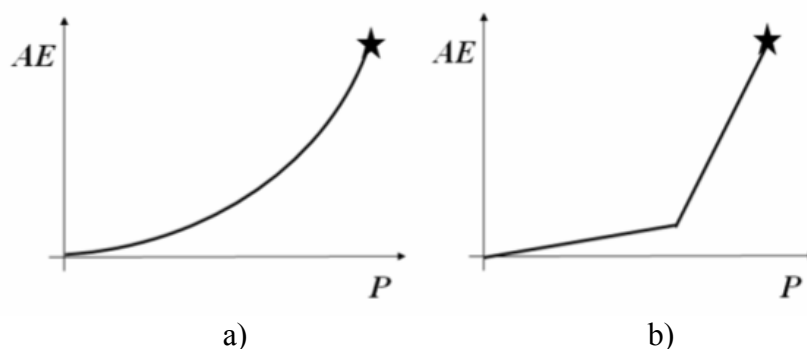
30. att. Summārā skaita ( $N_{AE}$ ) atkarības no slodzes ( $P$ ) grafiks relatīvās vienībās:  
a) paraugiem ar transversālu šķiedru izvietojumu; b) paraugiem ar garenisku šķiedru izvietojumu

### 5.1.5.3. Kompozītmateriāla konstrukciju sagrūšanas veida noteikšanas akustiskā emisijas metode

Veicot pētījumu rezultātu analīzi, tika atklātas divas galvenās summārās AE izmaiņu sakarības, kas ir parādītas 29. att. (a un b) relatīvās vienībās [1,11,12].

Kad slodzes vektors iedarbojās gar šķiedrām, tika novērota vienmērīga summārās AE palielināšanās (summārās AE izmaiņas gradients bija mainīgs un sasniedza maksimumu pirms sagrūšanas (sk. 31. att., b)).

Kad slodzes vektors iedarbojās perpendikulāri šķiedru virzienam, palielinoties slodzei, tika novērots no diviem posmiem sastāvošs summārās AE raksturojums (sk. 31. att., a): pirmajā posmā summārā AE palielinājās ar mazu ātrumu, otrajā — summārā AE palielinājās ar ievērojami lielāku ātrumu. Bojājuma analīze parādīja, ka sagruva matrice: notika materiāla delaminācija bez nesošo šķiedru sagrūšanas. Tādā veidā šāds summārās AE izmaiņu raksturs liecina par kompozītmateriāla matricē sagrūšanu.



31. att. AE atkarība no slodzes:

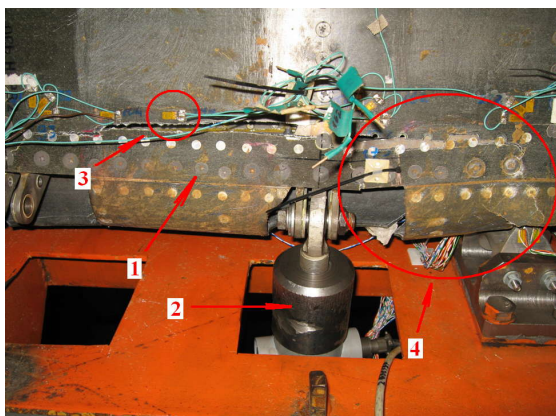
a) galvenokārt šķiedru sagrūšanas gadījumā; b) galvenokārt matricē sagrūšanas gadījumā (★ — konstrukcijas sagrūšanas brīdis)

## 5.2. Reālu kompozītmateriālu aviācijas konstrukciju bojājamības novērtējums

Elerona, kas ir izgatavots no kompozītmateriāla, sagrūšana notika apakšējā panelī pie slodzes  $P = 129\%$  (5070 kg) no sagrūšanas slodzes  $P_p = 3668$  kg, kas atbilst slodzei hidrocilindrā  $P_{HD} = 49,7$  kN (5070 kg). Turklāt maksimālā slodze uz maketa būstera sastādīja  $P_B = 56,3$  kN (5742 kg). Sagrūšana tika konstatēta maketa būstera stiprināšanas zonā. Elerona apakšējā paneļa sagrūšanas skats parādīts 32. att., elerona priekšējā gala skats — 33. att.

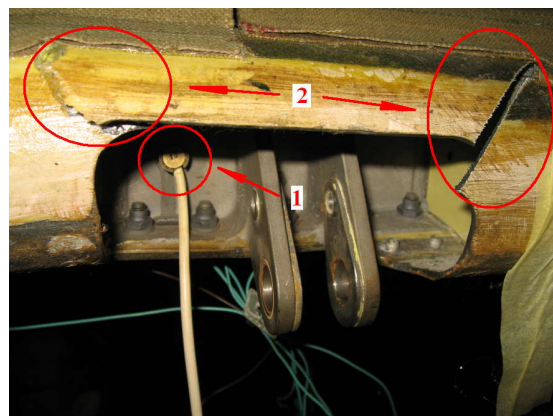
Elerona sagrūšanas procesu var raksturot, balstoties uz informatīvu AE parametru analīzi. Turklāt, tāpat kā paraugiem no KM, elerona sagrūšanas procesam ir raksturīgas trīs pamatstadijas. Piemēram, AE signālu amplitūdas atsevišķajām sagrūšanas stadijām vidēji

mainījās šādā veidā (34. att.): pirmajai stadijai — līdz 60 dB, otrajai — līdz 90 dB un trešajai — līdz 100 dB.



32. att. Elerona apakšējā paneļa sagrūšanas veids maketa būstera zonā:

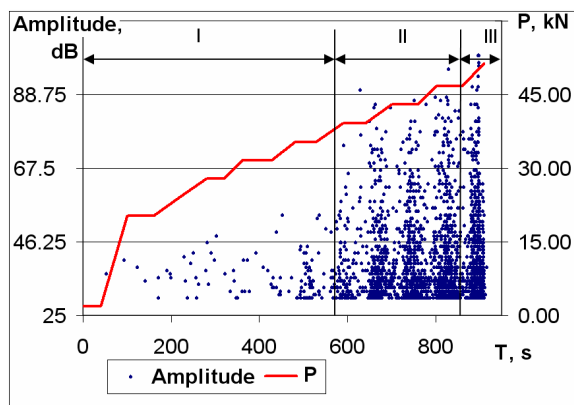
1 — elerons; 2 — būsters; 3 — tenzometrijas devējs;  
4 — sagrūšanas vieta



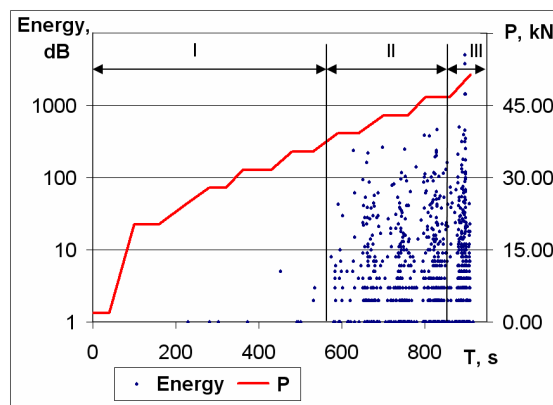
33. att. Elerona deguna sagrūšana no augšējā paneļa puses pjezopārveidotāja (AE devēja) stiprinājuma vietā:

1 — AE devējs; 2 — sagrūšanas vietas

Sagrūšanas procesa stadiju secību visspilgtāk raksturo AE signālu enerģijas izmaiņas grafiks pēc laika (35. att.). Pirmajā stadijā enerģijas vērtība nepārsniedz 10 dB. Otrajā stadijā enerģijas vērtības sasniedz 500 dB, trešajā — līdz 5000 dB.

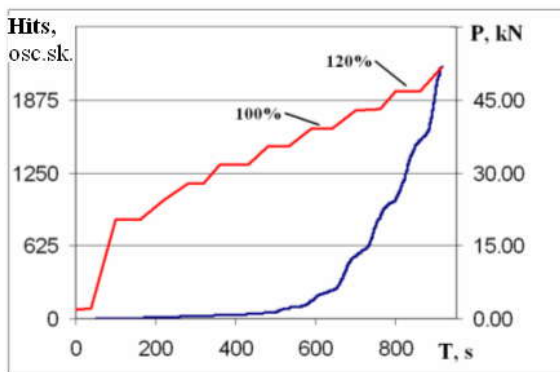


34. att. AE signālu amplitūdas ( $Amp$ ) un slodzes ( $P$ ) izmaiņas laikā ( $T$ )

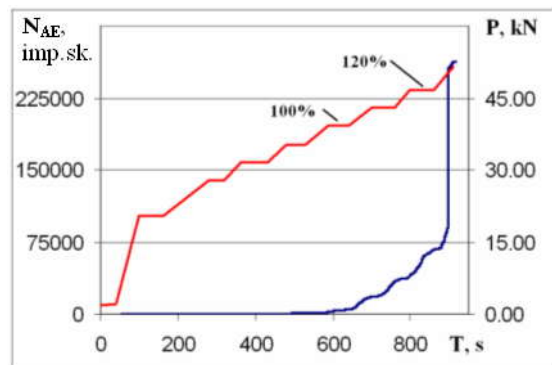


35. att. AE signālu enerģijas ( $E$ ) un slodzes ( $P$ ) izmaiņas laikā ( $T$ )

Impulsu summas, summārā skaita un signāla oscilāciju skaita izmaiņas laikā likumsakarības visprecīzāk atspoguļo konstrukcijas sagrūšanas procesu otrajā un trešajā stadijā, kas ir KM šķiedru delaminācija un sagrūšana (36., 37., 38. att.).

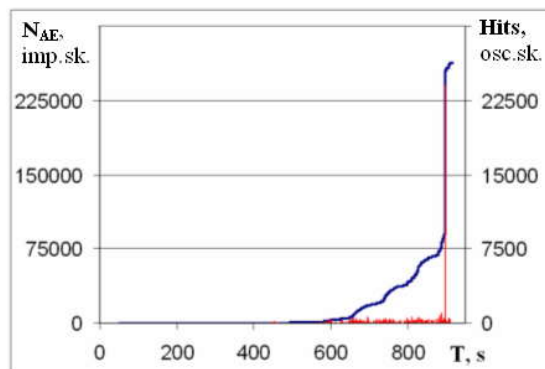


36. att. AE impulsu summas (*Hits*) un slodzes (*P*) izmaiņas laikā (*T*)



37. att. Summārā AE skaita ( $N_{AE}$ ) un slodzes (*P*) izmaiņas laikā (*T*)

No iegūtiem datiem (36., 37., 38. att.) var secināt, ka elerona konstrukcijas intensīva sagrūšana tika novērota slogojuma etapā līdz 100 % no sagrūšanas slodzes, savukārt turpmākajam sagrūšanas procesam bija katastrofisks raksturs līdz pat pilnīgai sagrūšanai, kas iestājās, sasniedzot 129 % no sagrūšanas slodzes.



38. att. Summārā AE skaita ( $N_{AE}$ ) un AE AE impulsu summas (*Hits*) izmaiņas laikā (*T*)

Eksperimentālie dati, kas tika iegūti, izmantojot reālu konstrukciju elementus, apstiprināja bojājamības novērtējuma kritēriju, kas iegūti, balstoties uz AE mērījumu datiem, efektivitāti.

## SECINĀJUMI

- 1) Piedāvāts metālisko materiālu noguruma bojājamības novērtējuma matemātiskais modelis, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumu datiem viena slogojuma cikla ietvaros jebkurā bojājumu stadijā. Parādīts, ka, izmantojot AE parametru reģistrācijas datus, ir iespējams novērtēt materiāla lokālas plastiskas deformācijas apjomu, noguruma plaisas garumu un laukumu.
- 2) Izpētīts aviācijas konstrukciju no metāliskiem materiāliem bojājamības mehānisms, kā rezultātā izstrādāti jauni metālisku materiālu noguruma bojājumu novērtēšanas kritēriji, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumiem:
  - a) izmantojot lidmašīnas galvenās šasijas balsta un gaisa skrūves soļa vadības sviras AE mērījuma (AE summārais skaits, imp.sk.) un izmēģinājuma datus (slodzes lielums (kN), slogojuma ciklu skaits (cik)), tika piedāvāts jauns noguruma plaisas laukuma novērtējuma kritērijs  $S_{cr}$  (bojājuma laukuma lielums,  $\text{mm}^2$ ), kas ļauj noteikt bojājuma laukumu;

- b) piedāvāta jauna metālisku materiālu un konstrukciju nogurumizturības novērtējuma metode, kurus izmanto, lai noteiktu kritisku slodzi, kas atbilst konstrukcijas katastrofiskās sagrūšanas sākumam. Izmantojot AE mērījumus, eksperimentu rezultātā tiek noteikta iespēja konstatēt kritisko slodzi ar drošības rezervi ne mazāku par 1,8.
- 3) Izpētīts dažu veidu aviācijas kompozītmateriālu sagrūšanas mehānisms dažādos sloģuma režīmos un paņēmienos, balstoties uz AE signālu reģistrācijas datiem. Eksperimentālo pētījumu pamatā tika izstrādāti kompozītmateriālu bojājumu pakāpes novērtējuma kritēriji, tajā skaitā:
  - a) AE kritērijs, kas ļauj noteikt vienā virzienā vērsta kompozītmateriāla neatgriezeniskās sagrūšanas sākuma brīdi;
  - b) AE kritērijs, kas ļauj novērtēt kompozītmateriāla sagrūšanas intensitāti;
  - c) AE kritērijs, kas ļauj novērtēt kompozītmateriāla sagrūšanas raksturu, tas ir, noteikt, kurš elements sagrust — šķiedras vai matrica.
- 4) Izpētīts reālu konstrukciju no kompozītmateriāliem sagrūšanas mehānisms un apstiprināta to bojājamības novērtējuma efektivitāte GK spārna elerona piemērā, izmantojot AE mērījumu datus.



## LITERATŪRA

1. Doroško S., Harbuz Y. *Kompozītmateriāla sagrūšanas tipa noteikšanas metode*// LR Patents Nr. 14585. – 2012.
2. Harbuz Y., Doroško S. *Maksimāli pieļaujamās slodzes noteikšanas paņēmiens izmēģinājumos uz paliekošo stiprību*// Patents LV Nr. 14531. – 2012.
3. Harbuz Y., Doroško S. *Plaisas lieluma noteikšanas paņēmiens noguruma pārbaudēs*// LR Patents Nr. 14488. – 2012.
4. Nasibullins A. *Akustiskās emisijas metodes pielietojuma izpēte aviotehnikas spēka konstrukciju kontrolei stendu izmēģinājumos. Promocijas darbs.* – Rīga: RTU, 2011. – 137 lpp.
5. Urbahs A., Banovs M., Doroško S. *Kuģa gāzturbīnu dzinēju kompresoru disku akustiskās emisijas kontrole*// Maritime Transport and Infrastructure–2010. –2010. -93.–98. lpp.
6. Urbahs A., Banovs M., Doroško S., Feščuks J. *Kuģu gāzturbīnu iekārtu stāvokļa kontrole ar akustiskās emisijas metodi*// Maritime transport and Infrastructure–2009. – 2009. 137.–141. lpp.
7. Urbahs A., Banovs M., Doroshko S., Nasibullins A., Turko V. *Noguruma plaisu agrīnās atklāšanas tehnoloģija šasijas stenda izmēģinājumos*// RTU zinātniskie raksti. – 2010. – Ser. 6, Sēj. 34. 9.–16. lpp.
8. Banov M., Doroshko S., Nasibullin A., Turko V. *Undercarriage fatigue test control by acoustic emission method*// Ultragarsas. – 2006. – N2 (59). 16–18 p.
9. Banov M., Konyaev E., Troenkin D. *Method of estimating the fatigue strength of turbine blades by acoustic emission*// Fault detection. – 1981. – N2. 26–28 p.
10. Banov M., Troenkin D., Urbahs A., Minatsevich S. *Inspection of the condition of gas-turbine engine blades by the acoustic-emission method*// The journal of nondestructive testing. – 1986. – 22(9). 619–623 p.
11. Doroshko S., Harbuz Y. *Acoustic emission analysis of fatigue crack development*// *Mechanika*–2012. – 2012. 73–76 p.
12. Harbuz Y., Chepusov A. *Methods of acoustic emission diagnostics of pre-destruction state*// *Transport means* 2012. – 2012. 228–231 p.
13. Nasibullin A., Harbuz Y., Doroshko S. *Acoustic emission characteristics of fatigue crack development in a pitch control arm of helicopter lifting propeller blades*// *Transport Means* – 2010. – 2010. 49–52 p.
14. Shaniavski A. *Modeling of Fatigue Cracking of Metals. Synergetics for Aviation.* – Ufa: Publishing House of Scientific and Technical Literature «Monograph», 2007. 500 p.
15. Shaniavski A., Urbahs A., Banov M., Doroshko S., Hodos N. *Correlation of acoustic emission signals with kinetics of fatigue crack growth in the shock absorber of aircraft landing gear*// *Scientific Journal of Riga Technical University.* – 2009. – V6, N31. 94–100 p.
16. Troenkin D., Shaniavski A., Banov M., Konyaev E. *Methodological recommendations for monitoring fatigue damage of low-dimensional structures using acoustic emission method.* – M.: CSTI CA, 1985. 52 p.
17. Urbahs A., Banov M., Doroshko S., Harbuz Y., Turko V. *Acoustic Emission Diagnostic of Fatigue Crack Development During Undercarriage Bench Testing*// *Mechanika* 2010. – 2010. 450–454 p.
18. Urbahs A., Banov M., Doroshko S., Nasibullin A., Feshchuks Y. *Acoustic emission monitoring of fatigue damage* // *High Tech in Latvia* 2008. – Rīga: Latvia Technology Park, 2008. 50 p.



19. Urbahs A., Banov M., Doroshko S., Turko V. Non-destructive inspection of aircraft landing gear during residual strenght testing// *Ultragarsas=Ultrasound*. – V64, N1. – 2009. 43–45 p.
20. Urbahs A., Banov M., Harbuz Y., Chepusov A., Feshchuk Y. Evaluation of residual strength of aircraft aileron construction// *AES – ATEMA 2011*. – 2011. 29–34 p.
21. Urbahs A., Banov M., Harbuz Y., Feshchuks Y., Sologubov Y. Evaluations of degree of damage and probability of forecasting of destructing load in anisotropic composites by means of acoustic emission in materials under static loading// *Transport Means* – 2011. – 2011. 270–273 p.
22. Urbahs A., Banov M., Harbuz Y., Turko V., Feshchuk Y., Hodos N. Estimation of mechanical properties of the anisotropic reinforced plastics with application of the method of acoustic emission // *Transport and Telecommunication*. – 2010. – V11, N2. 68–75 p.
23. Urbahs A., Banov M., Harbuz Y., Turko V., Feshchuk Y., Hodos N. Investigation of Mechanical Properties of Composite Materials Using the Method of Acoustic Emission// *Mechanika* – 2011. – 2011. 306–310 p.
24. Urbahs A., Banov M., Turko V., Feshchuk Y. Diagnostics of Fatigue Damage of Gas Turbine Engine Blades// *WASET Issue 59*. – 2011. – Part IX. 906–911 p.
25. Urbahs A., Harbuz Y., Urbaha J. Evaluating Of Damageability Of Materials At Fatigue Loading Based On Signals Of Acoustic Emission// *Mechanika*–2015. – 2015. -257-261 p.
26. Urbahs A., Shaniavski A., Doroshko S., Banov M. Correlation of Acoustic Emission and Fractographic Characteristics during Fatigue Crack Development// *EWGAE 2010*. – 2010. 1–8 p.
27. Архирейский А.А., Рассоха Е.Н. Статистическая обработка данных о надежности: Методические указания к выполнению расчетно-графической работы. – Оренбург: ГОУ, 2004. 35 с.
28. Банов М. Д., Коняев Е. А., Троенкин Д. А. Методика оценки усталостной прочности газотурбинных лопаток методом акустической эмиссии. – М.: Дефектоскопия, 1981, № 2. 26–28 с.
29. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Изд. «Наука», 1983. 415 с.
30. Веремеиук В. В., Кожушко В. В., Мороз О. А. Статистическая обработка выборки значений случайной величины: Учеб.-метод. Пособие по высшей математике для студ. строит. спец. – Мн.: БГПА, 2002. 102 с.
31. Гаскаров Д. В., Шаповалов В. И. Малая выборка. – М.: Статистика, 1978. 248 с.
32. Иванова О. В., Дорофеева Н. С. Первичная обработка выборочных данных. Часть II: методические указания к лабораторному практикуму. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. 35 с.
33. Кацман Ю. Я. Статистическая обработка экспериментальных данных: методические указания к лабораторным работам. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 38 с.
34. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. – Москва: Наука, 1974. 312 с.
35. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – К.: Наукова думка, 1977. 277 с.
36. Урбах А. И. Диагностика повреждений и прогнозирование разрушений авиационных конструкций акустико – эмиссионным методом. – Рига: PAV, 1996. 123 с.