

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Aleksejs NASIBULLINS**

**AKUSTISKĀS EMISIJAS METODES PIELIETOJUMA IZPĒTE  
AVIOTEHNIKAS SPĒKA KONSTRUKCIJU KONTROLEI  
STENDU IZMĒĢINAJUMOS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2011**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Transporta un Mašīnzinību fakultāte  
Transportmašīnu Tehnoloģiju Institūts

**Aleksejs NASIBULLINS**

Doktora studiju programmas “Transporta sistēmu tehniskais nodrošinājums” doktorants

**AKUSTISKĀS EMISIJAS METODES PIELIETOJUMA IZPĒTE  
AVIOTEHNIKAS SPĒKA KONSTRUKCIJU KONTROLEI  
STENDU IZMĒĢINAJUMOS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

**Rīga 2011**

UDK 629.7.018.4:620.179.17(043.2)

Na 636 a

Nasibullins A. Akustiskās emisijas metodes  
pielietojuma izpēte aviotehnikas spēka  
konstrukciju kontrolei stendu izmēģinājumos.  
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2011.-27 lpp.

Iespiests saskaņā ar „RTU P-20” promocijas padomes  
2011. gada 01.jūnija lēmumu, protokols Nr.01/2011



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

**ISBN 978-9984-49-340-4**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 25.augustā plkst. 13:00 Rīgas Tehniskās universitātes Transportmašīnu tehnoloģiju institūtā, Rīgā, Lomonosova ielā 1, V korpusā, 218. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

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

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Andrejs Šaņavskijs  
Maskavas Valsts Tehniskā Civilaviācijas Universitāte, Krievija

Dr.habil.sc.ing. Aleksandrs Sorokins  
SIA Rīgas zinātniski eksperimentālais centrs „AVIATEST LNK”, Latvija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Aleksejs Nasibullins .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, slēdzienu vai secinājumus, literatūras sarakstu, 5 pielikumi, 70 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 137 lappuses. Literatūras sarakstā ir 131 nosaukumi.

## Darba aktualitāte

Šobrīd viens no modernās aviācijas attīstības prioritārajiem virzieniem ir aviācijas tehnikas drošas ekspluatācijas laika palielināšana. Uz zemes veicamie aviācijas tehnikas un tās komponentu statistiskie un noguruma izturības pētījumi ar dažādu nesagraujošās kontroles (NK) metožu pielietošanu ir nepieciešams gan jaunas tehnikas sertifikācijas, gan arī jau lietošanā esošu lidmašīnu un helikopteru ekspluatācijas termiņu pagarināšanas obligāts nosacījums. Kā zināms, noguruma plaisas kombinācijā ar metāla koroziju ir galvenie vairāku avotu bojājumu veidošanās un katastrofisku atteikumu cēloņi, kuri aviācijas konstrukciju ekspluatācijas laikā rada vislielāko bīstamību. Tādēļ, veicot noguruma izmēģinājumus, ir svarīgi pēc iespējas ātrāk reģistrēt noguruma bojājumu rašanos un tālāk kontrolēt to attīstības gaitu.

Labi izstrādātajām un plaši pielietotajām NK metodēm, piemēram, ultraskaņas, virpuļstrāvu, kapilāru, magnētiskā u.c. metodēm piemīt vairāki trūkumi, kuri apgrūtina vai padara par neiespējamu to pielietošanu vairākās praktiskās situācijās. Pie tādiem trūkumiem var pieskaitīt, piemēram, piekļuves kontrolējamai virsmai nepieciešamību, ekspluatācijas un tehnoloģisko faktoru ietekme uz metožu izšķirtspēju un to darbietilpību. Lielāko daļu no tradicionālajām NK metodēm piemītošajiem trūkumiem var pārvarēt izmantojot perspektīvu NK metodi – akustiskās emisijas metodi (AE).

AE metode ar augstu ticamības pakāpi ļauj konstatēt grūti pieejamu konstrukciju iecirkņu struktūras defektus un noguruma bojājumus un sekot līdzi to attīstībai gan noguruma pārbaudēs, gan ekspluatācijas laikā. Lietojot AE metodi, defektus ir iespējams konstatēt agrīnā attīstības stadijā, kā arī bojājumus klasificēt pēc bīstamības pakāpes. Tomēr praksē AE metodi pielietot ir ļoti sarežģīti, jo derīgā signāla enerģijas līmenis un galvenie tā parametri ir ļoti atkarīgi no materiāla īpašībām, bet defekta attīstības procesu parasti pavada trokšņi ar tādiem parametriem, kuri ir tuvi AE signālu parametriem.

Sakarā ar augstāk minēto, tālākas AE metodes pilnveidošana, materiāla struktūras bojājuma pakāpi atspoguļojošu kritēriju noteikšana, agrīnas noguruma bojājumu konstatēšanas metodiku izstrāde un ieviešana nosaka izvēlētās pētījuma tēmas **aktualitāti**.

## Darba mērķis

Darba mērķis ir izstrādāt AE metodes pielietošanas metodoloģiju noguruma bojājumu uzkrāšanās procesa likumsakarības pētījumiem spēka konstrukciju stenda izmēģinājumos.

Izvirzīto mērķu sasniegšanai ir jāatrisina šādi **uzdevumi**:

1. Pierādīt summārās AE atkarības no slogošanas ciklu skaita grafika pirmā lūzuma punkta atbilstību noguruma plaisas rašanās momentam.
2. Papildināt noguruma plaisas veidošanās kvantitatīvā summārās AE slogošanas cikla laikā novērtēšanas modeli.
3. Izstrādāt AE metodes pielietošanas metodiku aviācijas konstrukciju stenda izmēģinājumu veikšanā .
4. Izstrādāt noguruma plaisu parādīšanās agrīnas konstatēšanas metodi, kuras pamatā ir AE efekts.

## **Pētījumu metodika**

Lai izpētītu noguruma bojājumu uzkrāšanās procesa likumsakarības, tika veikta pētāmo objektu cikliska slogošana ar pieliktās slodzes un AE signālu sinhronu ierakstu līdz uzdoto izmēru noguruma plaisu parādīšanās brīdim. Turklāt, noguruma pētījumi tika apturēti un pieaugoša slodze tika pielikta līdz pētījuma objekta sagraušanai. Tālāk tika veikta lūzuma fraktogrāfiskā izpēte un iegūto datu salīdzināšana ar AE signāliem. Lai veiktu izmēģinājumus, tika izmantoti Rīgas zinātniski eksperimentālā centra „AVIATEST LNK” (Riga Scientific Experimental Centre “AVIATEST LNK”) izmēģinājumu stendi:

- Speciāli izstrādāts titāna paraugu ciklisku izmēģinājumu dinamiskais kanāls. Paraugu slogošanas frekvence – 30 Hz.
- Centrā „Aviatest” pilnveidota izmēģinājumu mašīna WPM, kuru izmantoja titāna paraugu monotoni izstiepšanai līdz sagraušanai pēc noguruma izmēģinājumu beigās.
- Lidmašīnas TU-154 šasijas galvenā balsta izmēģinājumu stends. Stendā ir iespējams realizēt dažādas slogošanas programmas, uzdodot slodzi pa trim asīm X, Y un Z. Lai realizētu slogošanas programmu, var tikt iesaistīti līdz 18 slogošanas kanāliem.
- Helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras izmēģinājuma stends. Lai radītu slodzi, lieto 4 slogošanas kanālus, kuri realizē uz skrūves soļa vadības sviru pieliktās slodzes.

Fraktogrāfisko pētījumu veikšanai tika lietots firmas Carl-Zeiss elektronu mikroskops, kurš ir analogisks tam mikroskopam, ar kuru tiek veikti ekspluatācijas procesā sagrauto aviācijas konstrukciju elementu pētījumi. Visi fraktogrāfiskie pētījumi, kuri parādīti promocijas darbā, tika veikti Krievijas Valsts centrā "Безопасность полетов на воздушном транспорте".

## Zinātniskā novitāte

1. Ir paveikti noguruma plaisu rašanās un  $\alpha$ -kritērija atbilstības noguruma plaisas parādīšanās brīdim likumsakarību pētījumi. Tika pierādīts, ka summārās AE atkarības no slogošanas ciklu skaita ( $\alpha$ -kritērijs) grafika pirmais lūzuma punkts tiek identificēts kā mikroskopiskas noguruma plaisas parādīšanās moments. Ja sākotnējā izmēģinājumu posmā uz summārās akustiskās emisijas atkarības no slogošanas ciklu skaita grafikā ir novērojami vairāki lūzumi, vairāki leņķi  $\alpha$ , tad leņķu  $\alpha$  skaits atbilst izveidojušos noguruma mikroplaisu skaitam.

2. Tika izpētīts noguruma plaisas veidošanās kvantitatīvā novērtējuma modelis pēc summārās AE slogošanas ciklā. Tika parādīts, ka plaisas rašanās procesā katra slogošanas ciklā aprēķinos ir jāņem vērā tikai tā summārā AE, kura attiecas uz summārās AE paātrināta pieauguma atkarībā no slogošanas ciklu skaita posmu ( $\alpha$ -kritērijs).

3. Pamatojoties uz AE metodi, tika izstrādāta noguruma plaisas pieauguma metodika cikliskos konstrukciju izmēģinājumos, kura ir aizsargāta ar Latvijas Republikas patentu Nr. 13853. Konstrukciju noguruma plaisas pieauguma novērtēšanu veic ciklisku izmēģinājumu procesā ar pastāvīgas zīmes slodzi. Izmēģinājumu gaitā sinhroni reģistrē AE signāla un slodzes līmeņu vērtības. Turklāt arī nosaka AE signāla virzību katrā slogošanas ciklā. Momentu, kurā plaisa sasniedz uzdotos izmērus, novērtē gan pēc slogošanas cikla AE signāla intensitātes līmeņa, gan AE signāla stāvokļa stabilizācijas rezultātiem.

## Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Noguruma plaisas parādīšanās momenta identifikācija pēc  $\alpha$ -kritērija.
- Noguruma plaisu parādīšanās agrīnas konstatēšanas metode, kuras pamatā ir AE efekts.
- AE metodes pielietošanas metodika aviācijas konstrukciju stenda izmēģinājumu veikšanā.

## Darba praktiskā nozīme un ieviešana

Pētījumu rezultātus var izmantot gan noguruma plaisu rašanās un pieauguma kontrolē, gan dažādu aviācijas spēka konstrukciju izmēģinājumos, gan arī citu tehnikas veidu izmēģinājumos, piemēram, dzelzceļa tehnikas izmēģinājumos. Darba rezultāti ir praktiski ieviesti SIA „Aviatest LNK” metodikas veidā – „Spēka konstrukciju stenda noguruma pētījumu AE kontroles metodika”. Darba rezultāti tika izmantoti īstenojot projektus: RTU projekts №ZP-2008-21

„Aviācijas konstrukciju noguruma plaisu agras noteikšanas un kontroles metodes izstrāde standu izmēģinājumos” (2008.-2009.g.g.); un RTU projekts FLPP-2009/52 „Rūpniecisko ventilatoru vibroakustiskā diagnostika” (2008.-2009.g.g.);

*Ziņojumu konferencēs:*

1. International Conference „Non-Destructive Testing and Diagnostics – 2006” Lietuva, Viļņa, 2006g. 26.maijs, „Undercarriage fatigue test control by acoustic emission method”

2. 12th International Conference “Transport Means 2008”, Lietuva, Kauna, 2008g. 23.oktobris, “Acoustic emission monitoring of landing gear fatigue testing.”

3. International Conference „Non-Destructive Testing and Diagnostics – 2009”, Lietuva, Viļņa, 2009g. 28.maijs, “The helicopter’s MI-26T tail and fin booms stressed state under static loading”

4. 48. RTU studentu zinātniska un tehniska konference. TMF, Aviācijas institūts, 2007g. 14.aprīlis, „Noguruma plaisas rašanās un attīstības kontrole ar akustiskās emisijas metodi.”

5. Zinātniskā konference „K. D. Mirtovam 100 gadi”. Rīga, RTU, TMF, Aviācijas institūts, 2008g. 25.janvaris, „Акустическая эмиссия как метод неразрушающего контроля шасси самолета Ту-154Б при стендовых испытаниях.”

6. RTU 49. starptautiskā zinātniskā konference. TMF, Transportmašīnu Tehnoloģiju Institūts, 2008g. 13.oktobris, “Helikoptera MI-26 astes sijas saspriegta stāvokļa izpēte.”

7. RTU 50. starptautiskā zinātniskā konference. TMF, Transportmašīnu Tehnoloģiju Institūts. „Akustiskās emisijas metodes pielietojums helikoptera EH-101 propellera soļa vadības roksviras noguruma pārbaudēs.”

8. RTU 50. starptautiskā zinātniskā konference. TMF, Transportmašīnu Tehnoloģiju Institūts. “Akustiskā emisija kā noguruma plaisas rašanās kontroles metode.”

9. Stenda referāts par projekta izpildi. RTU, Kaļķu iela, 1. 2009. gada 23. oktobrī „Aviācijas konstrukciju noguruma plaisu agras noteikšanas un kontroles metodes izstrāde standu izmēģinājumos.”

*Publikācijas:*

1. Banovs M., Doroshko S., Nasibullins A., Turko V. „Undercarriage fatigue test control by acoustic emission method.”, Ultragarsas. - №2(59), 2006, 16.-18.lpp.

2. Nasibullins A., Banovs M., „Noguruma plaisas rašanās un attīstības kontrole ar akustiskās emisijas metodi.”, 48. RTU studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, 2007. gada aprīlī. – Rīga : RTU Izdevniecība, 2007. – 1.d.: Arhitektūra. Būvniecība. Datorzinātne. Elektrozinības. Mašīnzinības, 185 -185.lpp.

3. Banovs M., Feščuks J., Nasibullins A., Vinogradovs L. „Gultņu elektrodzinēja mezglā akustisko-emisiju diagnostika”, RTU zinātniskie raksti 6. sērija Mašīnzinātne un transports, intelektuālas transporta sistēmas, 26. sējums, RTU, Rīga 2008, 56-61 lpp.
4. Urbahs A., Banovs M., Doroško S., Nasibullins A., Feščuks J. Acoustic emission monitoring of fatigue damage // High Tech in Latvia 2008. - Rīga, LATVIJA: Latvia Technology Park , 2008. 50- 50. lpp.
5. Urbahs A., Banovs M., Doroško S., Nasibullins A., Feščuks J. Leak control technology in pressure vessels // High Tech in Latvia 2008. - Rīga, LATVIJA: Latvia Technology Park, 2008. - 55.-55. lpp.
6. Urbahs A., Banovs M., Doroshko S., Nasibullins A. . „Acoustic Emission Monitoring of Landing Gear Fatigue Testing”. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International conference. Transport means 2008, Kaunas University of Technology, Lithuania, Kaunas 2008, 33- 36. lpp.
7. Nasibullins A., Turko V. “The helicopter’s MI-26T tail and fin booms stressed state under static loading”. Ultragarsas. - №2 (64), 2009, 45.-47. lpp.
8. Nasibullins A. „Akustiskās emisijas metodes pielietojums helikoptera EH-101 propellera soļa vadības roksviras noguruma pārbaudēs.” RTU zinātniskie raksti 6. sērija Mašīnzinātne un transports, 34. sējums, RTU, Rīga 2010, 29-34 lpp.
9. A.Urbahs, M.Banovs, S.Doroško, A.Nasibullins, V.Turko „Noguruma plaisu agrīnās atklāšanas tehnoloģija šasijas stenda izmēģinājumos” RTU zinātniskie raksti 6. sērija Mašīnzinātne un transports, 34. sējums, RTU, Rīga 2010, 30.-39. lpp.
10. Nasibullins A., Banovs M. “Acoustic Emission monitoring of fatigue crack origination during titanium specimens tests .” RTU zinātniskie raksti 6. sērija Mašīnzinātne un transports, 34. sējums, RTU, Rīga 2010, 61-67 lpp.
11. A. Nasibullin, Y. Harbuz, S. Doroshko “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 University of Technology, Lithuania, Kaunas 2010, 49 - 52. lpp.

## **Darba saturs**

Darba pirmajā nodaļā ir aplūkotas NK metodes, kuras lieto aviācijas tehnikas ekspluatācijā un izmēģinājumos. Ir veikta to iespēju un pielietošanas analīze, ņemot vērā izšķirtspēju un pielietojamības robežas. Salīdzinājumā ar aplūkotām metodēm ir apskatīti AE metodes priekšrocības un trūkumi.

AE metodes priekšrocības:

- sagatavošanās darbu un kontroles darbietilpība ir desmitiem (simtiem) reižu mazāka, nekā tā ir citām NK metodēm: metodei nav nepieciešama visaptveroša virsmas skenēšana, t.i. tā ļauj uz pētāmā devēja lokāli izvietot devējus, kas ievērojami samazina pielietošanas izmaksas: minimāla izolācijas noņemšana, minimāla virsmas tīrīšana).

- pēc kontroles apjomiem ir globāla metode. Uzstādot vairākus devējus, tiek veikta visa objekta kontrole, kurā tiek noteikta defektu rašanās un to attīstības vietas (lokācijas režīms). Tas ļauj šo metodi izmantot nepieejamu virsmu kontrolei, kā arī veikt nepārtrauktu objekta kontroli (monitoringu) tā funkcionēšanas laikā un pāriet no periodiskām tehniskām apskatēm uz objekta ekspluatāciju atbilstoši tā tehniskajam stāvoklim.

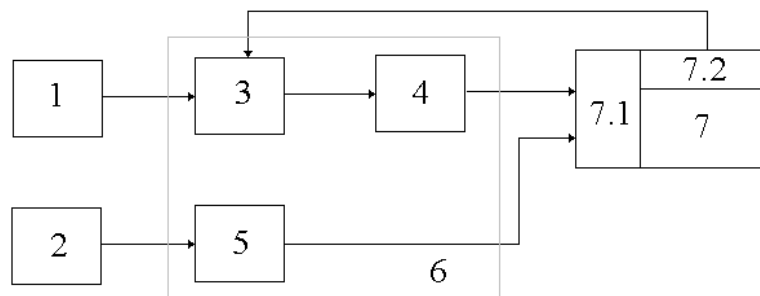
- ļauj veikt pilnu objekta diagnostiku, nepārtraucot esošo ekspluatācijas režīmu vai to pārtraucot uz īsu laiku, kas sniedz acīmredzamas ekonomiskās priekšrocības, ja salīdzina ar tradicionālajām NK metodēm, kurām kontroles veikšanai ir nepieciešama objekta ekspluatācijas pārtraukšana.

- AE kontroles metode nodrošina tikai progresējošu, tātad, patiešām bīstamu defektu konstatēšanu un reģistrāciju, klasifikāciju nevis pēc izmēriem, bet pēc bīstamības pakāpes. Tas nozīmē, ka daži, apaļas formas defekti, kuru izmēri pārsniedz tradicionālo NK metožu brāķa līmeni, izmantojot AE metodi, var nonākt drošu defektu klasē, jo tie pastāv, taču objekta darba laikā tie neattīstās. Tas ļauj pamatoti atcelt objekta darbības apturēšanu un remontdarbus, kuri dažos gadījumos samazina objekta drošumu.

- Piemīt universāls raksturs attiecībā uz diagnosticējamā objekta izvēli, t.i., var bez ierobežojumiem var tikt izmantota jebkuru objektu diagnostikai, kuros iespējamo defektu diagnostikai var nodrošināt spiediena (slodzes) izmaiņu.

Otrajā nodaļā ir aprakstītas izmēģinājumu veikšanas metodikas un pielietotā AE aparatūra. Izmēģinājumos tika izmantoti trīs AE mēraparatūras kompleksi. Pirmais ir izveidots uz iekārtas AF-15 bāzes, otrais – uz PAC 3000/3004 bāzes, bet trešā mērīšanas sistēma ir P-DAQ/T-DAQ. Lai izpildītu izvirzītos uzdevumus, ir jāveic sinhrona AE signālu un pieliekamās slodzes vērtību ierakstīšana. Esošās AE iekārtas to nespēja nodrošināt. Lai atrisinātu šo uzdevumu, tika veikta iekārtas AF-15 modernizācija.

1.att. ir parādīta iekārtas AF-15 funkcionālā shēma pieslēgšanai pie personālā datora .



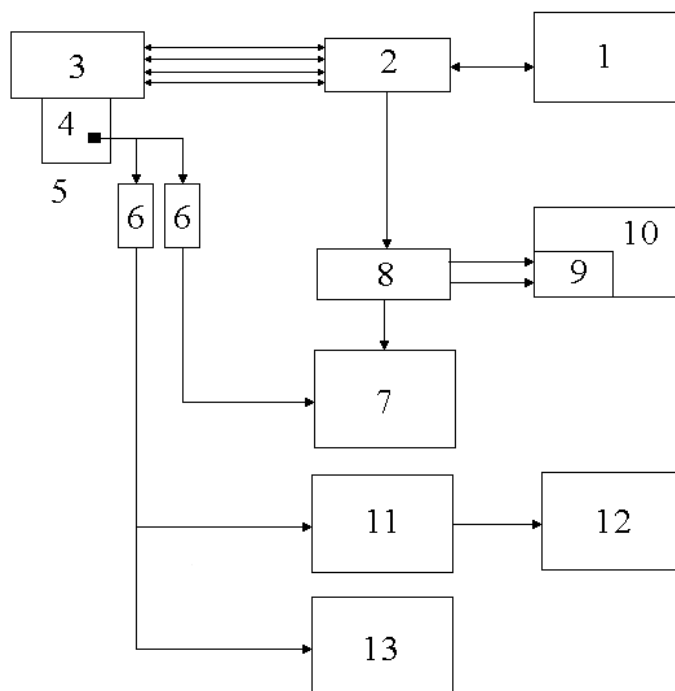
1.att. Modernizēta AE signālu mērīšanas kompleksa uz iekārtas AF-15 bāzes funkcionālā shēma.

1- AF-15, 2 – slodzes devējs, 3 – vadāms impulsu skaitītājs - dalītājs, 4 – bufera kaskāde 5 – salāgojošs pastiprinātājs, 6 – salāgošanas ierīce, 7 - personālais dators, 7.1 - ACP Lcard L-783, 7.2 - CAP Lcard L-783

Lai būtu iespējams veikt AE signālu un slodzes reģistrēšanu, programmēšanas valodā C++ tika uzrakstīta programma „Akusto”. Izstrādes vidē Borland 2007 tika izstrādāts lietotāja interfeiss. Ierakstīto signālu matemātiskai apstrādei tikai lietota programma Powergraph.

Paveikto darbu rezultātā tika novērsti galvenie iekārtas AF-15 trūkumi. Uz iekārtas AF-15 bāzes iegūtais AE mērīšanas komplekss atbilst mūsdienu AE aparatūrai uzstādāmajām prasībām.

2.att. ir parādīta AE iekārtu pieslēgšanas tipveida shēma izmēģinājumu veikšanai .



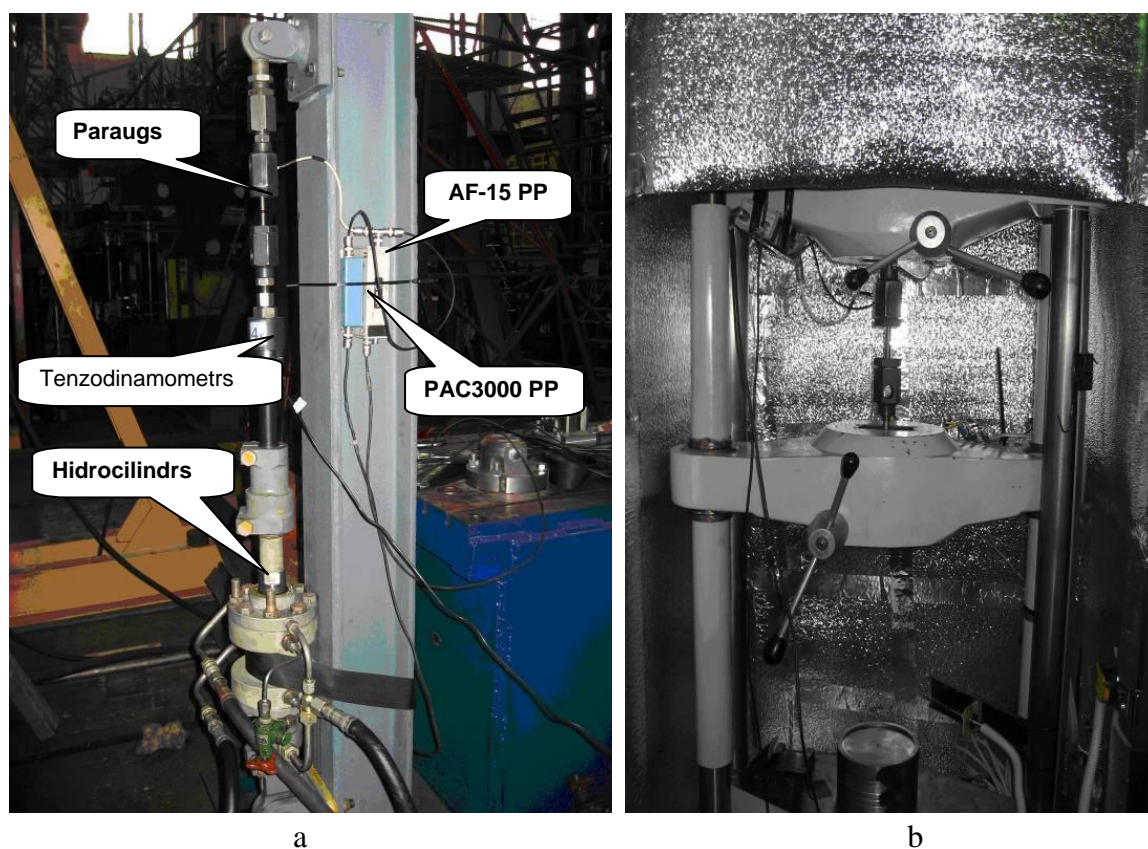
2.att. AE mēraparatūras pieslēguma shēma.

1- vadības sistēmas dators, 2-vadības sistēma, 3 – slodžu radīšanas hidrocilindri, 4 –izmēģinājumu objekts, 5-AE devējs, 6-priekšpastiprinātājs, 7- iekārta AF-15, 8-salāgošanas ierīce, 9-ACP Lcard L-783, 10 – AE reģistrācijai paredzētais dators, 11 – mērīšanas sistēma P-DAQ/T-DAQ, 12 – portatīvais dators, 13 – mērīšanas sistēma PAC 3000/3004.

### *Titāna paraugu ar stiprinātu virsmu izmēģinājuma stends un izmēģinājumu veikšanas metodika*

Lai veiktu paraugu noguruma pētījumus, tika konstruēta speciāla ietaise, kura ir parādīta 3a.att. Iekārta sastāv no statnes, hidrocilindra, kurš rada slodzi un tenzodinamometra ar tipu U93 (ražotājs ir kompānija HBM), ar kuru kontrolē pielikto slodzi.

Pēc noguruma pētījumu pārtraukšanas paraugus pakļāva monotonai stiepei līdz to sagraušanai. Šim nolūkam tika izmantota izmēģinājumu mašīna WPM, kura bija pilnveidota uzņēmumā AVIATEST (skat. 3b.att.). Parauga slogošana tika veikta ar pārvietojumu, veicot pieliktās slodzes kontroli.



3.att. Titāna paraugu izmēģinājumu iekārta (a), Izmēģinājumu mašīna WPM (b)

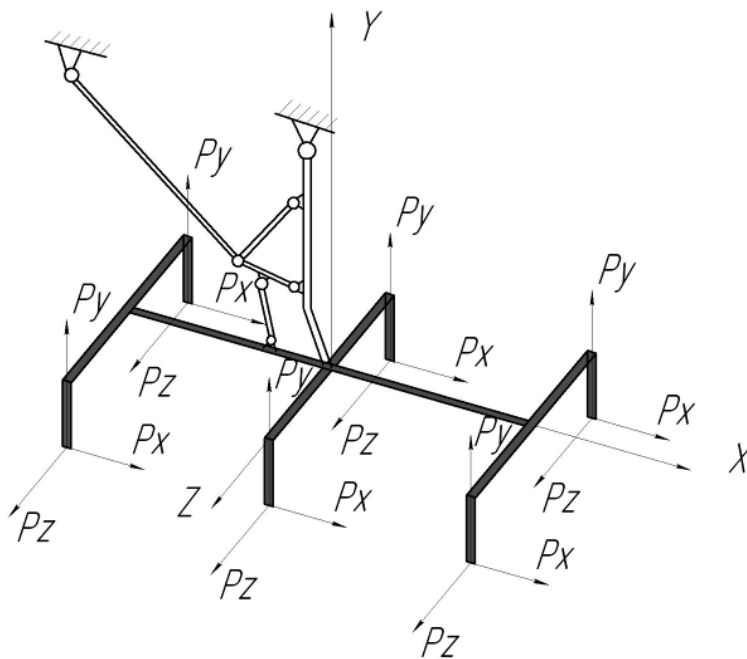
Izmēģinājumu paraugiem tika pielikta cikliska, nemainīgas zīmes slodze. Visu paraugu slogošanas frekvence bija 30 Hz. Katram paraugam pieliekamo slodžu vērtības tika kontrolētas pēc iepriekšējo izmēģinājumu rezultātiem. Lai cikliskā slogošanā varētu identificēt summārā AE skaita strauja pieauguma momentu ar materiāla iekšējās struktūras izmaiņām, paraugu izmēģinājumi tika pārtraukti pēc leņķu reģistrācijas summārās akustiskās emisijas atkarības no slogošanas ciklu skaita grafikā, pēc kā paraugi tika pakļauti monotonai stiepei līdz to sagraušanai. Pēc sagraušanas tika veikta lūzuma vietas fraktogrāfiskā izpēte. Paraugu stiepes ātrums bija 0.005 mm/s, lai stiepes procesa ilgums būtu apmēram 5 minūtes. Tik mazs slogošanas ātrums tika izvēlēts tādēļ, lai

materiāls varētu reaģēt uz stiepi visās zonās, kur tajā atradās spriegumu koncentratori, un, vispirms tur, kur hipotētiski izveidojas mikroplaisas virsma.

#### *Lidmašīnas TU-154 galvenā šasijas balsta izmēģinājumu stends un metodika*

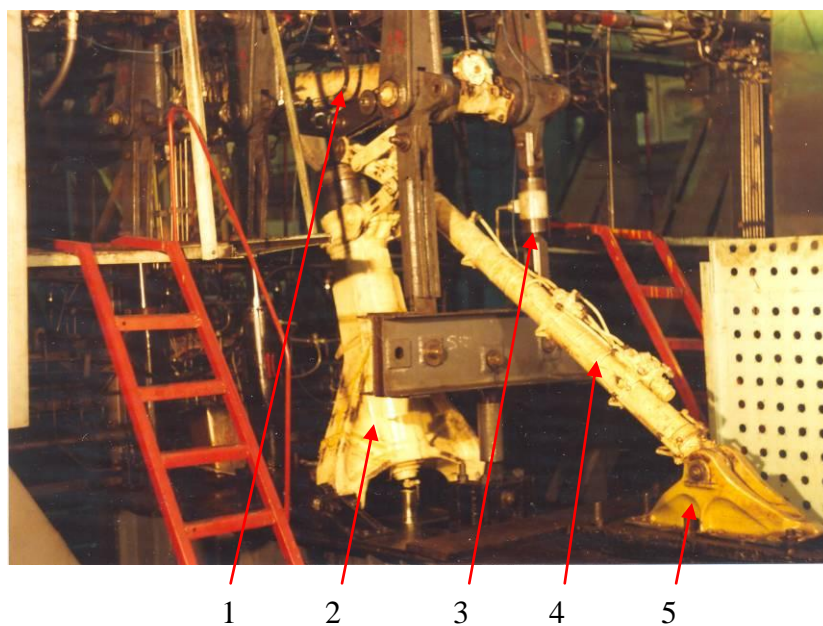
Šasijas izmēģinājumiem tika izmantots Rīgas zinātniski-eksperimentālā centra „AVIATEST LNK” stenda komplekss. Stends atbilstoši Eiropas lidaparātu daļu un mezglu noguruma izmēģinājumu standarta LV EN 450001 prasībām ir sertificēts Latvijas Nacionālajā Akreditācijas birojā un ir Latvijā vienīgais šāda veida stends.

Atkarībā no izvirzītajiem izmēģinājumu veikšanas uzdevumiem, stendā var realizēt dažādas slogošanas programmas. Šīs programmas var atšķirties ar iesaistīto slogošanas kanālu skaitu un pielikto slodžu virzienu un izmēru. Slodžu ietekmes darbības shēma uz šasijas balstu ir parādīta 4.att.



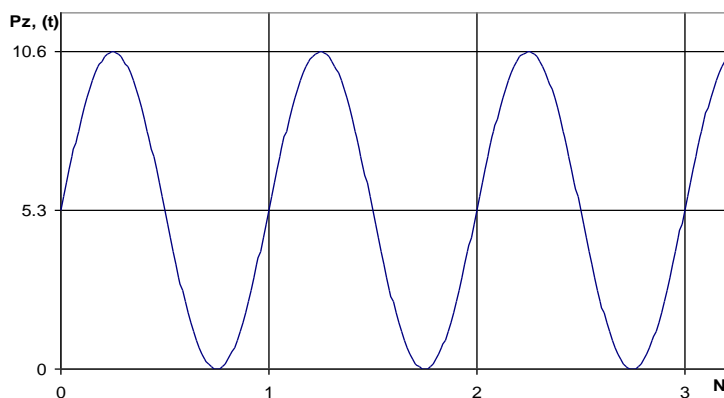
4.att. Slodžu ietekmes shēma uz šasijas galveno balstu .

Kopējais šasijas noguruma pētījumu stends ir parādīts 5.att. Stendā šasijas galveno balstu izvieto apgriezta stāvoklī un pie grīdas sliedēm piestiprina ar standarta kronšteinu palīdzību. Izmēģinājumu objekta slogošanu veica ar hidrocilindru palīdzību, kurus izvietoja uz speciāla rāmja; lai radītu uzdots slodžu spektru, hidrocilindru kāti tika savienoti ar dažādiem šasijas punktiem.



5.att. Kopējais šasijas izmēģinājumu stenda izskats. 1 – ratiņi; 2 – amortizators; 3 – slogošanas sistēmas hidrocilindrs; 4 – atgāznis; 5 – kronšteins.

Izmēģinājumu veikšanai no koncentratora, kurš tika novietots uz amortizatora kāta iekšējās virsmas, bija jāiegūst noguruma plaisa. Lai samazinātu plaisas rašanās laiku, tika izvēlēta šāda slogošanas programma – slogošana tika veikta ar pulsējošiem sānu spēkiem  $P_z = 0 \dots 10,6$  tonnas (6.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.



6.att. Slogošana ar pulsējošu sānu spēku ( $P_z = 0 \dots 10,6$  tonnas).

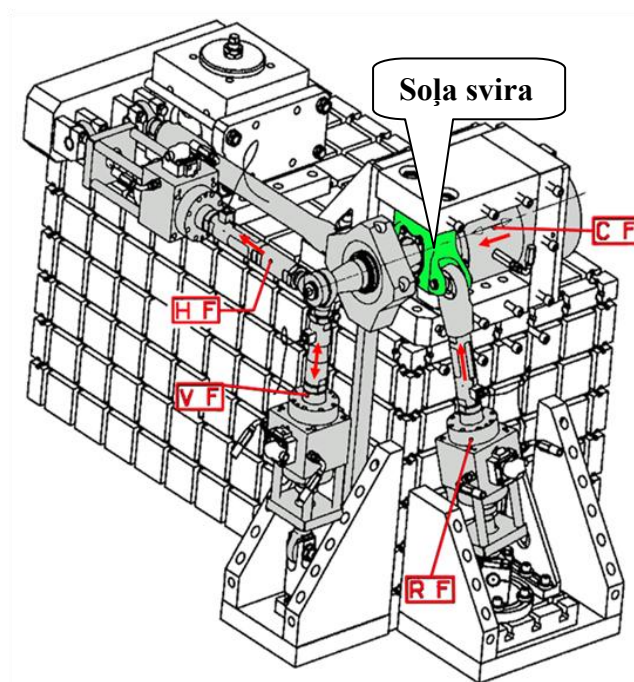
#### *Helikoptera gaisa skrūves soļa vadības sviras izmēģinājumu stends un veikšanas metodika*

Helikoptera gaisa skrūves vadības sviras izmēģinājumos tika izmantots Rīgas zinātniskā centra „AVIATEST LNK” stenda komplekss.

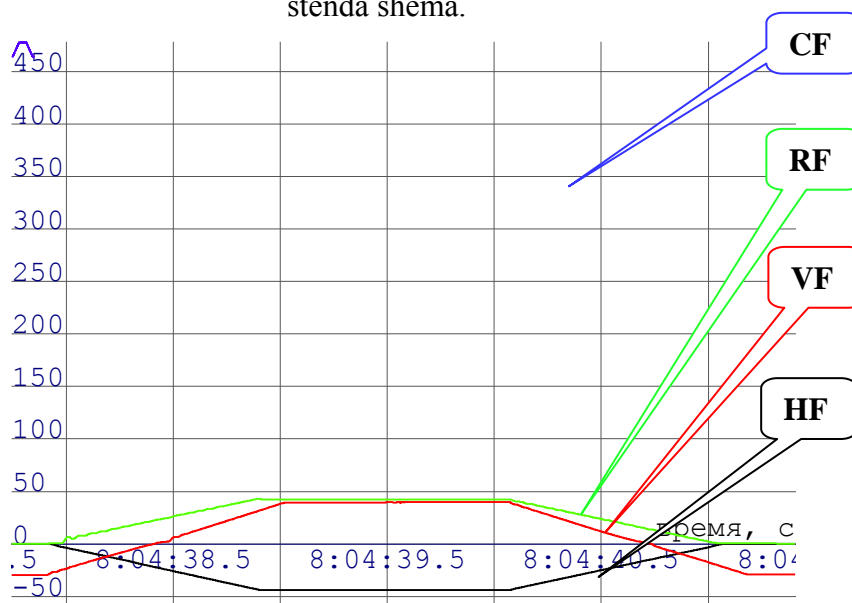
Lai pieliktu ar slogošanas programmu noteiktos spēkus, izmanto četrus hidrocilindrus: HF - horizontāls spēks (horizontal force), VF – vertikāls spēks (vertical force), RF – soļa saites spēks

(pitch link force), CF – centrbēdzes spēks (centrifugal force). 7.att. ir parādīta helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras izmēģinājumu stenda shēma, kurā ir norādīti katra hidrocilindra slodzes pielikšanas virzieni.

Izmēģinājumu objekta sloģošana tika veikta cikliski. Katram sloģošanas ciklam bija trapecveidīga forma un tas sastāvēja no četriem sloģošanas etapiem, skat. 8.att. 1.etaps – sagatavošanās sloģošana ( $t=1s$ ,  $HF=0kN$ ,  $VF=-29,43kN$ ,  $RF=0kN$ ,  $CF=0kN$ ), 2.etaps – sloģošana ( $t=1s$ ), 3.etaps – slodzes noturēšana ( $t=1s$ ,  $HF=-44,14kN$ ,  $VF=39,24kN$ ,  $RF=42,18kN$ ,  $CF=462kN$ ), un 4.etaps – atsloģošana ( $t=1s$ ). Kopējais viena cikla ilgums ir 4 sekundes.



7.att. Helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras noguruma izmēģinājumu veikšanas stenda shēma.



8.att. Slodzes pielikšanas ciklogramma helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības svirai .

Trešajā nodaļā ir aplūkots noguruma plaisas veidošanās kvantitatīvā novērtējuma modelis slogošanas ciklā pēc summārās AE. Tiek parādīts, ka modelī mikroplaisas rašanās etapā aprēķinos ir jāņem vērā to summārā AE katrā slogošanas ciklā, kura attiecas uz summārās AE palielināta pieauguma atkarību no slogošanas ciklu skaita ( $\alpha$ -kritērijs). Ir pierādīta summārās AE atkarības no slogošanas ciklu skaita grafika pirmā lūzuma punkta atbilstība noguruma plaisas rašanās momentam.

Kā zināms, cikliskas slogošanas procesā norisinās neatgriezeniskas materiāla struktūras izmaiņas. Šobrīd tiek vispārīgi pieņemts, ka noguruma bojājumu process ir saistīts ar plastiskās deformācijas attīstību, kura veicina submikroplaisu rašanos. Tās pakāpeniski pieaug un pārvēršas makroplaisās, kuras ir redzamas ar neapbruņotu aci.

Saskaņā ar kinētisko izturības koncepciju, katru deformācijas vai sagraušanas aktu pavada starpatomu saišu pārraušana ar noteikta enerģijas daudzuma izdalīšanos. Bojājumu uzkrāšanās un kolektīva starpatomu saišu pārraušana var radīt akustisku impulsu, kurš ir pietiekami liels, lai pārveidotājs varētu to reģistrēt. No tā izriet, ka katram materiāla struktūras bojājuma gadījumam atbilst primārs elastīgais impulss, kura izstarošanas process ir tā saucamais „AE akts”, bet AE aktu sekošanas ātruma izmaiņa ļaus novērtēt sagraušanas procesu norisi.

Pieņemsim, ka ģenerējamo AE impulsu skaits ciklā ir proporcionāls tai plaisas kustības procesā atbrīvotajai potenciālajai enerģijai  $U$ , kura pārvēršas vides kustības kinētiskajā enerģijā  $A_K$ , kura izsauc AE signālu pārveidotāja reakciju.

Vienādas zīmes saikne starp plaisas kustības procesā atbrīvoto kinētisko enerģiju un plaisas pieauguma ātrumu tika konstatēta, pamatojoties uz šādu analīzi.

Pieņemsim, ka plaisas virsma kādā slogošanas ciklā ieguva  $\delta S$ . Šis plaisas pieaugums rada potenciālās enerģijas atbrīvošanos.

$$\delta U = \frac{1-\mu^2}{E} K^2 \delta S \quad (1.1)$$

kur:  $E$  – materiāla elastības modulis;  $\mu$  - Puasona koeficients,  $K$  – spriegumu intensitātes koeficients (SIK) (tiek pieņemts, ka plaisa attīstās pēc normālas atrašanās mehānisma).

Atbrīvotā enerģija bieži tiek izmantota materiāla plastiskai deformēšanai, kura ir saistīta ar plastiskās zonas pārvietošanos. Šī enerģijas daļa ir proporcionāla plastiski deformēto slāņu tilpumam, kuri tieši piekļaujas pie no jauna izveidotai virsmai:

$$\delta A_p = \bar{\sigma}_i \bar{\epsilon}_i \cdot 2h \delta S \quad (1.2)$$

kur  $\bar{\sigma}_i$  un  $\bar{\epsilon}_i$  - norādīto slāņu spriegumu un deformāciju intensitāte,  $2h$  – slāņu biezums.

Ja stiepes diagrammas pakāpenisko atkarību pieņem par  $\sigma_i = \sigma_0 \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^m$ , kur  $m$  – stiprināšanas rādītājs,  $\sigma_0$  – plūstamības sliekšnis, bet, tad deformāciju sadalījumu plastiskajā zonā atkarībā no attāluma no plaisas virsotnes  $r$  var tuvināti aproksimēt ar izteiksmi:

$$\varepsilon_{i(r)} = \varepsilon_0 \left( \frac{r_p}{r} \right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (1.3)$$

kur:  $r_p$  – plastiskās zonas izmērs.

Rezultātā spriegumu un deformāciju plastiskajā zonā intensitātes vidējās vērtības noteiksim saskaņā ar vienādojumiem:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{r_p} \int_0^{r_p} \sigma_i(r) dr = (1+m)\sigma_0 \quad (1.4)$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{r_p} \int_0^{r_p} \varepsilon_i(r) dr = \frac{(1+m)}{m} \varepsilon_0 \quad (1.5)$$

Tā kā  $h \sim r_p$ ,  $\delta S = t \delta l$ , tad, izmantojot (1.2), (1.4), (1.5) plāksnei ar biezumu  $t$  iegūsim

$$\delta A_p = \beta \frac{(1+m)^2 \sigma_0^2}{m E} r_p t \delta l \quad (1.6)$$

kur  $\beta$  – konstante,  $\delta l$  – plaisas garuma pieaugums.

Tuvinātai novērtēšanai pieņemsim, ka:

$$r_p = \frac{K^2}{2\pi(1+m)\sigma_0^2} \quad (1.7)$$

un tādā gadījumā

$$\delta A_p = \frac{\beta}{2\pi E} \frac{1+m}{m} t K^2 \delta l \quad (1.8)$$

Ja (1.1) un (1.8) ievieto enerģijas saglabāšanas vienādojumu

$$\delta U = \delta A_k + \delta A_p,$$

tad nākošajā pārejā no ciklu skaita  $n$  uz nepārtrauktām funkcijām rezultātā iegūsim cikla kinētiskās enerģijas noteikšanas vienādojumu:

$$\frac{dA_k}{dn} = \beta_0 t K^2 \vartheta \quad (1.9)$$

kur  $\vartheta = \frac{dl}{dn}$  – plaisas pieauguma mikroskopisks ātrums, kurš ir vienāds ar tās pārvietošanos konkrētā ciklā,  $\beta$  – materiāla konstante, kuru nosaka pēc vienādojuma .

Pieņemot, ka Perisa likums saglabājas arī pie maziem noguruma plaisas pieauguma ātrumiem un, ja tajā izmanto vidējo mikroskopisko ātrumu, tad  $K$  var izteikt šādā veidā:

$$K = \frac{1}{C} \vartheta^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1.10)$$

Pieņemot pakāpes atkarību

$$N_{\Sigma c} \sim \left( \frac{dA_k}{dn} \right)^C, \quad (1.11)$$

iegūsim patieso saikni starp summāro AE skaitu ciklā  $N_{\Sigma c}$  un plaisas pieauguma vidējo mikroskopisko ātrumu  $v$ :

$$N_{\Sigma c} = \beta_1 \left( 1 - \beta_2 v^{\frac{2}{(1+m)\alpha}} \right) v^{(1+\frac{2}{\alpha})} \quad (1.12)$$

kur  $\beta_1$  un  $\beta_2$  – konstantes, kuras iegūst eksperimentālā ceļā,  $\alpha$  un  $C$  – materiāla konstantes.

Funkciju (1.12) var pierakstīt vienkāršotā veidā

$$v = \frac{B}{t^C} N_{\Sigma c}^{\frac{\alpha}{\alpha+2C}} \quad (1.13)$$

kur  $B$  – konstante, kura ir atkarīga no elastīgajām konstantēm, stiprinājuma koeficienta un Perisa likuma konstantēm.

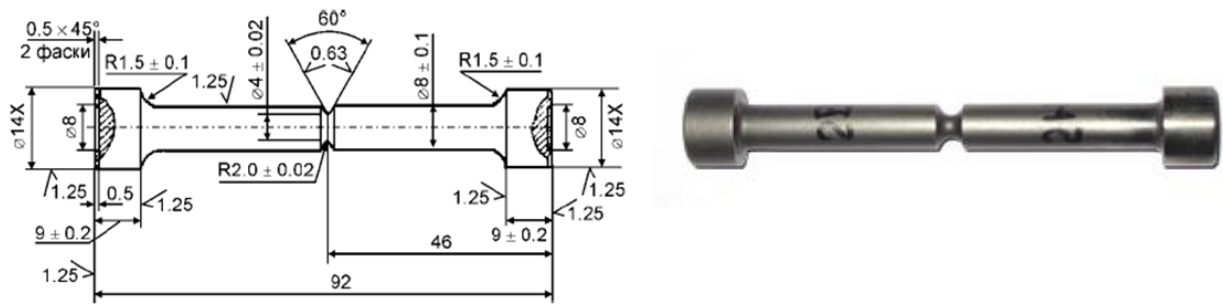
Iegūtajai attiecībai praktiski jābūt neatkarīgai no plaisas tipa, jo tips lielākoties nosaka plastiskās deformēšanās raksturu. Attiecībā uz sagraušanas procesu un tā radītajiem AE signāliem materiālā, var apgalvot, ka saišu sagraušanas starp plaisas pretējām malām raksturu, veidojoties jaunai virsmas plaisai, nosaka tikai materiāla īpašības.

Augstāk aplūkotajā modelī (1.13) figurē tāds parametrs kā summārā AE slogošanas ciklā  $N_{\Sigma c}$ . No tā izriet jautājums, kuri slogošanas cikli ir jāņem vērā plaisas pieauguma ātruma aprēķinā slogošanas ciklā pēc summārās AE? Pastāv tāda teorija, pēc kuras noguruma plaisu attīstībai ir pakāpenisks raksturs. Šo etapu sākumu nosaka pēc  $\alpha$ -kritērija – summārās akustiskās emisijas atkarības no slogošanas ciklu skaita grafika lūzuma punktiem. Tādēļ varam pieņemt, ka aprēķinot noguruma plaisas pieauguma ātrumu, ir jāņem vērā tikai tie slogošanas cikli, kuros atrodas summārās AE pasātināta pieauguma etapi.

Tiek uzskatīts arī, ka pirmais  $\alpha$ -kritērijs – ir viens no noguruma plaisas rašanās kritērijiem pielietojot AE metodi. Tomēr līdz pat šim brīdim nav pierādīts, ka uzreiz pēc tam, kad akustogrammā tiek fiksēts minētais kritērijs, metālā ir radusies plaisa.

Lai apstiprinātu šos faktus, tika veikti titāna sakausējuma BT3-1 paraugu ar stiprinātu virsmu sērijas noguruma izmēģinājumi, lai būtu iespējams izpētīt noguruma plaisu parādīšanās likumsakarības un iegūtu noguruma  $\alpha$ -kritērija atbilstību noguruma plaisas parādīšanās momentam.

Pārbaudīto paraugu ģeometrija un ārējais izskats ir parādīti 9.att.



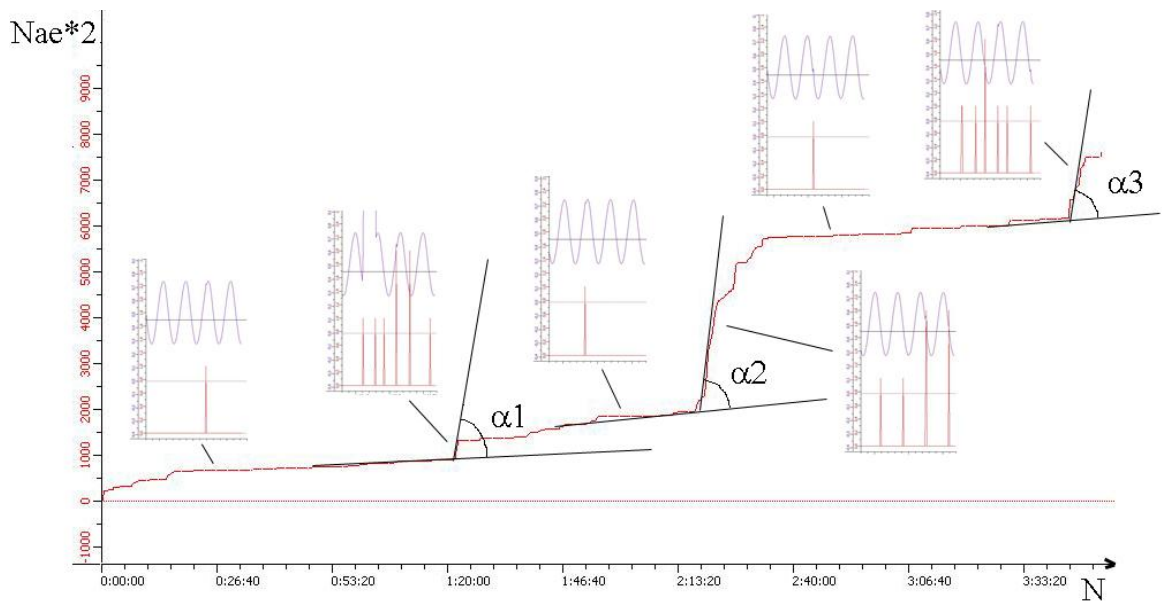
9.att. Izmēģinājumā lietoto paraugu ģeometrija un ārējais izskats.

Noguruma plaisu parādīšanās AE kontroles rezultāti tika attēloti kā summārās AE atkarības no slogošanas ciklu skaita grafiki un AE signālu intensitātes un pieliktās slodzes sinhronā ieraksta fragmenti. Viens no šiem grafikiem ir parādīts 10.att. Šī parauga lūzuma vietas fraktogrāfiskās izpētes rezultāti ir parādīti 11.att.

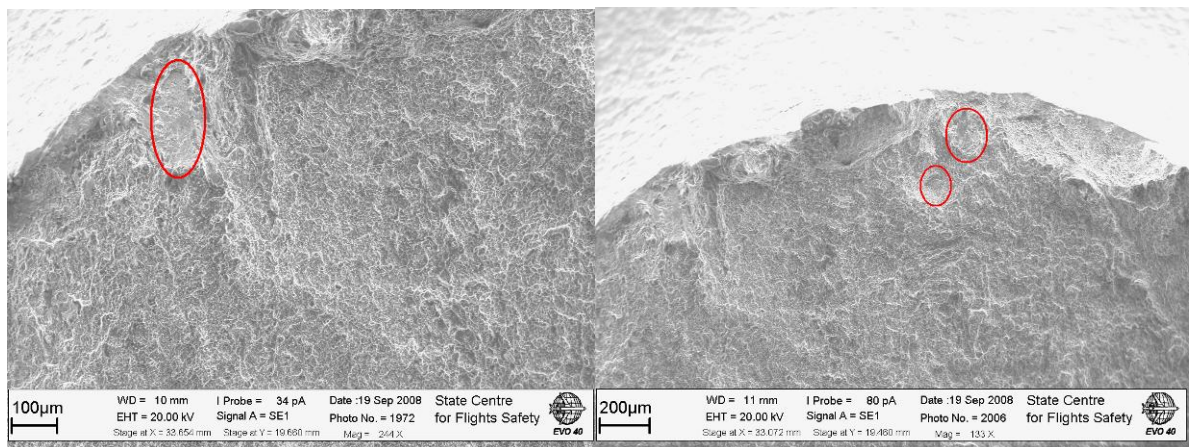
Paraugu lūzumu fraktogrāfisko pētījumu rezultātā tika noteikts, ka paraugos tika imitēts tipisks lūzums ar plastiskās deformācijas radītiem nošķēlumiem, kuri parasti ir novērojami monotoni stieptu paraugu viskozā sagraušanā. Lūzums vidusdaļā ir plakans un uz parauga virsmas ir nošķēlumi.

Tika konstatēts, ka visu paraugu vidusdaļā ir izveidojies lūzuma reljefs ar koncentriskām bedrītēm. Analogisks reljefs izstieptu bedrīšu veidā bija izveidots plastiskās deformācijas nošķēlumos.

Turklāt uz katra parauga virsmas vai nelielā attālumā no virsmas tika konstatētas nelielas kvazitrauslas materiāla sagraušanas zonas. Tieši šī lūzuma posmi atspoguļo to faktu, ka parauga materiālā jau ir radusies neizturīga materiāla zona, kura tika reģistrēta pēc  $\alpha$ -kritērija, pamatojoties uz summāro signālu uzkrāšanos. Tādā veidā, summārās AE atkarības no slogošanas ciklu skaita grafika lūzuma punkts ( $\alpha$ -kritērijs) tiek identificēts kā mikroskopisku izmēru noguruma plaisu rašanās moments. Atsevišķos gadījumos cikliskas slogošanas procesā akustiskās emisijas atkarības no slogošanas ciklu skaita grafikā var būt novērojami vairāki leņķi  $\alpha$  (skat. 10.att.) Šo paraugu lūzumu fraktogrāfiskās izpētes rezultāti parādīja, ka leņķu  $\alpha$  skaits atbilst izveidojušos noguruma mikroplaisu skaitam (skat. 11.att.).



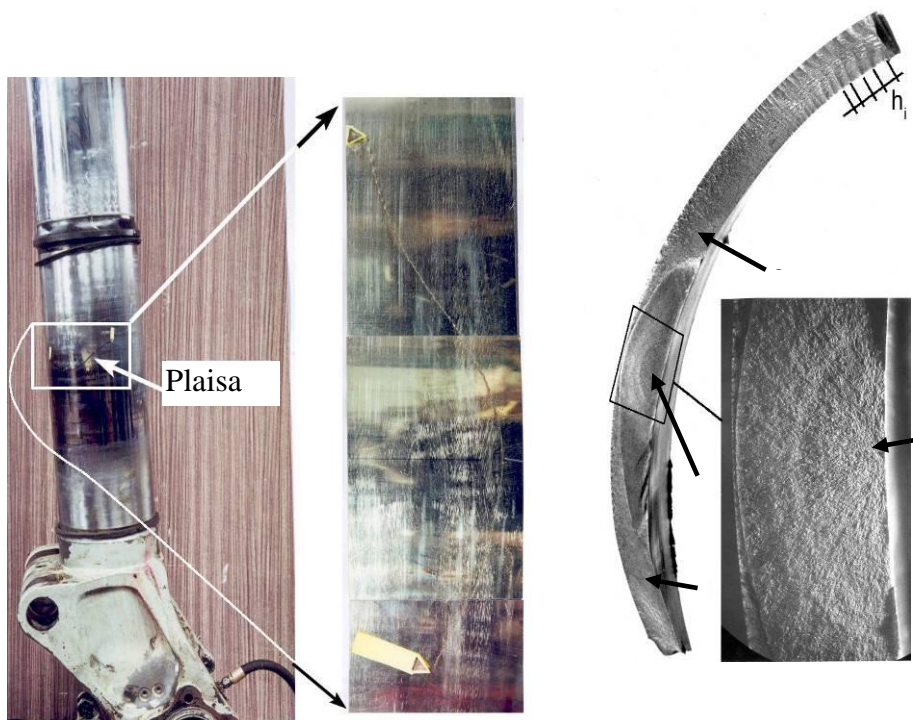
att.10. Summārās AE  $N_{AE}$  atkarības no slodzes ciklu skaita  $N$  grafiks  
(Darbība 415104 cikli)



att.11. Lūzuma vietas fraktogrāfiskās izpētes rezultāti

Ceturtajā nodaļā tiek aprakstīta lidmašīnas TU-154 šasijas galvenā balsta noguruma izmēģinājumu process. Izmēģinājumu objekta tehniskā stāvokļa kontroli veic ar AE metodi. Pamatojoties uz paveikto eksperimentu, tika izstrādāta AE metodes pielietošanas aviācijas spēka konstrukciju stenda izmēģinājumu metodika un noguruma plaisas pieauguma konstrukciju cikliskos pētījumos ar AE metodi novērtējuma metodika. Izstrādāto metodiku aprobācija tika veikta helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras izmēģinājumos.

Šasijas galvenā balsta izmēģinājumos, kuru laikā tika pētīti atgāžņa-pacēlāja cilpu noguruma parametri, uz amortizatora kāta virsmas parādījās C-veidīga caurejoša plaisa (skat. 12.att.)



12.att. Plaisa uz amortizatora kāta

Fraktogrāfiskajos pētījumos tika konstatēts, ka plaisai ir noguruma raksturs un tās avots bija materiāla lokāla starpgraudu sabrukšana.

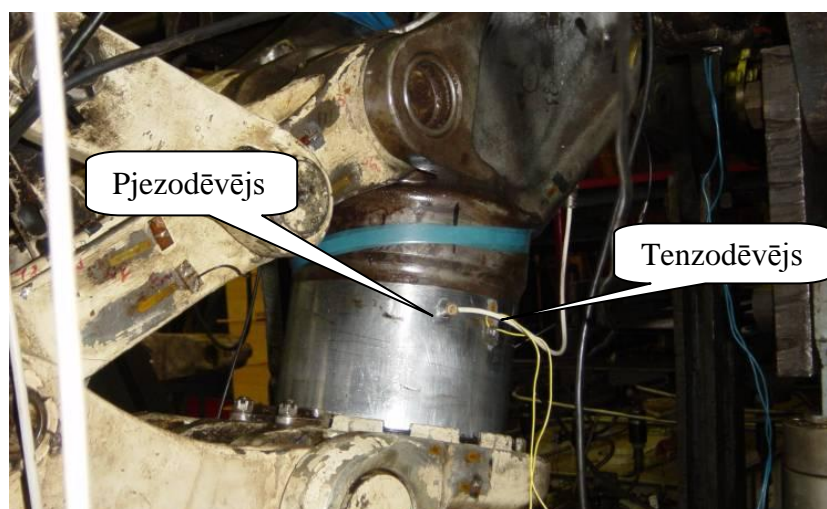
Sakarā ar augsto amortizatora kāta sabrukšanas bīstamību ekspluatācijas apstākļos, tika turpināta šāda defekta attīstības novērtēšanas un tā konstatēšanas iespēju pētījumi. Šim nolūkam amortizatora kāta konstrukcijā tika ievadīts mākslīgs defekts – koncentrators. Koncentratoru amortizatora kātā ievadīja tajā vietā, kur iepriekšējo noguruma pētījumu laikā bija parādījusies noguruma plaisa. Tas bija iezāģējums ar garumu 21 mm un platumu 8 mm (13.att.)

Tā kā tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu pielietošana bez mezgla izjaukšanas bija ierobežota, tad kā galveno 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.



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

Kā AE devējs tika lietots pjezodevējs. Pjezodevējs tika uzlīmēts uz amortizatora kāta virsmas tajā vietā, kura atrodas ārpus cilindra (14.att.). Lai sinhronizētu AE informāciju ar sloģošanas procesu, tika izmantots tenzodevējs, kuru uzlīmēja pieliekamās slodzes maksimālas jūtības zonā.

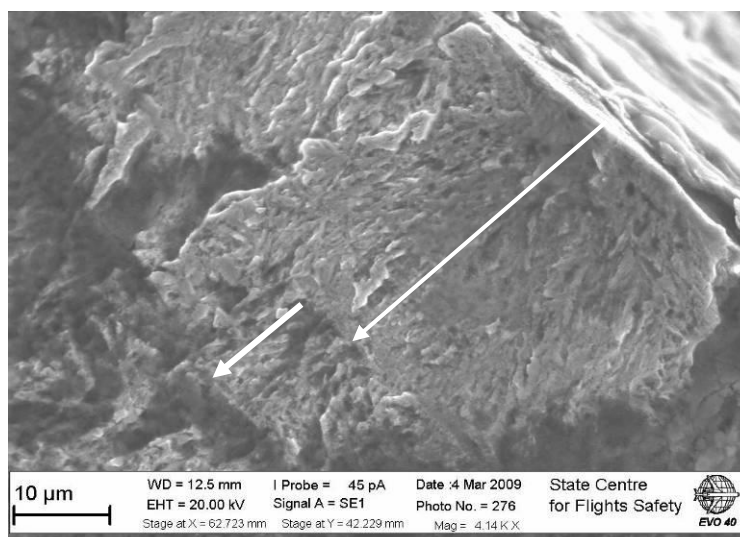


14.att. Pjezodevējs un tenzodevēja izvietojums uz amortizatora kāta virsmas.

Pēc 3550 sloģošanas ciklu nostrādes amortizatora kātā ar US kontroles metodi tika konstatēta noguruma plaisa ar izmēriem 0,6...1,7 mm. Lai iegūtu pārlicinošu 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.

Fraktogrāfiskās analīzes rezultāti parādīja, ka maģistrālā plaisa ir radusies no liela avotu skaita gar iezāģējuma virsotni.

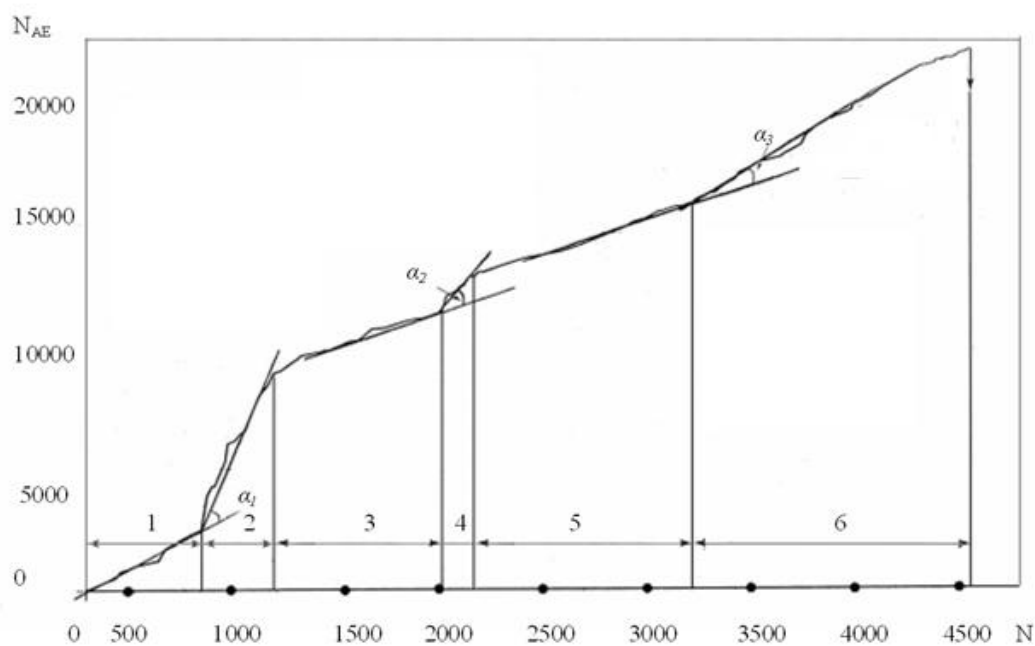
Sākuma etapā aptuveni 30  $\mu\text{m}$  dziļumā izplatījās daudz plaisu, kuras bija radušās patstāvīgi. Tās izveidoja pakāpju kaskādi, kuras norāda uz sākotnējo sabrukšanas zonu tuvināšanos, kuras parādījās kātā gar koncentratoru. Detalizēta analīze pie liela mikroskopa palielinājuma parāda (15.att.), ka sākumā mezotuneļu robežās norisinājās plaisu kaskādes attīstība, pēc kā plaisu pieauguma ātrums samazinājās. No straujas plaisas pieauguma ātruma samazināšanās robežas notika atkārtota intensīva sabrukuma attīstība, kas atspoguļojas lūzuma raupjuma pieaugumā. 15.att. ar bultiņām ir parādīti pirmo divu plaisas pieauguma zonu izmēri ar dažādiem ātrumiem līdz paātrinājuma maiņas robežai sabrukuma attīstības gaitā.



15.att. Šasijas statnes sagraušanas lūzuma sākotnējā etapā fragmenti.

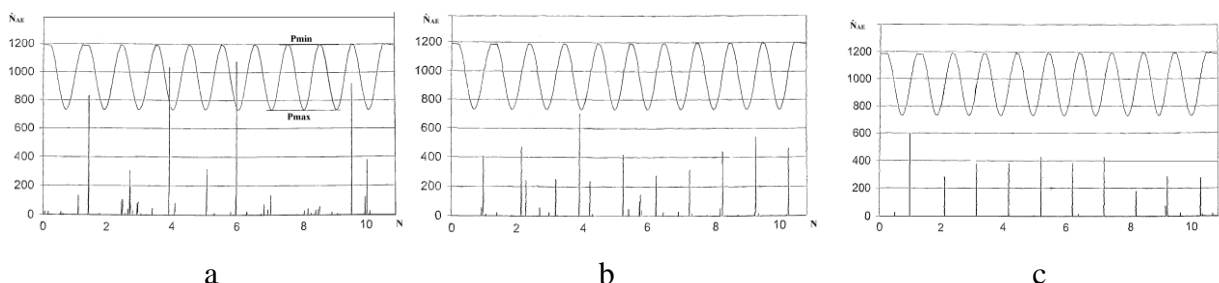
Veiktā izpēte parāda, ka amortizatora kāta plaisas attīstības apstākļos ir bijušas vismaz divas straujas pārejas: (1) sākotnējā plaisu formēšanās aptuveni 30  $\mu\text{m}$  dziļumā ar sekojošu to apstāšanos; (2) sekojoša plaisu rašanās un plaisu attīstība autonomos mezotuneļos. Tālāk norisinājās platu mezotuneļu apvienošanās vienā maģistrālajā plaisā. Maģistrālās plaisas pieauguma procesā notika paātrinājumi tās vidējā daļā, kur plaisas dziļums bija vislielākais, kā arī tās malās.

Summārās AE izmaiņas grafiks  $N_{AE}$  atkarībā no ciklu skaita, kurš iegūts ar iekārtu AF-15, ir parādīts 16.att.



16.att. Summārās AE  $N_{AE}$  atkarības no slogošanas ciklu skaita  $N$  grafiks.

Grafikā ir skaidri izšķirami 3 etapi ar lēnu (1., 3. un 5.) un 3 etapi ar ātru (2., 4. un 6.) AE impulsu uzkrāšanos. 1., 3. un 5. etapam ir raksturīga sporādiska AE signāla parādīšanās; 2., 4. un 6. etapā (šīs zonas ir apzīmētas ar leņķiem  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  un  $\alpha_3$ , kuri raksturo summārās AE  $N_{AE}$  izmaiņas) AE impulsi parādās praktiski katrā slogošanas ciklā, tomēr katram etapam ir savas to parādīšanās īpatnības. Sinhronā slodzes un AE signālu vērtību ieraksta fragmenti ir parādīti 17.att.



17.att. Slodzes  $P$  un AE intensitātes izmaiņas sinhronais ieraksts.

a –  $N' > 1200$  cikli; b –  $N' > 2000$  cikli; c –  $N' > 3000$  cikli.

Ir jāatzīmē, ka plaisas attīstības procesam ir diskrēts raksturs, t.i., plaisas lēna pieauguma etapus, kuros plaisa pieaug atsevišķos slogošanas ciklos, nomaina etapi ar ātru tās pieaugumu – plaisa palielinās visos šo etapu ciklos. Tādu etapu maiņu var izskaidrot ar enerģijas uzkrāšanās un atbrīvošanās procesiem starpatomu un starpdislokāciju saitēs: uzkrātās enerģijas atbrīvošanas process (starpatomu un starpdislokāciju saišu spēku darbs) tiek realizēts plaisas pieauguma gaitā.

Izmēģinājumu sākuma stadijā (16.att., 1.etaps) visdrīzāk AE signālu uzkrāšanās ir saistīta ar atsevišķu dislokāciju sākotnējo kustību, kurām šai kustībai nav nepieciešama ievērojama enerģija. Iespējams, ka dislokāciju zonas var būt izvietotas dažādās pētāmā objekta daļās. Kopumā ir skaidrs, ka šajā etapā norisinās enerģijas uzkrāšanas process un pastiprinās spriegumu sadalījuma nevienmērības atkarība no sākotnējiem pētījumu objekta materiāla struktūras defektiem. Tā kā vislielākā materiāla īpašību nevienmērība ir lokalizēta koncentratoru zonā (konstruktīvi, mākslīgi vai parādījušies objekta ekspluatācijas gaitā), tad tieši šeit rodas vislielākā spriegumu sadalījuma nevienmērība.

Pēc kritiskās spriegumu vērtību sasniegšanas, kad tie pārspēj materiāla ar dislokācijām atomu režģī stabilā stāvoklī noturošos spēkus, notiek dislokāciju savstarpējo saišu pārraušana un to kustība – šis ir noguruma mikroplaisas rašanās moments. Dislokāciju kustības procesu pavada intensīva AE signālu ģenerācija, kuru var novērtēt ar parametru, kuru sauc par  $\alpha$ -kritēriju un kuru 16.att., 2.etapā raksturo leņķis  $\alpha_1$ . Pie tam ir jāņem vērā dažas īpatnības: pirmkārt, plaisa pieaug praktiski katrā slogošanas blokā (ciklā); otrkārt, mikroplaisa pieaug pateicoties cikliskas slogošanas rezultātā, kā arī 1.etapā uzkrātās enerģijas dēļ un, treškārt, iespējama divu vai vairāku mikroplaisu rašanās, kas šajā etapā atspoguļojas kā vairāki lūzuma punkti. Paveiktās AE analīze

slogošanas ciklos liecina par jaudīgu AE signālu parādīšanos atsevišķos ciklos – šo parādību kopā ar  $\alpha$ -kritēriju var izmantot mikroplaisas rašanās indikācijai.

Kad dislokāciju saķeres spēki izrādās lielāki par slodzēm, tie tiecas turpināt to kustību, noguruma plaisas pieauguma ātrums sāk bremsēties un tās attīstība praktiski apstājas – tas ir defekta attīstības nākamais etaps (16.att. 3.etaps). Tāpat kā sākuma etapā slogošanas enerģija galvenokārt tiek patērēta nevis plaisas virzības darbam (plaisa pieaug tikai atsevišķos slogošanas ciklos), bet gan, lielākoties, tiek uzkrāta dislokācijas zonās ap plaisu.

Tālāk process atkārtojas: sasniedzot jaunu kritisko stāvokli, plaisa sāk saskarties un atkal palielinās. 16.att. tas ir 4.etaps, kuru raksturo leņķis  $\alpha_2$ . Šī etapa īpatnība ir tāda, ka plaisa pieaug katrā slogošanas ciklā. Tālāk atkal seko bremsēšanās etaps, kurā plaisas attīstības ātrums strauji samazinās, 16.att. 5.etaps.

Šādi apstāšanās un plaisas attīstības etapi vispārējā gadījumā var būt vairāki – tas ir atkarīgs no metāla parametriem, tā bojājumu pakāpes, pielikto slodžu līmeņa un rakstura u.t.t. Dažreiz apstāšanās un sekojoša pieauguma etapus izdalīt ir grūti. Šī etapa (vai etapu) īpatnība ir mikroplaisas pārvēršanās mezoplaisā. Jāatzīmē, ka pastāvošās nesagraujošās kontroles metodes neļauj noteikt mikro- vai mezoplaisu klātbūtni materiālā – tās var identificēt ar metodēm, kuru realizācijai nav nepieciešams sagraut detaļu.

Noslēdzošo plaisas attīstības etapu raksturo mezoplaisas pārvēršanās makroplaisā – makroplaisu definē kā plaisu, kuru iespējams identificēt ar tradicionālajām nesagraujošās kontroles metodēm (vizuāli optiskās, ultraskaņas, magnētiskā pulvera metodes utt.) 16.att. tas ir 6.etaps, kuru raksturo leņķis  $\alpha_3$ . Plaisa, tāpat kā iepriekšējos plaisas paātrinātas attīstības etapos, pieaug katrā slogošanas ciklā.

Dažreiz summārās AE  $N_{AE}$  raksturīgā pieauguma zonu nofiksēt  $\alpha$ -kritēriju ir samērā sarežģīti. Šajā gadījumā var būt noderīga AE aktivitāte  $N'$  (piemēram skat. 17.att.).

Īpaši svarīga ir makroplaisas indikācija. Šo momentu pēc  $\alpha$ -kritērija noteikt ir pietiekami sarežģīti: piemēram, 16.att. parādītajā variantā  $\alpha_3 < \alpha_2 < \alpha_1$ . AE signālu ģenerācijas cikliskos noguruma izmēģinājumos ļauj noguruma plaisas pārejas no mezoplaisas makroplaisā identifikācijai ieteikt AE aktivitātes stabilitātes koeficientu  $N'$  slogošanas ciklā, kuru raksturo divi faktori: AE intensitātes līmeņa stabilitāte un fāzes stāvoklis attiecība uz pielikto ciklisko slodzi  $P$  (skat. 17.att, c).

Pamatojoties uz veiktajiem pētījumiem, tika saņemts Latvijas Republikas patents Nr.13853 „Noguruma plaisas pieauguma novērtēšanas paņēmieni konstrukciju cikliskajās pārbaudēs”. Izgudrojums attiecas uz mērīšanas tehniku, izstrādājumu kontroles un diagnostikas paņēmieniem, kuros izmanto AE metodi. Piedāvāto paņēmieni var izmantot arī dažādu

konstrukciju noguruma izmēģinājumos ar pastāvīgas zīmes ciklisku slodzi ar mērķi novērtēt noguruma plaisu pieauguma kinētiku, kā arī cikliskas darbības mašīnu tehniskā stāvokļa kontrolē un diagnostikā. Noguruma plaisas pieauguma novērtēšanu konstrukcijās veic ciklisku izmēģinājumu ar pastāvīgas zīmes slodzi procesā. Izmēģinājumu gaitā sinhroni reģistrē AE signāla līmeņa un slodzes vērtības. Pie tam katrā slogošanas ciklā nosaka AE signāla stāvokli. Momentu, kurā plaisa sasniedz uzdotos izmērus, novērtē pēc AE signāla intensitātes līmeņa un AE signāla stāvokļa stabilizācijas slogošanas ciklā.

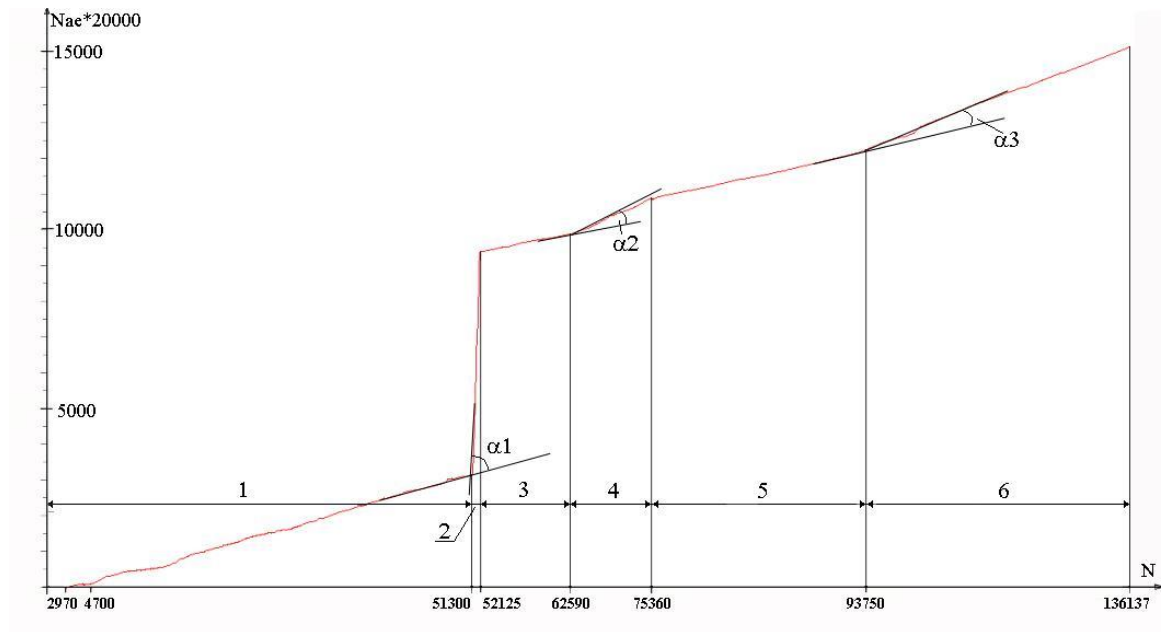
Ir izstrādāta „AE metodes pielietošana aviācijas konstrukciju stenda izmēģinājumu veikšanā”, kura ieviesta Rīgas zinātniski eksperimentālajā centrā „AVIATEST LNK”.

Lai apstiprinātu izstrādāto metodiku efektivitāti, bija nepieciešams veikt to aprobāciju, veicot kādas spēka konstrukcijas stenda noguruma izmēģinājumus. Aprobācija tika veikta helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras noguruma izmēģinājumos. Gaisa skrūves soļa vadības svira ir sasveres automāta – mehānisma helikoptera dzenošās skrūves vadības sistēmā sastāvdaļa, kura paredzēta lāpstiņu iestatījuma leņķu maiņai. Lai kontrolētu noguruma plaisas rašanos un pieaugumu, tika izmantota AE metode, kā arī tika veikta izmēģinājumu objekta periodiska vizuāla kontrole. Gaisa skrūves vadības sviras izmēģinājumi tika veikti līdz noguruma plaisas konstatēšanai ar vizuālu metodi.

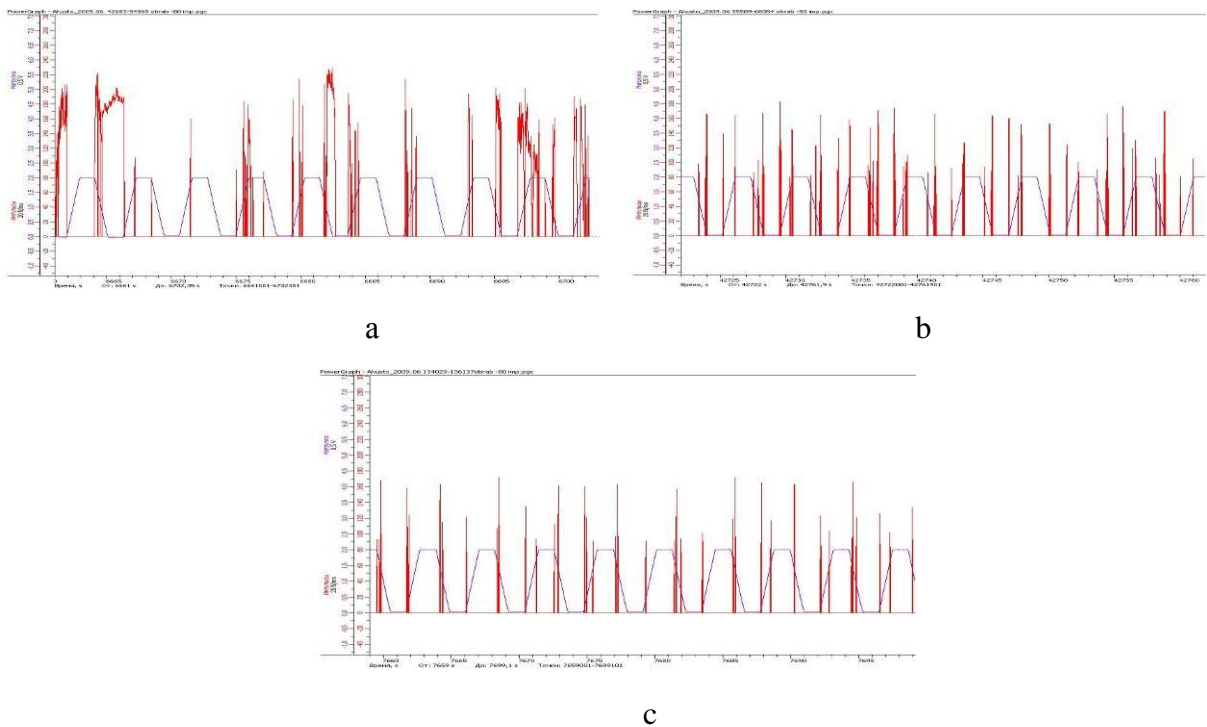
Noguruma izmēģinājumi tika pārtraukti pēc 136137 ciklu nostrādes pēc 15 mm garas noguruma plaisas konstatēšanas ar vizuālo metodi. Helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras tehniskā stāvokļa AE kontroles rezultāti grafika veidā ir parādīti kā summārās AE atkarība no slogošanas ciklu skaita (18.att.) un AE intensitātes un pieliktās slodzes sinhrono ierakstu fragmenti (CF kanāls), 19.att.

Summārās AE atkarības no slogošanas ciklu skaita helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras izmēģinājumos grafika (18.att.) analīze parādīja, ka tas ir ļoti līdzīgs lidmašīnas TU-154B šasijas galvenā balsta summārās AE atkarības no slogošanas ciklu skaita grafikam (16.att.) 18.att. parādīto grafiku, kā arī 16.att. parādīto grafiku var sadalīt sešos etapos, kurus raksturo dažāds summārās AE pieauguma ātrums. Grafikā (18.att.) ir skaidri redzami 3 etapi ar lēnu (1., 3. un 5.etapi) un 3 etapi ar ātru (2., 4. un 6.etaps) AE impulsu uzkrāšanos. 1., 3. un 5.etapu raksturo sporādiska AE signālu parādīšanās; 2., 4. un 6.etapā (šīs zonas ir apzīmētas ar leņķiem  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  un  $\alpha_3$ , kuras raksturo summārās AE  $N_{AE}$  izmaiņas ātrumu) AE impulsi parādās praktiski katrā slogošanas ciklā, tomēr katram etapam piemīt savas to parādīšanās īpatnības.

Iegūto AE datu analīze, lūzuma vietas fraktogrāfiskās izpētes rezultāti, kā arī lidmašīnas TU-154B šasijas galvenā balsta izmēģinājumos iegūtie rezultāti ļauj uzskatīt, ka AE signālu veidošanās likumsakarība un noguruma plaisas attīstības etapi ir izskaidrojami ar tiem pašiem procesiem, kuri novēroti šasijas pamata balsta izmēģinājumos.



18.att. Summārās akustiskās emisijas atkarības no slodzes ciklu skaita grafiks.



19.att. Slodzes  $P$  izmaiņas un AE intensitātes  $N'$  izmaiņas sinhronais ieraksts

a – 2.etaps; b – 4.etaps; c – 6.etaps.

19.att. ir parādīti AE intensitātes un pieliktās slodzes (CF kanāls) sinhrono ierakstu fragmenti etapiem Nr.2, Nr.4 un Nr.6. Etapā Nr.2 (18.att), kurš ir noguruma mikroplaisas rašanās etaps, mēs redzam, ka AE intensitāte ir ļoti liela, un var teikt, ka tai ir „sprādzienveidīgs raksturs”, bet AE impulsu parādīšanās biežumam ir stohastisks raksturs. Etapā Nr.4 (18.att.),

kurā turpinās mikroplaisas pieaugums un pēc tā beigām, var izdarīt pieņēmumu, ka mikroplaisa pāriet mezoplaisā un mēs redzam, (19.att.b), ka AE intensitāte salīdzinājumā ar etapu Nr.2 ir samazinājusies, bet AE impulsi parādās katrā složošanas ciklā, tomēr to lielumam un parādīšanās biežumam ir gadījuma raksturs. Etapā Nr.6 (18.att.) mēs redzam (19.att.c), kā AE impulsu virzība un intensitāte attiecībā pret pieliekamo slodzi stabilizējās, kas saskaņā ar „Noguruma plaisas pieauguma novērtēšanas paņēmienam konstrukciju cikliskajās pārbaudēs” ir pazīme tam, ka mikro(mezo) plaisas pāriet makroplaisā.

## Secinājumi

1. Tika paveikta AE iekārtas AF-15 modernizācija. Datu reģistrācijas iekārta AF-15 ir pieslēgta personālajam datoram, kā arī parādījusies iespēja veikt sinhronu AE parametru un pieliktās slodzes parametru sinhronu ierakstu.

2. Tika veikti noguruma plaisu parādīšanās likumsakarību pētījumi un ir iegūta  $\alpha$ -kritērija atbilstība noguruma plaisas parādīšanās momentam. Pēc pētījumu rezultātiem ir izdarīti šādi secinājumi:

- summārās AE atkarības no složošanas ciklu skaita līknes lūzuma punkts ( $\alpha$ -kritērijs) ir identificējams kā mikroskopisku izmēru noguruma plaisas rašanās moments;

- ja izmēģinājumu sākotnējā etapā summārās akustiskās emisijas atkarības no složošanas ciklu skaita grafikā ir novērojami vairāki lūzuma punkti, vairāki leņķi  $\alpha$ , tad leņķu  $\alpha$  skaits atbilst izveidojušos mikroplaisu skaitam.

3. Papildināts noguruma plaisas veidošanās kvantitatīvā summārās AE složošanas cikla laikā novērtēšanas modelis. Veiktie pētījumi parādīja, ka mikroskopiska plaisas pieauguma ātruma aprēķinā pa summāru AE složošanas ciklā, jāņem vērā tikai tas summāras AE vērtības, kuri attiecas uz AE paātrināta pieauguma etapu.

4. Balstoties uz AE metodi, tika izstrādāts „Noguruma plaisas pieauguma novērtēšanas paņemiens konstrukciju cikliskajās pārbaudēs”, kurš ir aizsargāts ar Latvijas Republikas patentu Nr.13853.

5. Balstoties uz AE metodi, tika izstrādāta „Spēka konstrukciju stenda noguruma pētījumu AE kontroles metodika”, kura tiek izmantota RZEC "AVIATEST LNK".

6. Tika veikta noguruma plaisas pieauguma novērtēšanas paņēmienu un AE kontroles metodikas aprobācija helikoptera EH-101 gaisa skrūves soļa vadības sviras noguruma izmēģinājumos. Iegūtie rezultāti apstiprināja izstrādāto metodiku efektivitāti.