

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
MĒRĪJUMA PAMATA**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
A. URBAHS

Rīga 2015



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

ANOTĀCIJA

Aviācijas konstrukciju resurss ir ierobežots. Parasti to ierobežo visatbildīgāko detaļu un mezglu stiprība. Viena no svarīgākajām problēmām ir plaisu agrīnās atklāšanas iespējamība, plaisu izplatīšanās kontrole ekspluatācijas laikā un resursa prognozēšana, tajā skaitā arī resursa izmēģinājumu stadijā.

Darbā tika veikts tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu efektivitātes novērtējums, kā arī, balstoties uz akustiskās emisijas (AE) metodes fizikālo dabu, tika analizētas tās iespējas materiālu un konstrukciju defektu agrīnās atklāšanas uzdevumu risināšanā.

Darbā piedāvāts materiālu noguruma bojājamības novērtējuma matemātiskais modelis, balstoties uz AE signālu mērījumu datiem viena konkrētā slogojuma cikla ietvaros.

Metālisku konstrukciju un kompozītmateriālu un to izstrādājumu bojājamības pētījumiem tika izstrādāta eksperimentālo pētījumu veikšanas metodoloģija. Pētījumu objekti bija sekojoši:

- vidējās maģistrālās lidmašīnas galvenais balsts;
- paraugi no kompozītmateriāla;
- tuvās maģistrālās lidmašīnas elerons, kura konstrukcijā tika izmantoti kompozītmateriāli.

Eksperimentāli pierādīta noguruma plaisu agrīnās atklāšanas un to pieauguma kinētikas kontroles iespējamība paraugos un aviācijas konstrukcijās. Piedāvāti jauni metālisku konstrukciju noguruma bojājumu kvantitatīvā novērtējuma kritēriji, kā arī kompozītmateriālu bojājumu pakāpes novērtējumi statistiskajā slogojumā.

Darba novitāti apstiprina patenti.

Darba rezultāti publicēti 9 avotos, no kuriem 5 ir citēti SCOPUS.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 6 pielikumus, 114 attēlus, kopā 174 lappuses. Literatūras sarakstā ir 148 nosaukumi.

ABSTRACT

The resource of aviation construction is limited. The most common limit is its part and joint detail strength. One of the most important problem is the chance of quick fracture determination and fracture spread control in the time of exploitation resource prediction as well as resource testing.

In the work, traditional non-destructive control efficiency assessment were performed based on acoustic emission (AE) method physical nature, an early construction defect task solving and analyses were performed.

In the work, material fatigue damage evaluation mathematical model is proposed, based on AE signal measurement data of one particular cycle of loading.

Metallic construction and composite as well as products damage research and experimental research performance methodology were developed. Research objects were as follows:

- medium the main planes major support;
- samples and composite;
- close range main planes aileron in which construction aileron were used.

Experimentally were proven fatigue crack early disclosure and its increase kinetic control probability in aviation construction. New metallic construction fatigue damage quantitative assessment criteria as well as new composite damage degree assessment in static loading are offered.

Novity of the work is approved by patents.

Work results are published in 9 sources from which 5 are cited in SCOPUS.

Doctors theses are written in Latvian, it consist of introduction, 5 chapters, conclusion, list of references, 6 attachments, 114 images, in total of 174 pages. 148 titles are mentioned in the list of references.

SATURS

IEVADS	8
1. AVIĀCIJAS KONSTRUKCIJU TEHNISKĀ STĀVOKĻA UN PALIEKOŠĀS STIPRĪBAS NOVĒRTĒŠANAS METOŽU ANALĪZE	9
1.1. Kompozītmateriālu lietojums gaisa kuģu konstrukcijās	9
1.1.1. Kompozītmateriālu galvenās īpatnības, priekšrocības un sastāvs	9
1.1.2. Kompozītmateriālu lietojuma piemēri gaisa kuģu un to dzinēju konstrukcijā	14
1.2. Aviācijas konstrukciju elementu defektu vispārējs raksturojums un klasifikācija	19
1.2.1. Konstrukcijas elementu no metāliskiem materiāliem defektu raksturojums un to rašanās iemesli.....	19
1.2.2. Konstrukcijas elementu no polimēru kompozītmateriāliem defektu raksturojums un to rašanās iemesli.....	23
1.3. Aviācijas konstrukciju stāvokļa vispārīgais novērtējums, balstoties uz to materiālu fizikāli-mehānisku īpašību mērīšanu	25
1.4. Aviācijas konstrukciju paliekošās stiprības novērtēšanas metožu analīze	27
1.5. Aviācijas tehnikas nesagraujošās un sagraujošās kontroles metožu un līdzekļu analīze	30
1.5.1. Optiski — vizuālā kontrole	30
1.5.2. Kapilārās NK metodes un līdzekļi.....	32
1.5.3. Magnētiskās NK metodes un līdzekļi.....	33
1.5.4. Virpuļstrāvas NK metodes un līdzekļi	34
1.5.5. Akustiskās kontroles metodes	35
1.5.6. Tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu priekšrocību un trūkumu analīze ...	36
1.5.7. Sagraujošās kontroles metodes.....	37
1.6. Akustiskās emisijas metodes lietošanas fizikālie pamati materiālu un konstrukciju bojājumu diagnosticēšanai un sagrūšanas prognozēšanai	38
1.6.1. Akustiskās emisijas signālu parametru rašanās būtība un informatīvuums	38
1.6.2. Galvenie AE signālu parametri	41
1.6.3. AE kontroles rezultātu novērtēšana.....	42
1.6.4. Materiālu bojājamības mehānisma izpēte, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumu datiem.....	42
1.6.5. AE metodes pielietošanas sfēras	46

1.6.6. AE metodes priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālām NK metodēm	47
1.7. Darba mērķi un uzdevumi.....	48
2. MATERIĀLU BOJĀJAMĪBAS MODELĒŠANA CIKLISKO SLODŽU PROCESĀ, BALSTOTIES UZ AKUSTISKĀS EMISIJAS SIGNĀLU MĒRĪJUMU DATIEM.....	50
2.1. Metālisku materiālu akustiskās emisijas avotu un noguruma sagrūšanas mehānisma analīze	50
2.2. Materiālu bojājamības modelēšana ciklisko slodžu procesā, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumu datiem	55
3. EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU VEIKŠANAS METODOLOĢIJA UN PIELIETOJAMĀS APRĪKOJUMS	60
3.1. Pētījumu objektu raksturojums	60
3.1.1. Kompozītmateriāla paraugu raksturojums	60
3.1.2. Lidmašīnas VML pamata statnes konstrukcijas īpatnības	61
3.1.3. Lidmašīnas TML elerona konstrukcijas īpatnības	64
3.1.3.1. Elerona komponējums un galvenie parametri	66
3.1.3.2. TML elerona konstrukcijas raksturojums	68
3.2. Eksperimentālo pētījumu veikšanas metodoloģija	69
3.2.1. Kompozītmateriāla paraugu pētījumu veikšanas eksperimentālais stends un metodoloģija	69
3.2.2. VML šasijas statnes pārbaudes veikšanas stends un izmēģinājumu metodoloģija	77
3.2.3. Elerona statisko izmēģinājumu veikšanas stenda un metodikas apraksts	84
3.3. Pielietojamās akustiskās emisijas aparatūras tehniskais raksturojums	87
3.3.1. Akustiskās emisijas signālu analizators AF-15	89
3.3.2. Portatīvā akustiskās emisijas sistēma POCKET AE — 2.....	90
3.3.3. Uz AF-15 balstītas mērīšanas sistēmas modernizācija	92
3.3.4. Akustiskās emisijas iekārtu pieslēgšanas izmēģinājumu veikšanai tipveida shēma	93
4. AVIĀCIJAS KONSTRUKCIJU NO METĀLISKIEM MATERIĀLIEM SAGRŪŠANAS MEHĀNISMA IZPĒTE UN BOJĀJAMĪBAS NOVĒRTĒŠANA AR AKUSTISKĀS EMISIJAS METODI	95
4.1. Aviācijas konstrukciju metālisku materiālu sagrūšanas mehānisma izpēte, balstoties uz lidmašīnas amortizatora balsta izmēģinājumu rezultātiem	95
4.2. Metālisku materiālu noguruma bojājumu novērtēšanas kritēriji, balstoties uz akustiskās emisijas kontroli.....	99

4.2.1. Bojājumu laukuma novērtējuma kritērijs pēc AE mērījumu datiem	100
4.2.2. Konstrukciju paliekošās stiprības kompleksais kritērijs pēc slodzes parametra ..	102
5. AVIĀCIJAS KOMPOZĪTMATERIĀLU UN KONSTRUKCIJU SAGRŪŠANAS	
MEHĀNISMU IZPĒTE UN BOJĀJAMĪBAS NOVĒRTĒŠANA.....	104
5.1. Aviācijas konstrukciju kompozītmateriālu sagrūšanas mehānisma analīze uz eksperimentālo datu pamata	104
5.1.1. Kompozītmateriālu sagrūšanas mehānismu eksperimentālie pētījumi, izmantojot akustiskās emisijas mērījumu datus	104
5.1.1.1. Eksperimentālo paraugu, kas netika pakļauti sākotnējai slodžošanai, izmēģinājumu rezultāti	107
5.1.1.2. Paraugu, kas tika pakļauti sākotnējai slodžošanai, izmēģinājumu rezultāti....	117
5.1.2. KM paraugu sagrūšanas procesa analīze	128
5.1.3. Eksperimentālo pētījumu rezultātu statistiskā analīze	129
5.1.4. Iegūto rezultātu vispārējs raksturojums	132
5.1.5. Materiālu bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumi.....	133
5.1.5.1. Vienā virzienā vērstā kompozītmateriāla bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumu kritēriji statiskajā slodījumā	133
5.1.5.2. KM sagrūšanas intensitātes novērtēšanas akustiskās emisijas kritērijs.....	135
5.1.5.3. Kompozītmateriāla konstrukciju sagrūšanas veida noteikšanas akustiskā emisijas metode	135
5.2. Reālu kompozītmateriālu aviācijas konstrukciju bojājamības novērtējums	136
SECINĀJUMI	141
LITERATŪRA.....	142
PIELIKUMI.....	152

IEVADS

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 ilgizturību 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 laukietilpīgas, 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. Tā kā šīs izmaiņas ir saistītas galvenokārt ar materiāla sabrukšanas procesiem, 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 ilgizturību un prognozēt tās resursu ekspluatācijas procesā.

Darba tēmu var uzskatīt par aktuālu un nepieciešamu gan Latvijā, gan pasaulē pamatojoties uz promocijas darbā izvirzītiem uzdevumiem un, ņemot vērā, ka darbs atbilst valsts prioritārajam zinātnes virzienam „Inovatīvie materiāli un tehnoloģijas”, sniedz ieguldījumu šī zinātnes virziena attīstībā un papildus sekmē zinātnes un ražošanas integrāciju.

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

1.1. Kompozītmateriālu lietojums gaisa kuģu konstrukcijās

Absolūtais vairākums aviācijas konstrukciju elementu izgatavoti no metāliskiem materiāliem. Bet pēdējā laikā plašu lietojumu guva arī kompozītmateriāli.

Kompozītmateriāls (KM) (kompozīts) — konstrukciju (metālisks vai nemetālisks) materiāls ar to pastiprinošiem elementiem no stiprāka materiāla, kas ir diegu, šķiedras vai lēkšu veidā [108]. Kompozītmateriālu piemēri: plastīts, kas ir stiegrots ar bora, oglekļa, stikla šķiedrām, grīsti vai audumu; alumīnijs, stiegrots ar tērauda vai berilija diegiem. Apvienojot komponentu telpisku saturu, var iegūt kompozītmateriālus ar nepieciešamajām stiprības, karstumizturības, elastības moduļa, abrazīvās izturības vērtībām, kā arī veidot kompozīcijas ar nepieciešamām magnētiskām, dielektriskām, radio absorbējošām un citām speciālām īpašībām.

1.1.1. Kompozītmateriālu galvenās īpatnības, priekšrocības un sastāvs

Aerokosmiskā nozare izvirza stingras prasības konstrukciju materiālu darbībai un drošumam.

Pēdējā laikā aizvien plašāku pielietojumu gūst KM, kuriem piemīt virkne unikālu īpašību, kas nosaka to, ka KM aizstāj metālistiskus sakausējumus.

Viendabīgiem vai, kā tos vēl sauc, homogēniem konstrukcijas materiāliem (kuriem pieskaita arī tradicionālos metālistiskus sakausējumus) ir ievērojama teorētiska rezerve savas stiprības palielināšanā [96,105,109,121]. Tas nozīmē, ka pašlaik pielietojamo homogēno konstrukcijas materiālu stiprība teorētiski var būt palielināta vairākas reizes. Taču šo materiālu tehniskā stiprība jau tuvojas maksimāli pieļaujamajai vērtībai. Tas ir skaidrojams ar to, ka slogotā materiāla sagrūšanu nosaka saskaņā ar mikroskopisko bojājumu (defektu) lielumu un daudzumu. Novērst šos defektus homogēnā materiālā nav iespējams. Tajā pašā laikā no tiem ir iespējams atbrīvoties, paņemot materiālu tieva diega (šķiedras) veidā. Jo tievāks ir diegs, jo mazāk defektu paliek tā šķērsgrīzumā. Lai izmantotu tos konstrukcijās, šķiedras nepieciešams ietvert matricā, lai tas darbotos spiedē, bīdē, stiepē.

Ja metāli ir izotropi (*Izotropija* – no sengrieķu ἴσος „vienāds, līdzīgs” + τρόπος „līkums, pagrieziens; raksturs” — fizisku īpašību vienādība visos virzienos, invariance, simetrija attiecībā uz virziena izvēli, KM ir anizotropi. To stiprība šķiedru virzienā var vairāk nekā

20 reizes pārsniegt matricēs stiprību, stiprību perpendikulāri šķiedrām vai stiprību starp slāņiem. Tādējādi ir iespējami vairāki sagrūšanas varianti: no stiepes, spiedes, bīdes plāksnes plaknē, starpslāņu bīdes, no plakanas stiepes vai to kombinācijas. Tomēr, ja metāls spiedes iedarbībā var drīzāk samesties nekā sabrukt, tad polimērie kompozītmateriāli uzvedas atšķirīgi: tie var pilnībā sabrukt, atslāņoties vai sašķelties matricē paralēli šķiedrām.

Turklāt kompozītmateriāli ir neviendabīgi. Izstrādājumam no KM ir atšķirīgs sastāvs dažādos virzienos vienā slānī vai biezumā. Tādējādi vērtējot plaisas noguruma, plūstamības un pieauguma iespējas saskaņā ar klasisku pieeju, ir nepieciešams ņemt vērā dažādus materiāla elementus (šķiedras un matrici), šķiedru orientāciju attiecībā pret slodzes virziena un to mijiedarbību. Pat statistiskā stiprība var mainīties atkarībā no slāņu salikuma secības, t. i., kārtības, saskaņā ar kuru identiskie slāņi tiek salikti biezumā.

Trešā KM raksturīgā īpatnība ir mazas deformācijas. Metāla gadījumā plastiskās deformācijas atslogo spriegumu koncentrācijas un pārdala tos vietās, kur ir krasas ģeometrijas izmaiņas, defekti un izgriezumi. Tāpēc formulas, kas apraksta spriegumu koncentrācijas koeficientus k un noguruma stiprības koeficientus k_f metāliem, tiešā veidā nevar tikt izmantotas KM. Paliekošie spriegumi, piemēram, termiskie, kas rodas cietēšanas laikā, kļūst būtiskāki (salīdzinājumā ar tiem, kas rodas metālos), jo var sekmēt priekšlaicīgu sagrūšanu.

Nepieciešams nopietni tikt skaidrībā ar kompozītmateriālu matricēs degradācijas dabu. Salīdzinājumā ar metāliem, matricē nepakļaujas klasiskajai korozijai vai korozijai zem sprieguma, tā var degradēt no novecošanas, ultravioletā starojuma, mitruma ietekmes, zibens spārieniem, triecieniem vai erozijas. Šīs parādības jāņem vērā, ja runa ir par ilgu kalpošanas laiku.

Pieļaujamā bojājuma pakāpe ir atšķirīga KM un metāliem un ir ļoti atkarīga no konstruktīvā izpildījuma. Drošuma novērtēšanai ir jāsaprot, kā bojājumi ietekmē statistisku un noguruma stiprību, plūstamību un paliekošo stiprību.

Un, visbeidzot, neparasts KM un to savienojumu raksturs nosaka nesagraujošās kontroles veikšanas sarežģītību.

KM, īpaši šķiedrainie kompozīti, kuriem piemīt unikālās augstas stiprības un zema blīvuma īpašības, kā arī labas noguruma īpašības, var tikt pielietoti jebkurās konstrukcijās. KM mehānika pēta to mehānisku uzvedību zem slodzes, t. i., slodzes un deformācijas sadalījumu, saskaņā ar kuru var aprēķināt konstrukcijas kinemātiskus raksturojumus un stiprību. Atkarībā no novērojumu mēroga šīs izpētes pieskaita pie makromehānikas vai mikromehānikas. Pirmajā gadījumā pieņem, ka materiāls sastāv no viendabīgiem anizotropiem slāņiem, bet meklējamās vērtības ir vidējie spriegumi, deformācijas un stiprības

robeža. Šajā gadījumā slāņainu kompozītu raksturo divi Junga moduļi, divi Puasona koeficienti, bīdes modulis un trīs stiprības robežas vērtības.

Mikromehānikas pētījumi balstās uz to, ka KM vai konstrukcijas uzvedība ir cieši saistīta ar iekšējo spriegumu vērtību un sadalījumu un ar slodzes nodošanu no viena komponenta uz citu. Mikromehānika pēta šos iekšējos spriegumus, kā arī iekšējās reakcijas un atsevišķu daļu mijiedarbību, kurus izraisa pieliktie spēki. Iegūtie dati ir pamats materiāla mikroskopiskās uzvedības aprēķiniem un prognozēšanai, sagrūšanas veida noskaidrošanai un stiprības kritērija noteikšanai.

Starp iespējamiem sagrūšanas veidiem izšķir matricas pārrāvumu, pārrāvumu uz šķiedras un matricas starpvirsmas un šķiedru pārrāvumu. Šie sagrūšanas veidi nav neatkarīgi, tie var mijiedarboties un stimulēt viens otru. Sagrūšanas sākumu nosaka iekšējais spriegumstāvoklis, kas ir atkarīgs no darbojošās slodzes, kompozīta ģeometriskās uzbūves un tā komponentu īpašībām. Var gadīties, ka spriegumstāvoklis ir ļoti sarežģīts, un to ir ļoti grūti noteikt analītiski; tāpēc eksperimentāliem pētījumiem ir būtiska loma, bet dažreiz bez tiem vienkārši neiztikt. Eksperimentālās metodes, kuras pielieto KM mehānikas pētījumos, iekļauj fotoelastības metodi, tenzometrisku metodi, muarē metodi, hologrāfiju un akusti skās emisijas (AE) metodi. AE metode tiek pielietota kā nesagraujošās kontroles metode, tā ir īpaši efektīva sagrūšanas mikromehānikas pētījumos.

Kad vienā virzienā vērsts kompozīts tiek slogots perpendikulāri šķiedrām, rodas kritiskā situācija. Stingrums sasniedz minimumu, un stiprības kritērijus nosaka matricas spriegumu un deformācijas vērtības. Šim gadījumam piederošiem mikromehāniskiem pētījumiem ir galvenokārt analītisks raksturs [16].

Dažos pētījumos tiek apskatīti vidējie (makroskopiskie) mehāniskie raksturlielumi un sniegtas izteiksmes moduļiem šķērsvirzienā un kompozīta termiskās izplēšanās koeficientiem. Daži no šiem darbiem balstās uz enerģētikas spriegumiem, kas izmanto variācijas principus; citos pielieto tuvinātas empīriskas izteiksmes.

Spriegumiem matricē ir lielas vērtības gadījumos, kad slodze ir pielikta virzienā, kas ir perpendikulārs šķiedrām, jo šajā gadījumā sagrūšanas sākums ir saistīts ar spriegumu un deformāciju koncentrāciju matricē. Uz analīzes pamata aprēķina deformāciju pieaugumu uz matricas un šķiedras robežas [31]. Izmantojot skaitliskās metodes, ieguva precīzu risinājumu elastības teorijas ietvaros [24]. Analītiskās metodes tika izstrādātas, lai ņemtu vērā anizotropijas [60], viskoelastības īpašību, plastiskuma un nejauša šķiedru sakārtojuma ietekmi.

Cita svarīga kompozītu mikromehānikas problēma — slodzes pārnesanas no matricēs uz šķiedru (vai no šķiedras un matrici) pētījumi gadījumos, kas ārējais spēks iedarbojas paralēli šķiedrām vai leņķī. Zināms ievērojams daudzums eksperimentālo fotoelastīgu pētījumu, kas veltīti spriegumiem matricē, spriegumu pārdalei uz matricēs un šķiedras starpvirsmas, spriegumu koncentrācijai šķiedru galos un pārrāvumos, kā arī bojājumu viediem un to attīstībai. Lielākajai daļai šo pētījumu ir kva litatīvs raksturs. Slodzes nodošana un īpaši spriegumu pārdale un to koncentrācija šķiedru galos ir daudzu pētījumu priekšmets, tajos pielietoti divdimensiju modeļi.

Līdz šim brīdim AE metodes pielietošana dinamisko parādību pētījumos bija visai ierobežota. Šajā nozarē strādāja Huguets S., Godins N., Gaertners R., Salmons L., Villards D. [26].

Detaļām no polimēru kompozītiem pašsvārstību spektrs ir krietni lielāks nekā detaļām no metāliem. Ja alumīnija, titāna sakausējumiem un tēraudam svārstību pašfrekvences spektri tuvojas rezonansei un novirzei no rezonanses režīma ir nepieciešams mainīt divus detaļas ģeometriskus izmērus, tad augstas modalitātes polimēru materiāliem to var sasniegt, tikai izmainot šķiedru orientāciju atsevišķajos slāņos. Kompozītu, piemēram, oglekļa šķiedras lietojums ļauj samazināt konstrukciju termisko saspriegumu, jo tiem ir raksturīgs diezgan zems lineārās izplešanās temperatūras koeficients. Kompozītu priekšrocība ir saistīta ar iespējamību plaši variēt praktiski visas materiāla īpašības, kas ir sasniedzams, izvēloties sastāvdaļas, to skaitliskās attiecības, sadalījumu un orientāciju materiālā. Tas ļauj iegūt daudzfunkcionālas pielietojamības konstrukcijas materiālus ar bieži vien pretējām īpašībām.

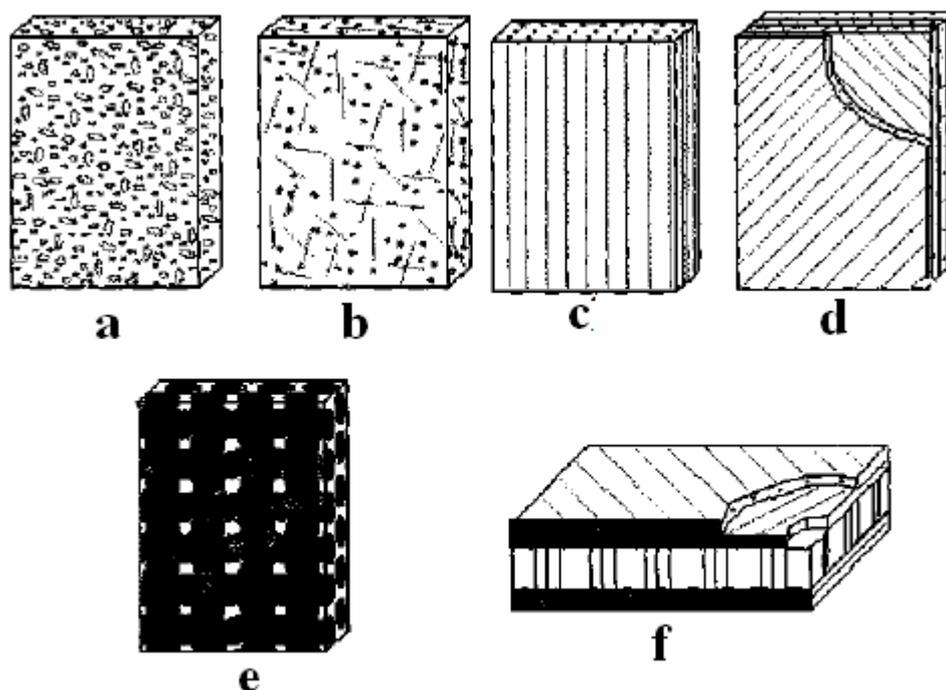
Kompozītu galvenās priekšrocības:

- augsta īpatnējā stiprība un stingrība (2...3 reizes lielāka nekā metāliem);
- unikāli noguruma pretestības rādītāji (izturības robeža stiepē tuva stiprības robežai, izturība pret vibrācijām un akustiskām slodzēm);
- tā dēvētās pārmērīgās „konstruktīvās masas”, kas piemīt plānsienu metāliskajām konstrukcijām, likvidācija;
- tehnoloģiskums, veidojot sarežģītas aerodinamiskas formas lielgabarīta konstrukcijas;
- aerodinamiskas virsmas un apvalka stingruma īpašību kvalitātes uzlabojums;
- plašā diapazonā vadāma īpašību anizotropija.

Kompozītmateriāli sastāv no metāliskas matricēs (biežāk Al, Mg, Mi un to sakausējumi), kas ir stiprināta ar augstas izturības šķiedrām vai smalkas dispersijas grūti

kūstošām daļiņām, kas nešķīst pamatmetālā (ar dispersijas daļiņām stiprināti materiāli). Metāla matricē sasaista šķiedras (dispersijas daļiņas) vienā veselumā. Šķiedra (dispersijas daļiņas) un saistviela, kas veido kādu no kompozīcijām, ieguva nosaukuma „kompozītmateriāli”.

Kā polimēru matricas lieto nemetāla, oglekļa un keramikas materiālus. No polimēru matricām visplašāko pielietojumu ieguva epoksīda, formaldehīda un poliamīda matricas. Oglekļa matricas iegūst no sintētiskiem polimēriem, kas tika pakļauti pirolīzei. Matricē sasaista kompozīciju, piešķirot tai formu. Par stiprinātājiem kalpo šķiedras: stikla, oglekļa, bora, organiskās, veidotās uz diegveida kristālu bāzes (oksīdi, karbīdi, borīdi, nitrīdi un citi), kā arī metāliskās (stieples), kurām piemīt augsta stiprība un stingrība. To lietojuma piemēri sniegti 1.1. att.



1.1 att. Kompozītu uzbūves piemēri:

- a) stiprināti ar daļiņām; b) stiprināti ar sakapātām šķiedrām; c) vienā virzienā vērsti kompozīti;
- d) daudzslāņaini kompozīti; e) stiprināti ar audumiem; f) kompozītu šūnu konstrukcijas

Kompozītu ar matricu un šūnu trīsslāņu konstrukciju lietošanas piemēri aviācijā: ķīļa gala plūsmvirzītis; ķīļa priekšējā daļa; ķīļa kore; fizelāžas gala plūsmvirzītis; augstuma un virziena stūres; spārna mehānizācijas agregāti; spārna paneli; profilēti ribojumi; diafragmas; lonžeroni; sijas; brangas; spārna priekšējais plūsmvirzītis; šasijas un kravas nodalījuma nišu durvis; gondolas paneli; fizelāžas priekšējais plūsmvirzītis u. c.

Kompozītmateriālu īpašības ir atkarīgas no komponentu sastāva, to kombinācijas, skaitliskās attiecības un to savstarpējās saites stiprības. Stieģrošanas materiāli var būt šķiedru, lēkšu, lenšu, daudzslāņainu auduma veidā. Stiprinātāja saturs orientētajos materiālos sastāda 60...80 % (no to apjoma), neorientētajos (ar diskretām šķiedrām un diegveida kristāliem) — 20...30 %. Jo lielāka ir šķiedru stiprība un elastības modulis, jo lielāka ir kompozītmateriāla stiprība un stingrums. Matricas īpašības nosaka kompozīcijas stiprību bīdē un spiedē un noguruma sagrūšanas pretestību. Atkarībā no stiprinātāja kompozītmateriāli tiek klasificēti sekojoši: stikla šķiedrāti, oglekļa šķiedrāti, bora šķiedrāti un organiskie šķiedrāti.

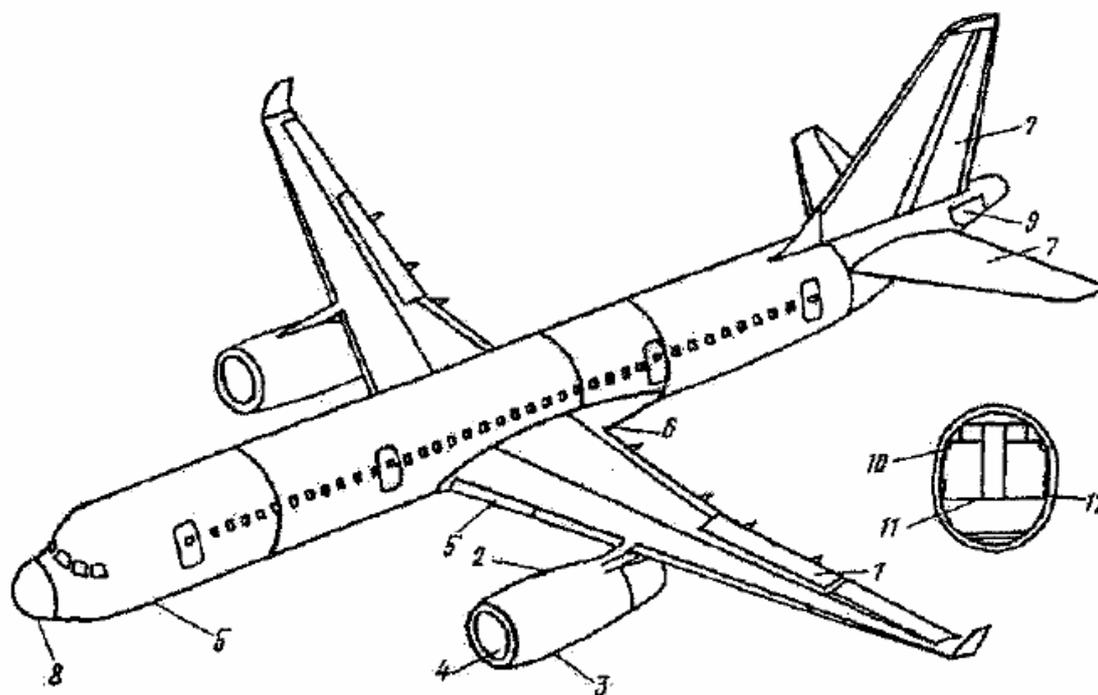
Daudzslāņainajos materiālos ar saistvielu piesūcinātas šķiedras, diegi, lentes tiek saliktas paralēli viena otrai salikšanas plaknē. Plakanus slāņus saliek plāksnēs. Šajā gadījumā tiek iegūtas anizotropas stiprības īpašības. Izmantojot materiālu noteiktā izstrādājumā svarīgi ņemt vērā darbojošās slodzes virzienus. Var iegūt materiālus gan ar izotropām, gan ar anizotropām īpašībām. Var salikt šķiedras dažādos leņķos, tādējādi variējot kompozītmateriālu īpašības. No slāņu salikšanas secības ir atkarīgas materiāla vērpes un lieces stingrums vērtības. Pielieto stiprinātājus no trīs, četriem un vairākiem diegiem. Visplašāk tiek pielietota struktūra no trīs savstarpēji perpendikulāriem diegiem. Stiprinātāji var atrasties ass, radiālā un aploces virzienos. Telpiski materiāli var būt jebkura biezuma bloku, cilindru veidā. Telpiskie audumi palielina atraušanas un bīdes pretestību salīdzinājumā ar daudzslāņainajiem. Sistēma no četriem diegiem veidojas, sadalot stiprinātāju pa kuba diagonālēm. Četru diegu struktūra ir līdzsvarota, tai ir paaugstināts bīdes stingrums pamata plaknēs. Tomēr četros virzienos vērstu materiālu veidošana ir sarežģītāka salīdzinājumā ar trīs virzienos vērstiem materiāliem.

1.1.2. Kompozītmateriālu lietojuma piemēri gaisa kuģu un to dzinēju konstrukcijās

Pateicoties pārākumam īpatnējās stiprības un stingrums rādītājos, īpašam konstrukciju, siltuma, fizisku un speciālu īpašību apvienojumam, kompozītmateriāli aizvien plašāk tiek lietoti gaisa kuģu konstrukcijās. Ja lidmašīnas „Tu-204” planiera konstrukcijā un interjerā kompozītmateriālu lietojuma apjoms bija tikai 14 % no kopējās masas, tad jaunākajos pasažieru aerobusos („A 380” tipa) šis rādītājs sasniedz jau 25 %. Kompozītu lietojums gaisa kuģu konstrukcijā ilustrēts 1.2. att.

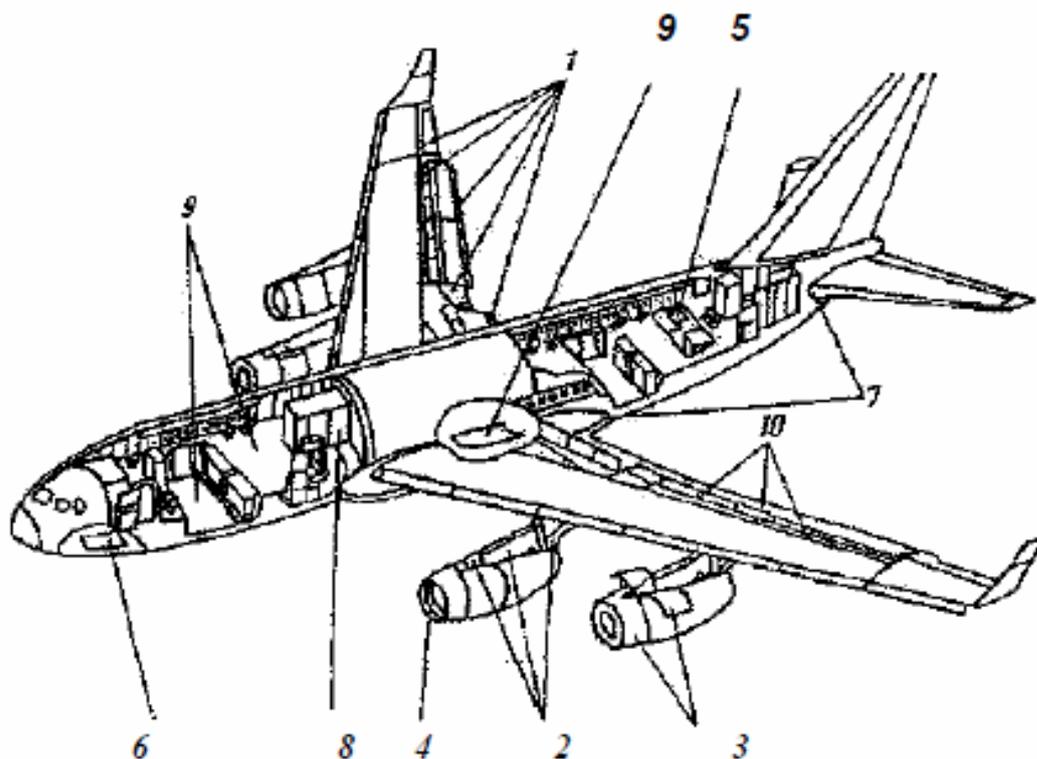
A.N. Tupoleva vārdā nosauktā konstruktoru biroja pieredze plastītu lietošanā iepriekšējo modeļu lidmašīnās stabilizatora šūnu un monolītu paneļu ar darba temperatūru virs 100°C izgatavošanā uzrādīja to augstu drošumu ekspluatācijā un tehniskajā apkalpošanā.

Radiolokācijas staciju un interjera detaļas lietots augsti tehnoloģisks materiāls sfērtēkstolīts, kas izstrādāts Viskrievijas aviācijas materiālu institūtā (VAMI). Plaši izmanto oglekļa un stiklplastus, kas izgatavoti pēc iepriekšējās piesūcināšanas („pre-preg”) tehnoloģijas (slāņaini pildītāji (stikla šķiedras audumi, oglekļa audumi) piesūcināti ar termoreaktīvu saistvielu, daļēji cietināti). Izmanto vidēju un lielgabarīta izstrādājumu ražošanā un pārstrādā hidrauliskajās spiednēs ar lielu plākšņu izmēru, kas ir aprīkotas ar izvelkamiem sveķiem). Grīdas paneļi ir izgatavoti no organiskā plastīta savienojumā ar šūnām uz polimēru papīra bāzes. Radiolokācijas staciju aptecētāju izgatavošanā lietots stiklplasts uz epoksīda-fenola saistvielas bāzes. Izgatavojot lidmašīnu agregātus no oglekļa un organiskiem plastiem, izmanto epoksīda universālo saistvielu no epoksīda sveķiem ar darba temperatūru 120...130 °C.



1.2. att. Kompozītmateriālu lietojums lidmašīnas „Tu-204” planiera konstrukcijā:

- 1 — spārna mehānizācijas elementi; 2 — pilons; 3 — gondola (priekšējā daļa, vērtne);
- 4 — kompresora gaisa savaceis; 5 — šasijas vērtnes; 6 — spārna plūsmvirzītis;
- 7 — lidmašīnas aste: ķīlis, stabilizators; 8 — priekšējais plūsmvirzītis;
- 9 — enerģētiskās palīgiekārtas vērtne; 10 — šūnu paneļi; 11 — grīdas paneļi;
- 12 — monolītas detaļas



1.3. att. Kompozītmateriālu lietojums lidmašīnas „Il – 96–300” planiera konstrukcijā:

- 1 — spārna mehanizācijas elementi; 2 — pilons; 3 — gondola; 4 — gaisa savācējs; 5 — dienesta lūkas;
 6 — šasijas vērtnes; 7 — spārna plūsmvirzīs; 8 — šūnu paneļi un vienslāņa izlīmes;
 9 — grīdas šūnu paneļi; 10 — spārna astes daļas paneļi

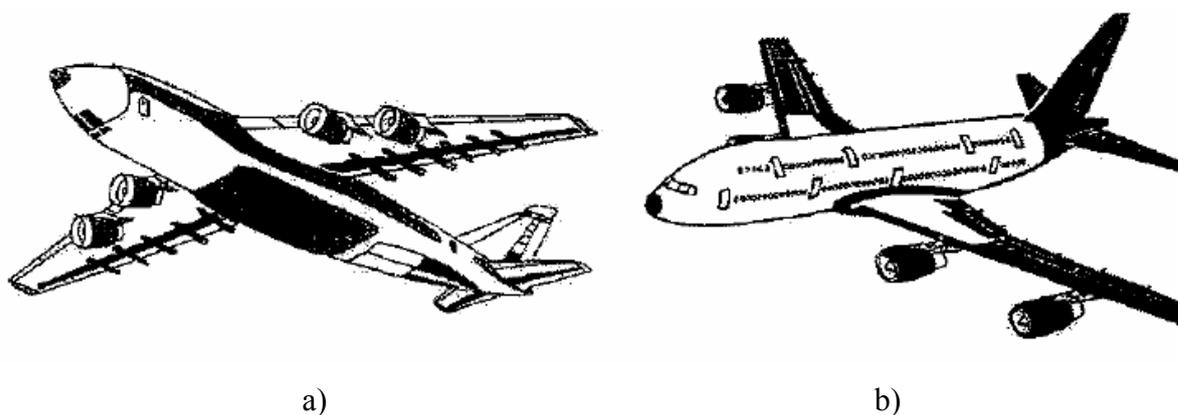
Attēlā 1.3. parādīts kompozītmateriālu pielietojums tālās maģistrālās platas fizelāžas lidmašīnas „Il-96-300” planiera konstrukcijā (S.V.Iļušina KB). Konstrukcijā tika izmantots liels kompozītu daudzums (1650 kg), kas ļāva samazināt tās svaru par 520 kg. Kompozītmateriālu pielietošanas īpatnība lidmašīnas „Il-96-300” konstrukcijā slēpjas tajā, ka visi konstrukcijas elementi ir izgatavoti, izmantojot hibrīdus materiālus. Tievajos apšuvumos uz virsmu no piesūcinātām oglekļa lentām vienā tehnoloģiskā procesa laikā uzklāj organiskos audumus, kas nodrošina preterozijas izturību un oglekļa plasta trauslu slāņu aizsardzību ekspluatācijas procesā. Visvairāk slogotajās konstrukcijās organiskā plasta slāņus izvietoj vienmērīgi visā apšuvuma biezumā (25 % organisko plastu slāņu no kopējā slāņu skaita), kas nodrošina augstāku hibrīda konstrukciju izturību pret plaisāšanu salīdzinājuma ar oglekļa plasta konstrukcijām. Turklāt tiek pielietoti papildus slāņi no stikla šķiedras, kas izslēdz korozijaktīva oglekļa plasta kontaktu ar alumīnija un tērauda detaļām. Tādējādi samazinās salikšanas darbu izpildes un detaļu pielāgošanas darbietilpība, jo šajā gadījumā urbšana un

griešana tiek veikta pa stikla šķiedras auduma slāņiem, kas ir tehnoloģiski pareizāk. Liela uzmanība lidmašīnas „Il-96-300” izgatavošanā pievērsta kompozītu korozijizturībai.

Interjera materiālu — dekoratīvās plēves, organītu, mākslīgās ādas, grīdas materiāla „Avin-2”, gumijota auduma elastīgiem cauruļvadiem un citu — modificēšanas darbi ļāva pilnveidot tos līdz atbilstībai lidojumderīguma normām degtspējas, dūmu rašanās un toksiskuma kategorijās.

Sintezējot konstruktīvus komponējuma un tehnoloģiskus risinājumus, kompozīti tiek aizvien plašāk izmantoti, tai skaitā helikopteru lielgabarīta agregātu veidošanā N.I.Kamova vārdā nosauktā konstruktoru birojā. No kompozītiem veidoto konstrukciju masa helikopterā „Ka-26” sastādīja 6 %, „Ka-27” („Ka-32”) — 15 %, „Ka-126” („Ka-226”) — 17 %, „Ka-50” — 35 %, „Ka-62” — 55 %. No kompozītiem uzprojektētas četras nesošās skrūves lāpstiņu paaudzes. Pašlaik sērijražošanā un ekspluatācijā ir „Ka-26”, „Ka-27” („Ka-32”), „Ka-50” helikopteru lāpstiņas. Kompozītu lietošana N.I.Kamova vārdā nosauktā KB helikopteros nodrošina: masas samazināšanu par 15...35 %, resursa palielināšanu 1,5...3 reizes, ilgizturības palielināšanos, helikoptera izgatavošanas darbietilpības un cikla samazināšanos 1,5...3 reizes.

„An-124” „Ruslan” konstrukcijā tiek plaši izmantoti polimēru kompozītmateriāli, kas veidoti uz augstizturīgu un augsti modulāru oglekļa, organisko un stikla pildītāju bāzes. Eiropas konsorcijs „Airbus Industry” aerobusā „A380” izmanto kompozītmateriālus dzinēju gondolās, spārna un astes apšuvuma elementos (1.4. att.).

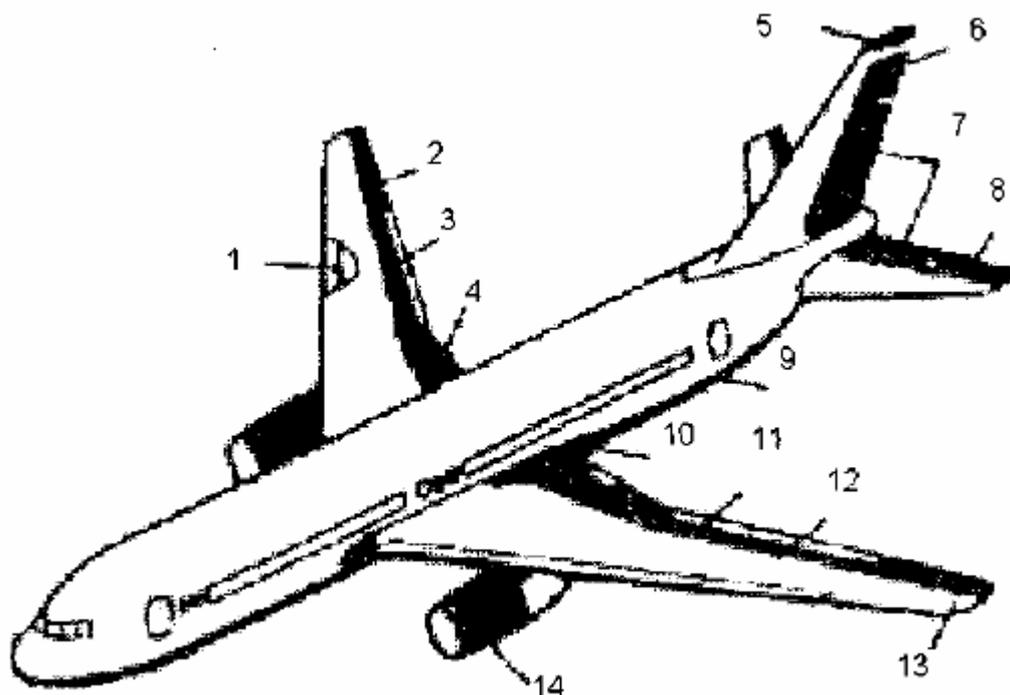


1.4. att. Kompozītu lietojums pasažieru lidmašīnu konstrukcijās:

a) lidmašīnā „An-124” lietojamie kompozītmateriāli; b) KM konstrukciju lietojums lidmašīnā „A 380”

Kompozītu lietojuma pieaugums aviācijā un, pirmkārt, militārajās lidmašīnas galvenokārt notiek, paplašinoties to izmantošanas apjomiem galvenajās planiera daļās: astes un spārna daļā, fizelāžā; helikopteriem svarīgs virziens ir kompozītu lietošana piedziņas

vārpstas un galvenās un astes skrūvplēsna ražošanā. Tos pielieto arī radiolokācijas plūsmvižu, iekšējo paneļu, griestu, gaisvadu, degvielas tvertņu, komandas un lidmašīnas vai helikoptera visvairāk aizsargājamo daļu aizsarg bruņu izgatavošanā u. tml.



1.5. att. Kompozītmateriālu lietošanas shēma lidmašīnas „Boeing-767” konstrukcijā:

- 1 — garensijas sienas; 2 — aizmugurējie fiksētie paneļi; 3 — interceptors; 4 — iekšējais elerons; 5 — ķīļa augšējā daļa; 6 — vadības stūre; 8 — augstuma stūre; 9 — kravas nodalījuma apdare; 10 — spārna plūsmvirzīs; 11 — aizspārņu izlaišanas sistēmas aptecinātājs; 12 — spārna augšējais un apakšējais apšuvums, stringeri; 13 — ārējais elerons; 14 — gondolas apšuvums

Vienlaikus ir vērts atzīmēt, ka kompozītu ieviešana lidmašīnu, īpaši smagu civilo lidmašīnu, konstrukcijas nesošos elementos pirmajā etapā notika ļoti piesardzīgi, izvēloties galvenokārt vāji vai vidēji slogotas detaļas. Iemesls tam bija nepietiekama pārliecība par jaunu materiālu ekspluatācijas drošumu, kas, pirmkārt, bija saistīts ar ierobežotu eksperimentālo pētījumu un praktisko izmēģinājumu daudzumu. Pakāpeniski uzkrātie eksperimentālie dati par kompozītu ekspluatācijas īpašībām, kā arī pieredze, izstrādājot un ekspluatējot dažāda veida kompozītu konstrukcijas, pilnveidojot kompozītu kvalitātes kontroles metodes, sekmēja to, ka pašlaik eksistē liels lidmašīnu skaits, kā, piemēram, „DC-10”, „Boeing-727”, -737, -747, -757, -767, A-310 un citas, kā arī helikopteri: „Sikorsky S-

76”, „Sikorsky SH-53D” un citi, kuru konstrukcijās, tajā skaitā arī vitāli svarīgajās, pielietoti kompozītmateriāli.

Attēlā 1.5. parādīta kompozītu lietošanas shēma lidmašīnai „Boeing-767”. Kopējais kompozītmateriālu agregātu svars lidmašīnā „Boeing-767” sastāda 1534,5 kg, kas ļāva samazināt lidmašīnas svaru par 813 kg. Cits piemērs ir „McDonnell Douglas” firmas lidmašīna „MD-100”, kuras konstrukcijās izmantoti aptuveni 6950 kg kompozītmateriālu.

Vairumā gadījumu metālisku sakausējumu nomaiņa detaļās uz kompozītmateriāliem ļāva samazināt ne tikai konstrukcijas masu (līdz 20-40 % salīdzinājumā ar metāliskiem analogiem), bet arī tās izmaksas.

Avio dzinēja plānsienu maz slogotas korpusa detaļas ir visperspektīvākās no polimēru kompozītmateriālu lietošanas viedokļa. Pieejamība, iespēja periodiski veikt vizuālo kontroli, diagnostiku un nepieciešamības gadījumā arī nomaiņu, nodrošina to drošu darbu dzinēja iekārtas ekspluatācijā. Korpusa detaļas no kompozītmateriāla ir par 20...25 % vieglākas salīdzinājumā ar metāliskiem analogiem.

1.2. Aviācijas konstrukciju elementu defektu vispārējs raksturojums un klasifikācija

Jebkurš izstrādājums (detaļa, agregāts) spēj veikt uzdotas funkcijas tikai tajā gadījumā, ja katrā laika sprīdī tā raksturojumi atbilst prasībām, kas ir reglamentētas tehniskajos noteikumos. Novirzoties no tehniskiem noteikumiem, var iestāties atteice, kas nozīmē daļēju vai pilnīgu izstrādājuma darbības zaudēšanu. Šajā gadījumā saka par defekta esamību izstrādājumā [83].

Ar *aviācijas tehnikas atteici* saprot jebkuru sistēmas (agregāta) darbības zaudēšanu (pilnīgu, daļēju, uz laiku), tās (tā) parametriem novirzoties no uzstādītām normām, kas parādījās gan lidojuma laikā, gan uz zemes.

Ar *defektu* saprot jebkuru sistēmas (agregāta) vai atsevišķa elementa (mezgla, detaļas) bojājumu un izregulēšanos, kas nesekmēja to darbības zaudēšanu.

1.2.1. Konstrukcijas elementu no metāliskiem materiāliem defektu raksturojums un to rašanās iemesli

Neskatoties uz to, ka kompozīti tiek aizvien plašāk izmantoti avio būvniecībā, galvenie planiera konstrukcijas materiāli vēl joprojām ir alumīnija sakausējumi. 2000.–2015. gg. to īpatsvars lietojuma struktūrā saglabājas 50 % līmenī. Fizelāžai, spārnām un spēka iekārtām izmantojamo sakausējumu drošuma palielināšanas, plaisizturības, noguruma īpašību

palielināšanas uzdevums līdz šim tika risināts, būtiski palielinot sakausējumu tīrību (samazinot silīcija un dzelzs blakus piemaisījumu saturu, lieku fāžu daudzumu), izstrādājot jaunus termiskās apstrādes režīmus, paaugstinot pusfabrikātu kvalitāti.

Aviācijas konstrukciju detaļu no metāliskiem materiāliem defektu iemeslus vispārīgā gadījumā iedala sekojošās grupās: konstruktīvie, tehnoloģiskie, ekspluatācijas defekti un darba nodilums.

Konstruktīvie defekti ir pārrēķināšanās rezultāts detaļas konstruēšanas procesā. Tipiska konstruktīvā defekta iezīme ir detaļas atteice pie „tipveida slodzes”. Cita konstruēšanas kļūdas pazīme ir nepareiza mašīnas detaļu mijiedarbības sasaiste, kā rezultātā pat pie nelielas ārējās slodzes var noteikt atteice, jo slodzes pārsadale notika nelabvēlīgi.

Konstruktīviem defektiem ir raksturīgi tas, ka tie rodas uz visiem apskatāmās detaļas eksemplāriem un nav atkarīgi no izstrādājuma nodiluma pakāpes.

Pie *ražošanas tehnoloģiskiem defektiem* pieskaita defektus, kuru cēlonis ir ražošanas kļūdas [107]. Ražošanas kļūdas var rasties gan detaļas izgatavošanas, gan remonta procesā. Pārsvarā to iemesli ir rasējuma, tehnoloģijas, ražošanas instrukciju prasību, kas reglamentē augstas kvalitātes detaļas izgatavošanu un remontu, neievērošana. Šo kļūdu rezultātā rodas metalurģiskie, metināšanas, kā arī termiskās apstrādes (rūdišanas) defekti.

Tehnoloģiskie defekti rodas vispārpieņemtās izstrādājuma izgatavošanas (remonta) tehnoloģijas neievērošanas rezultātā. Visbiežāk sastopamie tehnoloģiskie defekti ir termiskās apstrādes, galvanisko pārklājumu, metināšanas, kniedēšanas, kā arī izejmateriāla nepilnības defekti. Atšķirībā no konstruktīviem defektiem, tehnoloģiskie defekti tiek atklāti tikai izstrādājumu daļai.

Ekspluatācijas defekti ir izstrādājumu ekspluatācijas apstākļu ierobežojumu neievērošanas sekas. Šādi pārkāpumi ir iespējami, ekspluatējot izstrādājumus nepiemērotajos klimatiskajos, temperatūras un citos apstākļos, kā arī neievērojot izstrādājumu apkopes tehnoloģisku operāciju noteikumus un termiņus.

Noguruma sagrūšana.

Dažādi darba slodžu veidi, iedarbojoties uz aviācijas materiāliem (AM) īsāku vai ilgāku laiku, sekmē to nestspējas samazināšanos (resursa izstrādi) un sagrūšanu. Šo momentu var pavadīt kā ārējās pazīmes (nepieļaujams nodilums, korozija), tā arī iekšējās, slēptās materiāla struktūras transformācijas.

Mainīgu slodžu, kas ekspluatācijas procesā iedarbojas uz konstrukciju, lielums un svārstību frekvence GK ekspluatācijas procesā mainās plašā diapazonā. Sākotnēji šīs slodzes var iedalīt divās klasēs [123]:

pirmā — neregulārās kvazistatisko slodžu secības. Šai klasei pieskaita slodzes, kas rodas lidojuma laikā nemierīgā gaisā vai manevru laikā, pacelšanās un nosēšanās laikā, pārvietojoties pa lidlauku, mainoties spiedienam lidmašīnas hermētiskajā kabīnē u. c. Šo slodžu svārstību frekvence ir no hercu desmitdaļām līdz vairākiem herciem;

otrā — vibrāciju augstas frekvences slodzes. Šai klasei pieskaita svārstības, kas ir saistītas ar dažādām aerodinamiskām parādībām (bafings, kratīšanās u. c.), spēka iekārtas iedarbību, dažādu agregātu darbību u. c. Šo slodžu frekvence ir robežās no dažiem līdz vairākiem simtiem hercu.

Kopējo GK noguruma pretestību nosaka pirmās klases slodzes. Otrās klases slodžu iedarbība nosaka konstrukcijas lokālu zonu slogojumu.

Mainīgās slodzes sekmē noguruma rašanos materiālā — pakāpenisku bojājumu uzkrāšanos, kas izraisa plaisu rašanos un attīstību, kas laika gaitā var sekmēt konstrukcijas sagrūšanu.

Visbiežāk sākotnējās plaisas rodas uz detaļu ārējās virsmas lielu stiepes slodžu iedarbības un virsmas bojājumu (rises, skrāpējumi, uzsitumi, iespaidumi u. c.) rašanās rezultātā. Bieži rodas noguruma plaisas spriegumu koncentrācijas vietās (noapaļojumu vietas, ķīļrietas, caurumi u. c.). Retāk noguruma bojājumi rodas materiāla neviendabīguma dēļ (nemetāliskie ieslēgumi, gāzes pūslīši, dobumi u. c.).

Izstrādājumu *darba nodilums* rodas neatgriezenisku procesu, kas noris ekspluatācijas laikā, veidošanās rezultātā. Darba nodiluma svarīgākās pazīmes ir berzes nodilums, daudzkārtējās plastiskās deformācijas, noguruma, korozijas, termoķīmiskais nodilums un to iespējamās kombinācijas.

Procesi, kas ir saistīti ar mašīnu detaļu darba virsmu nodilumu berzes apstākļos, var tikt iedalīti divās grupās: pieļaujамie nodiluma veidi, kurus raksturo samērā mazi sagrūšanas ātrumi, un nepieļaujамie.

Oksidēšanās nodilums ir pieļaujамs un plaši izplatīts aviācijas tehnikas detaļu nodiluma veids. Tas rodas slīdes berzes un rites berzes gadījumā sausa kontakta vai robežziežvielas apstākļos. Oksidēšanās nodiluma rašanās iemesli ir mikroplastiskās deformācijas un skābekļa difūzijas metālā procesi, kas vienlaikus noris berzes virsmās.

Pie nepieļaujамiem nodiluma veidiem pieskaita sekojošus nodiluma veidus.

1. veida *adhezīvais nodilums* rodas slīdes berzes procesā, kad ir mazs relatīvās pārvietošanās ātrums, un īpatnējais spiediens pārsniedz metāla plūstamības robežu faktiskā kontakta laukumos, kad nav ziežvielu un oksīdu aizsargplēvju.

2. *veida adhezīvais nodilums* rodas slīdes berzes procesā, kad ir liels berzes virsmu relatīvās pārvietošanās ātrums un liels īpatnējais spiediens, kas izraisa intensīvu temperatūras palielinājumu berzes virsmas kontakta vietās. Šī nodiluma gadījumā starp kontakta vietām paaugstinās temperatūra un rodas metāliskās saites.

Abrazīvais nodilums rodas, kad abrazīvās daļiņas iekļūst berzes zonā, un pēc būtības ir intensīva berzes virsmu sagraušana mikroskrāpējumu un mikrogriezumu ceļā. Abrazīvās daļiņas bieži vien ir cietākas par berzes virsmām, tāpēc to izraisītie virsmas slāņu bojājumi var būt būtiski, un atkailinātos laukumos ir iespējama saķere.

Līdz ar apskatītiem nodiluma veidiem ir iespējami arī citi detaļu nodiluma (sagraušanas) veidi. Visizplatītākā ir noguruma sagrūšanas.

Noguruma nodilums ir intensīva detaļu virsmas sagrūšana berzes procesā, kuru nosaka plastiskā deformācijas, iekšējie spriegumi un īpašas noguruma parādības. Tā rezultātā uz berzes virsmas rodas mikroplaisas un plaisas. Noguruma sagrūšana īpaši bieži tiek novērota maiņzīmju slodzes gadījumos.

Izdrupšanas nodilums (pitings) ir raksturīgs detaļām, kas darbojas rites berzes apstākļos (gultņi, zobrati u. c.). Tā rezultātā uz berzes virsmas rodas mikroplaisas un plaisas, kas savienojas vienā punktā un pēc tam izdrūp, veidojot individuālus vai grupveida iedobumus, kas rodas plastiskās deformācijas, iekšējo spriegumu, noguruma parādību rezultātā. Galvenie izdrupšanas nodiluma iemesli ir spiedes un bīdes spriegumi, kas rodas nododamā spēka iedarbības rezultātā vienlaicīgas rites un slīdes apstākļos.

Detaļu korozijas bojājumi ir izplatīti un bīstami defekti, kas rodas ārējās vides ķīmiskās vai elektroķīmiskās iedarbības rezultātā. Tā kā korozijas izpausmes ir visai dažādas, pastāv vairāki tās klasifikācijas veidi: pēc apkārtējās vides, ārējās izpausmes un metāla un vides mijiedarbības fizikāli-ķīmisko parādību rakstura.

Erozijas sabrukums. Vielas virsmas sagrūšanas process ārējās vides iedarbības rezultātā tiek saukts par eroziju. Metālu erozija notiek to virsmas apteces procesā ar cietu, gāzveida vai šķidru daļiņu plūsmu vai elektriskās izlādes gadījumā, sīkām daļiņām triecoties virsmas slānī. Vides termiskā iedarbība vai ķīmiskā agresivitāte būtiski pastiprina erozijas procesu.

Termiskais nogurums — plaisu rašanās un detaļu sagrūšana ciklisko spriegumu, kurus izraisa temperatūras režīmu izmaiņas, iedarbības rezultātā.

Materiāla termiskais nogurums tiek novērots aviācijas gāzturbīnu dzinēju detaļās, kas ekspluatācijas laikā tika pakļautas lielam skaitam palaišanu un apturēšanu, kurus pavada intensīva detaļu sildīšana un dzesēšana.

Fretinkorozija (kontakta korozija) — parādība, kas vēl nav ieguvusi vispārpieņemtu nosaukumu. To sauc sekojoši: „fretings”, „berzes oksidēšanās”, „berze-korozija” u. c.

Fretinkorozija ir viens no koncentrēto detaļu bojājumu veidiem, kas rodas, ja piepildās divi vienlaicīgi eksistējošie nosacījumi: periodiski mazi divu saskarē esošo virsmu, kas nomināli ir nekustīgas savā starpā, pārvietojumi; šo virsmu berzes apstākļi sekmē daļiņu, kas radās nodiluma procesā, bloķēšanu.

Fretinkorozijas procesā vienlaikus noris un mijiedarbojas divi procesi; ķīmiskais (korozija) un mehāniskais (berze).

1.2.2. Konstruktijas elementu no polimēru kompozītmateriāliem defektu raksturojums un to rašanās iemesli

Izgatavojot konstrukcijas no KM, pastāv liels faktoru skaits, kas ietekmē to īpašības. Daudzi no šiem faktoriem ir saistīti savā starpā. Sagrūšanai, kas nosaka konstrukcijas stiprības robežu, ir progresējošs raksturs, un tā rodas dēļ vietējiem defektiem un spriegumu koncentrācijas materiālā [104].

Zināms, ka KM stiprību ietekmē dobumu vai gāzes pūslīšu esamība, saites kvalitāte starp pildījumu un polimēru matricu, kā arī virsmas defekti, kas bojā stieģrojuma nepārtrauktību un viengabalainību. Īsumā apskatīsim katru defektu.

Dobumi KM sekmē stiepes un spiedes stiprības samazināšanos, jo samazinās konstrukcijas šķērsgriezums. Pieņemtās stiprības atkarība no dobumu apjoma tiek aprēķināta saskaņā ar formulu:

$$\sigma_s = a \left[1 - \left(\frac{V_s}{V} \right)^{2/3} \right]$$

kur a — pieņemtā materiāla stiprība, Pa;

σ_s — materiāla cietās vielas stiprība, Pa;

V_s — dobumu apjoms, mm³;

V — materiāla kopējais apjoms, mm³.

Materiāla kopējais apjoms ir vienāds ar cietās vielas apjoma un dobumu apjoma summu. Eksperimentālie dati rāda [104], ka: ja stiklplastam dobumu apjoms sastāda 5 %, stiepes stiprības robeža samazinās 1,15 reizes, bet pie 10 % apjoma – attiecīgi 1,25 reizes.

Mehāniskām īpašībām liela nozīme ir saites stiprība starp pildītāja šķiedrām un polimēru matricu.

Izvēloties KM sastāvdaļas un, izgatavojot konstrukcijas, nepieciešams nodrošināt ķīmiskās saites starp polimēru matricu un šķiedrām, kā arī šķiedru mehānisku „saspiešanu”.

Tomēr, ja netiek nodrošināts uzdotais pildītāju mitrums sasiluma un glabāšanas procesā, plastīta stiprības īpašības būtiski samazinās un sekmē defektu rašanos ekspluatācijas laikā, jo tiek bojāta saite starp šķiedrām un matricu, apšuvumiem un pildītāju.

Apskatīsim KM virsmas defektu ietekmi uz konstrukcijas stiprību.

Virsmas defekti var rasties konstrukciju izgatavošanas laikā, kā arī to ekspluatācijas gaitā. Dotais defektu veids bojā stiegrojuma nepārtrauktību un viengabalainību. Pie virsmas defektiem pieskaita: pildītāja slāņu krokas, viena vai vairāku slāņu malu savienojuma vietas sadūrā vai ar pārlaidumu, makroskopiskas plaisas, skrāpējumus, iegriezumus u. tml.

Krokas sekmē stiepes un spiedes stiprības samazinājumu, virsmas ieplēsumi sekmē stiepes stiprības samazinājumu, apšuvumu slāņošanās, jo stiprības robežas pārsniegšana, virzoties saistvielai, izraisa sagrieztu šķiedru galu atslāņošanās, bet pēc tam arī pilnīgu konstrukcijas sagrūšanu.

Plaisas matricā ir spriegumu koncentratori, kas ietekmē stiprības raksturojumus. Tās attīstās ātrāk nekā slāņošanās, tām var būt atzarojumi, kā arī tās izraisa ātru matricas sagrūšanu starp stiegrotā materiāla slāņiem.

Tādējādi galvenie KM sagrūšanas (pilnīgas vai daļējas) iemesli ir :

- matricas un stiegrošanas materiāla fizikāli-mehānisko un ģeometrisku parametru izkliede;
- nepietiekami labi matricas un stiegrošanas materiāla, līmējošo materiālu adhēzijas un kohēzijas raksturojumi;
- paliekošie spriegumi matricā;
- šķiedras iekšējie tehnoloģiskie mikrodefekti, matricas iekšējie tehnoloģiskie mikrodefekti uz robežvirsmas „šķiedra-matrica” (poras, plaisas, slāņošanās, dobumi, rievās);
- virsmas defekti (rises, skrāpējumi, rievās, plaisas u. c.).

No iepriekš minētā izriet, ka defektus var sadalīt divās klasēs: defekti, kas neattīstās KM konstrukcijā tās darba laikā, kā arī defekti, kas attīstās ekspluatācijas procesā un izraisa ekspluatācijas raksturojumu pasliktināšanos, bet dažreiz arī noved pie katastrofiskām sekām.

Visbiežāk sastopamie KM konstrukciju defekti ir sniegti 1. pielikumā.

1.3. Aviācijas konstrukciju stāvokļa vispārināts novērtējums, balstoties uz to materiālu fizikāli-mehānisku īpašību mērīšanu

AM vispārinātu stāvokļa novērtējumu dažādās darba stadijās var veikt, mērot to fizikāli-mehāniskus raksturojumus mehānisko izmēģinājumu laikā, kurus veic gan laboratorijas, gan ražošanas apstākļos.

Novērtējot AM pēc paraugu mehānisko izmēģinājumu rezultātiem, parasti paredz, ka ir noteikta sakarība (kvantitatīva vai kvalitatīva) starp mehāniskām īpašībām un parauga uzvedību modelētajos slogošanas un deformācijas procesos. Kā izrādījās, šīm kopsakarībām ir diezgan sarežģīts, bet dažreiz arī pretrunīgs raksturs.

Ticamu kopsakarību atklāšanu starp fizikāli-mehāniskām īpašībām un nestspēju sniedz rezultāti, kas iegūti konstrukcijas elementu izmēģinājumos reālos apstākļos, bet tie ir saistīti ar lielām materiālām un laika izmaksām.

Efektīvu rezultātu var sasniegt, ja nosaka tikai tos materiālu raksturojumus, kas ir tiešā veidā saistīti ar potenciālo elementa sagrašanās veidu ekspluatācijas apstākļos. Šādu raksturojumu izvēli var veikt, balstoties uz to elementu analīzi, kuriem iestājas atteice, kā arī, atklājot pazīmes, kas viennozīmīgi norāda uz graužošu slodzi. Mehānisku sistēmu elementiem šo uzdevumu var atrisināt, piemēram, pētot metālisku konstrukciju sagrašanās (lūzuma) virsmas [86]. Kopsakarību starp lūzuma struktūru un konkrētu sagrašanās veidu var apstiprināt metālu fizikālā analīze (metāliskām konstrukcijām). Lūzuma vietās sekojošiem slogojuma veidiem parasti ir redzamas skaidras materiālu sagrašanās rakstura pazīmes: īslaicīgam statiskajam slogojumam normālā temperatūrā (šajos apstākļos izmēģina, piemēram, šasijas balstus), ilglaicīgam statiskajam slogojumam paaugstinātā temperatūrā (raksturīgi turbīnu diskām un lāpstiņām) un vibrāciju-cikliskajam slogojumam normālā temperatūrā (kompresora darba lāpstiņas u. tml.).

Ja konstrukcija tiek slogota ar lielu īslaicīgu statisku slogojumu, tās sagrašana parasti notiek pēkšņi. Zināmi sekojoši kritēriji, kas norāda uz materiālu pēkšņas nestspējas zaudēšanu paaugstinātu slodzi iedarbības rezultātā [115]:

- maksimālo galveno spriegumu kritērijs (pieņem, ka sagrašana iestājas pie nosacījuma $\sigma_{max} = \sigma_{0,1}$);
- maksimālo tangensa spriegumu kritērijs ($\tau_{max} = \sigma_{0,2}$);
- uzkrātās deformācijas enerģijas kritērijs (sagrašanās kritērijs ir fiksētā deformācijas enerģija, kas uzkrājas no neatgriezeniskas materiāla deformācijas parādīšanās brīža līdz sprieguma robežvērtības sasniegšanas brīdim);

- bīdes deformācijas enerģijas kritērijs (sagrūšana iestājas, kad bīdes deformācijas enerģija sarežģītā slogotā stāvoklī kļūst vienāda ar deformācijas enerģiju vienas ass stiepē);
- maksimālo galveno deformāciju kritērijs (Sen-Venāna kritērijs). Maksimālā deformācija, kas atbilst sagrūšanai, ir saistīta ar spriegumiem, kas ir orientēti pa trim asīm $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, elastības moduli E un Puasona koeficientu ν ar kopsakarību: $\varepsilon = (\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3)/E$.

Praksē iepriekš minētu kritēriju darbību var novērot, piemēram, gaisa kuģa nepieļaujami cietās nosēšanās laikā (triecienslodzes šasijas elementiem, spārna spēka sijām u. tml.). Reālos ekspluatācijas apstākļos šos kritērijus nevar izmērīt, bet tie ir vērtīgi ar to, ka orientē mūs uz galvenajiem šasijas materiāla stiprības rādītājiem, proti: elastības robeža $\sigma_{0,1}$, plūstamības robeža $\sigma_{0,2}$, kā arī relatīvs pagarinājums δ un sašaurinājums ψ .

Ja ilgstoši iedarbojas pieliktās statiskās slodzes vai paaugstinātas temperatūras, iespēju robežās novērtē divas raksturlielumu grupas: ilgzturības robežu (σ_{ilg}) un maksimālu deformāciju (ζ_{max}).

Lai novērtētu materiāla noguruma pakāpi, var veikt virkni netiešu pārbaužu (novērtēt virsmas slāņa viendabīgumu (t. s. heterogenitāti), tā nostiprināšanas pakāpi, paliekošo spriegumu sadalījumu u. tml.) vai veikt paraugu noguruma izmēģinājumus, pēc kuru rezultātiem var pieņemt lēmumu par turpmākās konstrukcijas ekspluatācijas iespējamību (to bieži dara attiecībā uz kompresoru lāpstiņām).

Minētie stāvokļa parametru izvēles piemēri balstās uz loģisku konstrukcijas (objekta) fizikālā modeļa analīzi. Eksistē virkne citu pieeju raksturojumu izvēlei, kas atspoguļo konstrukcijas nestspēju pie noteiktā slogojuma veida, tas ir, balstoties uz ekspertu novērtējumiem, statistiskajiem novērtējumiem, fizikāli-mehāniskā parametra „jutīguma” novērtējumu, tā informativitātes novērtējumu utt.

Eksperimentālā pieeja balstās uz ekspertu-speciālistu, kuriem ir pieredze šajā materiālu mehānisko īpašību pētīšanas jomā, rekomendāciju izmantošanu [124].

Statistiskais novērtējums balstās uz parametru realizācijas biežuma, kad materiāls atrodas avārijas stāvoklī, skaitīšanu un no tā izrietošās prioritārās parametru grupas izvēli [117].

Izvēloties parametrus pēc to „jutības” novērtējuma rezultātiem, orientējas uz matemātiskajiem, visbiežāk lineārajiem materiāla konstrukcijas novecošanas modeļiem, kas ir izteikti parametru un tās nestspējas dzīves cikla etapā kopsakarību veidā [106].

Informatīvu kritēriju izmantošana ļauj ticamāk izteikt materiāla stāvokli no vairākiem stāvokļiem. To sasniedz, analītiski novērtējot informāciju, ko sniedz katrs no parametriem, attiecībā pret kādu konkrētu stāvokli [77].

Tādējādi, pastāv diezgan daudz pieeju AM nestspējas kritēriālā novērtējuma izvēlei. Iepriekš minētajam var piebilst, ka pareizi izvēlēti fizikāli - mehāniskie raksturojumi ļauj fiksēt AM stāvokli ne tikai „dotajā brīdī”, bet var tikt izmantoti arī kā materiāla uzvedības novērtējuma instruments noteiktajam sloģojuma veidam, t. i., prognozei uz nākamo darba periodu, kas ir svarīgi praksē.

1.4. Aviācijas konstrukciju paliekošās stiprības novērtēšanas metožu analīze

Dažādu mašīnu un būvju konstrukcijas stiprības novērtēšanas metodika paredz izmēģinājumu veikšanu saskaņā ar speciālām programmām, kas ņem vērā to ekspluatācijas īpatnības. Piemēram, veicot aviācijas (un citu atbildīgu) konstrukciju stiprības novērtējumu, tos sākotnēji pakļauj cikliskiem noguruma izmēģinājumiem, kas parasti imitē ekspluatācijas sloģojumu. Pēc noteikta sloģojumu ciklu skaita (vai pēc defekta rašanās, parasti tā ir noguruma plaisa) objektu pakļauj paliekošās stiprības izmēģinājumiem.

Paliekošās stiprības izmēģinājumi vairumā gadījumu ir statistiskie (precīzāk, kvazistatiskie) izmēģinājumi [30,88] ar slodzes palielināšanu (iespējama pakāpeniska vai pakāpjveidīga sloģošana). Izmēģinājumu procesā objekts tiek sloģots līdz sagrūšanai un paliekošās stiprības kritērijs (novērtējums) ir slodzes vērtība sagrūšanas brīdī [49].

Tomēr šāds kritērijs nav pilnīgs dažiem pielietojumiem. Pirmkārt, tas neatspoguļo sagrūšanas kinētiku (t. i., piemēram, to, kad (pie kādas slodzes attiecībā pret sagrūšanas slodzi) defekts (bojājums) sāka attīstīties). Otrkārt, tas nav pietiekams objektiem, kuru funkcionēšana ar bojājumiem ir ierobežota vai nav pieļaujama. Ja šādiem objektiem defekts rodas ekspluatācijas procesā ar noteiktu ticamības pakāpi objekta sagrūšana var iestāties arī pie mazākas slodzes, kas attiecīgi izraisa nopietnākas sekas (cilvēku bojāeja, u. tml.). Šajos gadījumos lietderīgi vismaz iegūt informāciju par objekta sagrūšanas procesa sākumu paliekošās stiprības izmēģinājumos un izmantot to objekta stiprības novērtēšanai.

Aviācijas tehnikas elementu un sistēmu kontroles metodes var nosacīti iedalīt sekojošās grupās: lineāro un leņķizmēru mērījumi, stenda izmēģinājumi, sagraujošā kontrole, nesagraujošā kontrole, statistiskā kontrole.

Lineāro un leņķizmēru mērījumus pielieto visos gadījumos, kad ir nepieciešams noteikt detaļu ģeometrisku parametru (izmēru, formas, virsmu savstarpējā izvietojuma) atbilstību normatīvajai dokumentācijai.

Stenda izmēģinājumus lieto aviācijas tehnikas (agregātu, aparātu, sistēmu u. c.) speciālajos kontroles un pieņemšanas izmēģinājumos. Izmēģinājumu objektu parametru pārbaude notiek ar stendu palīdzību. Stendi ir iekārtas, kurām ir palīgierīces izmēģināmā parauga ātrai uzstādīšanai un nostiprināšanai, kontroles un mērījumu iekārtas, elektroenerģijas, saspīestā gaisa, ūdens, tvaika, eļļas, degvielas (atkarībā no objekta: izmēģinājumu programmas) padeves komunikācijas, vadības pults. Smagu lidaparātu konstrukcijas elementu izmēģinājumiem stendus aprīko ar grozāmiem celšanas un transportēšanas līdzekļiem. Kontrolmērījumu aparatūras rādījumus izmēģinājumu procesā nolasa vizuāli vai ar pašrakstītāju palīdzību. Masveida un automatizētajā ražošanā lieto griestos iebūvētus pusautomātiskus vai automātiskus stendus. Izmēģinājumu objekta uzstādīšana vai noņemšana, visu pievienojumu veikšana un rādījumu nolasīšana tiek veikta minimālajā stingri reglamentētajā laikā.

Sagraujošā kontrole (mehāniskie izmēģinājumi) tiek lietota materiāla mehānisko īpašību, kas ir to kvalitātes rādītāji, novērtēšanai. Ar mehānisku izmēģinājumu palīdzību nosaka materiāla spēju pretoties deformācijai vai deformēties slodzes ietekmē; nosaka robežvērtību, līdz kurai materiāls spēj izturēt ārējo slodzi bez sagraušanas.

Lai iegūtu materiālu mehānisko īpašību rādītājus, veic statiskus un dinamiskus izmēģinājumus (stiepes, spiedes, lieces, vērpes, cirpes, noguruma, trieciena u. c. izmēģinājumus). Šie izmēģinājumi var būt īslaicīgi vai ilgstoši, veikti zemās, istabas vai augstās temperatūrās. Atsevišķos gadījumos veic cietības, plastiskuma, stiepšanas izmēģinājumus. Dažreiz veic gatavu izstrādājumu reālus izmēģinājumus stendos. Visu veidu mehāniskajos izmēģinājumos tiek atveidoti pēc iespējas reālāki izstrādājumu darba apstākļi. Iegūtus rezultātus — materiālu un izstrādājumu mehānisko īpašību kvantitatīvus raksturojumus — izmanto aviācijas tehnikas detaļu stiprības aprēķinos.

Tā kā sagraujošajos izmēģinājumos paraugi, sagataves, mezgli un agregāti mehānisko slodžu iedarbībā tiek novesti līdz sagraušanai, šāda kontrole nevar būt pilnīga. Tā var būt tikai izlases. Bet izlases kontroli nedrīkst pielietot aviācijas tehnikas atbildīgu elementu ar minimālu stiprības rezervi, kas darbojas smagos ekspluatācijas apstākļos, kvalitātes novērtēšanai, jo tā nenodrošina nepieciešamu drošumu. Lidaparātu elementu kvalitātes drošumu var nodrošināt tikai pilnīgā kontrole ar nesagraujošo metožu palīdzību.

Nesagraujošo kontroli (fizikālās kontroles metodes) lieto nevienlaidību (dobumu, ieslēgumu, plaisu, slāņošanās, iespiedumu u. c.) atklāšanai sagatavju, detaļu un mezglu materiālos, materiāla struktūras noteikšanai, tā cietības, elektrovadītspējas, termiski

stiprinātu slāņu, laku krāsas un citu aizsargslāņu biezuma noteikšanai, vadu, cauruļu, lokšņu biezuma noteikšanai u. tml.

Strikti runājot, pie nesagraujošās kontroles varēja pieskaitīt arī lineārus un leņķizmēru tehniskus mērījumus un stenda izmēģinājumus. Šīs metodes arī nepasliktina kontrolējamo objektu ekspluatācijas drošumu. Bet vēsturiski ir izveidojies tā, ka pie nesagraujošās kontroles pieskaita tikai defektoskopiju, biezuma mērīšanu un materiālu fizikāli-mehānisku īpašību noteikšanu ar nesagraujošu metožu palīdzību. Sīkāk šīs metodes tiks apskatītas tālāk.

Statistiskā kontrole balstās uz varbūtības teorijas un matemātiskās statistikas jēdzienu pielietošanu. To izmanto gan tehnoloģiskā procesa norises regulēšanai un vadībai, gan izgatavojamo detaļu partiju kvalitātes kontrolei. Pirmajā gadījumā mērķis ir brāķa profilakse, periodiski novērojot procesa norises pareizību. Zināms, ka pat noregulētajā un iestatītajā tehnoloģiskajā līnijā laika gaitā notiek nobīdes no apstrādājamo detaļu parametriem. Šīs nobīdes nosaka gadījuma un sistemātiskās kļūdas, piemēram, instrumenta un darbgalda kustīgo elementu nodilums, apstrādājamā izstrādājuma termiskā deformācija u. tml.

Pēc noteikta darbgalda darba laika intervāla vai pēc noteikta detaļu skaita apstrādes tiek paņemta izlase no n detaļām, kas tiek pakļauta kontrolei. Mērījumu rezultātus pēc matemātiskās apstrādes ieraksta tehnoloģiskajā kartē, kas ļauj sekot līdzi ražošanas procesa norisei un darbgaldu iestatīšanas un regulēšanas novirzēm, kas iezīmējas tajā.

Statistiskās regulēšanas metode ļauj laicīgi atklāt šīs novirzes un ieviest attiecīgās korektīvas.

Otrajā gadījumā tiek risināts tīri pārbaudes uzdevums — detaļu partijas atbilstības pārbaude tehniskiem nosacījumiem. Pārbaudi var veikt saskaņā ar kvantitatīvām, kvalitatīvām vai alternatīvām pazīmēm.

Piemēram, lai pieņemtu lēmumu par partijas, kurā ir N izstrādājumu, kvalitāti pēc alternatīvās pazīmes (izstrādājumu iedala derīgajos un nederīgajos), nepieciešams noteikt bojātu izstrādājumu M daļu q šajā partijā:

$$q = M/N$$

Šim nolūkam no kopējā izstrādājumu skaita N izvēlas noteiktu vienību skaitu n un pakļauj to kontrolei. Rezultātā tiek atklāts bojātu izstrādājumu daudzums m . Zinot lielumu N un M vērtības, var izdarīt slēdzienu par bojātu izstrādājumu daļu q visās partijās.

Kā redzams, abas šīs metodes balstās uz matemātiskās statistikas izlases procedūrām, un parasti tām ir nepieciešams neliels detaļu daudzums [79].

1.5. Aviācijas tehnikas nesagraujošās un sagraujošās kontroles metožu un līdzekļu analīze

Līdz ar rūpniecisku ražošanu, nesagraujošā kontrole (NK) guva plašu pielietojumu visu veida mašīnu tehniskajā apkalpošanā un remontā. Īpašu vietu NK ieņem aviācijas tehnikas remonta un ekspluatācijas jomā. Droši var apgalvot, ka gaisa kuģu tehniskās apkalpošanas un remonta nozare ir noteicošā daudzu NK metožu un līdzekļu izstrādē, pielietošanā un attīstībā. Tas ir saistīts ar nepieciešamību nodrošināt augstu lidojumu drošību, un to nosaka tiešā NK kvalitātes ietekme uz aviācijas tehnikas drošumu.

Aviācijas tehnikas ekspluatācijā un remontā plašu pielietojumu guva sekojošās fizikālās NK metodes: kapilārā, akustiskā, virpuļstrāvas, optiskā, siltuma, elektriskā, radiācijas un noplūžu meklēšanas metodes. Pamata, t. i., visbiežāk pielietojamās aviācijā ir pirmās piecas nesagraujošās kontroles metodes (NKM). Tās ir: magnētiskās, kapilārās, akustiskās, virpuļstrāvas, optiskās.

Ir vērts atzīmēt, ka aktīva iepriekš minēto NKM pielietošana aviācijas tehnikas detaļu un mezglu tehniskā stāvokļa kontrolei sākās tikai 20. gs. 40. gadu beigās, kad reaktīvās lidmašīnas aizstāja virzuļu lidmašīnas. Magnētiskās NKM sāka plaši pielietot sākot ar 1949. gadu, kapilārās — ar 1958. g., ultraskaņas defektoskopiju — ar 1961. g. un virpuļstrāvas NKM — ar 1963. g. Pirms tam, kā nesagraujošā kontrole, galvenokārt tika pielietota vizuālā defektācija.

1.5.1. Optiski–vizuālā kontrole

Optiski-vizuālā (OV) [71] kontrole balstās uz ģeometriskas optikas likumu izmantošanu, t. i., gaismas staru izplatīšanās, atstarošanas un laušanas likumiem optisku iekārtu sistēmās. Ar jēdzienu „gaisma” saprot elektromagnētisku starojumu ar viļņa garumu no 400 līdz 750 nm, kuru uztver cilvēka acs, kā arī starojums spektra infrasarkanajā un ultravioletajā daļā. OV kontroli pārsvarā veic redzamajā gaismā. Iekārtu optiskās sistēmas veido apskatāmā objekta attēlu un nodod to cilvēka acī.

Minimālais priekšmeta un fona spilgtuma kontrasts, kuru atšķir acs, tiek saukts par redzes kontrasta jutīguma sliekšni. Lielākai daļai cilvēku tas sastāda 1–2 %. Veicot detaļu apskati, šis sliekšnis salikumam "detaļa — detaļas virsma" ir lielāks un sastāda 5 % un vairāk. To nosaka defekta un detaļas virsmas zems spilgtums, mazs defektu leņķizmērs, atspīdumi, kā arī citu traucējošu faktoru ietekme. Praktiski defektu, piemēram, plaisas uz detaļas, kontrasts sastāda 0–1 % līdz 15–20 %. Tādējādi dažiem defektiem kontrasts ir zemāks par reālo sliekšņa vērtību. Tos nevar noteikt ar aci.

Tomēr pat apstākļos, kad ir liels kontrasts un pietiekama apgaismojuma intensitāte, acs var izšķirt tikai tos apskatāmā priekšmeta elementus, kuru leņķizmērs ir lielāks par noteiktu vērtību. Šī vērtība, kuru sauc par redzes asumu, normālai redzei optimālos apstākļos ir vienāda ar 1'. Cilvēku vidējais redzes asums sastāda 2–4'. Ja redzes asums ir 2', tad 250 mm attālumā acs var izšķirt figūras, kuru izmērs ir vismaz 0,15 mm.

Palielinoties optisku iekārtu palielinājumam, būtiski samazinās redzes lauks un asuma dziļums, cilvēks ātrāk nogurst, kā arī samazinās ražīgums un kontroles ticamība. Tāpēc detaļu apskatei pārsvarā lieto optiskās iekārtas ar palielinājumu ne vairāk par 20–30.

Optiskās ierīces lieto:

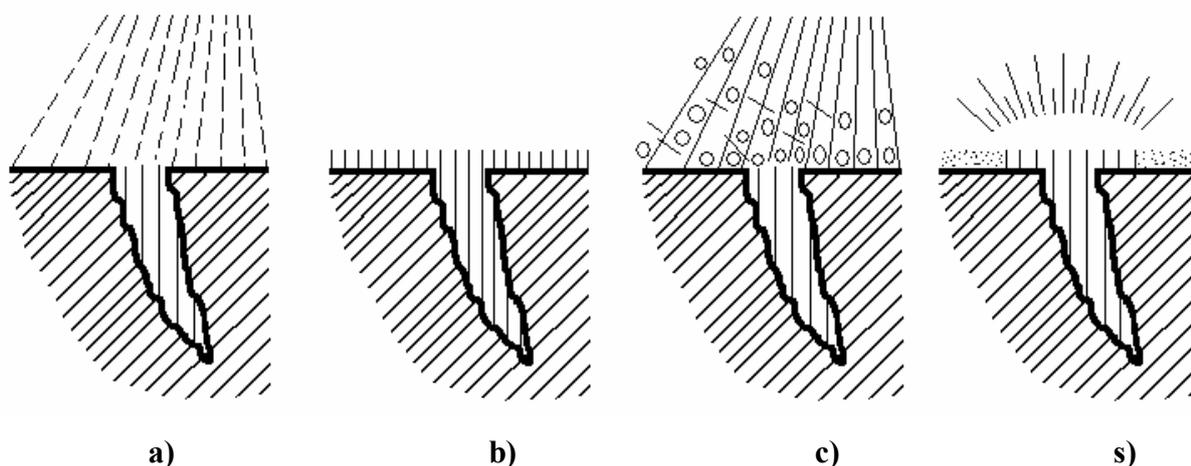
- virsmas defektu meklēšanai uz detaļas virsmas, veicot OV kontroli, kā arī sīku plaisu atklāšanai, veicot krāsu un pulvera magnēta kontroli;
- aviācijas konstrukciju detaļu un spēka elementu deformācijas un sagrūšanas vietu meklēšanai;
- virsmas defektu, kas tika atklāti, kontrolējot detaļas ar ultraskaņas, virpuļstrāvas, krāsu un pulvera magnēta metodēm, veida noteikšanai, rakstura analīzei, bīstamības pakāpes novērtēšanai;
- piededžu nosēdumu novērtēšanai, piesārņojumu, caurumu meklēšanai, nepiederošo priekšmetu atklāšanai slēgtu konstrukciju iekšpusē.

Optiskās ierīces pēc to pielietojuma iedala trīs grupās:

1. Ierīces blakus izvietotu objektu kontrolei (lupas, mikroskopi).
2. Ierīces attālinātu objektu kontrolei (teleskopiskas lupas, binokļi).
3. Ierīces slēptu objektu kontrolei un urbumu iekšējo virsmu, dobru detaļu un slēgtu konstrukciju apskatei (endoskopi, periskopi, boroskopi u. c.).

1.5.2. Kapilārās NK metodes un līdzekļi

Kapilārās metodes balstās uz kapilāro efektu, t. i., indikatora šķidrumu kapilāro īpašību izmantošanu, kas slapina kontrolējamo detaļu materiālus, iekļūst plaisās (nevienlaidību dobumos), bet pēc tam vielu ar augstām adsorbcijas īpašībām iedarbības rezultātā izkļūst no plaisas dobuma uz āru (tiek uzsūktas ar šīm vielām kapilāro spēku iedarbības rezultātā) un iezīmē defektu atrašanās vietu (1.6. att.). Indikatora šķidrumus, kurus izmanto, lai iekļūtu defektu dobumos, sauc par indikatora penetrantiem (no latīņu valodas "penetro" — iekļūt, sasniegt).



1.6. att. Kapilārās defektoskopijas shēma:

- a) — indikatora šķidruma uzklāšana; b) — lieka šķidruma noņemšana; c) — attīstošā vielas uzklāšana;
d) — indikatora zīmējuma novērošana

Kapilārās NK metodes lieto ar neapbruņotu aci neredzamu vai vāji redzamu virsmas defektu atklāšanai. Ar kapilārām metodēm var kontrolēt jebkuras formas un izmēru objektus, kas ir izgatavoti no jebkuriem cietajiem neporainajiem materiāliem: melnajiem un krāsainajiem metāliem un sakausējumiem, plastmasām, stikla, keramikas, kā arī citiem cietajiem neferomagnētiskajiem materiāliem. Kapilārās metodes pielieto arī detaļu, kas ir izgatavotas no feromagnētiskajiem materiāliem, kontrolei, ja to magnētiskās īpašības, defektu formas, veidi un atrašanās vietas neļauj nodrošināt prasāmu jutību pulvera magnēta metodes izmantošanas gadījumā vai kādu citu iemeslu dēļ pulvera magnēta metodes pielietošana nav pieļaujama (piemēram, objekta ekspluatācijas apstākļu dēļ).

Pašlaik izstrādāts diezgan liels NK metožu, kas izmanto kapilāro efektu, daudzums. Zemāk, pielietošanas secībā, sniegts to īss raksturojums.

Krāsu NK metode. Metode balstās uz krasaina indikatora zīmējuma un kontrolējamā objekta virsmas fona kontrasta reģistrāciju. Indikatora zīmējums — plaisas (neviendabīguma) attēlojums, kas ir līdzīgs tās profila formai tuvu detaļas virsmai, kuru veido penetrants.

Luminiscences NK metode. Balstās uz luminiscējošā indikatora zīmējuma kontrasta reģistrāciju. Indikatora zīmējumi no sākuma aplūko redzamajā, bet pēc tam garo viļņu ultravioletajā starojumā.

Luminiscences-krāsu NK metode. Metode balstās uz krāsu un luminiscējošā zīmējuma kontrasta reģistrāciju. Indikatora zīmējumi no sākuma aplūko redzamajā, bet pēc tam garo viļņu ultravioletajā starojumā.

Spilgtuma NK metode. Metode balstās uz ahromātiska indikatora zīmējuma un kontroles objekta virsmas fona kontrasta reģistrāciju.

Jāpiebilst, ka aviācijas tehnikas remonta nozarē plaši pielieto tikai pirmās trīs kapilārās nesagraujošās kontroles metodes: krāsu, luminiscences un luminiscences-krāsu metodes. Eksploataācijas apstākļos, veicot aviācijas tehnikas apkalpošanu, parasti pielieto tikai krāsu NK metodi [73,87,111].

1.5.3. Magnētiskās NK metodes un līdzekļi

Magnētiskās KNM [113,114] balstās uz feromagnētisku materiālu īpašību mainīt savus magnētiskus raksturojumus, parādoties defektiem (neviencilādībām, struktūras, sastāva, izmēru izmaiņām u. tml.). Uzskatāmākais ir magnētisku īpašību izmaiņu mehānisms, attīstoties materiāla neviencilādībām. Ja detaļu no feromagnētiskā materiāla ievieto magnētiskajā laukā, defekta zonā (plaisā, dobumā, sīkplaisā, sārņu ieslēgumā) izveidosies neviencilādīgs magnētisks izkliedes lauks.

Magnētisks izkliedes lauks rodas būtisku detaļas materiāla magnētiskās caurlaidības izmaiņu dēļ defektu rašanās vietās. Turklāt pretējās plaisas malas kļūst par otrādi vēršiem lokālā magnēta poliem (attiecībā pret pieliktā magnētiskā lauka poliem), vājinot iekšējās magnētiskās plūsmas.

Šāds lokāls magnēts defekta zonā feromagnētiskiem materiāliem saglabājas arī pēc ārējā magnētiskā lauka noņemšanas (atslēgšanas), kas arī ļauj noteikt defektu pēc tā saucamās atlikušās magnetizācijas kontrolējamās detaļas materiālā.

Atkarībā no defektu zonas atklāšanas paņēmiena (ar izkliedes lauku vai lokālu magnētu) izšķir trīs galvenos magnētiskās nesagraujošās kontroles veidus: pulvera magnēta, magnetografisko un ferozondējošo. Tomēr ir nepieciešams atcerēties, ka ir arī citas magnētiskās NK metodes: indukcijas, Holla efekta, pondemotorā un magnētiskās pretestības

metodes, kas ļauj ne tikai atklāt nevienlaidības, bet arī veikt metālu mehānisku īpašību un struktūras kontroli, kā arī tiek pielietotas biežuma mērīšanā.

Magnētisko NKM pielietošanas nozare pamatā attiecas uz feromagnētiskajiem materiāliem un to izstrādājumiem. To plaši pielieto aviācijas tehnikas remonta uzņēmumos, lai uz feromagnētiskām detaļām atklātu tādus defektus kā nevienlaidības, kas iziet uz virsmas (ir redzamas) vai atrodas zem virsmas (līdz 3 mm atkarībā no defekta veida, kontroles režīma un paņēmiena). Ar magnētisku NKM visvienkāršāk atklāj rūdīšanas, termiskās, noguruma un rukuma plaisas, nemetāliskus ieslēgumus, kalšanas defektus u. tml. ar defekta atvēruma platumu 0,01–0,03 mm un dziļumu 0,01–0,04 mm.

1.5.4. Virpuļstrāvas NK metodes un līdzekļi

Virpuļstrāvas nesagraujošās kontroles metodes [84,85] balstās uz virpuļstrāvas pārveidotāja (VP) elektromagnētiskā lauka un kontrolējamā objekta virpuļstrāvu elektromagnētiskā lauka savstarpējās iedarbības analīzi. Virpuļstrāvas kontrolējamā objekta materiālā ierosina ar virpuļstrāvas pārveidotāja spoli.

Šīs strāvas veido savu elektromagnētisku lauku. Šis lauks mijiedarbojas ar VP magnētisku lauku un maina tā elektriskus parametrus (komplekso pretestību, spriegumu u. t. t.).

VP spoles elektrisku parametru izmaiņas signalizē par kontroles objekta materiāla kvalitāti.

Virpuļstrāvu raksturu, kā arī VP elektrisku parametru izmaiņas ietekmē vairāki faktori. Virpuļstrāvas nesagraujošajai kontrolei tā vienlaikus ir gan priekšrocība, gan trūkums. No vienas puses, virpuļstrāvas NK ir plaša pielietojuma joma. No otras — kontrolējot noteiktu kontroles objekta materiāla īpašību, pārējās kļūst par šķēršļiem, kuru ietekmi nepieciešams mazināt.

Virpuļstrāvas defektoskopi. Virpuļstrāvas parametri būtiski mainās metālu nevienlaidības zonās, tāpēc tos pielieto plaisu un citu nevienlaidību atklāšanai. Virpuļstrāvas defektoskopu tipa ierīces ir mazgabarīta, ar individuālu barošanu, vienkāršas, drošas, vieglas un ērtas ekspluatācijā. Tās guva plašu pielietojumu aviācijas tehnikas tehniskajā apkalpošanā detaļu no nemagnētisku un vāji magnētisku metālu NK, kā, piemēram: gāzturbīnu dzinēju lāpstiņas un kompresori, propelleru lāpstiņas, avio riteņu veltņi, lidaparātu vadības sistēmu detaļas, lidaparāta planiera spēka uzņemšanas detaļas, lidaparātu salaiduma mezgli u. tml.

1.5.5. Akustiskās kontroles metodes

Akustiskās kontroles metodes — nesagraujošās kontroles metožu komplekss, kura pamatā ir plaša frekvenču diapazona elastīgu svārstību izmantošana. Tās balstās uz elastīgu viļņu spēju izplatīties viendabīgajā elastīgajā vidē un uz tās virsmas un atstaroties no nevienlabīgiem veidojumiem un to vides robežām [62,79,80].

Ar akustisko metožu palīdzību pusfabrikātos un izstrādājumos, kas ir izgatavoti praktiski no jebkuriem materiāliem, var atklāt virsmas un iekšējus defektus, kas ir nevienlaidības, struktūras nevienlabīgums, starpkristālu korozijas bojājumu zonas, līmēšanas, lodēšanas, metināšanas defekti u. tml. Akustiskās metodes ļauj mērīt ģeometriskus parametrus, piemēram, izstrādājuma biezumu, ja pieeja tam ir iespējama tikai no vienas puses, kā arī fizikāli-mehāniskas materiālu īpašības. Pēdējā laikā šīs metodes veiksmīgi izmanto paraugu un reālu izstrādājumu sākotnējās sagrūšanas stadijas kinētikas pētīšanai noguruma izmēģinājumos.

No pazīstamām akustiskām (ultraskaņas un skaņas) detaļu kontroles metodēm lidlauka apstākļos aviācijas tehnikas ekspluatācijā plaši pielieto atbalss — impulsa un impedances metodes. Atsevišķajos gadījumos izmanto ēnu vai spoguļa — ēnu metodi. Perspektīvas ir akustiskās emisijas un trokšņu-vibrācijas metodes.

Impulsa atbalss metodi pielieto noguruma plaisu atklāšanai detaļās un mezglos, kas atrodas konstrukcijas grūti sasniedzamās vietās, iekšējo defektu atklāšanai spēka iekārtu metinātajās šuvēs, degkameru apvalku materiālos u. c.

Impedances metodi pielieto līmētu savienojumu kontrolei konstrukcijās ar šūnu pildītāju.

Rezonances metode balstās uz rezonances svārstību, kas rodas kontroles objektā, parametru reģistrāciju. Nosakot sistēmas rezonances frekvenci, metode ļauj mērīt izstrādājumu biezumu (piemēram, rezervuāru sienu biezumu) kontrolējamajā zonā, noteikt defektus šajā zonā (piemēram, atslāņošanas), noteikt šķidruma līmeni slēgtajos rezervuāros.

Ultraskaņas metode virknē gadījumu izrādījās vienīgā iespējamā metode lidmašīnas detaļu defektoskopiskās kontroles sarežģītu uzdevumu efektīvai risināšanai.

Ultraskaņas svārstības, kuras ģenerē pjezopārveidotājs, ir brīvs impulss, precīzāk, viļņu kopums, kura pamata frekvence atbilst plāksnes pašsvārstību frekvencei. Objektu kontrolei izmanto vairāku veidu ultraskaņas viļņus: garenvilņus, šķērsvilņus un virsmas viļņus.

Akustiskās kontroles laikā īpaši svarīga ir ultraskaņas svārstību ievade kontrolējamajā izstrādājumā ar minimāliem svārstību enerģijas zudumiem pārveidotāja un detaļas kontakta vietā. To sasniedz ar ultraskaņas svārstību ievadi caur īpaši plānu šķidrums (piemēram, eļļa — vienkāršas konfigurācijas detaļām) slāni vai caur imersijas šķidrums slāni, kā arī pielietojot īpašus meklētājus.

1.5.6. Tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu priekšrocību un trūkumu analīze

Kopējie tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu galvenie raksturojumi ir parādīti 2. pielikumā.

No 2. pielikumā tabulas izriet, ka visām metodēm ir nepieciešama piekļuve vismaz pie vienas kontrolējamā objekta virsmas, tām ir noteikti kontrolējamā objekta ģeometrijas ierobežojumi, prasības virsmas un defekta dobuma tīrībai attiecībā uz pārklājumiem vai nepiederošām vielām. Visaugstākā jutība ir kapilāru metodei, kurai nepieciešams zināt precīzu defekta atrašanās vietu, bet tieši ultraskaņas metode ļauj noteikt defektus labākajā gadījumā ar dziļumu 0,1 mm. Turklāt lielu ietekmi uz jutību uz šiem defektiem atstāj to atvērums, kuram ir jābūt ne mazākam par 0,1 μm .

Īpaši ir jāpiemin šo metožu darbietilpība, piemēram, ultraskaņas un virpuļstrāvu metodes tiek realizētas, devējam skenējot visu kontrolējamo virsmu. Nobeigumā var teikt, ka neviena no standarta NK metodēm neļauj veikt kontroli izstrādājuma ekspluatācijas procesā, t. i., tās nespēj sniegt informāciju par noguruma bojājumu uzkrāšanos, par rašanās momentu un UT pieaugumu reālā laika mērogā.

Visus šo trūkumus var novērst ar AE metodi.

Sagatavošanās un kontroles darbietilpība ir vairākus desmitus (simtus) reižu zemāka, nekā citām NK metodēm: metodei nav nepieciešama visaptveroša virsmas skenēšana, t. i., devējus uz pētāmā objekta var uzstādīt lokāli, kas ievērojami samazina darbības izmaksas: minimāla izolācijas noņemšana, minimāla virsmas attīrīšana.

Pēc kontroles apjomiem kontrole ir globāla. Uzstādot dažus devējus, tiek veikta visa objekta kontrole, objekta defektu rašanās un attīstības kontrole (monitorings) funkcionēšanas laikā un pāreja no periodiskām tehniskajām apsekošanām uz objekta ekspluatāciju pēc tā fiziski tehniskā stāvokļa.

Ļauj pilnībā diagnosticēt objektu, nepārtraucot esošo ekspluatācijas režīmu vai pārtraucot ekspluatāciju uz minimālu laiku, kas, salīdzinājumā ar tradicionālajām NK

metodēm, kurām ir nepieciešama objekta ekspluatācijas pārtraukšana, sniedz acīmredzamas ekonomiskās priekšrocības.

AE kontroles metode nodrošina tikai progresējošu, tātad patiešām bīstamu objektu konstatēšanu un reģistrāciju, kā arī veic to klasifikāciju nevis pēc izmēriem, bet gan pēc bīstamības pakāpes. Tas nozīmē, ka daži, piemēram, apaļas formas defekti, kuru izmērs pārsniedz tradicionālo NK metožu brāķa līmeni, izmantojot AE var nokļūt drošu defektu klasē, jo tie pastāv, bet objekta darba laikā neprogresē. Tas ļauj pamatoti atcelt objekta darbības apturēšanu un remontdarbus, kuri vairumā gadījumu tikai samazina objekta drošību.

Piemīt universāls raksturs attiecībā uz diagnosticējamā objekta izvēli, t. i. bez ierobežojumiem var tik izmantota jebkuru objektu diagnosticēšanai, kur ir iespējama spiediena (slodzes) izmaiņa, lai būtu iespējams konstatēt iespējamus defektus.

Piemīt augsta operativitāte: sagatavošanās darbu un tehniskās diagnosticēšanas darbu laika ietilpība ir ievērojami zemāka, ja to salīdzina ar tradicionālajām NK metodēm.

1.5.7. Sagraujošās kontroles metodes

Līdz ar nesagraujošām kontroles metodēm aviācijas tehnikas remontā plaši pielieto kontroles metodes ar izmēģinājuma paraugu sagraušanu. Šādas metodes pārsvarā pielieto jaunu detaļu izgatavošanas procesā izmantojamo materiālu un izgatavoto detaļu kontrolei. Materiāla spriegotā stāvokļa veidošanas apstākļiem izmēģinājumu laikā pēc iespējas tuvāk jāatbilst ekspluatācijas apstākļiem. Sagraujošus (mehāniskus) materiālu izmēģinājumus atkarībā no sloģojuma veida iedala statistajos stiepes, spiedes, bīdes, cirpes, vērpes izmēģinājumus; dinamiskajos triecienviskozitātes un pārtrūkšanas izmēģinājumos; izturības un ilgstošajos karstumizturības un plūstamības izmēģinājumos.

Statiskus izmēģinājumus veic, laideni un pakāpeniski palielinot slodzi līdz pat pilnīgai parauga sagraušanai. Jebkurā izmēģinājuma brīdī var noteikt pieliktā spēka, kā arī deformācijas vērtību.

Veicot dinamiskus izmēģinājumus, paraugam pieliek triecienslodzi. Šajā gadījumā nosaka tikai kopēju parauga deformācijas darbu.

Izturības izmēģinājumus raksturo cikliskā slodze, kuru vairākkārtīgi piemēro paraugam.

Detaļas un paraugi tiek pakļauti karstumizturības un plūstamības izmēģinājumiem ar mērķi noteikt ilgstošu paaugstinātas temperatūras iedarbību, vienlaicīgi tos arī sloģojot.

Cietības pārbaude ir nepieciešama paraugu un detaļu plastiskās deformācijas pretestības novērtēšanai. Var noteikt arī termisku apstrādi, kā arī vairākus materiāla stiprības pamatraksturojumus.

Nodilumizturības un dilšanas izmēģinājumi ļauj novērtēt virsmas slāņu stāvokli, kā arī paraugu masas izmaiņas pēc ilgstošas berzes [82].

Pēc noteikta slogošanas ciklu daudzuma (vai pēc defekta rašanās: parasti tā ir noguruma plaisa) objekts tiek pakļauts paliekošās stiprības izmēģinājumiem.

Paliekošās stiprības izmēģinājumi visbiežāk ir statistiskie (precīzāk, kvazistatiskie) izmēģinājumi (sk., piemēram, [29], [88]) ar slodzes palielināšanu (iespējama pakāpeniska vai pakāpjveida slogošana). Izmēģinājumu laikā objekts tiek slogots līdz sagrūšanai, un noguruma stiprības kritērijs (novērtējums) ir slodzes vērtība sabrukšanas brīdī (sk., piemēram, [49]).

Informāciju par objekta sagrūšanas rašanos vai sākumu var iegūt ar tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu palīdzību: optiski vizuālo metodi, ultraskaņas metodi (sk., piemēram, [131]), krāsu metodi u. tml. Tādējādi, iepriekš minētu metožu lietošana ir saistīta ar izmēģinājumu apstādināšanu (objekta ekspluatācijas pārtraukšanu), savienojumu izjaukšanu, piekļuves nodrošināšanu grūti sasniedzamās vietās u. tml.

Šī problēma var tikt atrisināta, piemērojot AE metodi.

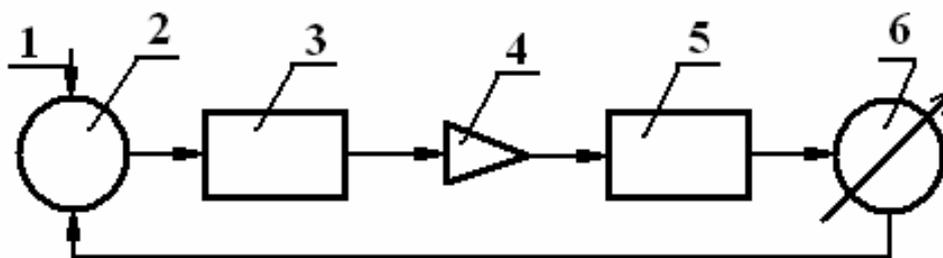
1.6. Akustiskās emisijas metodes lietošanas fizikālie pamati materiālu un konstrukciju bojājumu diagnosticēšanai un sagrūšanas prognozēšanai

1.6.1. Akustiskās emisijas signālu parametru rašanās būtība un informatīvs

Esošais standarts definē akustisko emisiju (AE) kā materiāla elastīgu mehānisko viļņu izstarošanas procesu, kura cēlonis ir materiāla iekšējās struktūras dinamiskās lokālās pārkārtošanās [126]. Par elastīgiem (akustiskiem) viļņiem sauc mehāniskās perturbācijas (deformācijas), kas izplatās elastīgā vidē (sistēmā). Perturbācijas no avota tiek nodotas tuvumā esošām vides daļiņām, kas novirzās attiecībā pret līdzsvara punktiem. Šīs nobīdes, atrodoties vides elastīgo viļņu iedarbībā, ierosina blakus esošo daļiņu kustību u. tml. Vidē rodas elastīgais vilnis, kas nodod enerģiju no perturbācijas (defekta) avota savā izplatīšanās virzienā, turklāt enerģijas pārnese notiek bez vielas pārnese. Vides materiālā punkta vai lokālā apjoma kustība, izplatoties elastīgam vilnim, tiek saukta par elastīgām svārstībām. Pēdējās mērījumu objektā var izsaukt apzināti, tad informāciju par objekta stāvokli iegūst svārstību un viļņu parametru vērtību un to izmaiņu, kas rodas mijiedarbības rezultātā ar

objektu, veidā. Parasti ierosināmo svārstību parametri ir zināmi, kas atvieglo objekta diagnostiskā novērtējuma uzdevumu. Šādu mērījumu režīmu sauc par aktīvu [105,109,126].

Atšķirībā no aktīvās metodes, par pasīvo sauc tādu metodi, kuras gaitā netiek piemēroti speciālie svārstību ierosināšanas līdzekļi. Šajā gadījumā elastīgās svārstības objektā rodas, iedarbojoties ārējiem faktoriem, kas ir saistīti ar tā mijiedarbību ar apkārtējo vidi un citiem objektiem. Tipisks piemērs — elastīgo svārstību rašanās objektā, iedarbojoties mehāniskām slodzēm, temperatūras izmaiņām vai citām fiziskām iedarbībām, kas ieguva akustiskās emisijas nosaukumu. AE kontroles metodes realizāciju var attēlot vispārinātās shēmas veidā (1.7. att.)[126,128].



1.7. att. Akustiskās emisijas diagnostikas mērījumu struktūrshēma:

1 — ārējais fiziskais lauks; 2 — mērījumu objekts; 3 — pārveidotājs; 4 — pastiprinātājs;
5 — signālu apstrādes bloks; 6 — reģistrators

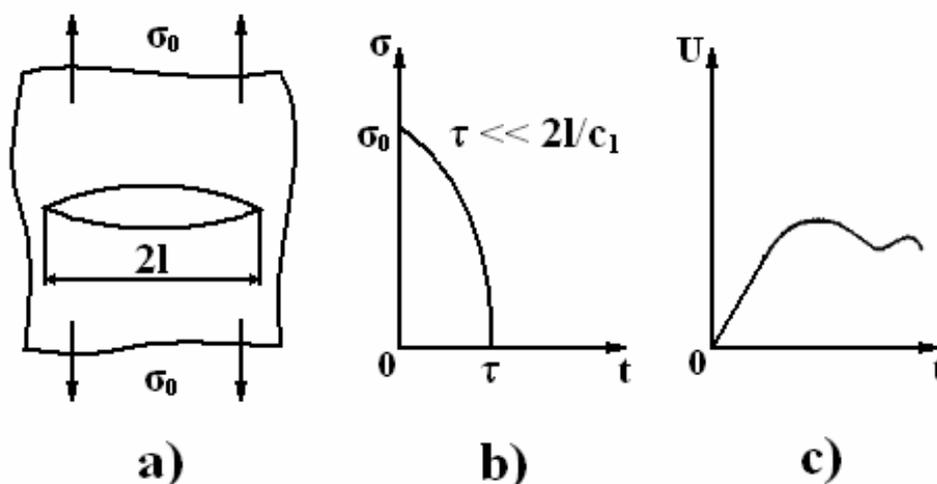
Šāda elastīgu viļņu reģistrācijas metode cieto ķermeņu deformācijas procesā ir pazīstama no XX gadsimta vidus pateicoties sekojošu zinātnieku darbiem: Kaizers, Skofīlds, Danegāns, Polloks u. c. [15,30,37]. Vairākas valstis (ASV, Japāna, Anglija, Francija, Vācija, Krievija) XX gadsimta 60.–80. gados izrādīja lielu aktivitāti, attīstot AE metodi kā materiālu un konstrukciju nesagraujošās kontroles metodi. AE metodes attīstībai Krievijā vislielākā uzmanība tika veltīta Grešņikova V., Guseva O., Drobotā J., Ivanova V., Belova V., Boiko V. u. c. autoru darbos[92,94,95,97]. Latvijā vislielākā pētījumu aktivitāte AE jomā attiecībā uz materiālu un izstrādājumu kvalitātes nesagraujošās kontroles un tehniskās diagnostikas uzdevumiem bija XX gadsimta 80.–90. gados pateicoties pētnieku Koņajeva J., Banova M., Urbaha A. darbiem [49,64,102,126,128,129].

AE avots ir materiāla apgabals, kurā notiek dinamiska struktūras pārkārtošanās, kuru pavada AE.

Makrolīmenī materiālā struktūras lokālās pārkārtošanās procesus saista ar dislokāciju kopu veidošanos, kustību un bojāeju, ar slīdēšanas, dvīņošanās u. c. procesiem [70,91,92,126].

Makrolīmenī AE parādība ir saistīta ar makro plaisu veidošanos un attīstību, kas noved pie konstrukciju sagrūšanas.

Fizisku priekšstatu par cieta ķermeņa AE sagrūšanas avotu var iegūt sekojošu spriedumu rezultātā (1.8. att.)[126]. Pārraujoties vides vienlaidībai defekta (plaisas) veidošanās vai augšanas dēļ, uz defekta jaunizveidotās virsmas noris spriegumu samazināšanās no sākotnējās vērtības (pirms sagrūšanas) līdz nullei (1.8. att., b), kas izraisa elastīgu svārstību veidošanos. Atslodzes laiks uz defekta virsmas ir atkarīgs no materiāla stiprības īpašībām un samazinās, palielinoties tā trauslumam (1.8. att., c).



1.8. att. Normāla atrāvuma plaisas rašanās shematiskais attēlojums (a), plaisas virsmas sprieguma σ izmaiņas laika intervālā t plaisas rašanās brīdī (b) un pārrāvuma virsmas pārvietošanās raksturs U plaisas rašanās brīdī (c)

AE var izpausties divējādi. Ja elementāru notikumu skaits, kas sekmē elastīgu viļņu rašanos, ir liels, bet enerģija, kas tiek atbrīvota katrā notikumā, ir maza, AE signāli tiek uztverti kā vāji nepārtraukti trokšņi, kas tiek saukti par nepārtrauktu AE [89]. Novērtējumi rāda, ka elektrisku impulsu, kurus rada elementāri mikrolīmeņa AE procesi, amplitūda sastāda $10^{-20} \dots 10^{-13}$ V [92,126].

Ja cietā ķermeņa stāvoklis nav ne tuvu līdzsvara stāvoklim, ir iespējami lavīnveida procesi, kad mazā laika intervālā procesā noris daudz elementāru notikumu. Elastīgā viļņa enerģija var vairākkārt pārsniegt nepārtrauktas akustiskās emisijas elastīgo viļņu enerģiju.

Šāda emisija, kuru raksturo diskrētums (intervāls starp signāliem ir lielāks vai vienāds ar to pieaugšanas vai rimšanas laiku) un liela amplitūda (atsevišķos gadījumos — desmiti volti). AE, kas rodas materiālā, kalpo par materiāla sagrūšanas vēstnesi ilgi pirms bīstamās stadijas. Parasti materiālu deformēšanas un sagrūšanas procesu pētījumos izmanto gan nepārtrauktu, gan diskrētu AE [70,91,92,126]. To nosaka cieša abu AE veidu savstarpējā saikne, kuras pamatā ir dažādi struktūras mehānismi. Piemēram, plaisas attīstība notiek apstākļos, kad secīgi mainās plastiskās deformācijas procesi plaisas virsotnē, un lēcienveidīgi mainās tās garums. Katram no šiem procesiem ir raksturīgs noteikts AE veids.

AE signālus raksturo vairāki parametri, katrs parametrs ir saistīts ar fizikālu procesu, kas norisinās līdz ar AE. Parametru mērīšana var sniegt informāciju par pētījumu vai kontroles objekta stāvokli.

1.6.2. Galvenie AE signālu parametri

Galvenie akustiskās emisijas avoti rūpniecisku objektu tehniskā stāvokļa diagnostikas un NK mērķiem ir plastiskā deformācija un plaisu palielināšanās. AE diagnosticēšanas praksē ļoti reti ir sastopami gadījumi, kad tiek reģistrēts signāls, kurš ir radies darba vielas caurplūšanas pa atveri objektā (AE noplūdes) gadījumā. Dažos gadījumos informāciju par kontroles objekta stāvokli sniedz fāzu maiņas AE, kura, piemēram, tiek reģistrēta metināšanas un termiskās apstrādes procesu kontroles gadījumā. Praktisks pielietojums ir procesa un korozijas rezultātu akustiskajai reģistrācijai.

Lai izveidotu objektu kontroles AE metodikas, nepieciešams noskaidrot AE signālu parametru saikni ar materiālu mehāniskajām īpašībām un sagraušanas mehānikas parametriem (teorētiskiem modeļiem) un AE signālu parametru saikni ar progresējošu defektu parametriem (eksperimentālos pētījumos).

AE signālu, ko rada cieta ķermeņa deformācija un sagraušana, ir nejaušu sarežģītas formas akustisko impulsu kopums. AE process pārveidotāja izejā tiek pārvērsts nejaušā oscilējošu radio impulsu secībā. Galvenie AE signāla parametri, kurus lieto plaisas objektā attīstības procesa novērtēšanai, ir sekojoši [19,20,126]:

- *AE summārais skaits* (N_{AE}) — reģistrēto AE impulsu suma, kas pārsniedz noteikto diskriminācijas līmeni, novērojumu laikā, imp.sk.;
- *Signāla ilgums* (Dur) — pilnais laiks no brīža, kad signāls pārsniedz sliekšni, līdz brīdim, kad tas aiziet zem sliekšņa, μs ;
- *Impulsu summa* ($Hits$) — ir to impulsu skaits, imp.sk.;

- AE signālu *enerģija* (E) — ir saistīta ar procesu enerģētiku, dB;
- *Amplitūda* (Amp) — ir signāla sprieguma maksimālā vērtība, dB.

1.6.3. AE kontroles rezultātu novērtēšana

Pēc pieņemto signālu apstrādes, kontroles rezultātus uzrāda identificētu un klasificētu AE avotu veidā.

Pieņemot lēmumu pēc AE rezultātiem, tiek izmantoti dati, kas satur datus par visiem AE avotiem, to klasifikāciju, kā arī datus par tiem AE avotiem, kuru parametri pārsniedz pieļaujamo līmeni. Pieļaujamo AE avota līmeni nosaka izpildītājs, gatavojoties konkrētā objekta AE kontrolei.

AE avotu klasifikāciju veic, izmantojot sekojošus signāla parametrus: summāro skaitu, impulsu skaitu, amplitūdu (amplitūdu sadalījumu), enerģiju (vai enerģētisko parametru), AE avotu skaitīšanas ātrumu, aktivitāti, koncentrāciju. Klasificējot AE avotus, tiek ņemti vērā arī kontrolējumā objekta sloojuma parametri un laiks.

Atklātus un identificētus AE avotus rekomendēts iedalīt četrās klasēs:

- I klases avots — pasīvs avots.
- II klases avots — aktīvs avots.
- III klases avots — kritiski aktīvs avots.
- IV klases avots — katastrofiski aktīvs avots.

Ja saskaņā ar AE kontroles rezultātiem objekta tehniskais stāvoklis tiek novērtēts pozitīvi vai netiek reģistrēti AE avoti, papildus nesagraujošo kontroles veidu pielietošana nav nepieciešama. Ja AE kontroles rezultātu interpretācija nav noteikta, tiek rekomendēts izmantot papildus nesagraujošās kontroles veidus.

Galīgā atklāto AE avotu un indikāciju pieļaujamības novērtēšana, pielietojot papildus NK veidus, tiek veikta, izmantojot jau iepriekš izmērītus defektu parametrus, pamatojoties uz normatīvām sagraušanas mehānikas metodēm, konstrukciju izturības aprēķina metodikām un citiem spēkā esošiem normatīvajiem dokumentiem.

1.6.4. Materiālu bojājamības mehānisma izpēte, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumu datiem

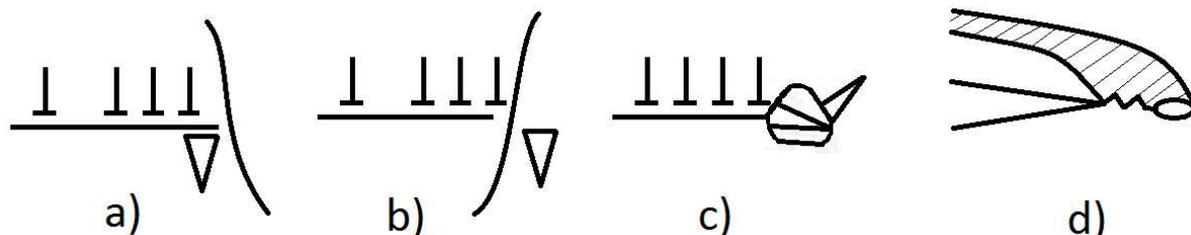
Materiālu noguruma bojājumu mehānismu un īpatnību pētījumiem ir veltīti vairāki darbi un tiek pielietots liels daudzums metodiku, kas balstās uz dažādiem fizikāliem

principiēm. AE metode ir viena no retām metodēm, kas ļauj reālā laikā veikt apjoma strukturālās pārkārtošanās kinētikas pētījumus dažādās materiāla deformācijas stadijās.

Pašlaik galvenās pētnieku pūles ir vērstas uz kvantitatīvu un kvalitatīvu likumsakarību noteikšanu starp AE parametriem un bojājumu uzkrāšanās raksturu materiāla paraugos un konstrukcijas elementos [25,44,126]. To nosaka AE metodes lietošanas perspektīvas, kas ļauj agrīnā stadijā atklāt plaisas un novērtēt to izmērus un pieauguma kinētiku reālos konstrukcijas elementos to izmēģinājumu laikā vai ekspluatācijas procesā, kad tradicionālās kontroles metodes nav iespējams lietot.

Apskatīsim dažus AE avotu modeļus. Attēlā 15, a–c parādīti pazīstami mikroplaisu veidošanās modeļi no dislokāciju sakopojumiem, bet attēlā 15, d — plaisas augšanas shēma, tai savienojoties ar dobumu, kas izveidojies pirms plaisas galiņa.

Dislokācijas, uz kurām iedarbojas pieaugošie spriegumi, pārvietoja s pa slīdes līniju un apstājas pirms šķēršļa — grauda robežas (1.9.att., a, b), ieslēguma (1.9.att., c) u. tml. Palielinoties spriegumiem dislokācijas pārraus šķērslī un notiks to ātra pārvietošanās grauda apjomā, vai arī pirms šķēršļa (1.9.att., a) vai pēc tā (1.9.att., b) izveidosies mikroplaisas, vai dislokāciju daļa „pārrāpos” no slīdes līnija, kas samazinās lokālos spriegumus.



1.9. att. Mikroplaisu veidošanās un attīstības modeļi

Elastīgo svārstību enerģiju, kas atbrīvojas, kad no dislokāciju sakopojuma veidojas mikroplaisas, var novērtēt sekojošā veidā. Palielinoties pieliktai slodzei, kristāliskā režģa atomi attālinās viens no otra, uzkrājot elastīgo potenciālo enerģiju, kas ir proporcionāla pieliktā spēka darbam ceļā, kas ir vienāds ar deformāciju ε . Materiāla vienības apjoma elastīgā enerģija ir vienāda ar:

$$W = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon, \text{ (dB)} \quad (1.1)$$

Nemot vērā, ka

$$\sigma = \varepsilon E \quad (1.2)$$

iegūstam

$$W = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon^2}{E}, (\text{dB}) \quad (1.3)$$

Atoma savienojumu pārrāvums notiks tajā brīdī, kas spriegums sasniegs dotā materiāla teorētisku stiprību. Saskaņā ar aptuvenām aplēsēm tā sastāda $\varepsilon_{max} = E/5$. Uzkrātā deformācijas enerģija, veidojoties pārrāvumam, sadalīsies uz enerģiju, kas ir nepieciešama mikroplaisas γ virsmas veidošanai, un AE enerģiju, tāpēc

$$W_{A\Theta} = W - \gamma, (\text{dB}) \quad (1.4)$$

Lai novērtētu AE enerģiju, ir nepieciešams zināt virsmas enerģiju dotajam materiālam. Aptuveni tā sastāda $\gamma \approx Eb/50$ (kur b — režģa konstante). Pieņemsim, ka izveidotās mikroplaisas apjoms ir aptuveni vienāds ar neviendabības apjomu, tad

$$W_{A\Theta} = \frac{1}{2} \frac{E}{25} hl(nb) - \frac{Eb}{50} hl, (\text{dB}) \quad (1.5)$$

kur h — mikroplaisas dziļums, μm ;

l — mikroplaisas garums, μm ;

n — dislokāciju, kas aizsāka mikroplaisas veidošanos, skaits.

Ja n ir pietiekami liels, virsmas enerģija salīdzinājumā ar AE enerģiju nepārsniedz 1 % no summārās uzkrātās enerģijas. Mikroplaisai tēraudā ar dziļumu 0,1 μm , garumu 1 μm un atvērums (100-1000) b AE enerģija būs vienāda ar 10^{-10} – 10^{-12} dB.

Darbā [25] ir parādīta iespēja noteikt plaisas nobīdes brīdi pēc AE signāliem.

Darbā [15] noteikts, ka summārais AE impulsu skaits ir proporcionāls sprieguma intensitātes koeficientam ceturtajā pakāpē, t. i.,

$$N \sim K^4 \quad (1.6)$$

Tomēr, saskaņā ar eksperimentāliem datiem, koeficients pakāpe parasti atšķiras no 4 un dažādiem materiāliem svārstās robežās no 4,6 līdz 11,9.

Autors [23] piedāvā izteiksmi, kas sasaista plaisas summārā atvērums vērtību δ ar AE impulsu skaitu N :

$$\delta \sim (1 - \mu) N / (0,2 \sigma_m) \quad (1.7)$$

kur μ — Puasona koeficients,
 σ_m — plūstamības robeža.

Darba [21] autors vērtību N saista ar atvērtas plaisas platību $S \sim N$.

Saskaņā ar citu autoru viedokļiem, impulsu amplitūda ir proporcionāla mikroplaisas platības vērtībai, bet AE impulsu, kas ir saistīti ar plaisas lēcienveidīgu pieaugumu, amplitūdu summas kvadrāts ir proporcionāls tās platības pieaugumam ΔS [38], t. i.:

$$\Delta S \sim (\sum A_i)^2 E / K^2, (\text{mm}^2) \quad (1.8)$$

kur E — materiāla elastības modulis,
 A_i — i -tā impulsa amplitūda, dB.

Reālie konstrukciju elementu noguruma sagrūšanas gadījumi sekmē AE metodes lietošanas aktualitāti defektu, kas attīstās maiņslodzes apstākļos, diagnostikā.

Raksturīga dažādu AE ģenerācijas mehānismu pazīme cikliskā slogojuma apstākļos ir izmaiņu, kas uzkrājas materiāla struktūrā, neatgriezeniskais raksturs, kas sekmē spriegumu pārsadalī un rada apstākļus AE ģenerācijai aizvien jaunajos materiāla apjomos.

Darbos [91,94,126] izskata sekojošus iespējamus AE ģenerācijas mehānismus ciklisku slogojumu laikā: plastiskās deformāciju uzkrāšanās materiālā; plaisas lēcienveidīga attīstība un ar to saistīta dinamiska uz plaisas robežas esošo materiāla posmu atslodze; plastiskās deformācijas zonas kustība un palielināšanās plaisas virsotnes apgabalā; noguruma plaisas malu savstarpējā berze.

Visi pastāvošie modeļi, neskatoties uz to nozīmīgumu, neatspoguļo bojājumu uzkrāšanas procesu kinētiku reālās konstrukcijās un galvenās likumsakarības, kas saista deformēšanas raksturojumus ar AE parametriem, iegūti atsevišķos gadījumos pārmērīgi vienkāršojot materiālā notiekošās strukturālās izmaiņas un tādējādi nav apstiprināti eksperimentāli. Turklāt šobrīd nav zināmi paņēmieni, kas ļauj veikt reālo konstrukciju noguruma bojājumu novērtējumu neregulārā slogojuma procesā.

Nemazinot šādu pētījumu praktisko vērtību, atzīmēsim, ka visoperatīvāk un visticamāk noteikt izstrādājumu noguruma ilgizturību var tikai uz AE datu, kas tiek reģistrēti cikliskā slogojuma procesā, analīzes pamata. Turklāt reālu izstrādājumu izmēģinājumos un ekspluatācijā nav pieļaujamas pat īslaicīga darba spriegumu vērtības pārsniegšana.

1.6.5. AE metodes pielietošanas sfēras

Pašlaik AE metodi ir iespējams pielietot zem spiediena esošo rezervuāru [91,95], energoiekārtu konstrukcijas elementu [70,75], dažādu būvkonstrukciju, mehānismu un sistēmu, siltumdzinēju u. t. t. [43,61,68,69,126] kontrolei.

AE metodi pielieto arī cauruļu velmēšanas un metalurģijas nozarē [129]. Pastāv dotās diagnostikas metodes lietošanas pētījumi medicīnā [130].

Aviācijas un kosmosa tehnoloģiju jomā AE metodi izmanto dzinēju apvalku, darba lapstiņu, gāzturbinu disku un degkameru [43,126], šasijas [92] un lidmašīnas planiera [36,74] elementu, raķešu apvalku un bāku [16,43], daudzkārtējās lietošanas kosmisko aparātu termiskās aizsardzības elementu [13] u. t. t. kontrolei.

Zināms par AE metodes lietošanu paliekošās stiprības novērtēšanā [59]. Bet dotā pētījuma autori savā darbā izsaka vienīgu apgalvojumu: „Paraugi ar samazinātām AE enerģijas vērtībām uzrāda lielāku paliekošu stiprību nekā paraugi ar palielinātām AE vērtībām”, kas nav pietiekoši uzstādītā uzdevuma risināšanai.

Pastāv arī noguruma plaisu kontroles paņēmieni [67], kas balstās uz summārās AE izmaiņām, cikliski slogojot objektu. Noguruma plaisas rašanos nosaka pēc iepriekš minētā parametra krasas pieaugšanas. Bet šī metode ir domāta tikai noguruma plaisas (precīzāk, mikroplaisas) rašanās momenta noteikšanai ciklisku noguruma izmēģinājumu procesā, nevis paliekošās stiprības izmēģinājumos (kuru rezultātā kontroles objekts sagrūst). Tādējādi arī šī metode pilnībā nerisina uzstādītu uzdevumu.

Zināma arī iekārta saskaņā ar ASV patentu[32]. Šajā iekārtā realizē sekojošu paņēmieni: nosaka AE signālu līmeni izvēlētajā laika intervālā, un pēc tā vērtības spriež par bīstamās slodzes rašanos. Bet dotā paņēmiena realizācijai sākotnēji jānosaka AE signālu līmeņa un bīstamās slodzes attiecība. Nosakot paliekošo stiprību, šādu slodzi var noteikt tikai pēc izmēģinājumiem, nevis to laikā. Turklāt netiek noteikts objekta sagrūšanas sākuma brīdis (vai tiek noteikts, bet ar mazu precizitāti, tas ir atkarīgs no izvēlēta laika intervāla).

Ir pazīstams arī paņēmieni [103], kas balstās uz AE signālu mērīšanu objekta cikliskā slogojuma laikā, un paredz sinhronu AE parametru un slodzes reģistrāciju. Tādējādi, šis paņēmieni nodrošina AE un slodzes attiecības iegūšanu.

Pēdējā laikā speciālās AE kontroles borta sistēmas izmanto noguruma plaisu atklāšanai un to pieauguma kontrolei lidmašīnu planiera konstrukcijā lidojuma laikā [27,35]. Sistēmām ir augsts jutīgums, kā arī tās ļauj atklāt noguruma plaisas sarežģītas piekļuves vietās.

Tomēr AE metodes praktiskā realizācija ar mērķi veikt diagnosticējošu kontroli katrā konkrētā gadījumā ir saistīta ar virkni sarežģītumu, kas rodas dēļ tā, ka nav pietiekami precīzi noteiktas sakarības starp AE parametriem un materiāla struktūras stāvokļiem, tāpēc ir nepieciešama rūpīga metodiku pilnveidošana attiecībā uz konkrētiem objektiem un to sloojuma apstākļiem. Īpaši sarežģīta doto uzdevumu risināšana ir attiecībā uz aviācijas konstrukciju detaļām, kuru sagrūšanu izraisa noguruma plaisu veidošanās, kas rodas zonās, kas nav pieejamas kontrolei ar tradicionālām metodēm.

Secinājumi:

Visi pastāvošie modeļi, neskatoties uz to nozīmīgumu, neatspoguļo bojājumu uzkrāšanas procesu kinētiku reālās konstrukcijās un galvenās likumsakarības, kas saista deformēšanas raksturojumus ar AE parametriem, iegūti atsevišķos gadījumos pārmērīgi vienkāršojot materiālā notiekošās strukturālās izmaiņas un tādējādi nav apstiprināti eksperimentāli. Turklāt šobrīd nav zināmi paņēmieni, kas ļauj veikt reālo konstrukciju noguruma bojājumu novērtējumu neregulārā sloojuma procesā.

Īpaši aktuāli šajā pētījumā ir aprakstīt AE stadiālitāti dažādos strukturālos deformācijas līmeņos ar mērķi prognozēt pirms sagrūšanas stadijas iestāšanos. Viens no svarīgiem kritērijiem, kuru izmanto prognozēšanā, ir struktūras defektu, kas attīstās noguruma sagrūšanas procesā, identifikācijas.

1.6.6. AE metodes priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālām NK metodēm

AE metodei ir raksturīgas sekojošas īpašības, kas atsevišķos gadījumos nodrošina priekšrocības salīdzinājumā ar citām metodēm [126]:

1. Metodes integritāte, kas izpaužas tā, ka ar vienu vai vairākiem pārveidotājiem, kas ir nekustīgi izvietoti uz objekta virsmas, ir iespējas kontrolēt visu objektu (100 % kontrole). Šī īpašība ir īpaši noderīga, apsekojot grūti sasniedzamas (vai nesasniedzamas) kontrolējamā objekta virsmas.
2. Atšķirībā no skenējošām NK metodēm, AE kontrolei nav nepieciešama kontroles objekta virsmas rūpīga sagatavošana. Tādējādi kontroles veikšana un tās rezultāti nav atkarīgi no virsmas stāvokļa un tās apstrādes kvalitātes. Izolācijas pārklājums (ja tāds ir) tiek noņemts tikai pārveidotāju uzstādīšanas vietās.
3. Tikai attīstības stadijā esošo defektu atklāšana un reģistrācija, kas ļauj klasificēt defektus nevis pēc to izmēriem (vai pēc citām netiešām pazīmēm — defektu formas, izvietojuma, orientācijas), bet gan pēc to bīstamības pakāpes (ietekmi uz stiprību) attiecībā uz kontrolējamo objektu.

4. Augsts ražīgums, kas vairākkārt pārsniedz tradicionālo NK metožu — ultraskaņas, radiogrāfiskās, virpuļstrāvas, magnētiskās u. c. – ražīgumu.
5. Iespēja veikt objektu kontroli, operatoram atrodoties tālu no kontrolējamā objekta. Dotā īpašība ļauj efektīvi izmantot šo metodi atbildīgu lielgabarīta konstrukciju, laukumveida vai bīstamu objektu kontrolei (monitoringam) nepārtraucot to ekspluatāciju un bez kaitējuma personālam.
6. Iespējamība kontrolēt dažādus tehnoloģiskus procesus un veikt objekta tehniskā stāvokļa novērtējumu reālā laika režīmā, kas ļauj novērst kontrolējamā objektā avārijas sagrūšanu.
7. Maksimālā efektivitātes un izmaksu attiecība.
8. AE metode ir dinamiska kontroles metode: defektu atklāšana notiek objekta sloģšanas procesā, attīstoties lokālām deformācijām un bojājumiem. Tādējādi AE metode nodrošina tikai visbīstamāko, t. i., attīstībā esošo, defektu atklāšanu un reģistrāciju.
9. AE metodei ir augsta jutība attiecībā uz attīstībā esošiem defektiem. Tās jutība būtiski pārsniedz citu metožu jutību.
10. AE metode ir integrāla, t. i., izmantojot vienu vai vairākus AE pārveidotājus, kas ir nekustīgi izvietoti uz objekta virsmas, var kontrolēt visu objektu bez skanēšanas.
11. AE metodei salīdzinājumā ar citām metodēm ir mazāk ierobežojumu, kas ir saistīti ar materiāla īpašībām un struktūru. To veiksmīgi izmanto tādu materiālu stāvokļa diagnosticēšanai, kuriem citu metožu pielietošana nav iespējama vai apgrūtināša.
12. Kad metodika ir atstrādāta un ir pieredze rezultātu interpretēšanā, AE metode ir diezgan vienkārša un neprasa lielu laika patēriņu.

1.7. Darba mērķi un uzdevumi

Darba mērķis ir aviācijas metālisko un kompozītmateriālu un konstrukciju sagrūšanas mehānisma izpēte 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.

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

2.1. Metālisku materiālu akustiskās emisijas avotu un noguruma sagrūšanas 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, kuru pavada AE [126].

Mikrolīmenī materiāla struktūras lokālās pārkārtošanās procesi ir tai skaitā saistīti ar dislokāciju rašanos, pārvietošanos un bojājumu. Polikristāliskā materiāla atsevišķu struktūras elementu līmenī tā struktūras pārkārtošanos var raksturot ar graudu iekšējo un savstarpējo slīdēšanu (slīdēšanas līniju un joslu veidošanos), dvīņošanos, fāzu pārvēršanos. Minētie procesi visbiežāk noris dinamiski un rosina sprieguma viļņu rašanos.

Mikroplaisu rašanās un pieauguma procesu pavada minēto procesu kopums, tāpēc tiek novērota arī AE signālu izstarošana. Augošās, trauslas plaisas sprieguma viļņu ģenerāciju no mehānikas viedokļa var izskaidrot ar materiāla apgabalu, kas piekļaujas augošās plaisas malām, dinamisku atslogošanos, kā arī ar plaisas virzības ātruma, attīstības virziena un sazarošanās izmaiņām [6,7,46,48,51,51,54,58].

Viens no visizplatītākajiem metālisku materiālu defektiem ir noguruma plaisa. Noguruma sagrūšanas sākotnējās sagatavošanās stadijās iekļauj tādus procesus, kā slīdēšanas līniju parādīšanās atsevišķajos kristālos un to attīstība, platu slīdēšanas joslu veidošanās, submikroskopisko plaisu veidošanās, to attīstība un apvienošanos mikroskopiskajās plaisās atsevišķajos posmos (sk.1.11. att., p.1.6.5). Tad noris makroskopiskās plaisas augšana. Visus šos procesus pavada AE signālu ģenerēšana.

Tādējādi, no noguruma parādības sarežģītības izriet, ka AE signālu veidošanās procesā piedalās vairāki iepriekš minētie procesi, bet viena slogojuma cikla gaitā var veidoties sarežģīts AE signālu kopums, kura avotu identifikācija ir praktiski neatrisināms uzdevums.

Turpmāk šajā darbā, veicot AE avotu izcelsmes analīzi noguruma slogošanas procesā, aprobežosimies tikai ar fenomenoloģisku līmeni, kas arī izraisa interesi no nesagraujošās kontroles un diagnostikas praktisko uzdevumu viedokļa. Tāpēc izslēgsim no turpmākās analīzes nano- un submikroskopiskus materiāla struktūras bojājumus, jo tie ļoti nebūtiski ietekmē kopējo AE signālu veidošanās procesu noguruma slogojuma procesā. Pieņemsim, ka

galvenie AE signālu avoti noguruma slogojuma procesā ir: plastiskās deformācijas plaisas virsotnē, plaisas garuma (laukuma) palielināšanās, tās malu saskaršanās (berze)[126].

Šajā darbā piedāvātā pieeja balstās uz hipotēzi, ka AE signālu avotu rašanās dabu noguruma slogojuma procesā var noteikt, vērojot to, kāds AE parametru sadalījums veidojas viena noteikta slogojuma cikla laikā jebkurā bojājumu stadijā.

Turklāt pieņemsim, ka bojājumu mehānisms un līdz ar to arī AE rašanās daba nav pretrunā ar superpozīcijas principu, saskaņā ar kuru:

- materiāla divu daļiņu mijiedarbība nemainās, pievienojot trešo daļiņu, kas arī mijiedarbojas ar pirmajām divām daļiņām;
- visu daļiņu mijiedarbības enerģija daudzdaļīgā sistēmā ir pāru mijiedarbības enerģiju summa (starp visiem iespējamajiem daļiņu pāriem). Sistēmā nav daudzdaļīgu mijiedarbību. AE signālu, kas atstaro šo daļiņu mijiedarbību, enerģija arī ir atsevišķu AE signālu enerģiju summa;
- vienādojumi, kas apraksta daudzdaļīgas sistēmas uzvedību, ir lineāri pēc daļiņu daudzuma.

Superpozīcijas principa piemērošana AE impulsu sadalē viena slogojuma cikla ietvaros sniedz iespēju noteikt impulsu avotu rašanās dabu, bet šo impulsu parametru novērošana ļaus novērtēt materiāla noguruma bojājuma pakāpi.

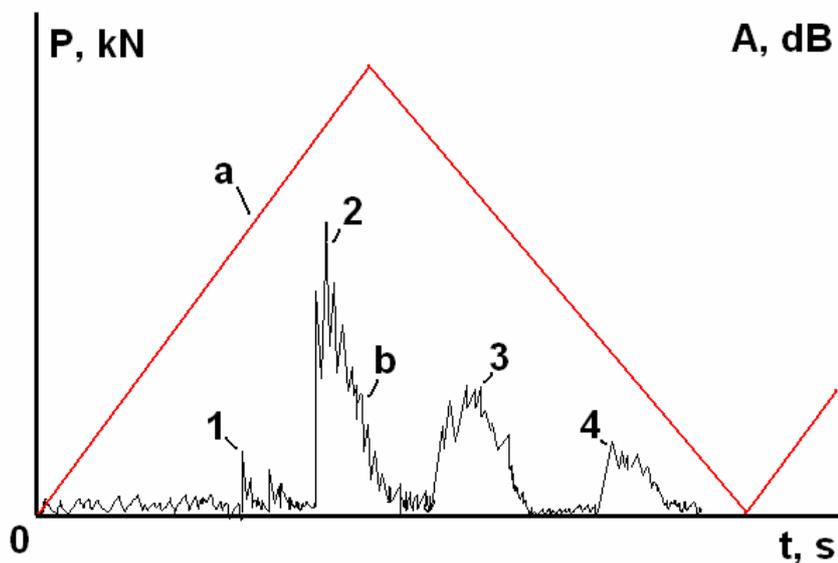
Plaisas pieaugumu konstrukcijas materiālos pavada plastiskā deformācija, kuras galvenās sastāvdaļas ir slīdēšana un dvīņošana.

Galveno ieguldījumu AE signālu izpētē sniedz tā materiāla daļa, kas ir iesaistīta plastiskajā stāvoklī. Šī materiāla apjoma atslogošana un atkārtota slogošana līdz iepriekšējam slodzes līmenim noved pie krasa AE izstarošanas samazinājuma dēļ Kaizera efekta[30]. Tomēr cikliskā slogojuma gadījumā, pat ja ciklu maksimālo slodžu līmenis ir nemainīgs, darbojās faktors, kas ir saistīts ar aizvien jaunu apjomu iesaistīšanu esošajā materiāla apjomā, kas rosina AE pieaugumu (2.1 att., poz. 1).

Noguruma plaisas laukuma palielināšanās un tai atbilstošā AE signālu ģenerācija notiek slodzes ciklu maksimumu intervālā.

I tipa [100,110] normālā lūzuma noguruma plaisas *malu saskāršanās (berze)* sākas slodzes krituma brīdī līdz nullei un attīstās spiedē. Darbā [126] parādīts, ka plaisas pretējo malu berze cikliskā slogojuma laikā tiek novērota stiepjošās slodzes samazinājuma stadijā, kas sekmē īslaicīgu plaisas pretējo malu „savienojumu”. AE signālus šajā gadījumā rosina divi procesi: plaisas malu dinamiskā sadursme un berze. AE sastāvdaļām, kuras izraisa aprakstīties procesi, ir dažāds informatīvums. To uzskaitē un summēšana notušē saiknes ar

noguruma plaisas parametriem dēļ vienlaicīgas procesu norises un mērījumu aparatūras īpatnībām, kā rezultātā rodas būtiskas kļūdas dažādu konstrukciju diagnosticēšanā. Viens no iespējamajiem „akustisko trokšņu”, kurus izraisa plaisas malu berze, reģistrācijas problēmas risinājumiem var būt AE signālu laika selekcija viena slogojuma cikla intervālā, kad tiek atmesta informācijas, kas tika reģistrēta slodzes krituma brīdī līdz nullei.

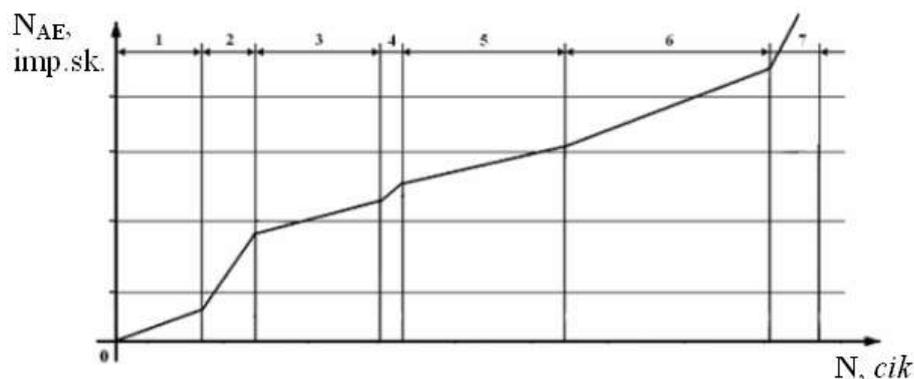


2.1. att. Slodzes P (a) un akustiskās emisijas signālu amplitūdas A (b) sinhronā ieraksta diagramma laika funkcijā t :

1 — AE signāli no materiāla plastiskās deformācijas; 2 — AE signāli no noguruma plaisas pieauguma (tās garuma un laukuma palielināšanās); 3, 4 — AE no noguruma plaisas pretējo malu berzes

Vairāku darbu rezultātā, kurus tajā skaitā veica dotā darba autors [39,46,48,58,126], noskaidrots, ka noguruma plaisas attīstība notiek vairākos etapos. Pirmajā etapā (2.2. att.) noris 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, kas pavada enerģijas izdalīšanās. Visbiežāk sastopamais variants: vispirms rodas vairākas mikroplaisas, kuras 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). 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 (2.2. att. tie ir etapi 5 un 6). Noslēguma etaps (etaps 7) — katastrofiska plaisas attīstība, kas noslēdzas ar izmēģinājumu objekta sagrūšanu.



2.2. att. Noguruma plaisas attīstības aviācijas konstrukcijās vispārinātā shēma, kas iegūta stenda izmēģinājumu rezultātā ar AE parametru reģistrāciju[46,48]

Iepriekš aprakstītus enerģijas izdalīšanās procesus pavada viļņu izplatīšanās materiālā — akustiskā emisija (AE). AE summārā skaita N_{AE} izmaiņas atkarībā no slogojuma ciklu skaita N kopumā atspoguļo aprakstītu noguruma plaisas attīstības procesu (2.3. att., a). Enerģija E , kas tiek patērēta plaisas pieauguma darbam, izdalīšanās parādīta 2.3. att., b; saskaņā ar enerģijas E izmaiņām, plaisas pieauguma raksturs parādīts 2.3. att., kur F_{crack} — defekta virsmas platība.

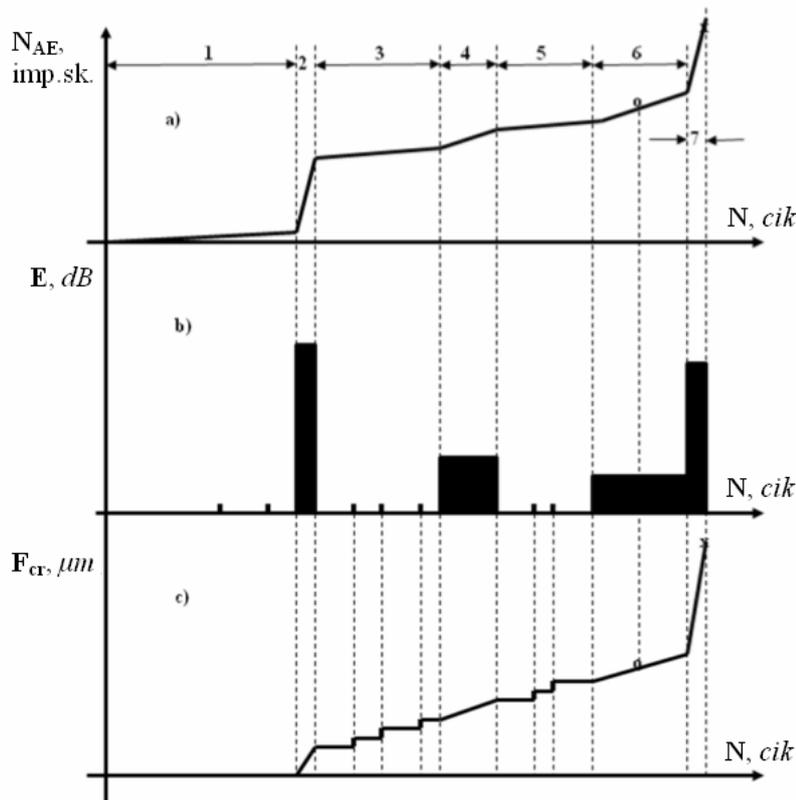
Šāds AE uzvedības variants ir raksturīgs lielākai daļai metālisku konstrukciju materiāliem, kuriem piemīt gan trauslums, gan arī plastiskās īpašības. Rezultātā noguruma plaisu attīstību „aptur” plastisku zonu veidošanās. Šajā gadījumā noguruma plaisu attīstības modelis kļūst par daudzpakāpju modeli: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

Tādā veidā, 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. Tā, darbā [39] autors, balstoties uz veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem, izdala trīs galvenās stadijas: mikroplaisas veidošanās (izmērs 1...50 μm) ar ātru sagrūšanas pieaugumu; mikroplaisas pārveidošanās mezoplaisā (50...500 μm) ar lēnāku tās

attīstību; mezoplaisas transformācija makroplaisā (500...5000 μm), 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.



2.3. att. Enerģijas izdalīšanās procesu shēmas[46,48]:

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

Minētās īpatnības veido pamatu piedāvājamajam materiālu bojājamības novērtēšanas modelim noguruma slogojuma procesā, balstoties uz akustiskās emisijas signālu mērījumu

datiem [56]. Teorētiskais pamatojums kalpo par pamatu praktisko metožu (sk. 4. nodaļu) izstrādei, kuru novitāti apstiprina atbilstoši patenti [1,2,3].

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 [6,7,46,48,51,52,54,56,58,126]:

- 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 [6,7,46,48,51,52,54,56,58,126].

Bojājumu intensitāti var novērtēt, balstoties uz AE notikumu grupas mērījumu rezultātiem katram slogojuma ciklam. Turklāt ir jāveic minētu parametru vidējošanu attiecībā pret slogojuma cikla ilgumu t_c :

$$\overline{N}_{in} = \frac{N_{in}}{t_c} \left(\frac{\text{imp. sk.}}{s} \right) \quad (2.1)$$

AE summārā skaita reģistrācijas gadījumā n -tā slogojuma ciklā N_{AEn} :

$$\overline{N}_{AEn} = \frac{N_{AEn}}{t_c} \left(\frac{\text{imp. sk.}}{s} \right) \quad (2.2)$$

AE signālu mērījumu procesā, izmantojot aparatūras risinājumus, ir iespējams veikt arī signāla strobēšanu (signāla atdalīšanu attiecībā pret konkrētu slogojuma stadiju viena cikla ietvaros). Šajā gadījumā ir lietderīgāk veikt minētu parametru vidējošanu attiecībā pret stroba ilgumu:

$$\overline{N}_{in} = \frac{N_{in}}{t_s} \left(\frac{\text{imp. sk.}}{s} \right); \quad \overline{N}_{AEn} = \frac{N_{AEn}}{t_s} \left(\frac{\text{imp. sk.}}{s} \right) \quad (2.3)$$

Noguruma plaisas garuma kopējo pieaugumu slogojuma ciklā δln tās attīstības vairāku etapu j realizācijas gadījumā nosaka kā šiem lēcieniem atbilstošu pieaugumu δln_j summu. Katram plaisas pieaugumam atbilst AE signāla izstarošana ar noteiktu amplitūdu. Plaisas garuma kopējā pieauguma akustiskās emisijas analogs ir cikla ekvivalentā amplitūda A_{ekv} , kuru nosaka kā atsevišķu impulsu amplitūdu summu:

$$A_{ekv.n} = \sum_{i=1}^k A_{in}, \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

kur k — kopējais diskrētā AE impulsu skaits slogojuma ciklā.

Slogojuma cikla ietvaros AE signālus var raksturot arī ar vidēju impulsu amplitūdu:

$$\bar{A}_n = \frac{A_{ekv.n}}{k}, \text{ (dB)} \quad (2.5)$$

Mērījumu rezultātā uz $\Delta n = n_2 - n_1$ ciklu bāzes parametriem N_{in}, N_{AEn} un A_{in} iegūsim to summārās vērtības:

$$N_i = \sum_{r=n_1}^{n_2} \bar{N}_{in}, \text{ (imp. sk.)}; \quad N_{AE} = \sum_{r=n_1}^{n_2} \bar{N}_{AEn}, \text{ (imp. sk.)}; \quad A = \sum_{r=n_1}^{n_2} \bar{A}_n, \text{ (dB)} \quad (2.6)$$

Mērījumu rezultātā uz vairāku slogojumu ciklu bāzes iegūtos parametrus ir nepieciešams vidēdot šādā veidā:

$$\bar{N}_i = \frac{N_i}{\Delta n}, \text{ (imp. sk.)}; \quad \bar{N}_{AE} = \frac{N_{AE}}{\Delta n}, \text{ (imp. sk.)}; \quad \bar{A} = \frac{A}{\Delta n}, \text{ (dB)} \quad (2.7)$$

Ņemot vērā noguruma plaisas pieauguma nestacionaritāti:

$$\bar{N}_i = \frac{N_i}{\Delta n \cdot \gamma} \left(\frac{\text{imp.sk.}}{\text{cik}} \right); \quad \bar{N}_{AE} = \frac{N_{AE}}{\Delta n \cdot \gamma} \left(\frac{\text{imp.sk.}}{\text{cik}} \right); \quad \bar{A} = \frac{A}{\Delta n \cdot \gamma} \left(\frac{\text{dB}}{\text{cik}} \right) \quad (2.8)$$

kur $\gamma = \frac{n_a}{\Delta n}$ — aktīvu slogojuma ciklu, kuros notiek plaisas pieaugums, rašanās biežums n_a .

Gadījumā, kad AE impulsus ģenerē vienādas izcelsmes procesi (avoti) (piemēram, plastiskā deformācija vai noguruma plaisas veidošanās un attīstība), starp amplitūdas un AE summārā skaita parametriem viena slogojuma cikla ietvaros var būt sekojoša sakarība:

$$\frac{N_{AEn}}{\sum_{i=1}^k N_{AEn}} = \left(\frac{A_{in}}{A_0} \right)^{-m} \quad (2.9)$$

kur A_0 — amplitūdas robežvērtība;

m — impulsu sadalījuma pēc amplitūdas rādītājs, kas raksturo bojājumu uzkrāšanos materiālā īpatnības un veidu (plastiskā deformācija vai noguruma plaisas veidošanās un attīstība, berze starp plaisas pretējām malām) un ir dotā tipa impulsu procesa-avota raksturotājs.

Sadalot visus izmēģinājumu gaitā reģistrētos AE impulsus atsevišķās grupās saskaņā ar izteiksmi (2.9), var noteikt arī katras signālu grupas enerģiju viena slogojuma ciklā ietvaros saskaņā ar formulu:

$$E_n = C \sum_{i=1}^k N_{AE_n} \cdot A_{in}^2, \quad (J) \quad (2.10)$$

kur C — proporcionalitātes koeficients, kas ir atkarīgs no materiāla īpašībām.

Turpmāk, lai noteiktu sakarības starp AE signālu parametriem un noguruma bojājumu avotiem, apskatīsim divus visizplatītākos avotus.

Avots 1: materiāla plastiskā deformācija.

Lai vienkāršotu teorētisku definīciju sakarībai starp AE parametriem un noguruma bojājumu avotiem materiālā, pieņemsim sekojošu hipotēzi [126]: AE summārais skaits materiāla plastiskās deformācijas laikā ir proporcionāls plastiski deformējamajam apjomam, citiem nosacījumiem paliekot nemainīgiem.

Šajā gadījumā iegūsim:

$$N_{AE_n}^* = N_{AE_0}^* \cdot V \quad (2.11)$$

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

$N_{AE_0}^*$ — AE signālu, kurus ģenerē materiāla plastiski deformējamā apjoma V lokālā vienība, summārais skaits, imp.sk.·mm².

Nosacījumu (2.11) var attēlot diferenciālā formā, nosakot skaitīšanas ātrumu:

$$\dot{N}_{AE_n}^* = \frac{dN_{AE_n}^*}{dt} = N_{AE_0\varepsilon}^* \cdot \dot{\varepsilon} \cdot V + N_{AE_0}^* \frac{dV}{dt} \quad (2.12)$$

kur $N_{AE_0\varepsilon}^* = \frac{dN_{AE_0}^*}{d\varepsilon}$ — AE summārais skaits, kura cēlonis ir plastiskās deformācijas apjoma izmaiņas;

$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ — 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 [100,116,126]:

$$\delta_{ijn} = \frac{K_j}{I} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \varphi_{ijn}(\theta, \mu, \tilde{r}), (\mu\text{m}) \quad (2.13)$$

kur sprieguma intensitātes koeficients (SIK)

$$K_j = P_j \sqrt{\pi l} Y_j(\lambda) \quad (2.14)$$

Sakarībās (2.13) un (2.14):

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

h — konstrukcijas ar plaisu sienīgas 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 (μm) un konstrukcijas raksturīgā izmēra L (μm)

(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, sloģojuma īpatnībām u. tml.

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

$$\Delta A_{ijn} = \frac{\partial \delta_{ijn}}{\partial l} dl \quad (2.15)$$

Tādējādi, noguruma plaisas lineārā izmēra palielinājumu var kontrolēt, reģistrējot gan amplitūdu, gan caur izteiksmēm (2.9) un (2.10) saistītus AE signālu summārā skaita un enerģijas parametrus.

Turklāt izteiksmē (2.14) 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:

$$S_{cr} = \frac{N_{AE2} - N_{AE1}}{(N_2 - N_1) \cdot P_{max} \cdot A} \quad (2.16)$$

kur S_{cr} — bojājuma laukuma lielumu, 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, kurš 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 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. EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU VEIKŠANAS METODOLOĢIJA UN PIELIETOJAMĀIS APRĪKOJUMS

Uzstādīto mērķu sasniegšanai tika veikta vesela virkne sarežģītu eksperimentu, izmantojot paraugus un reālas aviācijas konstrukcijas uz Rīgas zinātniski-eksperimentālā centra „AVIATEST LNK” bāzes, piedaloties dotā promocijas darba autoram, kā arī tika izmantoti eksperimentālie dati, kurus iepriekš ieguva RTU TMF Aeronautika institūta pētnieki [Nasibullins A., Turko V., Urbahs A., Banovs M., Feščuks J. u. c.]. Eksperimentālo pētījumu veikšanas metodoloģija un pielietojamais aprīkojums ir aprakstīti šajā nodaļā.

3.1. Pētījumu objektu raksturojums

Par pētījumu objektiem šajā darbā tika izvēlēti:

1. Paraugi no kompozītmateriāla;
2. Vidējas maģistrāles lidmašīnas (VML) šasijas pamata statne;
3. Tuvās maģistrāles lidmašīnas (TML) spārna elerons.

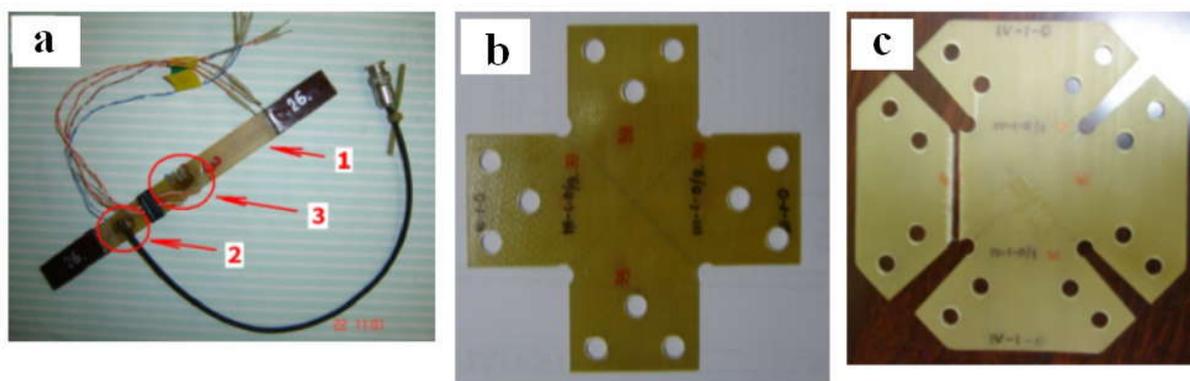
3.1.1. Kompozītmateriāla paraugu raksturojums

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 uzliktņiem, kas paredzēti stiepes pārbaudes veikšanai līdz pilnīgai paraugu sagraušanai (3.1. att., a);
- KM paraugi, kas ir veidoti kā krusteniskas formas plāksnes un paredzēti stiepes pārbaudes veikšanai līdz pilnīgai paraugu sagraušanai (3.1. att., b);
- KM paraugi, kas ir veidoti kā Maltas krusta formas plāksnes, un paredzēti stiepes pārbaudes veikšanai līdz pilnīgai paraugu sagraušanai (3.1. att., c).

Paraugi tika izgatavoti saskaņā ar ГООТ 12019 – 66, 11262 – 80 ar auduma pamatni Т-50(ВМII) — 18, kas ir izgatavota saskaņā ar ТУ 6 – 48 – 5786902 – 9 – 88, un saistvielu 5 – 211Б ПИ 1.2.266 – 84, kurai kopējais slāņu skaits ir vienāds ar 7.

Kad paraugi tika saņemti uzņēmumā SIA „AVIATEST LNK”, tie atradās koka kastē un bija secīgi iepakoti papīra un polietilēna iepakojumā. Kastē atradās arī kapsulas ar silikagelu, kas regulē mitrumu. Redzami kastes un iepakojuma bojājumi netika novēroti, un pēc sākotnējās apskates paraugi tika ievietoti preparēšanas telpā, kas tika speciāli sagatavota paraugu glabāšanai, apstrādei (mikroskopiskie mērījumi, tenzodevēju pielīmēšana) un izturēšanai standarta atmosfērā (+ 23°C un 50 % mitrums).



3.1. att. Kompozītmateriāla paraugu kopskats

3.1.2. VML pamata statnes konstrukcijas īpatnības

Gaisa kuģa pamata statne ir ideāls nogurumsagrūšanas procesu pētījumu objekts.

Šasija ir viens no visvairāk noslogotajiem GK konstrukcijas elementiem. Eksploataācijas procesā šasijas agregāti tiek pakļauti triecienslodzei, atmosfēras apstākļiem, nodilumam. Amortizācijas statnes ir pakļautas aksiālo spēku, lieces, vērpes un augsta iekšējā spiediena ietekmei, riteņu riepas un kameras ir pakļautas nozīmīgām iekšējam un ārējam spiedienam triecienu, kas rodas nosēšanās un lidmašīnas vadīšanas pa nelīdzenu virsmu, rezultātā. Riteņu bremzēšanas iekārtu elementi, amortizācijas statņu detaļas eksploataācijas procesā tiek pakļautas nodilumam.

Šasijas amortizācijas statņu galvenie eksploataācijas defekti un bojājumi ir sekojoši:

- pamata materiāla un metināto šuvju noguruma plaisas un sagrūšana;
- virzuļu — cilindru grupas detaļu nodilums, uzsitums, ieskrāpējums, rise;
- korozija un antikoroziijas pārklājuma bojājums;
- šķidrumu un gaisa noplūdes no amortizatora.

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 u. tml.

Informāciju par objekta sagrūšanas eksistenci vai tās sākšanos var iegūt ar tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu palīdzību: optiski-vizuālo metodi, ultraskaņas metodi, krāsu metodi u. tml. Tomēr defekti parasti rodas (vai atrodas) grūti sasniedzamās vietās, kā arī savienojuma vietās. Tādējādi, iepriekš minēto metožu pielietošana ir saistīta ar nepieciešamību pārtraukt objekta ekspluatāciju, izjaukt savienojumus, nodrošināt pieeju grūti sasniedzamām vietām u. tml.

Šasijas statnes testēšanas apstākļi ir līdzīgi tām metodēm, kuras pielieto ekspluatācijas apstākļos. Pirmkārt, lai veiktu mezglu, kas ir visvairāk pakļauti slodzēm, defektāciju un tehniskā stāvokļa novērtējumu, nepieciešams periodiski izjaukt statnes savienojuma vietas, kam ir nepieciešams papildu laiks un darbizlietojums. Otrkārt, bieža savienojumu izjaukšanas un salikšanas operāciju veikšana pasliktina to noguruma un drošuma parametrus. Treškārt, iepriekš minētie apstākļi stipri ietekmē noguruma izmēģinājumu ilgumu un sadārdzina tos. Tāpēc rodas nepieciešamība izpētīt arī citu netradicionālo nesagraujošās kontroles un diagnostikas metožu pielietojuma iespējas. Viena no šādām metodēm ir akustiskās emisijas metode (AE) [28].

Par pētījumu objektu tika izvēlēta VML šasijas pamata statne (sk. 3.2.att.).

VML (sk. 3.3. att.) izstrādāta A.N.Tupoļeva vārdā nosauktā eksperimentālajā konstruktoru birojā [122, 140,141,146,148].

VML ir uzbūvēta pēc zemplāna aerodinamiskās shēmas ar bultveida spārnu (35° pa hordas ceturtdaļas līniju), ar T-veida asti un dzinēja izvietošanu lidmašīnas aizmugurējā daļā. Divi dzinēji atrodas sānos uz piloniem, trešais — fīzelāžā ar gaisa savācēju forkilā ar S-veida kanālu. VML šasijai ir trīs balsti un priekšējā statne. Šasijas pamata statnes tiek ievilkas speciālajās gondolās, kas atrodas uz spārna. Kesona konstrukcijas spārnam ir trīs garsijas, priekšspārni, trīs spraugu aizspārni (videjas maģistrāles lidmašīnas — divspraugu), bremzspārni un eleroni.

Maksimālais videjas maģistrāles lidmašīnas lidojuma ātrums ir 950 km/h, kreisēšanas ātrums — 900 km/h. Maksimālais lidojuma augstums — 12 100 metri. Ieskrējiena garums — 2 300 metri. Lidmašīnas pacelšanās masa ir 90 000–98 000 kg. Nosēšanās ātrums ir no 220 līdz 230 km/h; vertikālā pārslodze nosēšanās laikā sastāda 1,4–1,6.



3.2.att. VML šasijas pamata statne [139]

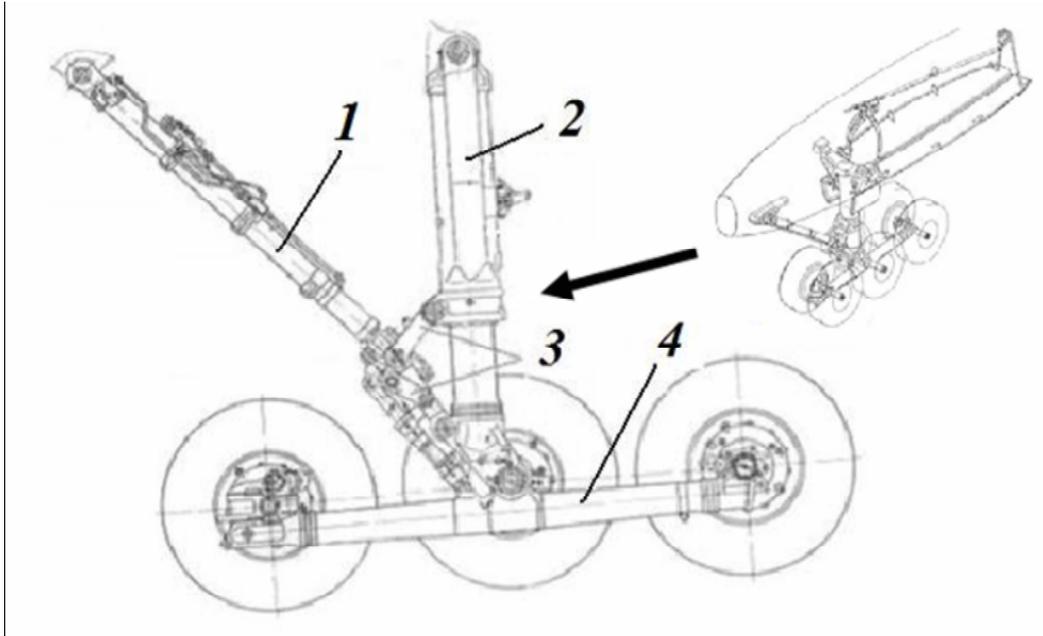


3.3. att. Videjas maģistrāles pasažieru lidmašīna [141]

Lidmašīnas šasija ir trīs balstu, ar priekšējo statni. Šasijas pamata statnes, kuras ir aprīkotas ar riteņu disku bremzēm, tiek ievilkta speciālajās gondolās, kas atrodas uz spārna. Priekšējā statne ir grozāma. Visu statņu izlaišana notiek pret gaisa plūsmu; izlaišanas, ievilkšanas, bremzēšanas un apgriešanās pievads — hidraulisks.

Šasijas pamata statnes uzbūve ir sekojoša (sk. 3.4. att.):

- amortizācijas balsts 2, kas sastāv no cilindra un virzuļa ar bīdni, ar rievotu šarnīru 3 un kardānu;
- slīpuma cilindrs 1;
- ratiņi ar sešiem riteņiem 4;
- ratiņu noliekšanās mehānisms;
- balsta un spārna kronšteina stiprinājumi un citi.



3.4. att. VML šasijas pamata statnes komponentes [46]:

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

3.1.3. TML elerona konstrukcijas īpatnības

Svarīgākā gaisa transporta attīstības problēma ir aizvien pilnīgāku lidmašīnu un helikopteru konstrukciju veidošana.

Sniedzoties pēc tehnisku un ekonomisku rādītāju uzlabošanas, aviācijas konstruktori ieviesa ne mazums GK konstrukcijas tehnisku uzlabojumu.

Viens no svarīgiem lidmašīnas ekspluatācijas rādītājiem ir tā ieskrējiena garuma pacelšanās laikā un bremzēšanas ceļa garuma nosēšanās laikā raksturojums, kas tieši ietekmē lidmašīnas degvielas patēriņu un lidojuma tālumu.

Viens no svarīgākajiem lidmašīnas konstrukcijas elementiem, kas ietekmē tā pacelšanos un nosēšanos, ir spārns. Lidmašīnu būves attīstības vairāk nekā simts gadu garajā vēsturē spārna konstrukcija, tā veids, bet pats galvenais — mehanizācija, tika pakļauti

vairākkārtējām izmaiņām. Mūsdienu lidmašīnas spārns — ļoti sarežģīta konstrukcija, kas ir aprīkota ar daudzām detaļām un mehānismiem.

Mehanizācija ir gandrīz katras mūsdienu lidmašīnas neatņemama spārna daļa. Spārna mehanizācija ļauj palielināt planēšanas leņķi nosēšanās laikā, samazina ieskrējiena un nobraukuma garumu, kā arī kopējo attālumu, kas ir nepieciešams šķēršļu pārvarēšanai pacelšanās laikā, tā arī palielina šķērsstabilitāti. Spārna mehanizācija palielina cēlējspēku un frontālo pretestību.

Šajā darbā par pētījumu objektu tika izvēlēts lidmašīnas TML spārna elerons (3.5. att.).



3.5. att. Tuvas maģistrāles lidmašīnas kopskats [147]

Tas, ka par pētījumu objektu tika izvēlēts dotais mehānisms, ir skaidrojams arī ar to, ka tieši lidmašīnas tuvas maģistrāles lidmašīnas elerona veidošanā tika izmantoti kompozītmateriāli. Attēlā 3.6. ir parādīta dažādu materiālu pielietojamības shēma šīs lidmašīnas ražošanas procesā.

Reģionālu TML saimē ir divas lidmašīnas ar pasažierietilpību 75 un 95 krēsli konfigurācijā ar bāzes un palielināto lidojuma tālumu – [134,137,138].

TML maksimālais ātrums V_{max} — 860 km/h. Maksimālais lidojuma augstums — 4000 km. Ieskrējiena garums — 1700–2050 metri. Pacelšanās masa sastāda 45 880–49 450 kg [145].



3.6. att. Dažādu materiālu pielietojamības shēma lidmašīnas TML ražošanas procesā [135]:

zilā krāsa — metāls; oranžā — oglekļa šķiedra; dzeltenā — stikla šķiedra

3.1.3.1. Elerona komponējums un galvenie parametri

Eleroni (sasveres stūres) — aerodinamiskie vadības orgāni, kas ir izvietoti simetriski spārna konsoles aizmugurējā daļā lidmašīnām ar normālu shēmu vai lidmašīnām, kas ir būvētas pēc shēmas „pīle”. Eleroni pirmkārt ir paredzēti, lai vadītu lidmašīnas sānsveres leņķi, turklāt eleroni darbojas diferenciāli, tas ir uz pretī esošām pusēm: lai lidmašīna sasvērtos uz labo pusi, labais elerons pagriežas uz augšu, bet kreisais — uz leju; un otrādi. Elerona darbības princips ir sekojošs: spārna daļai, kas atrodas pirms augšā paceltā elerona, pacelšanās spēks samazinās; bet spārna daļai, kas atrodas pirms uz leju nolaistā elerona, pacelšanās spēks palielinās; rodas spēka moments, kas maina lidmašīnas rotācijas ātrumu ap asi, kas ir tuva lidmašīnas garenasij.

Lidmašīnām, kas ir būvētas saskaņā ar ”bezastes” shēmu, eleroni darbojas kā augstuma stūres, nodrošinot lidmašīnas garenvadāmību un pārsveres leņķa balansēšanu, tāpēc tos sauc par **elevoniem** [118].

Turklāt eleronu pielietošana kopā ar bremzplākšņiem, uzlabo lidmašīnas šķērsvadāmību visā ātrumu diapazonā.

Eleroni tiek slogoti ar aerodinamiskiem spēkiem kā spārna sastāvdaļas un kā augstuma un virziena stūres to novirzes gadījumā [78]. Slodze mainās gar elerona hordu saskaņā ar trapeces likumu. Priekšējā malā tā ir vienāda ar $P_{el} = 0,64 g_{max}$, bet aizmugurējā malā tā ir trīs reizes mazāka. Jebkurā elerona šķērsgrīzumā aprēķina garumslodzi nosaka saskaņā ar formulu:

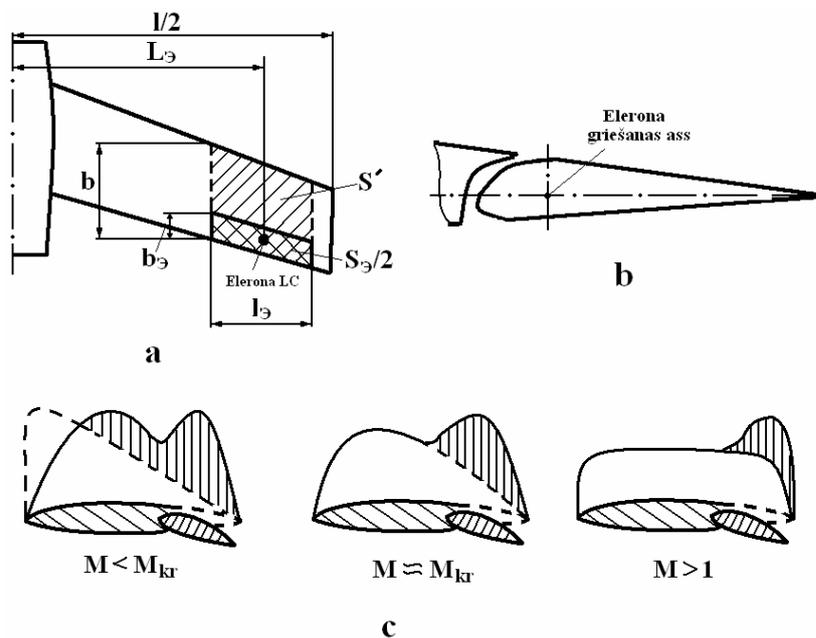
$$g_E = \frac{P_E + \frac{1}{3}P_E}{2} b_E = \frac{2}{3} P_E b_E, (N)$$

kur b_E — elerona horda.

Eleroniem tiek aprēķināta to novirze maksimālā ātruma spiediena q_{\max} gadījumā, kur ātruma spiedienu izvēlas saskaņā ar stiprības normām atkarībā no lidmašīnas manevrējamības.

Attēlā 3.7. parādīta elerona izvietojuma shēma uz spārna.

Attēlā ir izmantoti sekojoši apzīmējumi: S' — spārna daļa, kuru aizņem elerons, laukums; $S_E/2$ — elerona laukums; l_E — elerona vāziens; $l/2$ — spārna pus vāziens; L_E — attālums no elerona laukuma centra līdz lidmašīnas garenasij; b_E — elerona horda; b — spārna horda.



3.7. att. Elerona izvietojuma shēma uz spārna [78]:

- a) — tā izmēri; b) — CAHI (Centrālais Aerohidrodinamiskais institūts) tipa elerona profils;
- c) — gaisa slodzes sadalījums pa spārna hordu (punktēta līnija) un tā izmaiņas, eleronam novirzoties (nepārtraukta līnija)

Tuvināti eleronu efektivitāti var novērtēt ar attiecību S_e/S , kur S — visa spārna laukums. Mūsdienu lidmašīnām $S_e/S = 0,06...0,1$. Precīzāk elerona efektivitāti, veidojoties sānsveres momentam, nosaka saskaņā ar formulu:

$$g_{\vartheta} = \frac{S_{\vartheta}}{S} \frac{L_{\vartheta}}{l/2}$$

kuru sauc par statiskā momenta koeficientu, vai eleronu jaudas koeficientu.

Koeficients A_E ir proporcionāls elerona un pus spārna laukumu statisko momentu un lidmašīnas garenass attiecībai. A_E koeficienta vērtību statistika tiek izmantota projektēšanas gaitā.

Sakarības, kas raksturo eleronu izvietojumu un kontūru, ir sekojošas: $b_E/b = 0,2...0,28$; $l_E/(l/2) = 0,3...0,4$.

Palielinoties b_E/b , samazinās spārna darba šķērsriezuma platums. Elerona efektivitāte pie $b_E/b > 0,25$ nepalielinās. Palielinoties $l_E/(l/2)$, samazinās spārna vēziena daļa, kas ir nepieciešama mehānizācija, un turklāt samazinās plecs L_E .

Eleronu novirzes maksimālie leņķi ir $12...29^\circ$, turklāt mazākās vērtības attiecas uz ātrgaitas lidmašīnām.

Zemaskaņas lidmašīnām, kuru spārniem nav bultveidīgas formas un ir liels liekuma profils lidojumā, eleronu novirze uz leju un augšu par vienādu leņķi rada atšķirīgu frontālās pretestības palielinājumu, kura vērtība ir lielāka uz pus spārna ar nolaistu eleronu. Rezultātā rodas moments, kas pagriež lidmašīnu uz sānsveri pretējo pusi.

Pasākumi dotās parādības novēršanai:

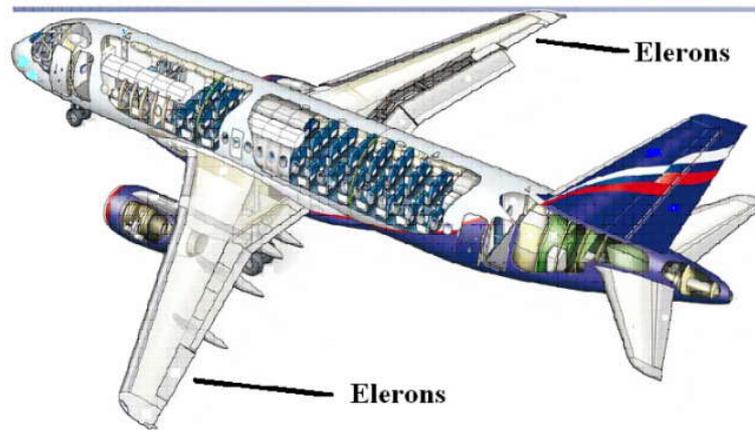
- eleronu diferenciālās novirzes pielietošana, t. i., eleronu novirze uz leju par mazāku leņķi nekā uz augšu; elerona deguna profilēšana (3.7. att., b).

Eleronam virzoties uz augšu dēļ tā, ka tā deguns izvirzās zem spārna, spārna pretestības palielinās vairāk nekā gadījumā, kad elerons virzās uz leju.

Ātrgaitas lidmašīnu eleroniem ir noapaļoti deguni. Ja ir iekšējā kompensācija, to forma atbilst formai, kas ir parādīta 3.7. att., c.

3.1.3.2. TML elerona konstrukcijas raksturojums

Elerons atrodas spārna astes galā aiz ārējā aizspārņa (3.8. att.). To uzkarina uz spārna ar divu uzkares mezglu palīdzību un darbina ar diviem stūres pievadiem.



3.8. att. Pētāmo eleronu izvietojuma shēma uz TML [136]

Eleronam ir bultveidīga forma, tā garums sastāda 2800 mm (pa purngalu) un platums — 400 mm pa spārna ribiņu №2. Tā izgatavošanai izmanto galvenokārt kompozītmateriālus (uz stikla šķiedras un oglekļa šķiedras pamata), kā arī tehnoloģijas, kuras pielieto lidmašīnu saimes Russian Regional Jet (RRJ) ražošanā.

Eleronam ir augšējais un apakšējais apšuvums, purngala daļas apšuvums, lonžeroni, spārna ribiņas, purngala diafragmas, sánstringers un uzkares kronšteini. Augšējais un apakšējais apšuvums ir veidots no kompozītmateriāliem ar šūnu pildītāja pielietojumu; purngala daļas apšuvums arī ir no kompozītmateriāla, bet bez pildītāja. Lonžeroni sastāv no divām daļām: saknes daļa, kas ir veidota no titāna sakausējuma kopā ar uzkares un piedziņas mezgliem, un gala daļa, kas ir veidota no polimēru materiāla. Sánstringera elementi ir veidoti no tekstolīta.

Elerona kopējais platums sastāda $1,98 \text{ m}^2$ ($21,3 \text{ ft}^2$) vai 2,6 % no spārna kopējās platības (S_{sp}).

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 ir aprīkots ar hidraulisku cilindru un tenzometrisku sistēmu. Slogojuma režīms tika uzdots un kontroles ar speciāli izstrādātu “Aviatest” sistēmu. Stends ir Vācijā ražota eksperimentālā iekārta WPM — 2 [46,51,52,53], kas tika pilnveidota laboratorijā SIA “AVIATEST LNK” (3.9. att.).



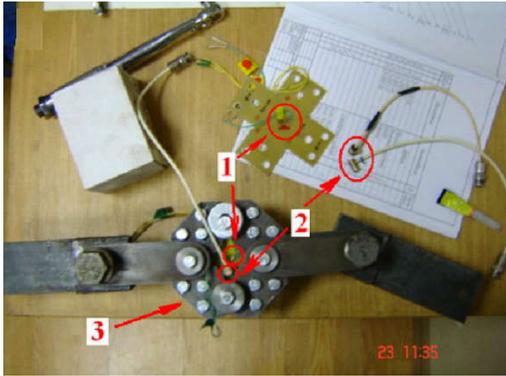
3.9. att. Izmēģinājumu stenda termostatiskā kamera

Izmēģinājumu iekārtas galvenie tehniskie parametri sniegti 3. pielikumā.

Iekārta ir metroloģiski atestēta saskaņā ar ГОСТ Р.8.568-97. Iekārtas atestāts №2/AT-08 ir izsniegts saskaņā ar primārās metroloģiskās atestācijas rezultātiem. Atestāciju veica „AVIATEST LNK” un federālā valsts unitārā uzņēmuma „Viskrievijas zinātniski pētnieciskais metroloģijas institūts” (FGUP VNIIM) speciālisti. Katru gadu izmēģinājumu iekārtai veic periodisku metroloģisku atestāciju.

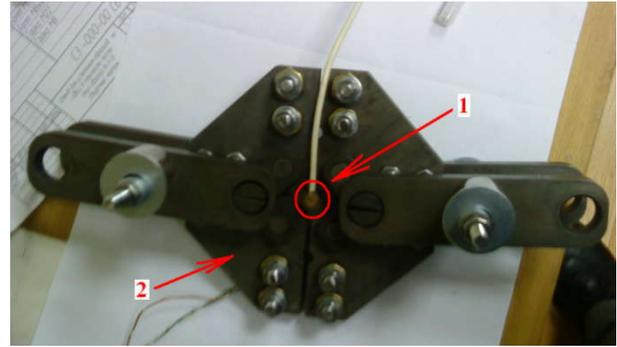
Palīgierīces paraugu bīdes izmēģinājumiem plāknē uzdotajos deformēšanas un sloojuma apstākļos krusteniskas formas (3.10. att.) un Maltas krusta formas paraugiem (3.11. att.) tika izgatavotas specializētā ražošanas aprīkojuma rūpnīcā (Rīga) saskaņā ar rasējumiem, kas tika izstrādāti A. N. Tupoleva vārdā nosauktā Kazaņas Valsts tehniskās universitātes (KGTU) Aviācijas tehnikas un tehnoloģiju institūta Lidaparātu konstrukcijas stiprības un drošuma izmēģinājumu laboratorijā (IATT IL PNK LA), Kazaņa.

Kompozītmateriāla paraugu, kas ir veidoti kā taisnstūra formas plāksnes ar galos iestiprinātiem uzliktņiem un Maltas krusta formas paraugu izvietojums iekārtas stiprinājumos termoizolētās kameras darba zonā ir parādīts 3.12. un 3.13. att.



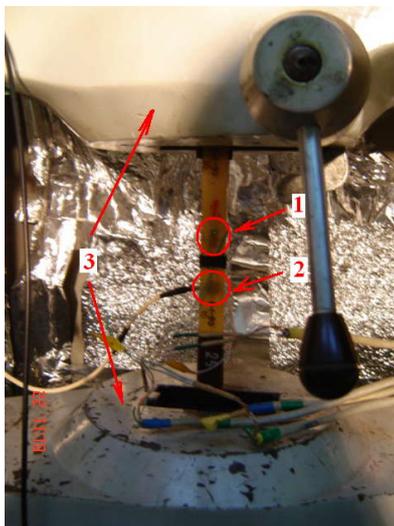
3.10. att. Palīgierīce krusteniskas formas paraugu izmēģinājumiem[88]:

- 1 — tenzometrijas devējs; 2 — AE devējs;
- 3 — palīgierīce paraugu izmēģinājumiem



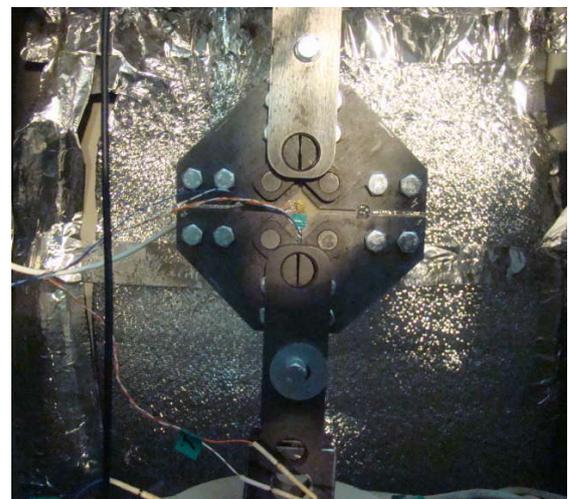
3.11. att. Palīgierīce Maltas krusta formas paraugu izmēģinājumiem[88]:

- 1 — AE devējs; 2 — palīgierīce paraugu izmēģinājumiem



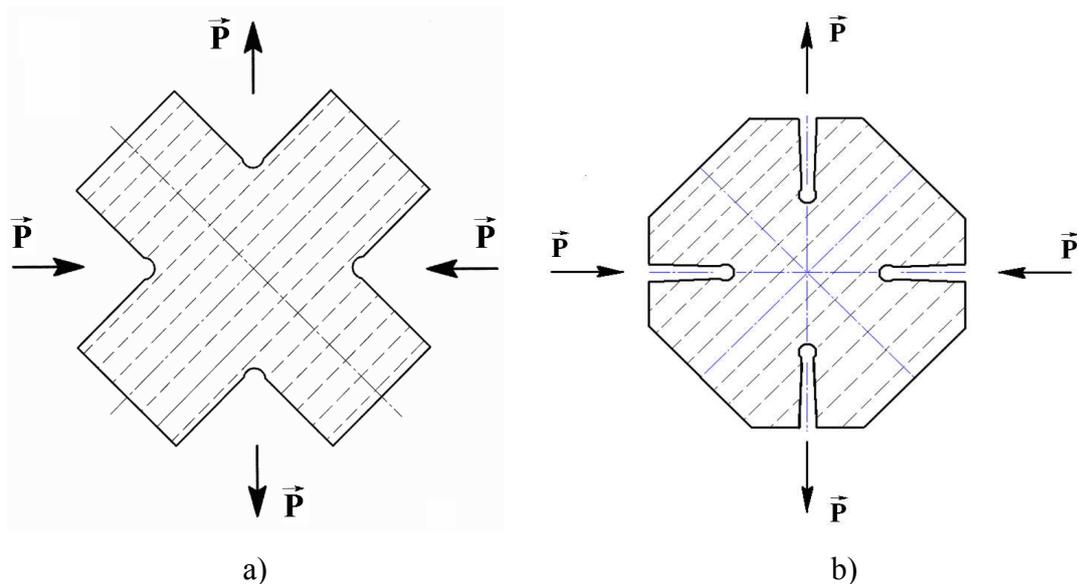
3.12. att. Kompozītmateriāla paraugu, kas ir veidoti kā taisnstūra formas plāksnes ar galos iestiprinātiem uzliktņiem, izvietojums iekārtas stiprinājumos termoizolētās kameras darba zonā:

- 1 — tenzometrijas devējs; 2 — AE devējs;
- 3 — izmēģinājumu stenda stiprinājumi



3.13. att. Maltas krusta formas parauga izvietojums iekārtas stiprinājumos termoizolētās kameras darba zonā

Attēlā 3.14. parādīta slogojošo spēku pielikšanas shēma krusteniskas formas paraugiem un Maltas krusta formas paraugiem ar kompozītmateriāla pamatnes šķiedru virziena attēlojumu.



3.14. att. Slogojošo spēku pielikšanas shēma paraugiem ar kompozītmateriāla pamatnes šķiedru virziena attēlojumu:

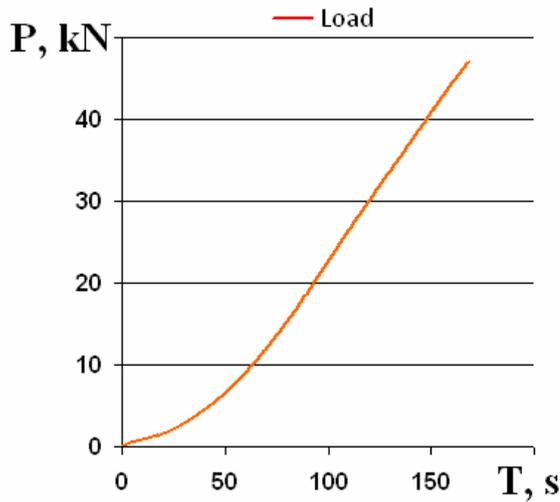
a) krusteniskas formas; b) Maltas krusta formas

Izmēģināmā parauga slogošanu un informācijas apkopošanu veica trīs operatori, kas bija atbildīgi: par parauga uzstādīšanu izmēģinājuma iekārtas stiprinājuma vietās, par uzstādītā parauga slogojumu ar uzdotiem parametriem, par deformācijas reģistrācijas kontroli un akustiskās emisijas signālu datu apkopošanu.

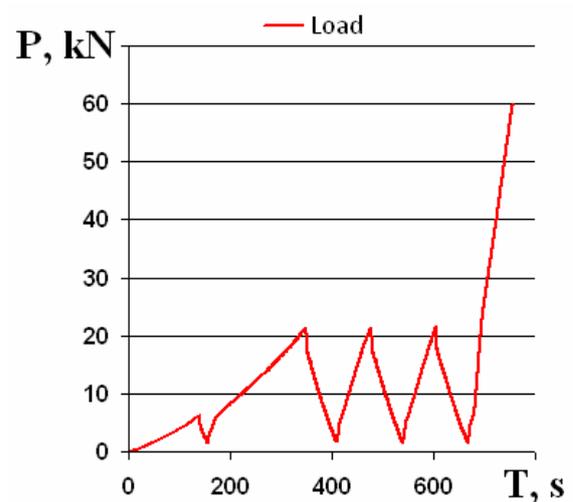
Paraugu izmēģinājumu veikšanas laikā obligāts nosacījums bija apkārtējās vides temperatūras uzturēšana $t = + 22...24^{\circ} \text{C}$ robežās.

Paraugu, kas ir veidoti kā taisnstūra formas plāksnes ar galos iestiprinātiem uzliktņiem, 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 sastāda 10–30 % no sagrūšanas slodzes, un turpmāku slogojumu līdz paraugu sagrūšanai (3.15. att.).

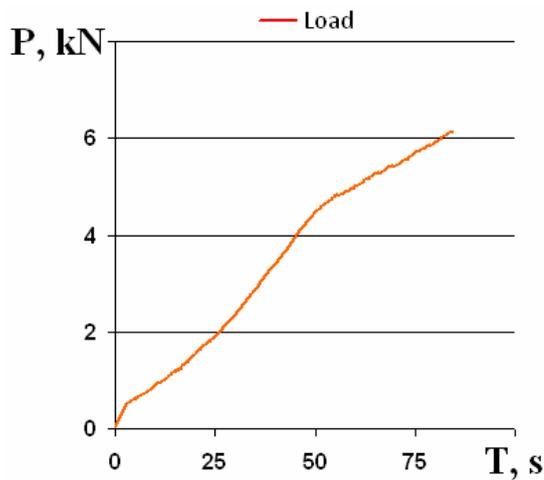
Paraugu, kas ir veidoti krusteniskas formas un Maltas krusta formas plāksnes, izmēģinājumu programma bija identiskas iepriekšējiem paraugiem: daļa no paraugiem tika slogota vienu reizi līdz pilnīgai sagrūšanai, bet pārējiem paraugiem bija slogojuma programma, kas paredzēja trīsreizēju paraugu slogojumu līdz līmenim, kas sastāda 10–30 % no sagrūšanas slodzes, un turpmāku slogojumu līdz paraugu sagrūšanai (3.16. att.).



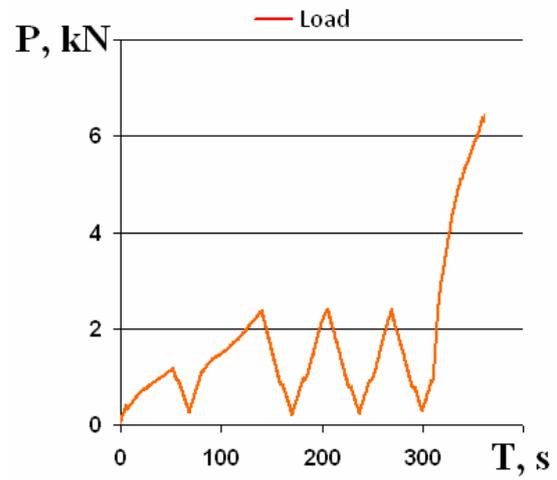
a)



b)



c)



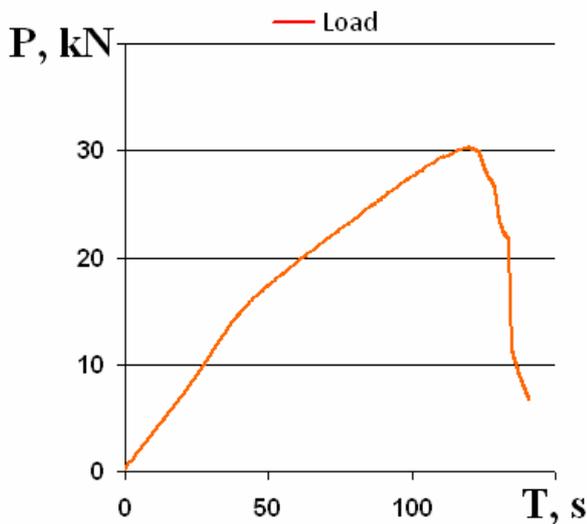
d)

3.15. att. Paraugu, kas ir veidoti kā taisnstūra formas plāksnes, slogojuma programma:

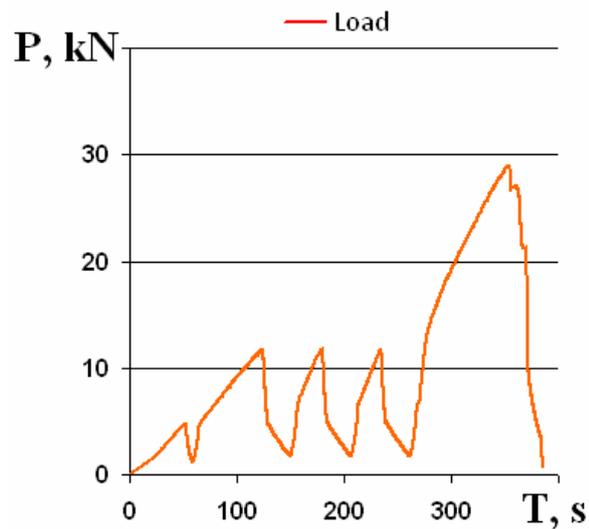
- a), b) — kompozītmateriāli ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu;
 c), d) — kompozītmateriāli ar transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu

Katrai KM grupai sākotnējās slodzes vērtība atbilda sekojošam vērtību diapazonam:

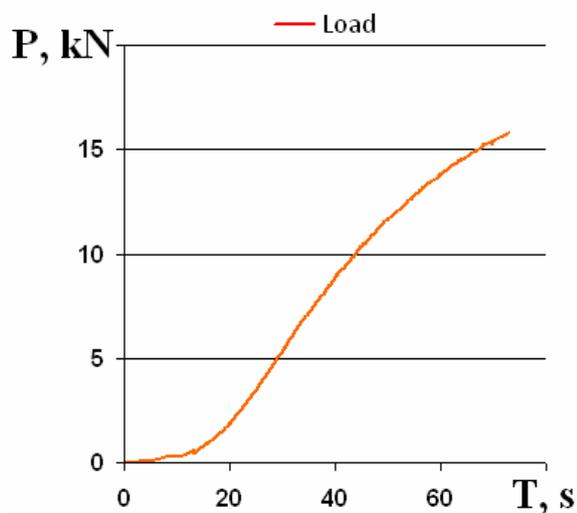
- kompozītmateriāli ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu — no 20 līdz 23 kN;
- kompozītmateriāli ar transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu — no 2 līdz 4 kN;
- krusteniskas formas KM — no 12 līdz 15 kN;
- KM Maltas krusta formas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



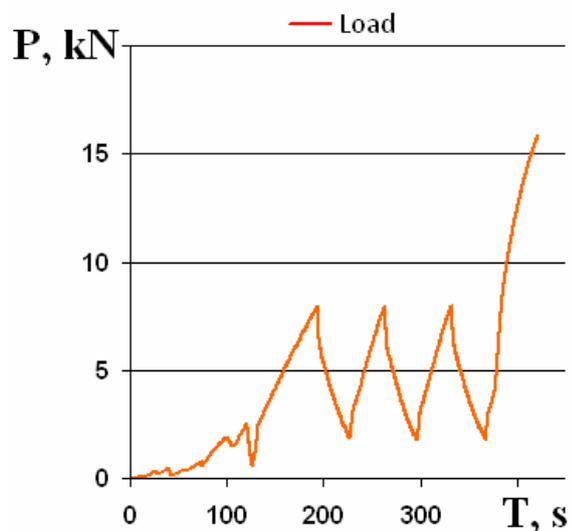
a)



b)



c)



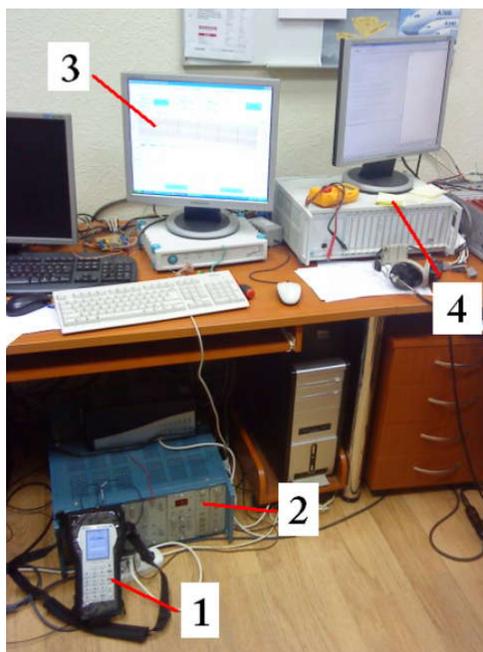
d)

3.16. att. Krusteniskas formas paraugu slojuma programma:

- a), b) — krusteniskas formas kompozītmateriāla paraugi;
- c), d) — Maltas krusta formas kompozītmateriāla paraugi

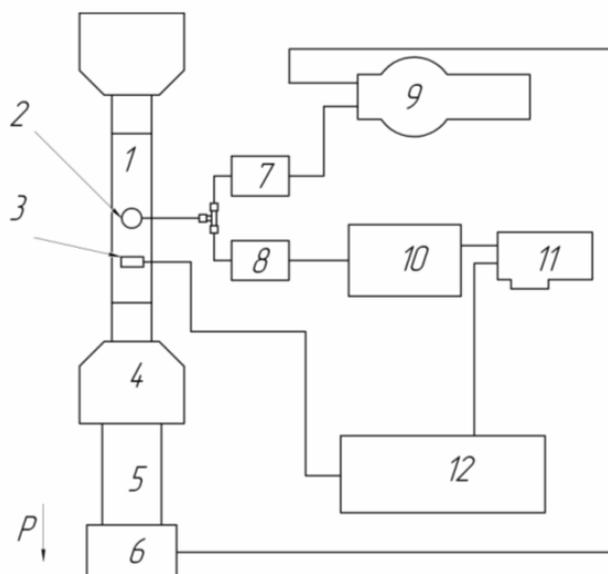
Attēlā 3.17. parādīts darba vietas un izmēģinājumos pielietojamās mērījumu un reģistrācijas aparātūras kopskats, bet attēlos 3.18. un 3.19. — kompozītmateriālu paraugu izmēģinājumu mēraparātūras komutācijas shēma.

Pirms izmēģinājumiem un līdz pat paraugu uzstādīšanai izmēģinājumu iekārtā tos uzglabāja speciālajā preparācijas telpā (klimatiskajā kamerā) apkārtējās vides standarta apstākļu nodrošināšanai (+ 23°C un 50 % mitruma).



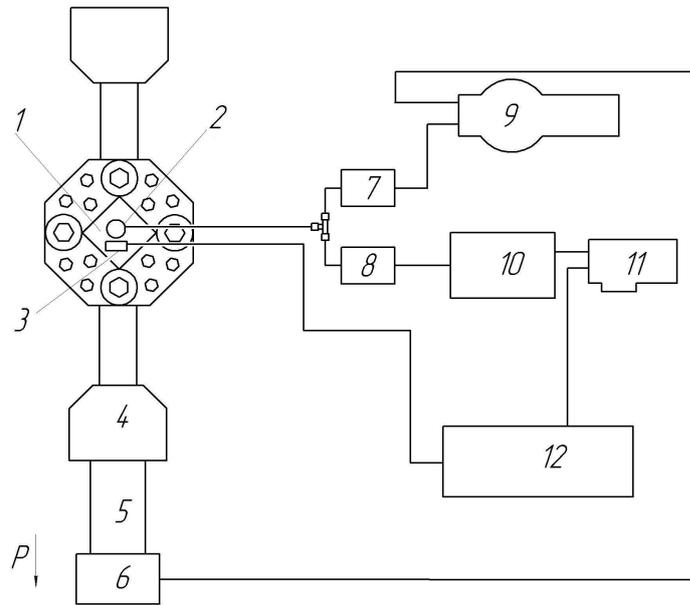
3.17. att. Kompozītmateriālu paraugu izmēģinājumu veikšanas darba vietas un izmēģinājumos pielietojamās mērījumu un reģistrācijas aparatūras kopskats:

- 1 — PAC POCKET AE-2, 2 –AF-15, 3 — monitors, kas attēlo programmas „Akusto” darbību,
4 — tenzometriskā sistēma



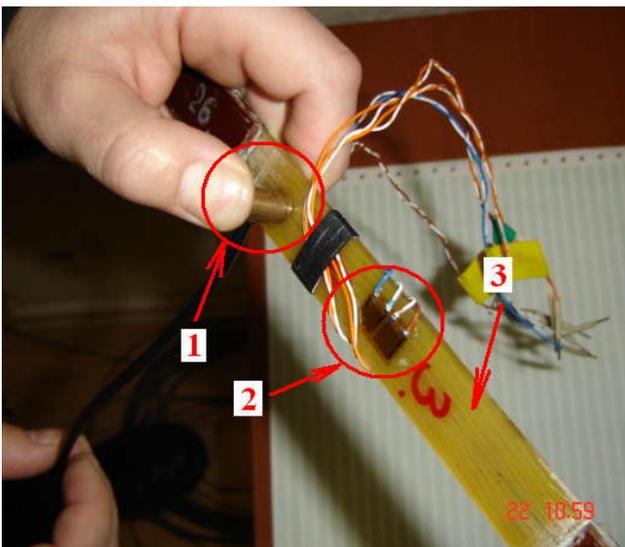
3.18. att. Izmēģinājumu mēraparatūras komutācijas shēma kompozītmateriālu paraugiem ar garenisku un transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slogojuma vektora virzienu:

- 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



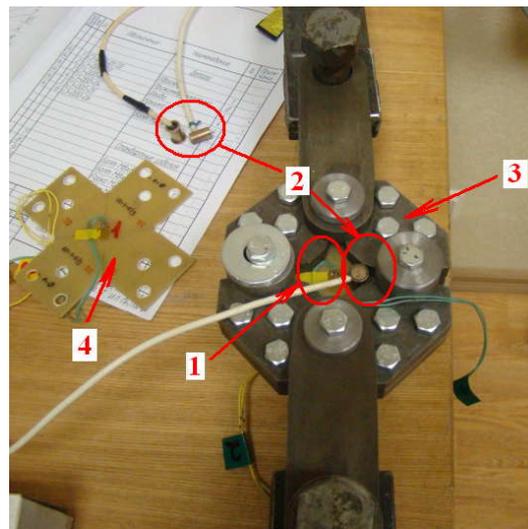
3.19. att. Mērījumu aparātūras komutācijas shēma krusteniskas un Maltas krusta formas kompozītmateriālu paraugiem:

- 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



3.20. att. AE devēju uzstādīšanas shēma taisnstūra formas paraugiem:

- 1 — AE devējs; 2 — tenzometrijas devējs;
 3 — izmēģinājumu paraugs



3.21. att. Palīgierīce krusteniskas formas paraugu izmēģinājumiem [88]:

- 1 — tenzometrijas devējs; 2 — AE devējs;
 3 — palīgierīce paraugu izmēģinājumiem;
 4 — paraugs

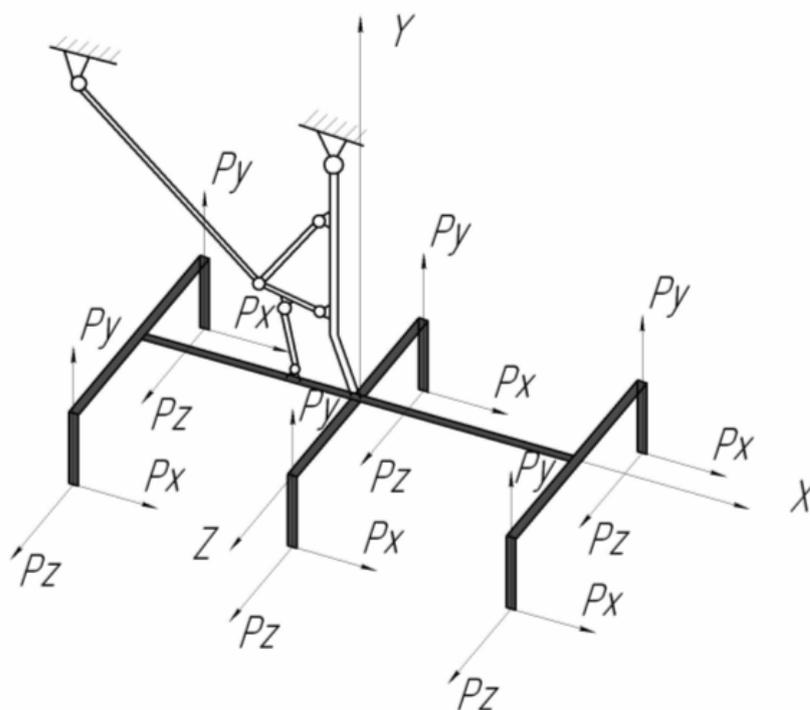
AE signālu devējus līmēja klāt paraugiem speciāli izvēlētajās vietās (sk. 3.20. un 3.21. att.) ar ciakrīna līmes palīdzību ar turpmāku izturi 4–5 minūtes.

3.2.2. VML šasijas statnes pārbaudes veikšanas stends un izmēģinājumu metodoloģija

VML šasijas noguruma izmēģinājumi tika veikti, lai būtu iespējams izstrādāt noguruma plaisas pieauguma cikliskos konstrukciju izmēģinājumos novērtējuma metodiku un spēka konstrukciju AE kontroles metodiku stenda noguruma izmēģinājumos [4].

Šasijas izmēģinājumiem tika izmantots „AVIATEST LNK” stenda komplekss. Stends atbilstoši Eiropas lidaparātu daļu un mezglu noguruma izmēģinājumu standarta (fatigue testing of aircraft parts and units) LV EN 450001 prasībām ir sertificēts Latvijas Nacionālajā akreditācijas birojā (Latvian National Accreditation Bureau) 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 statni ir parādīta 3.22. att.



3.22.att. Slodžu ietekmes shēma uz šasijas pamata statni [8]

Šasijas ekspluatācijā darbojas 3 slodžu veidi: P_x — priekšējā trieciena slodze (frontālā slodze); P_y — vertikālais spēks; P_z — sānu trieciena slodze (sānu slodze).

Stenda izmēģinājumos attiecīgi tiek realizētas visas šīs slodzes.

Šasijas statned slogošana ar vertikālu slodzi P_y tiek veikta ar 4 hidrocilindru palīdzību, kuri caur neīstiem riteņiem ir piestiprināti pie vidējās un aizmugures riteņu asīm. Slodzes uz priekšējo riteņi veidojas kā reakcijas uz visam, programmētām slodzēm. Slogošanu ar sānu spēkiem $\pm P_z$ nodrošina ar 9 hidrocilindriem, no kuriem trīs ir starp riteņu hidrocilindri. Spēki ir vērsti perpendikulāri lidojuma virzienam 398 mm rādiusā no riteņu ass riteņu saskares ar zemi vietās. Slodzes sadalīšanu starp riteņiem veic ar starp riteņiem uzstādītiem hidrocilindriem.

Jebkuru slodzi P_x rada spēki P_{x3} un P_{x0} . Slodzes P_{x3} tiek pieliktas riteņu saskares ar zemi punktos; frontālās slodzes P_{x0} — pie riteņu asīm. Abas slodzes darbojas pret lidojuma virzienu, un tās rada 12 hidrocilindri, no kuriem 8 ir starp riteņu hidrocilindri. Slodzes ir vienmērīgi sadalītas uz visiem 6 riteņiem. Slodžu sadalījums uz riteņu pāriem ir parādīts 3.1. tabulā.

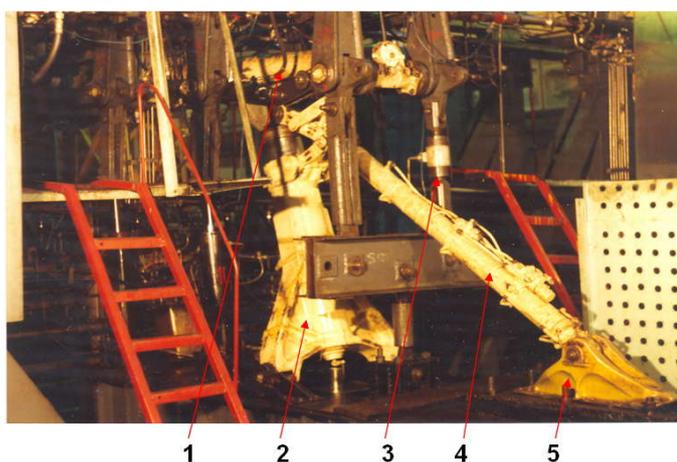
Kopējais šasijas noguruma izmēģinājumu stenda izskats ir parādīts 3.23. attēlā. Amortizatora cilindra savienojums ar kātu ir parādīts 3.24. attēlā. Šasijas galveno statni uz tā izvietoto apgrieztā stāvoklī un stiprina ar standarta kronšteiniem pie grīdas sliedēm. Izmēģinājumu objekta slogošana tika veikta ar hidrocilindru palīdzību, kurus izvietoja uz speciāla rāmja; hidrocilindru kāti tika savienoti ar dažādiem šasijas punktiem, lai tiktu radīts uzdots slodžu spektrs.

3.1. tabula

Slodžu sadalījums uz riteņu pāriem [4]

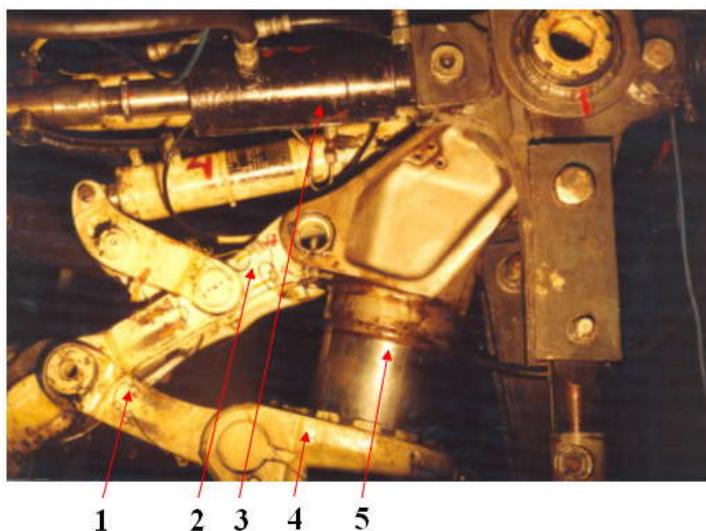
Riteņu asis	priekšējā	vidējā	aizmugures
slodze	%	%	%
P_{x3}, P_{x0}	33,3	33,3	33,3
$\pm P_z$	61,4	25,0	13,6
P_y	35,7	33,3	31,0

Hidrocilindru darbību nodrošina stenda hidraulikas sistēma, kura iekļauj eļļas sūkņēšanas staciju MS-52M, 18 hidraulikas jaudas pārveidotājus, ūdens-eļļas radiatoru, dzesētāju u. c. Hidraulikas sistēmas darba šķidrums ir eļļa AMG-10 [89]. Hidrocilindrus caur hidrauliskajiem jaudas pārveidotājiem saskaņā ar uzdoto sloģošanas programmu vada ar 24-kanālu sloģošanas automātu AAN-01. Sloģošanas programmas izpildi nodrošina vadības sistēma „SERVOTEST”, kura ir daudzkanālu vadības sistēma ar atgriezenisko saiti [9]. Atgriezeniskās saites signāli tiek saņemti no tenzodinamometriem un potenciometriskajiem spiediena devējiem. Vadības kanālu darbības kļūda nepārsniedz 5 %.



3.23.att. Kopējais šasijas izmēģinājumu stenda izskats [4]:

1 — ratiņi; 2 — amortizators; 3 — sloģošanas sistēmas hidrociļndrs; 4 — atģāznis; 5 — kronģsteins



3.24.att. Amortizatora cilindra savienojums ar kātu [4]:

1 — augģģģjais rievas řarnģrs; 2 — apakģģģjais rievas řarnģrs; 3 — sloģošanas sistģģģmas hidrociļndrs;
4 — amortizatora cilndrs; 5 — amortizatora kģģts

Izmēģinājumu stends ir aprīkots ar stenda un pārbaudāmā objekta aizsardzības sistēmu, kura nostrādā, ja izskaņojums starp vadības signālu un atgriezeniskās saites signāliem pārsniedz 20 %. Turklāt, ir paredzēta aizsardzības apakšsistēmas nostrādāšana, ja tiek pārsniegtas detaļu un mezglu pārvietojuma robežvērtības.

Noguruma izmēģinājumu sloģošanas programma imitēja šasijas tipveida slodzi lidojuma procesā. Vienā sloģošanas blokā tiek imitēts viens pamata sloģošanas cikls — „pacelšanās — nosēšanās”. Sloģošanas blokā ietilpst statistiskie spēki un mainīgās slodzes, kuras rodas sekojošos lidojuma režīmos:

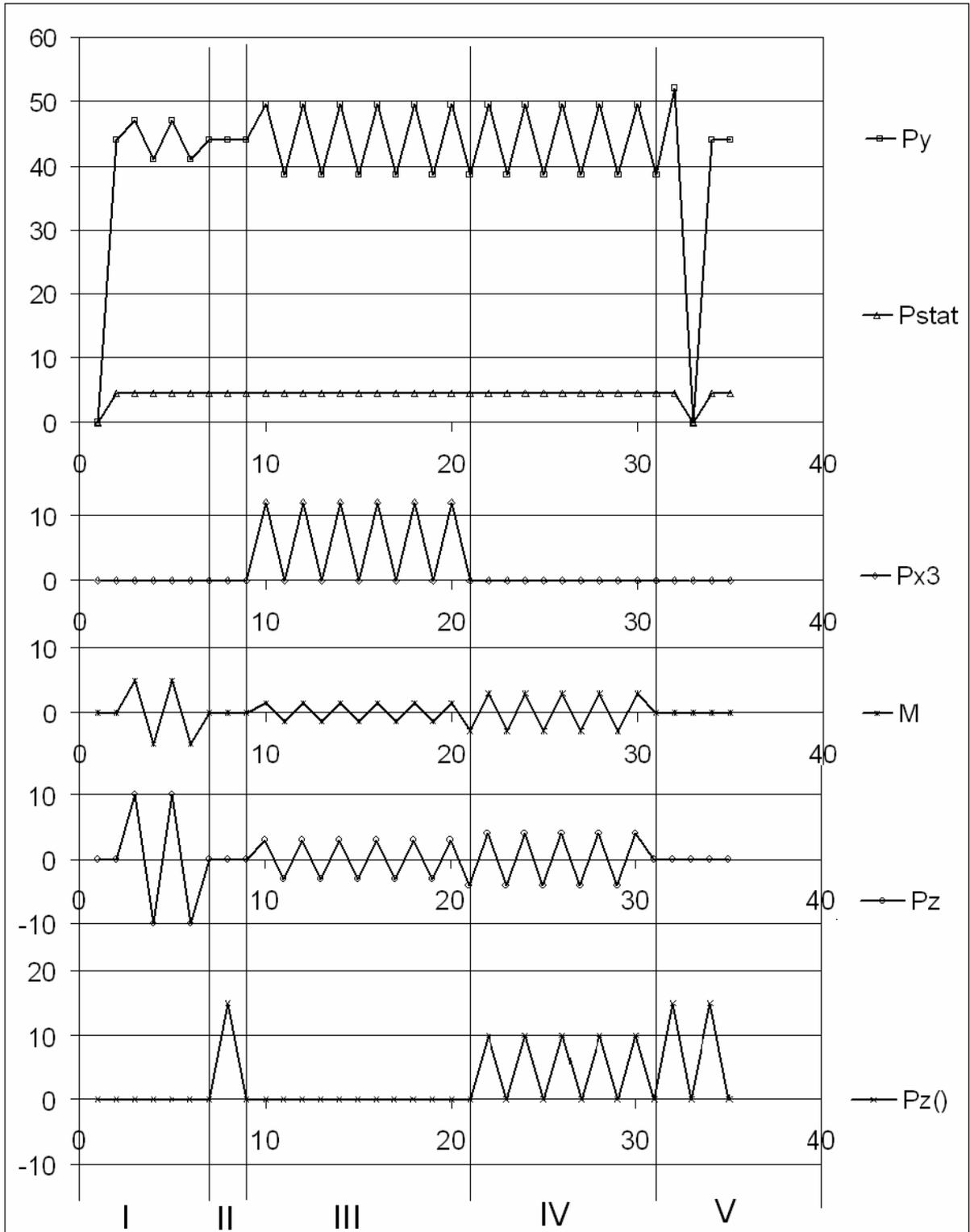
- pagriezieni pirms pacelšanās;
- bremžu atlaišana;
- stūrēšana un pacelšanās,
- šasijas ievilkšana un izlaišana;
- nosēšanās;
- pagriezieni pēc nosēšanās.

Slodžu lielumi ir izvēlēti, pamatojoties uz mērījumiem, kas tika veikti šasijas izmēģinājumos izgatavotājrūpnīcā, kā arī, vadoties pēc datiem, kas tika iegūti ekspluatācijas procesā. Viena sloģošanas bloka slodžu izmaiņa (vienas pacelšanās-nosēšanās imitācija) ir parādīta 3.25. attēlā.

Sloģošanas programma ir ciklogramma, kura sadalīta atsevišķos fragmentos, kurus sauc par etapiem. Kopā standarta sloģošanas programmā ir 31 etaps — tie kopā sastāda vienu programmas (pamata) bloku (ciklu). Sloģošanas secība, kura ir raksturīga dažādiem lidojuma režīmiem, var tikt mainīta.

Šasijas pamata statnes izmēģinājumos pēc standarta noguruma programmas amortizatora kāta spogulī parādījās C-veida caurejoša plaisa. Sakarā ar amortizatora kāta sabrukšanas augsto bīstamību ekspluatācijas procesā, šāda defekta attīstības un tā konstatēšanas iespēju pētījumi ir obligāti. Šim nolūkam amortizatora kāta konstrukcijā tika radīts mākslīgs defekts — koncentrators.

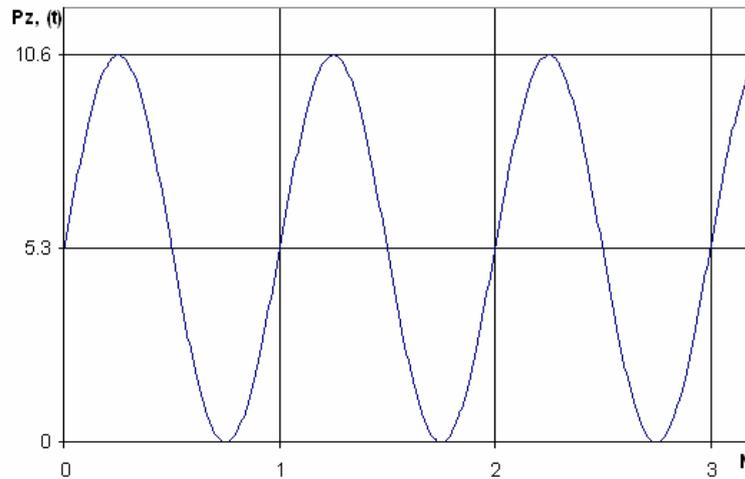
Izmēģinājumu veikšanai no koncentratora, kurš tika novietots uz amortizatora kāta iekšējās virsmas, bija jāiegūst noguruma plaisa. Lai samazinātu plaisas rašanās laiku, tika izvēlēta šāda programma — sloģošana tika veikta ar pulsējošiem sānu spēkiem $P_z = 0...10,6$ tonnas (3.26. att.) ar pastāvīgām vertikālām slodzēm $P_y = 45,0$ tonnas. Sānu spēku P_z pielikšana attiecībā pret iezāģējumu tika izvēlēta tādā veidā, lai radītu iezāģējuma atvēršanos.



3.25. att. Šasijas pamata statnes slogošanas programma (viens slogošanas bloks; atsevišķa lidojuma imitācija) [4,8]:

I — pagriezieni pirms pacelšanās; II — bremžu atlaišana; III — stūrēšana un pacelšanās;
 IV — nosēšanās; V — pagriezieni pēc nosēšanās

Reālās slodzes 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).



3.26. att. Slodšana ar pulsējošu sānu spēku ($P_z = 0 \dots 10,6$ tonnas) [4]

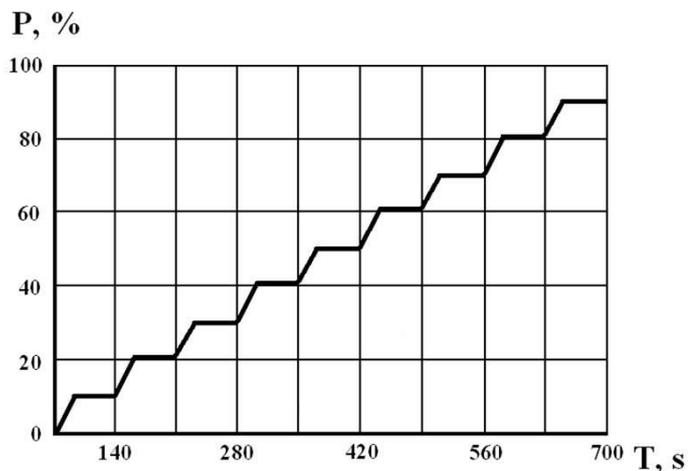
Kā AE devējs tika lietots pjezodevējs. Pjezodevējs tika uzlīmēts uz amortizatora kāta virsmas tajā vietā, kas atrodas ārpus cilindra (3.27. att.). Lai sinhronizētu AE informāciju ar slodzes procesu, tika izmantots tenzodevējs, kuru uzlīmēja pieliekamās slodzes maksimālās jūtības zonā.



3.27. att. AE devēja uzstādīšanas shēma uz amortizatora balsta ārējās sienas [4,8]:

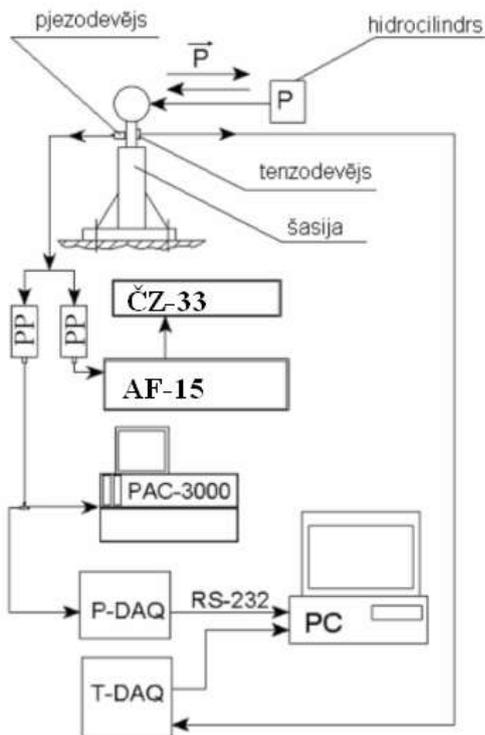
1 — AE devējs; 2 — tenzometrijas devēji; 3 — šasijas amortizatora balsts

Pēc tam statne tika pakļauta izmēģinājumiem ar palielināto slodzi (3.28. att.): slodze tika palielināta pakāpeniski (katrā slogojuma posmā par 10 % no aprēķinātās sagrūšanas slodzes). Balsts pilnīgi sagruva pie slodzes, kas sastādīja 90 % no aprēķinātās [2]. Vienlaicīgi sinhroni ar slogojuma izmaiņām tika mērīti AE signāli.



3.28. att. Šasijas statnes slogojuma shēma izmēģinājumos uz palielošo stiprību

Mērījumu aparātūras komutācijas shēma šasijas statnes izmēģinājumiem parādīta 3.29. att.



3.29. att. Mērījumu aparātūras komutācijas shēma šasijas statnes izmēģinājumos [4,5]

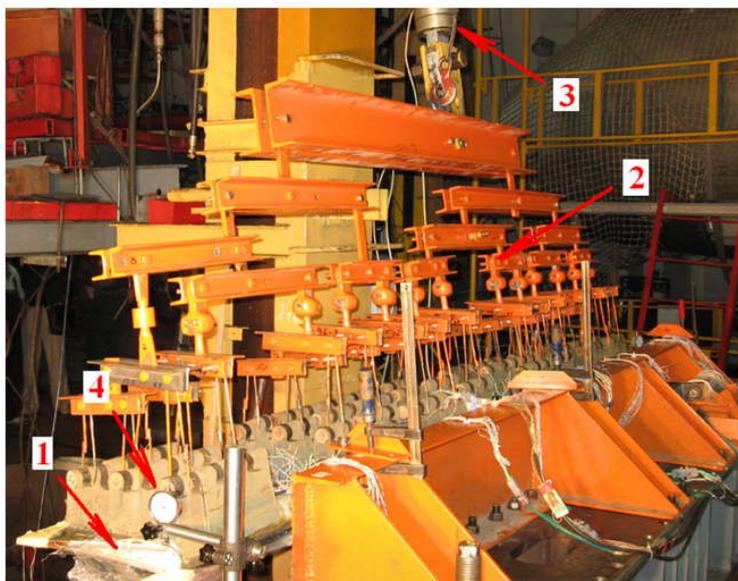
3.2.3. Elerona statisko izmēģinājumu veikšanas stenda un metodikas apraksts

Elerona izmēģinājumos izmantoja Rīgas zinātniski-eksperimentālā centra „AVIATEST LNK” stendu kompleksu.

Izmēģinājumu stenda kopskats parādīts 3.30. attēlā [50].

Gatavojoties eleronu statistiskajiem izmēģinājumiem, tika veiktas sekojošas operācijas:

- stenda hidrosistēmas montāža;
- stenda sloojuma sistēmas montāža;
- tenzometrijas sistēmas montāža;
- uz elerona konstrukciju tika uzlīmētas lences, tenzodevēji un pjezopārveidotāji.



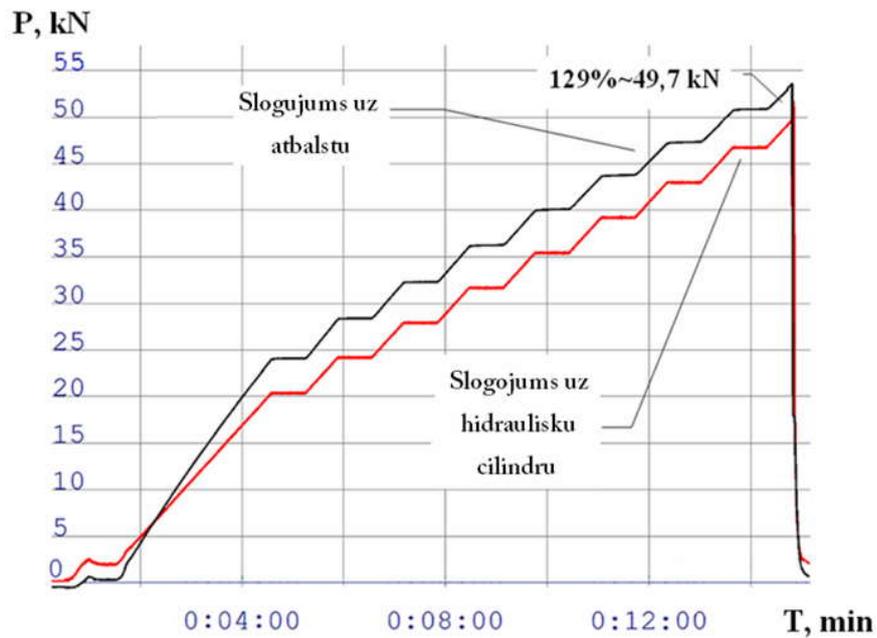
3.30. att. Elerona skats izmēģinājumu stendā:

1 — elerons; 2 — slošanas stends; 3 — slošanas hidrocilindrs; 4 — pulksteņindicators

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

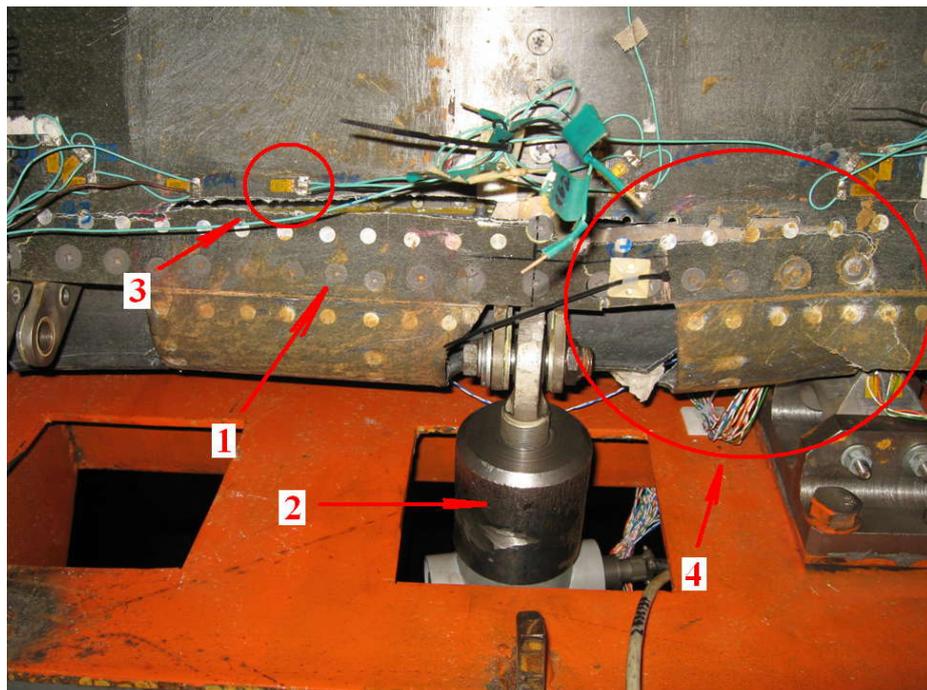
Izmēģinājumu gaitā tika uzdotas sekojošas parametru vērtības: elerona aizmugurējā mala novirzīta uz leju par $11,6^\circ$, kas atbilst lidojuma apstākļiem $H = 7560$ m augstumā ar ātrumu $V = 660$ km/h, lidojuma masa $G = 45880$ kg un pārslodze $n_y = 1,67$; aprēķina aerodinamiskā slodze uz eleronu šajā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

Elerona slojuma līdz sagrašanās ciklogramma parādīta 3.31. att.



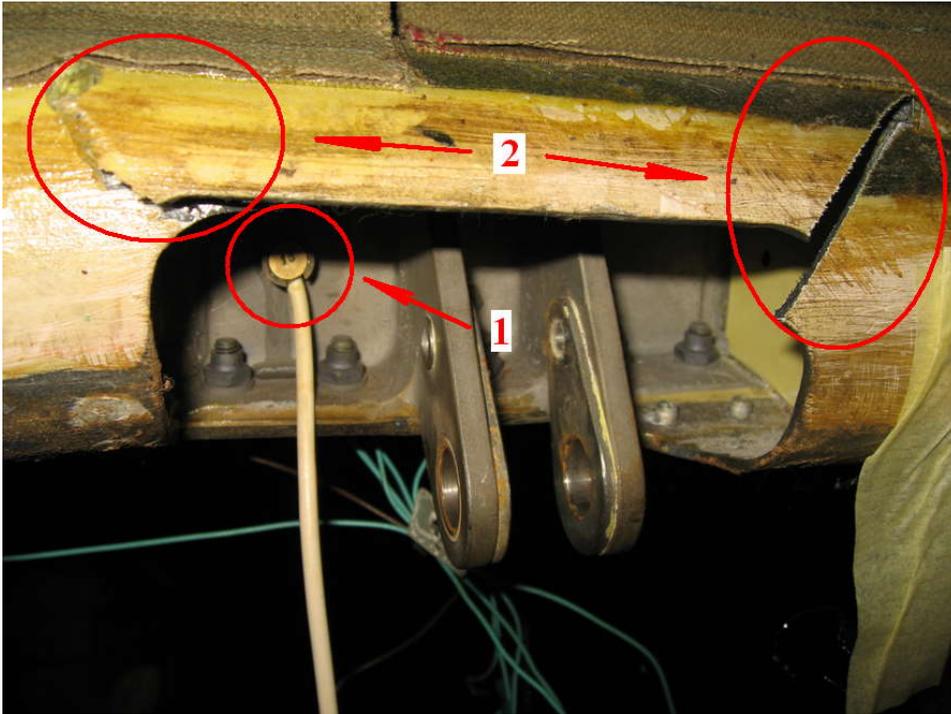
3.31. att. Elerona slogojuma ciklogramma statistiskos izmēģinājumos

Attēlos 3.32. un 3.33. parādīti tenzometrijas un akustiskās emisijas devēju stiprināšanas vietas.



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

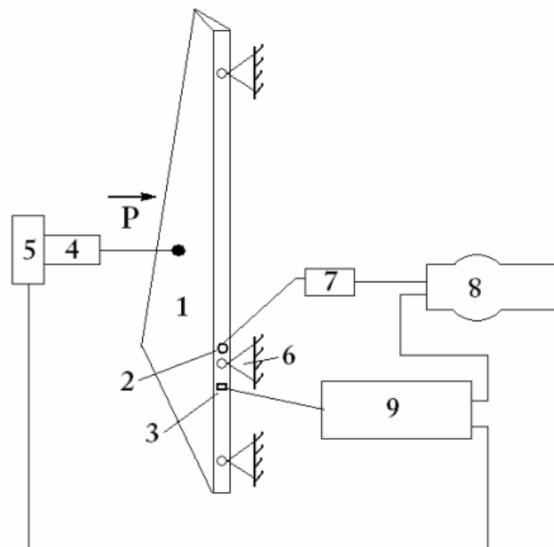
1 — elerons; 2 — būsters; 3 — tenzometrijas devējs; 4 — sagrūšanas vieta



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

1 — AE devējs; 2 — sagrūšanas vietas

Mērījumu aparātūras komutācijas shēma elerona izmēģinājumos parādīta 3.34. att.



3.34. att. Mērījumu aparātūras komutācijas shēma elerona izmēģinājumiem:

1 — elerons; 2 — AE devējs; 3 — tenzometrijas devēji; 4 — hidrocilindrs; 5 — dinamometrs;
6 — balsti; 7 — priekšpastiprinātāji; 8 — PAC POCKET AE-2; 9 — tenzometriskā sistēma

Elerona mitrumpiesātinājums tika veikts speciālajā kamerā (3.35. att.) (ražotājs — JEIO TECH) [133]. Īss mitrumpiesātinājuma kameras tehniskais raksturojums sniegts 4. pielikumā.



3.35. att. Mitrumpiesātinājuma kamera

Mitrumpiesātinājuma programma bija sekojoša:

- mitrumpiesātinājuma ilgums — 2,5 mēneši bez pārtraukumiem;
- temperatūra — 80⁰C;
- mitrums — 85 % HR.

3.3. Pielietojamās akustiskās emisijas aparatūras tehniskais raksturojums

Izmēģinājumu gaitā tika pielietoti divi AE signālu reģistrācijas un apstrādes kompleksi, kas tika veidoti uz bāzes iekārtu AF-15 (Moldova) (3.36. att.) un POCKET AE-2 Physical Acoustics Corporation (PAC), (ASV) (3.37. att.) pamata.

AE diagnostiskās sistēmas (AEDS) [127] metroloģiskais nodrošinājums balstās uz vispārējiem lietišķās metroloģijas principiem un AE diagnostikas metožu un līdzekļu metroloģiskā nodrošinājuma specifikas [65,112,119].

Tas iekļauj: AE avotu veidu un raksturu izpēti, kļūdu, kas rodas signālu parametru mērīšanas procesā, novēršanu, mērījumu iekārtu un līdzekļu, kas ir AEDS daļa, pārbaudi un atestāciju.

Galvenie kļūdu avoti, kurus iekļauj akustiskās emisijas signālu mērīšanas procesos un diagnostēšanas lēmumu (saskaņā ar mērījumu rezultātiem) pieņemšanas procesos, ir:

- instrumentālās kļūdas, kuras tajā skaitā nosaka signālu nodošanas koeficientu nelinearitāte, trokšņi elektroniskajos blokos u. tml.;
- identificēšanas sistēmu kļūdas;
- kļūdas, kuras nosaka AE ģenerācijas modeļu, kas ir izvēlēti AE informācijas interpretācijai, nepilnība vai nepietiekamā ticamība.

Metroloģiskā nodrošinājuma, kas ir nepieciešams, lai samazinātu (vai novērstu) iepriekš minēto kļūdu ietekmi, struktūra sastāv no metroloģiskā, kas nodrošina diagnostēšanas līdzekļu un metožu pārbaudi ar metroloģisku parametru atjaunošanu, attiecīgi iestatot aparatūru.

AE signālus raksturo vairāki parametri, katrs no kuriem ir saistīts ar fizisku procesu, kas pavada AE, un tā noteikšana var sniegt informāciju par pētījumu vai kontroles objekta stāvokli.

Veiksim galveno AE signālu parametru informatīvuma pakāpes analīzi.

AE signālu raksturo amplitūda, ilgums, skaits, enerģija, summārais skaits. Signālu plūsmu var arī raksturot ar statistiski vidējo notikumu biežumu, spektrālo blīvumu, amplitūdas un laika sadalījumu, vidējo vērtību, dispersiju. Katrs no iepriekš minētiem parametriem ir saistīts ar fizisku procesu, kas rada AE, un tā noteikšana var sniegt informāciju par objekta stāvokli.

AE summārais skaits (N_{AE}) — reģistrēto AE impulsu summa, kas pārsniedz noteikto diskriminācijas līmeni, novērojumu laikā, imp.sk. Diskrētās AE gadījumā šī vērtība raksturo notikumu skaitu ar enerģiju, kas pārsniedz robežvērtību.

Šī parametra izmantošana praksē ļauj novērst neviennozīmību, kas rodas vairākkārtīgi reģistrējot viena un tā paša impulsa oscilācijas. Prakse rāda, ka N_{AE} parametrs ir tieši saistīts ar defektu rašanās un izplatīšanās procesiem [95,125].

Amplitūda (Amp) ir signāla sprieguma maksimālā vērtība, dB. Šis viens no svarīgākajiem parametriem nosaka AE notikuma reģistrācijas iespējamību. Signālu amplitūdas ir tieši saistītas ar notikumu magnitūdām avotā un variējas plašā diapazonā no mikrovoltiem līdz voltiem. Līdz ar citiem standarta parametriem, amplitūda ir visvairāk piemērota AE datu statistiskās apstrādes veikšanai, iegūstot procesa sadalījuma funkcijas.

Impulsu summa (Hits) ir to impulsu skaits, imp.sk. Oscilāciju skaita noteikšana ir vieglākais signāla kvantitatīvās novērtēšanas paņēmieni. Šis parametrs ir atkarīgs no signālu avota magnitūdas, kā arī no vides un devēja akustiskām un rezonanses īpašībām [37].

AE signālu *enerģija (E)* ir saistīta ar procesu enerģētiku, dB. Jo lielāka ir *E* vērtība, jo lielāks ir plaisas vienreizējs palielinājums vai plastiski deformējamā materiāla apjoms.

Signāla *ilgums (Dur)* — pilnais laiks no brīža, kad signāls pārsniedz sliekšni, līdz brīdim, kad tas aiziet zem sliekšņa, μs . Šis parametrs ir atkarīgs no avota magnitūdas, kā arī no vides un devēja akustiskām un rezonanses īpašībām. Šo parametru izmanto, lai identificētu procesus, kuriem piemīt raksturīgi lielāki signālu ilgumi, piemēram, kompozītmateriālu atslāņošanas procesi. Turklāt šis parametrs ir noderīgs, filtrējot dažādus trokšņus (pēc ilguma) vai citu tipu avotus.

3.3.1. Akustiskās emisijas signālu analizators AF-15

Analizators AF-15 nodrošina vienlaicīgu AE signālu uztveršanu un apstrādi divos kanālos (sk. 3.36. att.) [9,101,120]. Iekārta reģistrē sekojušu ieejas signālu īpašības:

- laiks (s),
- impulsu summa (imp.sk.),
- enerģija (dB),
- amplitūda (dB),
- ilgums (μs).

Impulsa caurlaidības josla — 20...2000 kHz; turklāt ir iespēja uzstādīt augsto frekvenču filtra (AFF) nogriešanas frekvenci 20; 200; 500; 1000 kHz un zemo frekvenču filtra (ZFF) nogriešanas frekvenci 200; 500; 1000; 2000 kHz.

Analizatora iebūvētā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients sastāda 60 dB ar diskrētumu 1 dB.

Primārie pārveidotāji

Ka primāros pārveidotājus izmantoja pjezoelektriskos devējus (PD). Devēju izvēle tika veikta pēc amplitūdas-frekvenču raksturlīknēm, kuras tika iegūtas ar spektra analizatoru JCS-55 (ЯЧС-55) un ar indikatoru J40-0830 (Я40-0830).

Tika lietoti PD RU-50 ar rezonanses frekvenci 640 kHz un P113 ar rezonanses frekvenci 300 kHz.



3.36.att. Analizators AF-15 [4]

Priekšpastiprinātāji

Priekšpastiprinātāji (PP) ir paredzēti PD signālu iepriekšējai pastiprināšanai. Galvenie PP parametri:

- caurlaidības josla — 20...2000 kHz;
- pastiprinājuma koeficients — ne mazāks par 40 dB;
- izejas spriegums — līdz 5,5 V;
- iekšējais trokšņu līmenis — ne vairāk kā 7 μ V;
- elektrobarošana — no līdzstrāvas avota — 12 V.

PP satur ZFF ar nogriešanas frekvenci 2000 kHz un AFF ar nogriešanas frekvenci 20 kHz, kuri ir pastāvīgi ieslēgti un papildus AFF ar nogriešanas frekvencēm 200 un 1000 kHz un ZFF ar nogriešanas frekvenci 1000 kHz.

Savienošanas kabeļi

Kā savienošanas kabeļi tika izmantoti RG58 tipa kabeļi ar BNC konektoriem. Kabeļu starp PD un PP garums nepārsniedz 1 m; kabeļu garums starp PP un analizatoru AF-15 — 10 m.

3.3.2. Portatīvā akustiskās emisijas sistēma POCKET AE-2

„Pocket AE” tipa sistēmas ir patiesi mūsdienīgas, augsti tehnoloģiskas, datorizētas iekārtas, kas realizē akustiskās emisijas metodi, un kurām piemīt izturīgs korpuss un portatīvi gabarīti. „Pocket AE” sistēmai piemīt visas konstruktīvi-funkcionālās īpašības, kas ir lielākām un dārgākām kontroles sistēmām uz AE metodes pamata, t. i., tā pati AE frekvenču josla, ātrums, izlases frekvence un viļņa formas apstrādes funkcija. Turklāt visas šīs iespējas ir

realizētas kompaktajā, portatīvajā, pārnēsājamā ierīcē, kura darbojas no akumulatora. „Pocket AE” sistēma ir lielisks instruments darbam lauka apstākļos, īpaši gadījumos, kad ir problemātiski nodrošināt strāvas padevi no tīkla. Papildus divkanālu ierīcē „Pocket AE-2” (3.37. att.) realizēta lineārās lokācijas un telpiskas filtrācijas funkcijas, kas nodrošina plašākas iespējas ierīces pielietošanā gan laboratorijas, gan lauka apstākļos.



3.37. att. Firmas PAC POCKET AE-2 ierīce [132]

Portatīvās ierīces „Pocket AE-2” korpusā ir iebūvēti: divi kanāli, analogciparu pārveidotājs, AE apakšsistēma, turklāt ierīces vadību veic jaudīgs iebūvēts dators ar operētājsistēmu Microsoft Windows CE priekš portatīvajiem datoriem. Turklāt šajā portatīvajā ierīcē realizētas visas portatīvā datora priekšrocības, piemēram, “Microsoft Office” tipa programmu izmantošana, kompaktās zibatmiņas, kas ir nepieciešama iegūtu datu glabāšanai un nodošanai, pieslēgšana USB portā. Krāsains displejs nodrošina maksimāli astoņu AE grafiku attēlojumu (pēc kārtas), kā arī summāro izmēģinājumu rezultātu datu attēlojumu.

Kompozītmateriālu paraugu izmēģinājumu laikā tika izmantots viens akustiskās emisijas un viens parametriskās ieejas kanāls. Tika fiksēti sekojošie dati:

- laiks (s) $\pm 1 \mu\text{s}$,
- spriegums parametriskajā ieejā (V) $\pm 5 \text{ V}$,
- impulsu summa (imp.sk.),

- enerģija (dB) +/- 1,5 dB,
- amplitūda (dB) +/- 1,5 dB,
- ilgums (μ s) +/- 1 μ s,
- sliekšņa vērtība (35 – 48).

Ierīces „Pocket AE-2” AE kanāla frekvences raksturlīkne: no 1,0 kHz līdz 1,0 MHz, +/- 1,5 dB.

Pielietojamie devēji

Par AE devēju tika izvēlēts pjezopārveidotājs P113-(0,2–0,8) ar frekvenču diapazonu no 200 kHz līdz 800 kHz.

Pielietojamie signāla priekšpastiprinātāji

IL-LP-WS ar pastāvīgu pastiprinājumu 26 dB frekvenču diapazonā no 100 kHz līdz 1 MHz.

3.3.3. Uz AF-15 balstītas mērīšanas sistēmas modernizācija

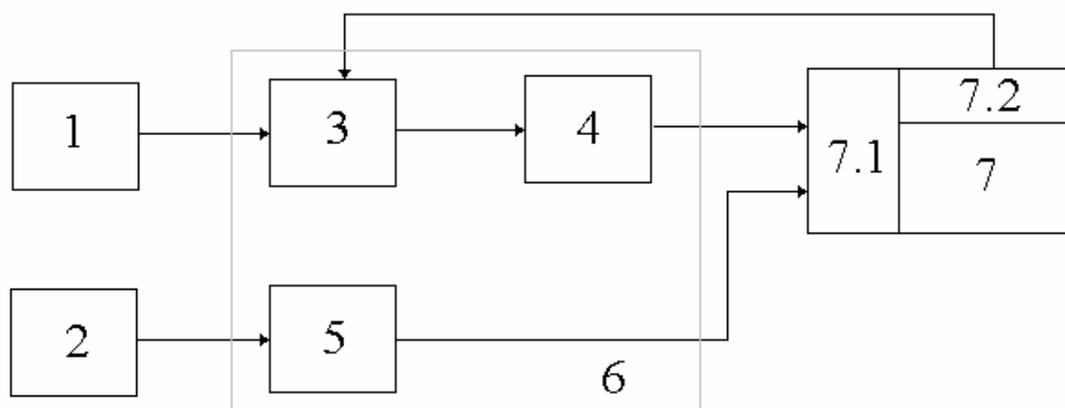
Lai izpētītu noguruma radīto bojājumu uzkrāšanās procesa likumsakarības, veicot stenda mēģinājumus ar AE metodi, ir nepieciešams veikt AE signālu un pieliktās slodzes sinhronu ierakstīšanu, un šī uzdevuma atrisināšana bija AF-15 modernizācijas iemesls [4].

Iekārta AF-15 ir paredzēta dažādu objektu (konstruktīvo materiālu paraugi, spiediena tvertnes, mašīnu un mehānismu mezgli, piemēram, atomenerģijas, kuģubūves, aviācijas mašīnu mezgli) izpētei un mehānisku īpašību kontrolei pēc AE informatīvajiem parametriem. Tomēr iekārtai ir šādi trūkumi:

1 — Iekārtu nav iespējams pieslēgt pie personālā datora, lai veiktu AE signālu ierakstīšanu visā eksperimenta gaitā un pēc tam ar specializēta programmu nodrošinājuma palīdzību veiktu iegūtu datu analīzi.

2 — Ar iekārtu nav iespējams veikt AE signālu un pētāmajam objektam pieliktās slodzes vērtību sinhronu ierakstīšanu.

Lai novērstu šos trūkumus, tika veikta salāgojošas ierīces (SI) izstrāde. SI ir paredzēta AE signālu un pieliekamās slodzes vērtību sinhronizācijai, kā arī lai izejas spriegumus salāgotu ar personālā datora ACP ieejām. Lai analogos signālus pārveidotu ciparu signālos, tika izvēlēta ACP Lcard L-783. 3.38. att. ir parādīta iekārtas AF-15 funkcionālā shēma pieslēgšanai pie personālā datora.



3.38.att. Modernizēta AE signālu mērīšanas kompleksa uz iekārtas AF-15 bāzes funkcionālā shēma [4]:

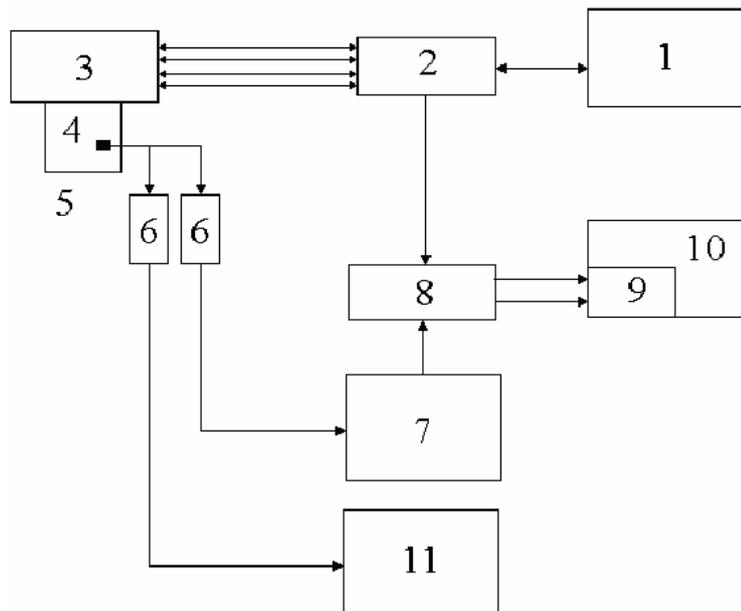
1 — AF-15; 2 — slodzes devējs; 3 — vadāms impulsu skaitītājs — dalītājs; 4 — bufera kaskāde;
 5 — salāgojošs pastiprinātājs; 6 — salāgošanas ierīce; 7 — Lcard L-783; 7.1 – ACP Lcard L-783; 7.2 – CAP Lcard L-783

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.

3.3.4. Akustiskās emisijas iekārtu pieslēgšanas izmēģinājumu veikšanai tipveida shēma

No personālā datora (1) slogošanas programma tiek padota uz vadības sistēmu (2) (att. 3.39), kura formē hidrocilindru (3) vadības signālus, kuri uzdoto slodzi nodod uz izmēģinājumu objektu (4). Kā AE devēju (4) izmanto pjezodevēju (5), kuru uzlīmē uz izmēģinājumu objekta (4). AE signāls caur priekšpastiprinātājiem (6) tiek padots uz mērīšanas kompleksi AF-15 (7), PAC POCKET AE-2 (11). AE un slogošana parametru sinhronizācijai izmanto salāgošanas iekārti (8), uz kuru no iekārtas AF-15 (7) padod noformētos AE impulsus un slogošanas sistēmas tenzodinamometra vai uz pētāmā objekta uzlīmēta tenzodevēja (4). Tālāk signālus padod uz ACP Lcard L-783 (9) un reģistrē personālajā datorā (10).



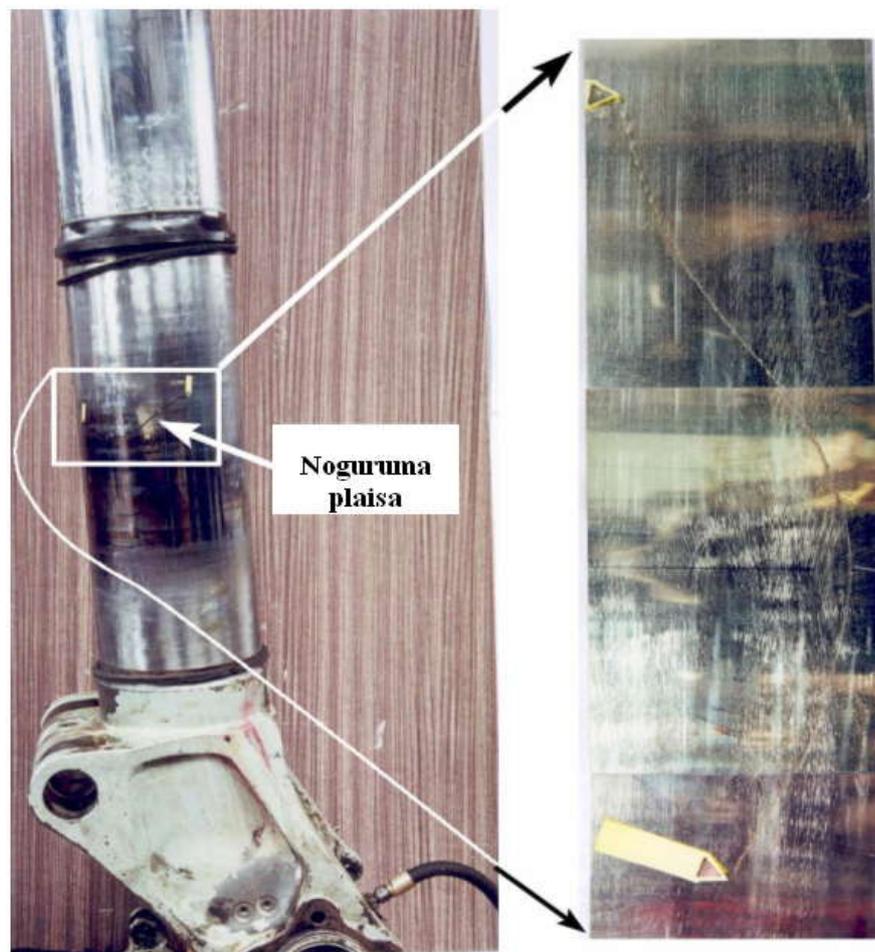
3.39. att. AE mēraparatūras pieslēgšanas shēma [34]:

- 1 — vadības sistēmas dators; 2 — vadības sistēma; 3 — slodzes radīšanas hidrocilindri;
 4 — pētāmais objekts; 5 — AE devējs; 6 — priekšpastiprinātājs; 7 — iekārta AF-15; 8 — salāgošanas ierīce,
 9 — ACP Lcard L-783; 10 — AE reģistrācijas dators; 11 — mērīšanas sistēma P-DAQ/T-DAQ;
 12 — portatīvais dators; 13 — mērīšanas sistēma PAC 3000/3004

4. 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

VML šasijas galvenā balsta izmēģinājumos, kuru laikā tika pētīti atgāžņa-pacēlāja cilpu noguruma parametri [4,10,41,47], uz amortizatora kāta virsmas parādījās C-veidīga caurejoša plaisa (skat. 4.1. att.)

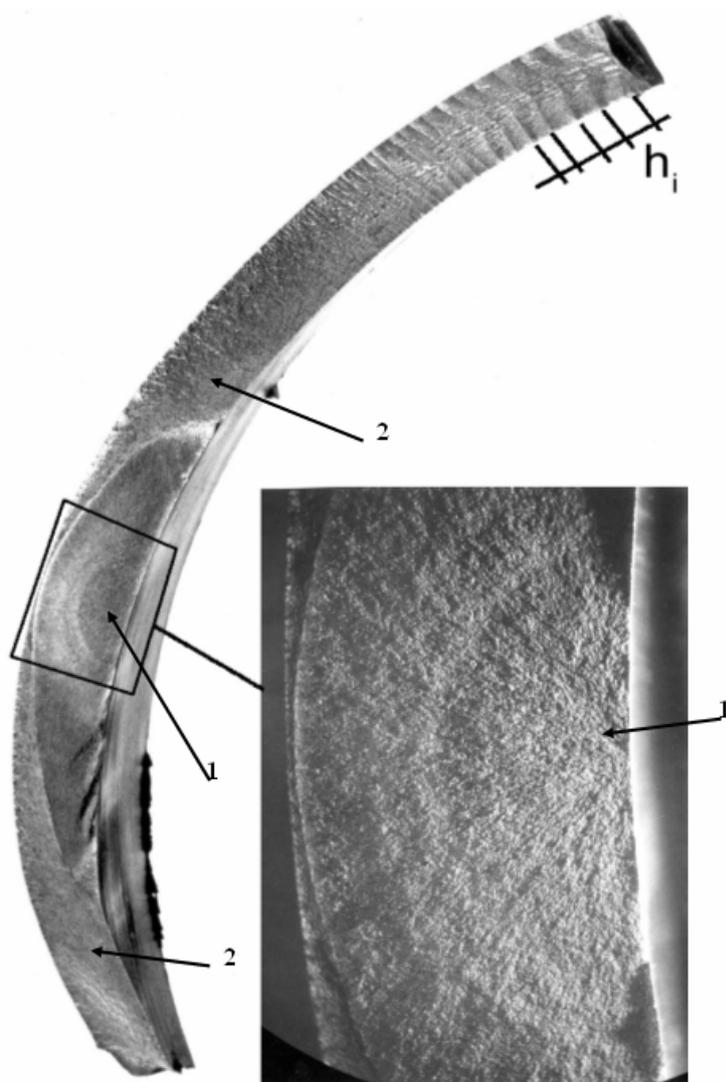


4.1. att. Plaisa amortizatora kātā [42]

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

Ir jāatzīmē, ka šādu necaurejošu plaisu konstatēšanas ekspluatācijas procesā un arī stenda izmēģinājumos, instrumentālu paņēmieni šobrīd nepastāv, jo plaisa atrodas konstrukcijas iekšienē. Var tikt konstatēta tikai caurejoša plaisa hidraulikas šķidrums noplūdes vai amortizatora iegrīmšana.

Lūzums (4.2. att.) sastāv no divām zonām: sākotnējā sabrukšanas zonas (I zona), kuru raksturo stabila plaisas attīstība, un II zonas, kura ir radusies pēc plaisas iziešanas cauri visam kāta sienas šķērsgriezumam (caurejošas plaisas parādīšanās).



4.2.att. Plaisa amortizatora kātā. Kopējais amortizatora kāta lūzuma izskats („h” — noguruma bojājuma makro līniju sols, kuras raksturo caurejošas plaisas pieaugumu katrā sloģošanas ciklā) [42,57]:

1 — I zona ; 2 — II zona

I zonas analīze parāda, ka plaisas pieauguma ātrums nebija pastāvīgs, Ir noteikts, ka noguruma plaisas rašanās ir notikusi no viena vietas, kura atrodas kāta iekšējā virsmā. Plaisa radās zem detaļas virsmas un tās parādīšanās ir saistīta ar detaļas virsmas uzkaldināšanu. Sākotnēji norisinājās materiāla sabrukšana pa divu graudu robežu, bet tālā no tiek norisinājās iekšējās grauda plaisas rašanās, kura vēlāk noteica kopējo kāta sagraušanu. No sagraušanas avota vietas plaisa sākotnēji izplatījās praktiski perpendikulāri bukses asij, saglabājot puseliptisku frontes formu. Šajā zonā plaisa izplatījās ar mazu ātrumu.

Pēc izplatīšanās pa visu šķērsriezumu notika diskrēta pāreja uz plaisas pieauguma virziena maiņu (II zona), kuru pavadīja strauja reljefa raupjuma palielināšanas un noguruma bojājuma makro līniju formēšanās.

II zonai ir raksturīga nestabila plaisas attīstība pēc statiskās izslīdēšanas mehānisma. Pēc caurejoša pieauguma plaisa no frontes virsotnes (maksimālais frontes dziļums) uz abām pusēm sāka attīstīties kā patstāvīga caurejoša plaisa. To norāda noguruma bojājuma makro līniju orientācija.

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 (4.3. 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 ultraskaņas kontrole ik pēc 200...400 sloģošanas cikliem, lai to veiktu, izmēģinājumi tika apturēti un kāts tika izbīdīts no amortizatora cilindra.

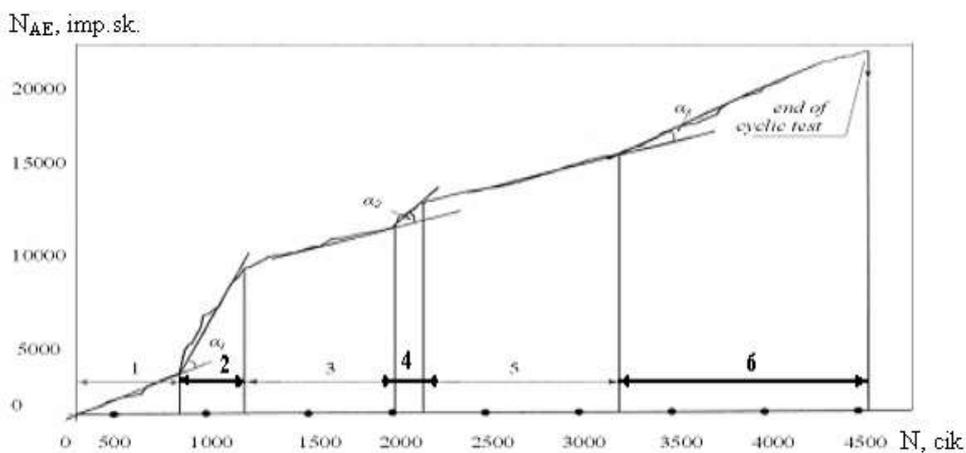
VML šasijas galvenā balsta pārbaudes veikšanas metodika un izmantotā AE aparatūra ir aprakstīta 3. nodaļā.

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

AE parametru (enerģijas, summārās AE) analīze šasijas balsta izmēģinājumu gaitā parāda, ka kopumā šo parametru izmaiņas atspoguļo noguruma plaisas attīstību trīs stadijās (4.4. att.; [46]). Mikroplaisas rašanās izraisa krasu minēto parametru pieaugumu. Pēc tam summārās AE pieauguma ātrums palēninās. Turpmāk notiek AE pieauguma ātruma palielināšanās, kas atbilst mezoplaisas attīstības stadijai (ar nevienmērīgām AE izmaiņām katrā ciklā). Makroplaisas parādīšanās etapā AE līmenis ciklā stabilizējas, summārās AE pieaugums nedaudz paātrinās.



4.3.att. Koncentrators-iezāgējums (iegūts pēc sagraušanas) [8]



4.4. att. Summārās AE izmaiņas šasijas balsta cikliskajā slogojumā

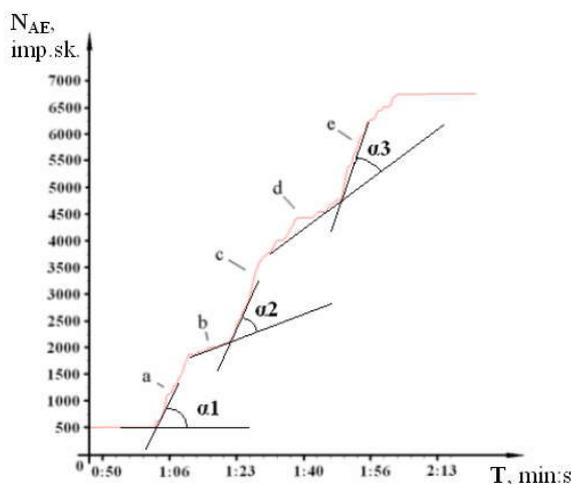
Vērts atzīmēt, ka summārās AE pieauguma temps mezo- un makroplaisas attīstības etapos ir būtiski zemāks nekā mikroplaisas rašanās un pieauguma stadijā, t. i., enerģija, kas ir

nepieciešama, lai rastos plaisa, ir būtiski lielāka salīdzinājumā ar enerģiju, kas ir nepieciešama esošās plaisas tālākajai virzībai.

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

Veicot objekta novērtēšanu, tā stāvokļa izmaiņas novērtējumu veic pēc noteiktām kontrolējamā parametra uzvedības pazīmēm. Vairākumā gadījumu par šādām pazīmēm kalpo parametra robežvērtības sasniegšana. Šāda pieeja tiek lietota arī AE parametru mērīšanā. Tomēr AE enerģija vienādos apstākļos dažādiem viena tipa objektiem var mainīties vairākas reizes, kas apgrūtina parametra robežvērtību normēšanu un objekta stāvokļa izmaiņu kritēriju veidošanu.

Virknē gadījumu, kā materiāla stāvokļa izmaiņas kritēriju izmanto vērtību, kuru sauc par α — kritēriju [11,12,45]. Piedāvājams kritērijs ir leņķis starp divām līnijām, kas apksimē summārās AE izmaiņas divos blakus esošajos posmos (sk. 4.5. att.). Visbiežāk šo kritēriju izmanto mikroplaisas rašanās un attīstības indikācijai. Piemēram, 4.5. att. [33] parādīta summārā AE skaita N_{AE} atkarība no laika T ar trīs atzīmētiem α kritērijiem, kas attēlo trīs mikroplaisu parādīšanos. Šī kritērija pielietošana ir saistīta ar vizuālu identificēšanu un ir būtiski atkarīga no izvēlētā mēroga (tas praktiski izslēdz iespējamību normēt parametru un automatizēt kontroli).



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

Drošāks kritērijs var būt izstrādāts, balstoties uz enerģijas E_{ac} , kas tika uzkrāta materiālā pirmajā etapā, summēšanu un, salīdzinot to ar enerģiju E_{lim} , kas ir nepieciešama sagrūšanai:

$$E_{ac} < E_{lim}.$$

Kā tika parādīts iepriekš, noguruma sagrūšanai ir daudzstepu 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 [40, 58]). Šim nolūkam var izmantot α -kritēriju.

Kas attiecas uz turpmāko plaisas attīstību, tad dēļ enerģijas, kas ir nepieciešama tās attīstībai (salīdzinājumā ar enerģiju, kas tiek patērēta mikroplaisas veidošanai), samazinājuma, α -kritērija izmantošana ir maz efektīva. Daļēji pirmsagrūšanas novērtējuma problēmu var atrisināt, veicot AE analīzi slogojuma ciklā. Darbā [55] 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).

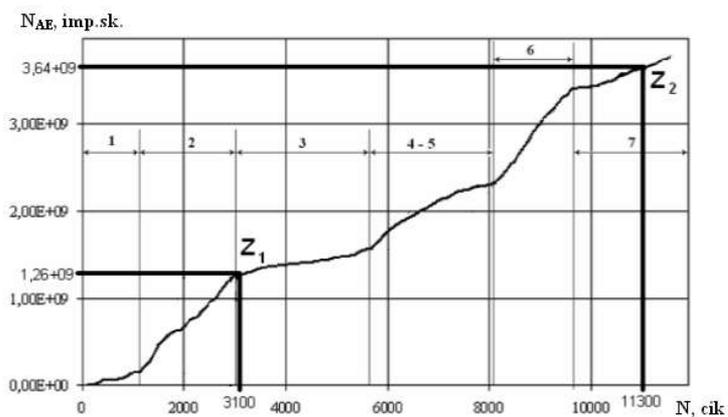
Acīmredzams, ka labāko pirmsagrūšanas kritērija variantu varētu izveidot, ja būtu zināmi plaisas izmēri. Tomēr dēļ lielas sagrūšanas enerģijas diferences dažādās plaisas attīstības stadijās, atrisināt šo jautājumu visā slogojuma diapazonā nav iespējams. Tajā pašā laikā, ja apskata plaisas attīstību pēc tās sākotnējās veidošanās (t. i., pēc mikroplaisas stadijas), tad enerģiju attiecība dažādos etapos būtiski samazinās, kas 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 virsmai esošo plaisu attīstību [3, 14].

4.2.1. Bojājumu laukuma novērtējuma kritērijs pēc AE mērījumu datiem

Iegutus eksperimentālus datus šasiju balsta izmeģinājumos tiek pielietoti noguruma plaisas laukuma novērtējumam. Balstoties uz formulu 2.16 (sadaļā 2.2), izteiksim parametru A :

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

VTL galvenas šasijas resursu izmeģinājumu rezultāta piemērā, kas ir aprakstīts rakstā [8], tiek aprēķināts parametrs A (4.6. att.):



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

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

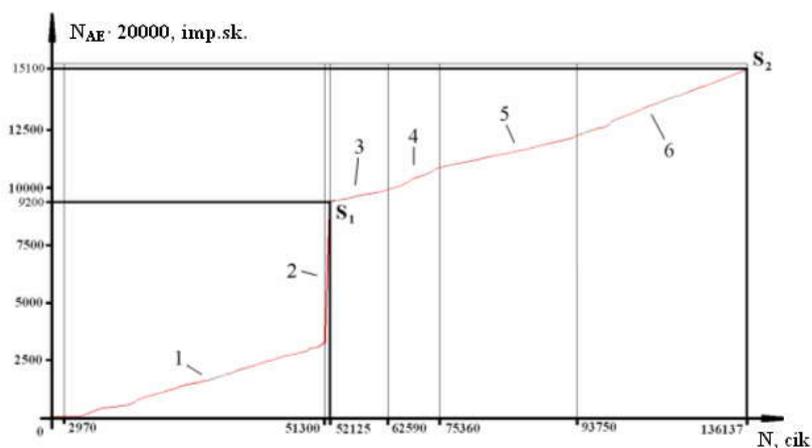
$$N_{AE1} = 1,26 \times 10^9 \text{ (imp.sk.)}; N_{AE2} = 3,64 \times 10^9 \text{ (imp.sk.)}; N_1 = 3,1 \times 10^3 \text{ (cik)};$$

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

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

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

Ņemot vērā iegūto parametru A , un zinot gaisa skrūves soļa vadības sviras izmeģinājumu rezultātus, kas ir aprakstīti rakstā [33], noteiksim plaisas lielumu S_{cr} pēc formulas 2.16 (4.7. att.):



4.7. 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.); $N_I = 52125$ (cik);

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

Sanāk, ka $S_{cr} = 2,7 \text{ mm}^2$, bet ieguta plaisas laukums sastādīja $2,9 \text{ mm}^2$.

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

Piedāvātās metodes novitāti apstiprina iegūtais patents [3].

4.2.2. Konstrukciju paliekošās stiprības kompleksais kritērijs pēc slodzes parametra

Šajā darbā piedāvātās un patentētās metodes ideja balstās uz sekojošo [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 papildus paliekošās stiprības (robežslodzes vai kritiskas slodzes) kritērijs objektiem, kuru funkcionēšana ar bojājumiem ir ierobežota vai nepieļaujama (pasažieru transports, aerokosmiskie aparāti, atomenerģētiskās iekārtas u. tml.).

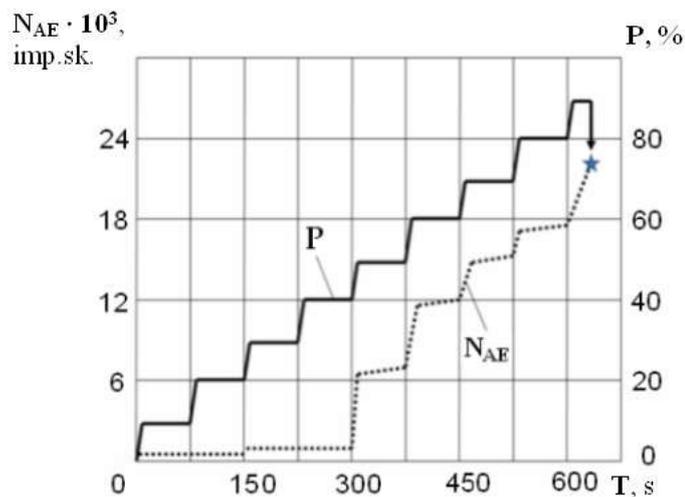
Tādā veidā piedāvāta metālistisku materiālu un konstrukciju nogurumizturības novērtējuma metode, kas balstīta uz AE parametru mērījumiem, kurus izmanto, lai noteiktu kritisko slodzi (robežslodzi), kas atbilst konstrukcijas katastrofiskās sagrūšanas sākumam. Metodi var pielietot reālu konstrukciju akustiskās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

Apskatīsim iespēju realizēt metodi, balstoties uz eksperimentiem, kas tika veikti paraugiem ar iepriekš izaudzētu noguruma plaisu; paraugi tika pakļauti statistiskai slogošanai līdz sagrūšanai. Statists slogojums atbilda vienam noguruma slogojuma ciklam slodzes palielināšanas stadijā.

Attēlā 4.8. ir redzams, ka stabils summārā AE skaita pieaugums sākās brīdī, kad slodze sasniedza aptuveni 50 % no sagrūšanas vērtības. Fraktogrāfisko pētījumu rezultātā tika konstatēts, ka summārās AE pieaugums liecina par plaisas, kas tika iegūta iepriekš cikliskajos noguruma izmēģinājumos, attīstības sākumu. Brīdis, kad plaisa sāk attīstīties, ir objekta sagrūšanas sākumbrīdis un saskaņā ar piedāvāto metodi, tieši šī slodze nosaka objekta paliekošo stiprību.

Tā kā faktiskā sagrūšanas slodze sastāda 90 % no aprēķinātās vērtības, starpība starp objekta pilnīgās sagrūšanas brīdi un sagrūšanas sākumbrīdi sastāda 40 % no aprēķinātās sagrūšanas slodzes. Šajā diapazonā pastāv objekta pilnīgās sagrūšanas varbūtība, kas nav pieļaujams pasažieru transportlīdzekļiem, aerokosmiskiem aparātiem, atomenerģētiskām iekārtām u. tml.

Nemsim vērā, ka faktiskā stiprības rezerve piedāvātajam parametram sastāda $(90/50) = 1,8$, kas atbilst, piemēram, aviācijas konstrukciju stiprības rezerves koeficientu vērtībām (1,5...2,0).



4.8. att. Summārā AE skaita N_{AE} un slodzes P atkarības shēma laikā

T (■ - sagrūšanas brīdis)

5. 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. Pētījumos tika izmantoti stiegoti plastīti ar anizotropām īpašībām.

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

Paraugu no KM izmēģinājumu metodika un lietojamais aprīkojums, kā arī AE signālu reģistrācijas metodoloģija ir aprakstīti šī darba 3. nodaļā.

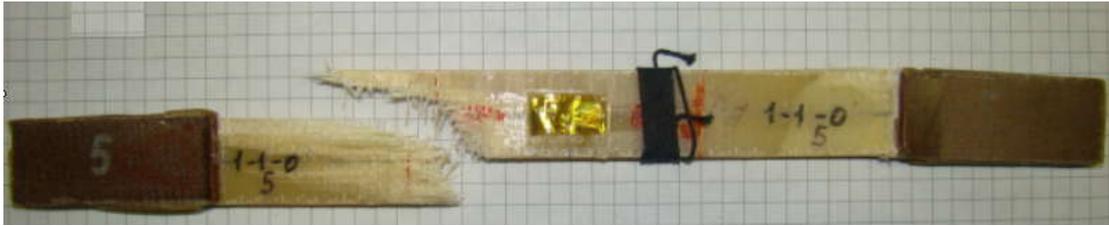
Att. 5.1. sniegti dažādas formas un šķiedru orientācijas kompozītmateriālu paraugi pēc izmēģinājumiem ar statistisku slodzi līdz sagrūšanai.

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

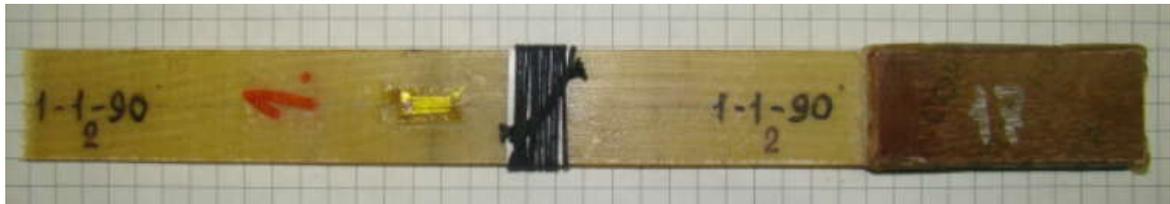
Daļu paraugu izmēģinājumu laikā pakļāva iepriekšējai sloģošanai ar mērķi atklāt to ietekmi uz KM bojājumu mehānismu un reģistrējamo AE signālu raksturu (sk. 3. nodaļu). Sākotnējie summārās AE (N_{AE}) no laika (T) atkarības grafiki paraugu grupai, kas tika pakļauta sākotnējai sloģošanai, parādīti 5.2. att. AE parametru izmaiņu raksturs liecina par Kaizera efekta [82] iedarbību, kas izpaužas kā straujš AE signālu izstāšanās samazinājums atkārtotās sloģošanas laikā līdz iepriekšējam slodzes līmenim. Tā kā šis sloģojuma diapazons nav informatīvs, tas tika izslēgts no turpmākās analīzes (sk. koriģētus atkarību grafikus 5.3. att.).

Eksperimentu gaitā paraugiem no KM reģistrēja virkni AE parametru (signālu amplitūdu Amp , signālu enerģiju E , impulsu summu $Hits$, summāro AE skaitu N_{AE}), katrs no tiem tika analizēts atsevišķi no informatīvuma viedokļa KM bojājumu pakāpes noteikšanai.

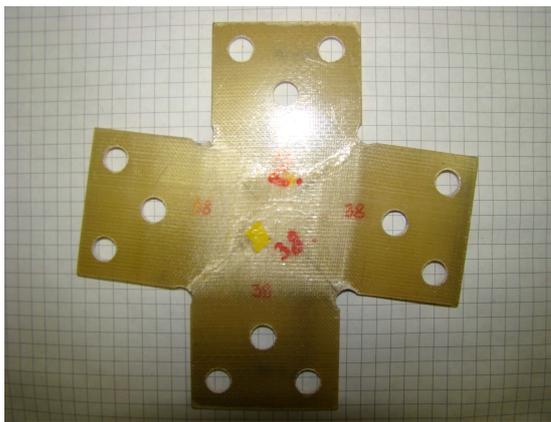
Zemāk tiek doti sakarību dati, kas tika iegūti, izmantojot AE aparāturu PAC POCKET AE-2. Datiem, kas tika iegūti ar iekārtas AF-15 (sk. 3. nodaļu), eksperimentālo sakarību raksturam bija tāds pats raksturs [51,52,53].



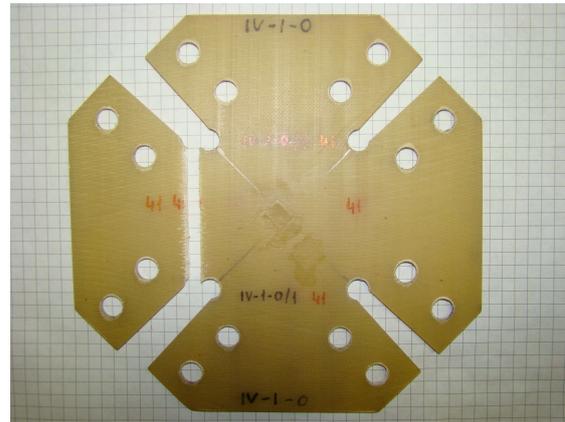
a)



b)



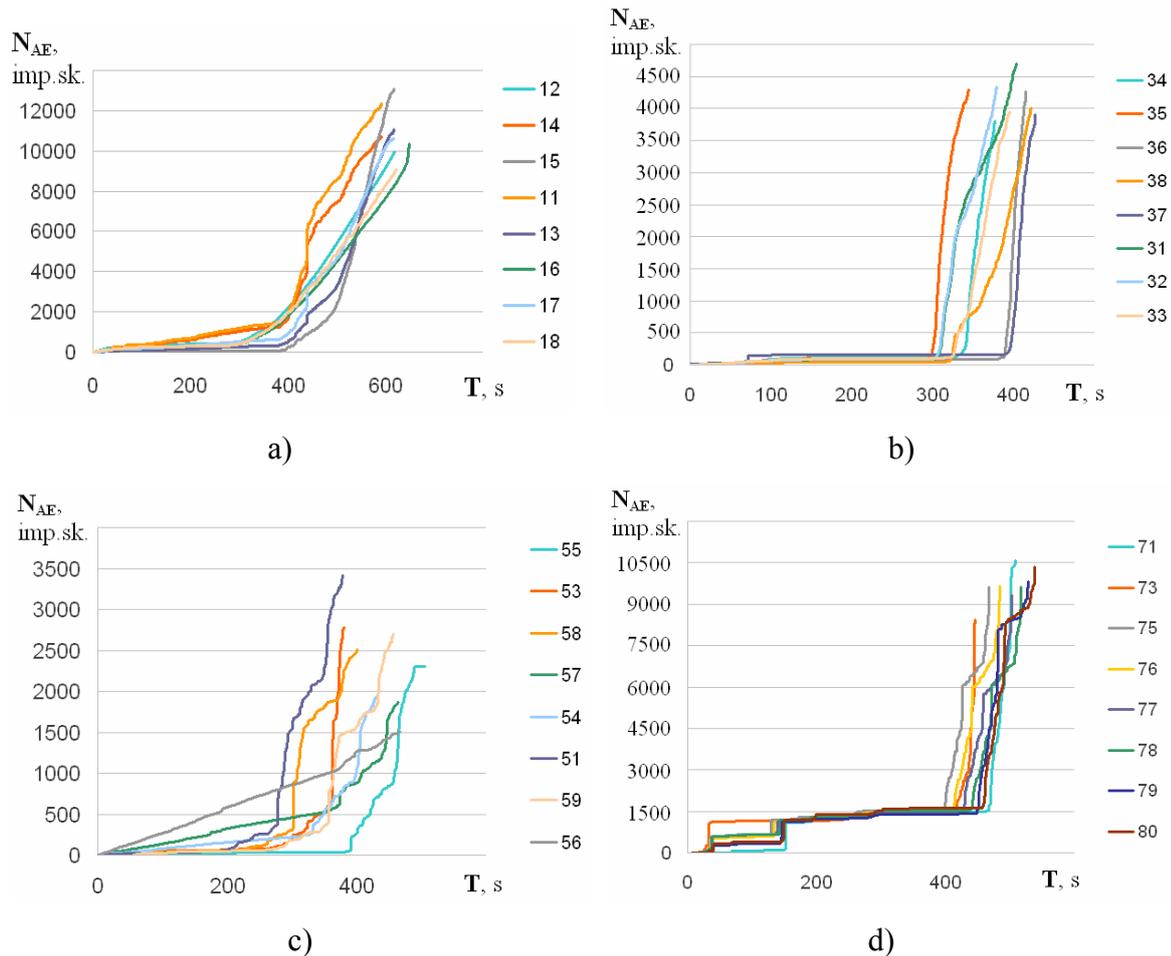
c)



d)

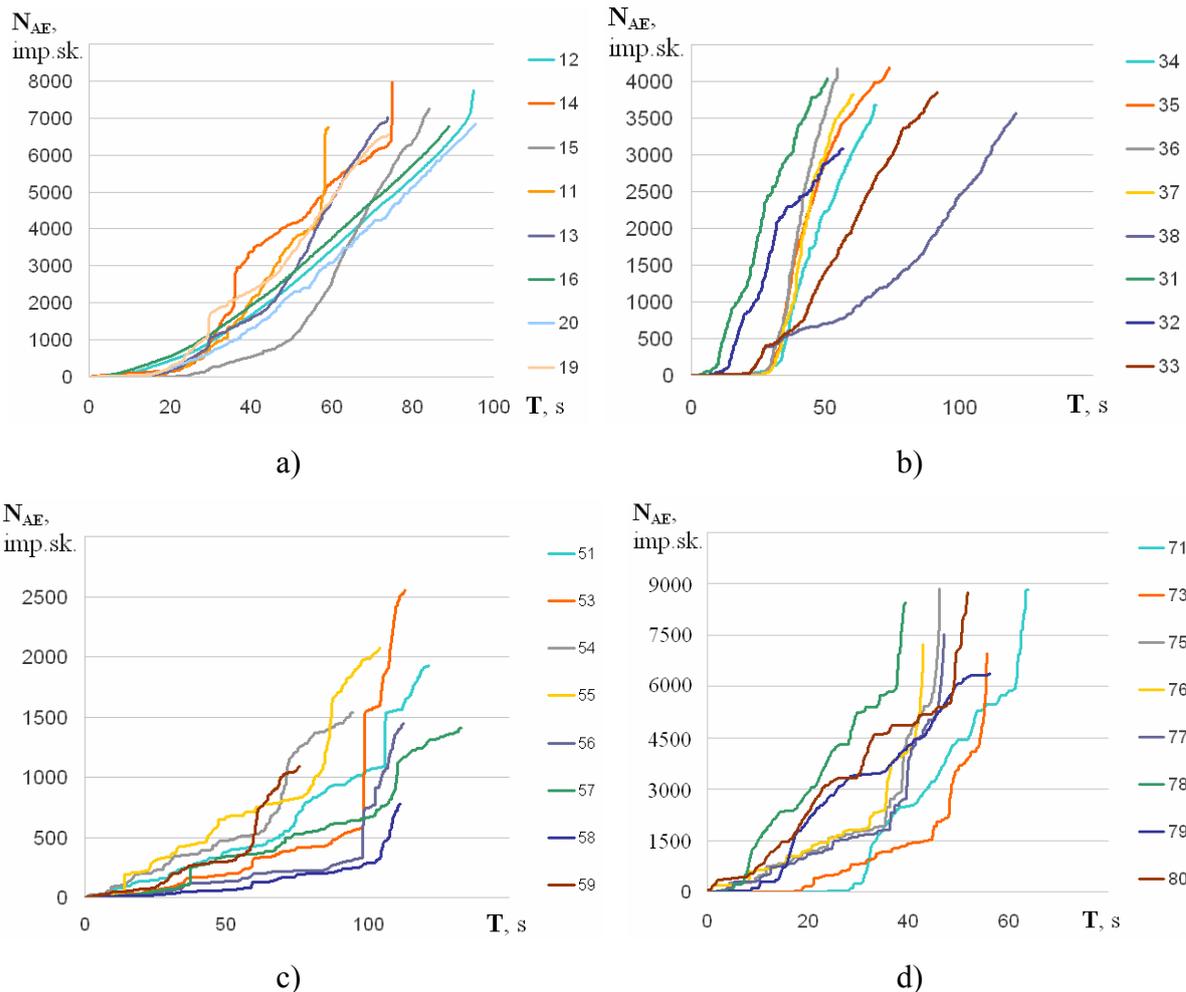
5.1. att. Eksperimentālo paraugu izskats pēc izmēģinājumiem:

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



5.2. att. Summārās AE (N_{AE}) no laika (T) atkarības grafiki paraugu grupai, kas tika pakļauti sākotnējai sloģošanai:

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



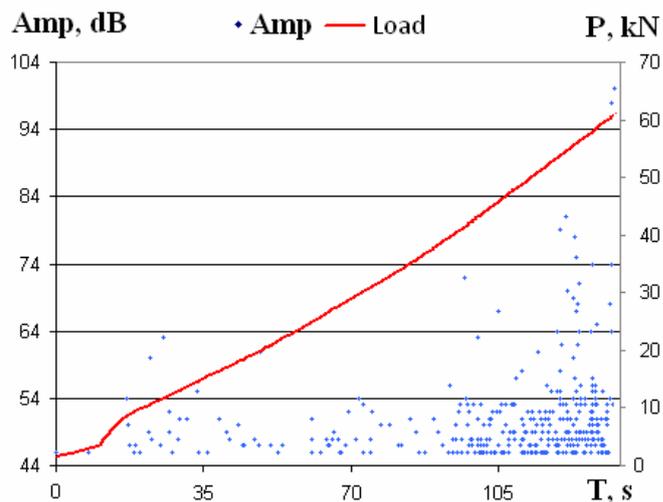
5.3. att. Koriģētie summārās AE (N_{AE}) no laika (T) atkarības grafiki paraugu grupai, kas tika pakļauti sākotnējai slodzei:

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

5.1.1.1. Eksperimentālo paraugu, kas netika pakļauti sākotnējai slodzei, izmēģinājumu rezultāti

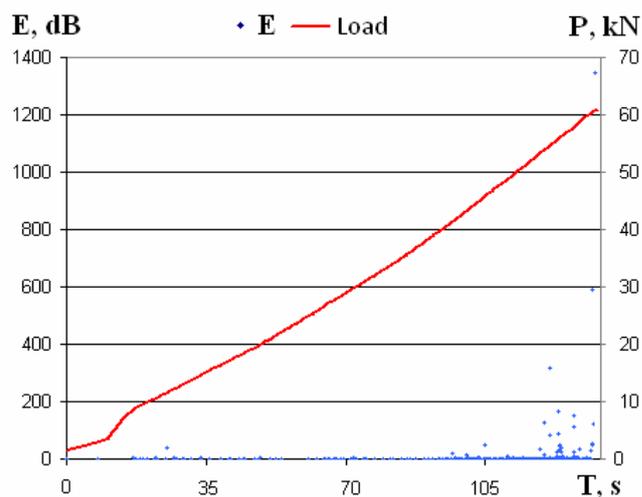
Paraugi ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slodzes vektoru

AE signālu amplitūdas vērtības Amp (5.4. att.) slodzes 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 slodzes etapā, paraugam sagrūstot, sasniedz 100 dB.



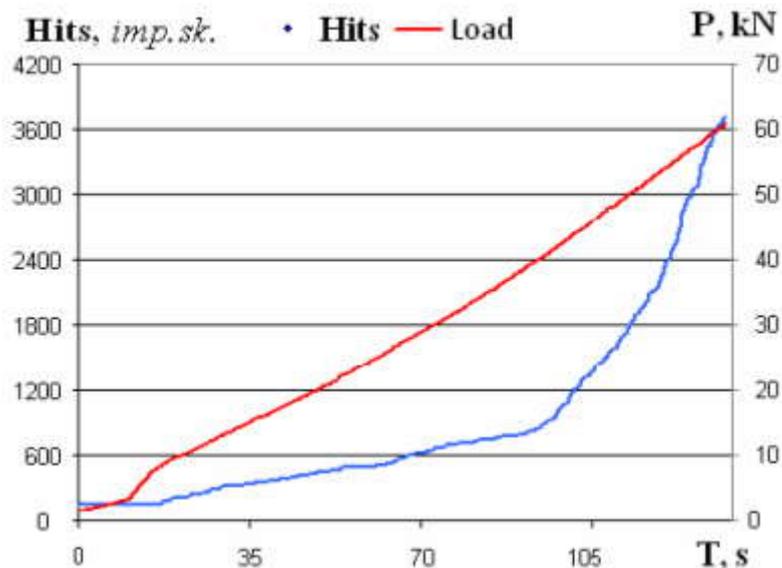
5.4. att. AE signālu amplitūdas (Amp) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Enerģijas E (5.5. 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.



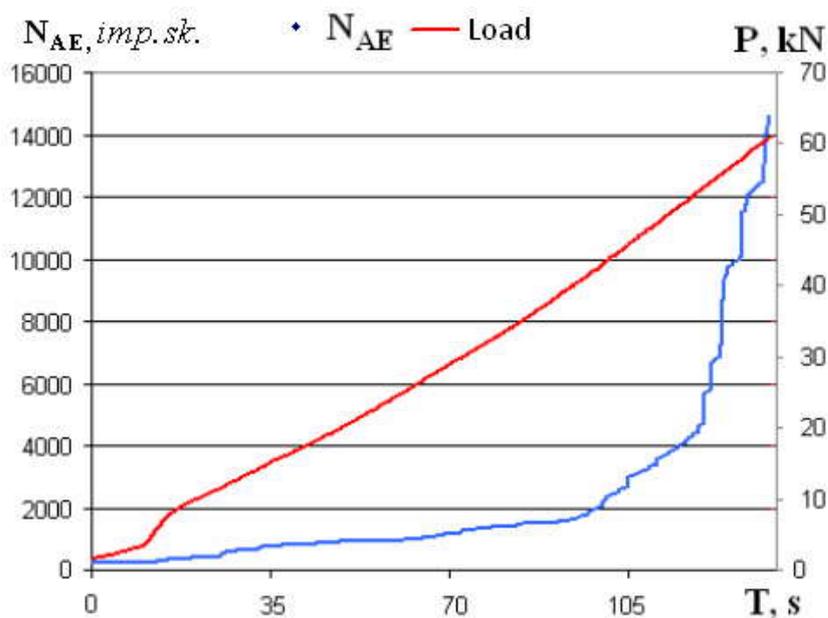
5.5. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

AE impulsu summas $Hits$ atkarības no laika T analīze (5.6. att.) uzrādīja strauju impulsu skaita pieaugumu, sākot ar slogošanas momentu, kas sastāda 66 % no sagrūšanas slodzes.



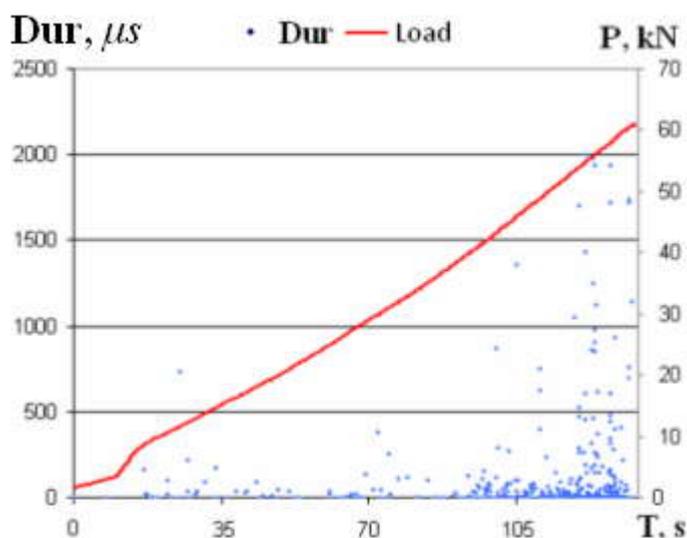
5.6. att. AE impulsu summas ($Hits$) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Summārā AE skaita N_{AE} atkarība no laika T (5.7. att.), sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 66 % no sagrūšanas slodzes, tiek novērota strauja N_{AE} palielināšanās.



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

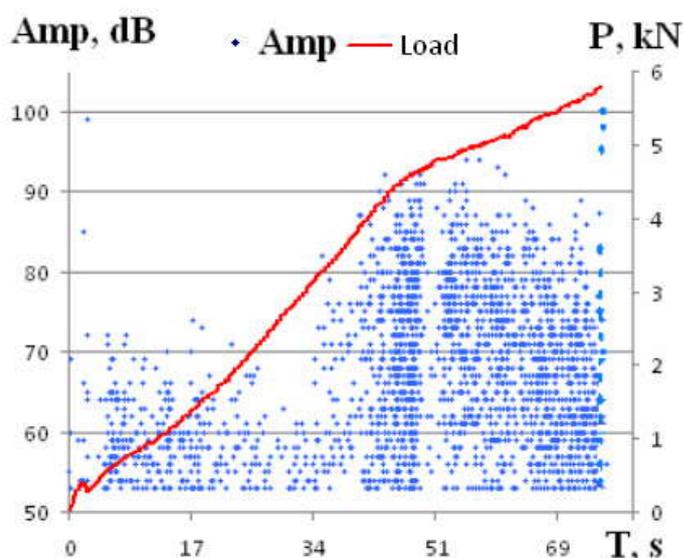
Tajā pašā laikā vairākuma signālu ilgums Dur (5.8. att.) sākotnējā slogošanas etapā palielinās no 100 μs līdz 200 μs . Sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 66 % no sagrūšanas slodzes, parametrs Dur palielinās no 500 μs līdz 800 μs . Sagrūšanas etapā AE signālu ilgums sastāda 2000 μs .



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

Paraugi ar transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slodzes vektoru

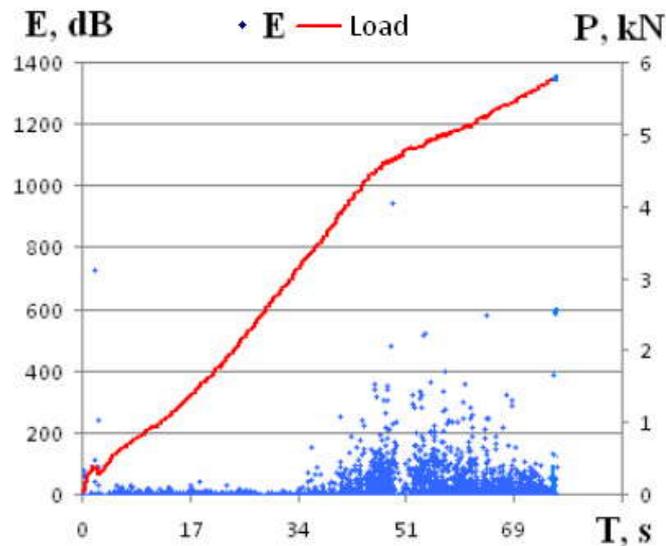
AE signālu amplitūdas vērtības Amp (5.9. att.) slogošanas procesa sākumā atsevišķajiem signāliem sasniedza 100 dB, bet vidēji nepārsniedza 75 dB. Pēc tam, kad slodze sasniedza 74 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 95 dB, bet pēdējā slogošanas etapā, paraugam sagrūstot, sasniedz 100 dB.



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

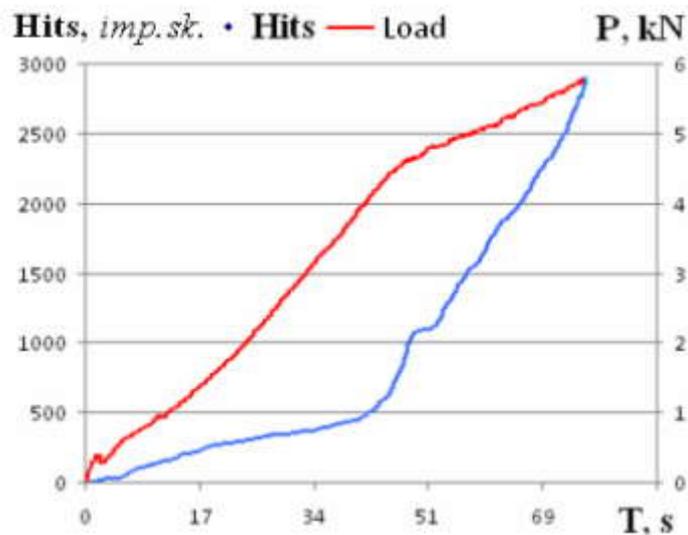
Enerģijas E (5.10. att.) vērtības sākotnējā etapā vidēji sasniedz 40 dB un praktiski nemaina savu vērtību līdz 74 % no sagrūšanas slodzes. Sasniedzot 74 % no sagrūšanas

slodzes, enerģija sāk krasi palielināties un sasniedz 600 dB. Parauga sagrūšanas etapā AE signālu enerģijas vērtības sasniedz 1300 dB.



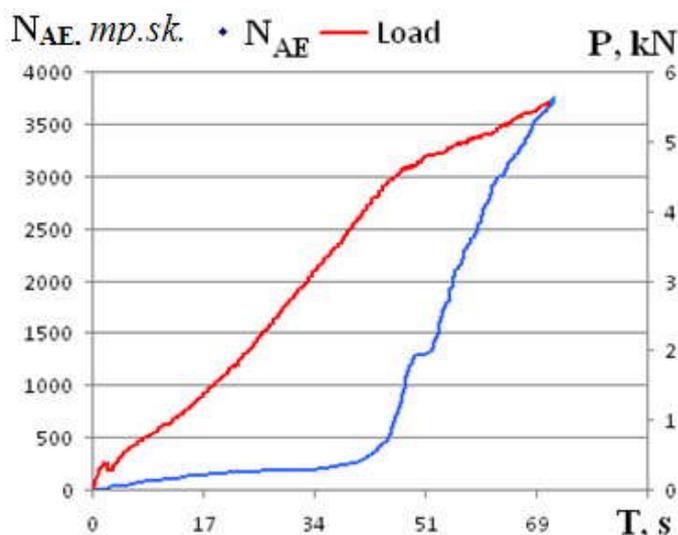
5.10. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

AE impulsu summas $Hits$ atkarības no laika T analīze (5.11. att.) uzrādīja strauju impulsu skaita pieaugumu, sākot ar slogošanas momentu, kas sastāda 74 % no sagrūšanas slodzes.



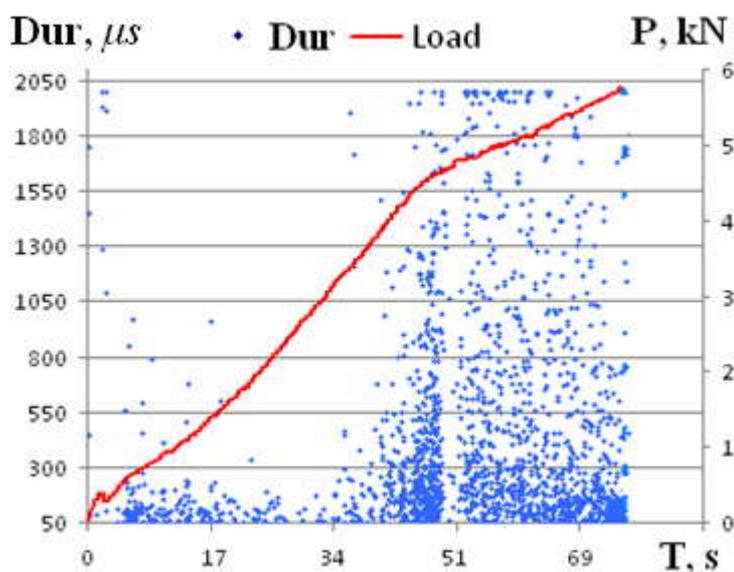
5.11. att. AE impulsu summas ($Hits$) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Summārā AE skaita N_{AE} izmaiņas laikā T (5.12. att.) uzrāda divus rakstura izmaiņas, kas notiek, sasniedzot 74 % no sagrūšanas slodzes.



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

Tajā pašā laikā vairākuma signālu ilgums Dur (5.13. att.) sākotnējā slogošanas etapā sasniedz 250 μs . Sasniedzot 74 % no sagrūšanas slodzes līmeņa, parametrs Dur palielinās līdz 2000 μs .

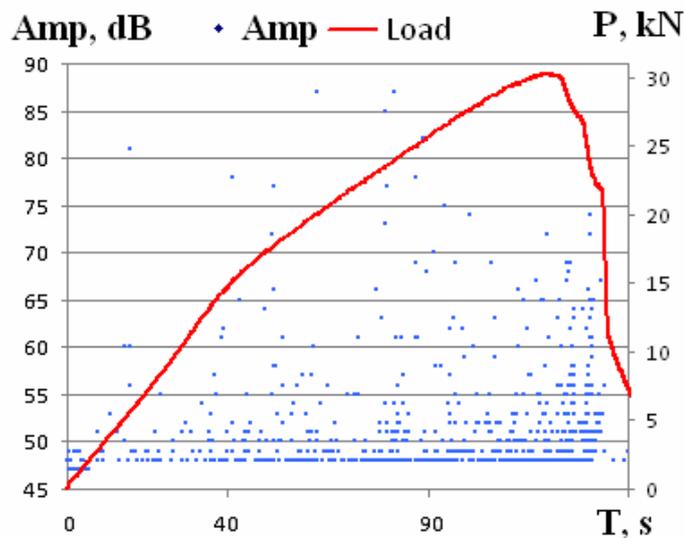


5.13. att. Signāla ilgums (Dur) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Krusteniskas formas paraugi

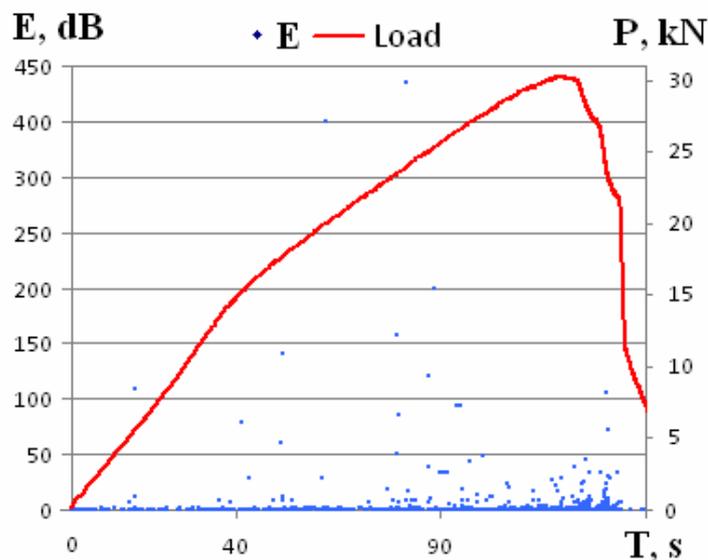
AE signālu amplitūdas vērtības Amp (5.14. att.) slogošanas procesa sākumā lielākai daļai signālu sasniedza 55 dB, bet vidēji nepārsniedza 50 dB. Slodzei sasniedzot 45 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 87 dB. Parauga

slogošanas etapā no 80 % līdz 100 % amplitūdas vērtības samazinājās no 87 dB līdz 67 dB. Pēdējo slogošanas etapu raksturo kārtējais amplitūdas vērtības palielinājums.



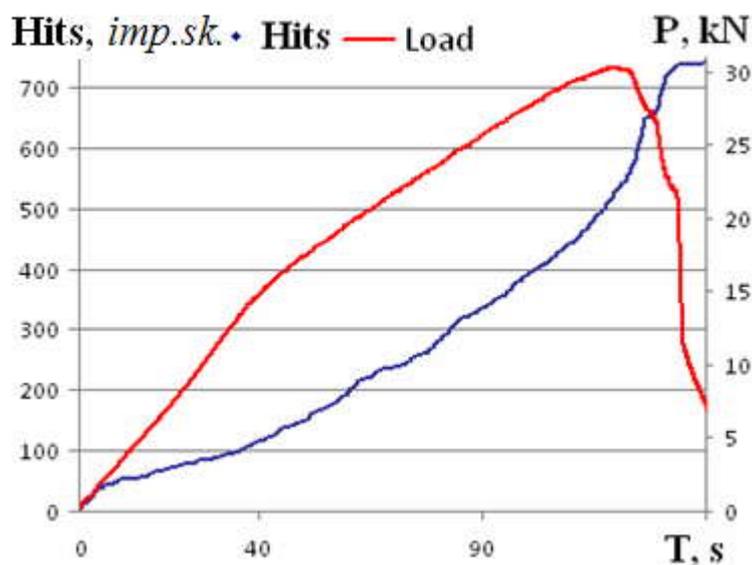
5.14. att. AE signālu amplitūdas (Amp) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Enerģijas E izmaiņu raksturs ir līdzīgs amplitūdas uzvedībai. Enerģijas E (5.15. att.) vērtības slogošanas procesa sākumā nepārsniedz 25 dB lielākajai daļai signālu. Sasniedzot 45 % no sagrūšanas slodzes, tika pamanīts enerģijas pieaugums līdz 350 dB. Parauga slogošanas etapā no 80 % līdz 100 % no sagrūšanas slodzes enerģijas vērtības samazinās no 380 dB līdz 25 dB. Pēdējo slogošanas etapu raksturo kārtējais enerģijas vērtības palielinājums.



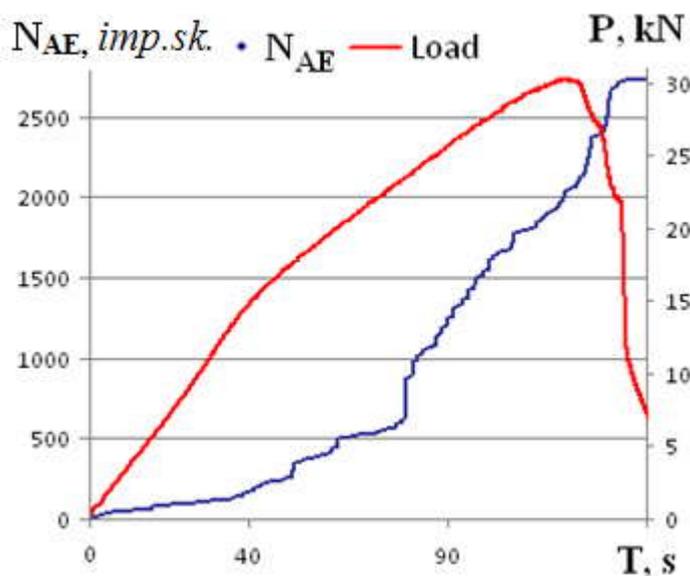
5.15. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

AE impulsu summas $Hits$ atkarības no laika T analīzi (5.16. att.) raksturo relatīvi vienmērīgs impulsu skaita pieaugums, līdz pat darbojošās slodzes maksimālajai vērtībai.



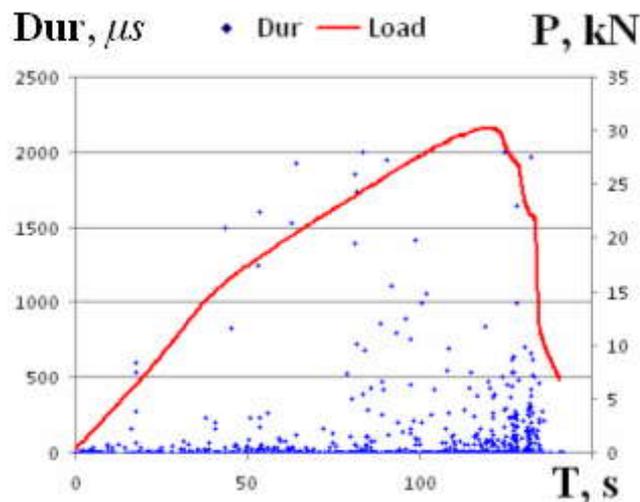
5.16. att. AE impulsu summas ($Hits$) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Summārā AE skaita N_{AE} izmaiņas laikā T (5.12. att.) uzrāda divas rakstura izmaiņas, kas notiek, sasniedzot 80 % no sagrūšanas slodzes.



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

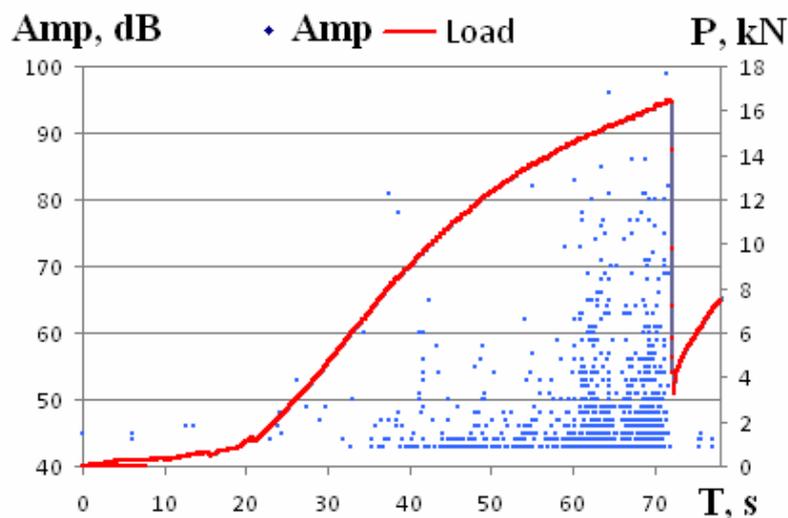
Signāla ilgums Dur izmaiņas laikā T (5.18. att.) uzrāda divu etapu esamību. Dur pieauguma raksturs mainās, sasniedzot 80 % no sagrūšanas slodzes.



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

Maltas krusta formas paraugi

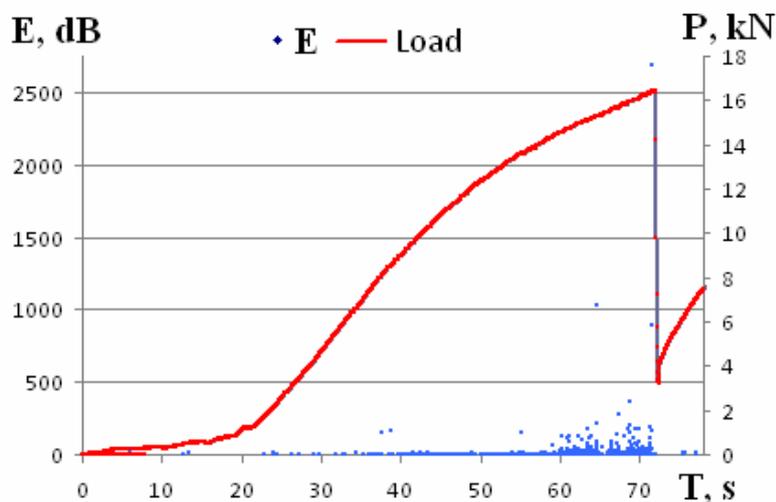
AE signālu amplitūdas vērtības Amp (5.19. att.) slodzes procesa sākumā vidēji nepārsniedza 50 dB. Slodzei sasniedzot 48 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 82 dB. Tālāk, slodzei palielinoties līdz 90 %, parauga amplitūdas vērtība sasniedza 85–96 dB. Sagrūšanas brīdī amplitūdas vērtība sastāda 100 dB.



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

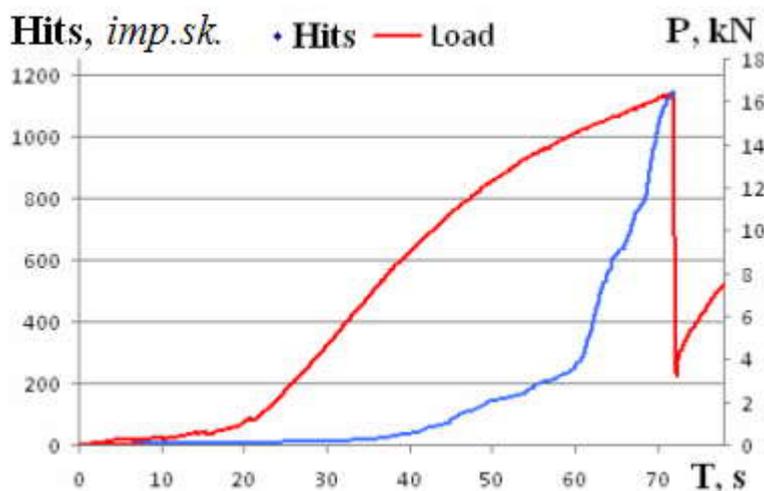
Enerģijas E (5.20. att.) vērtība nepārsniedz 30 dB sākotnējā slodzes palielināšanas etapā (līdz 48 % no sagrūšanas slodzes vērtības). Sloģšanas etapā, diapazonā no 48 % līdz

90 % no sagrūšanas slodzes, enerģijas vērtība nepārsniedz 200 dB, pēc 90 % sasniedz 1000 dB. Parauga galīgās sagrūšanas brīdī enerģijas E vērtība pārsniedza 2500 dB.



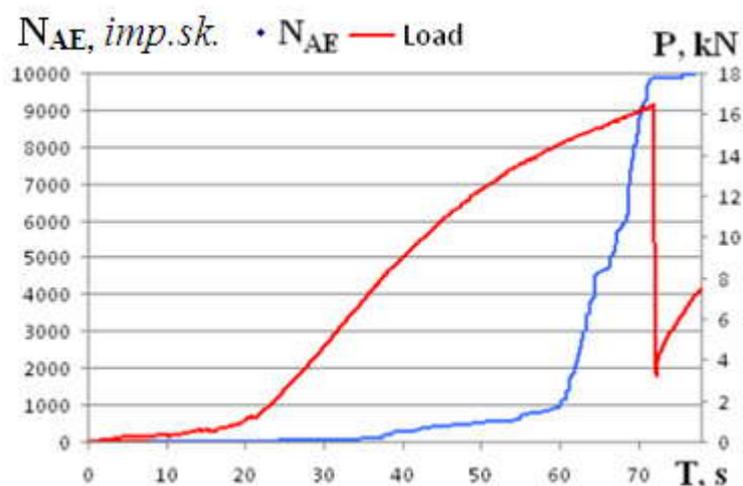
5.20. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

AE impulsu summas $Hits$ atkarība no laika T analīze (5.21. att.) uzrāda impulsu skaita pieaugumu, sasniedzot 48 % no sagrūšanas slodzes. Otrās impulsu skaita pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 90 % no sagrūšanas slodzes.



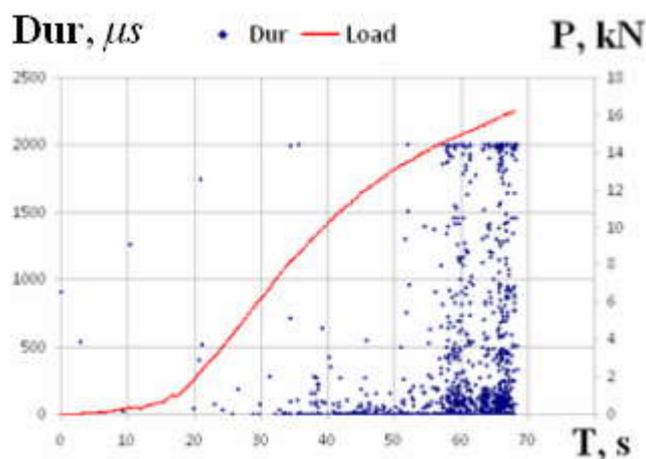
5.21. att. AE impulsu summas ($Hits$) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Summārā AE skaita N_{AE} atkarība no laika T (5.22. att.) ilustrē divas N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas. Pirmās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 48 % no sagrūšanas slodzes. Otrās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 90 % no sagrūšanas slodzes.



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

Signālu ilgums Dur atkarība no laika T (5.23. att.) sākotnējā slogošanas etapā palielinās līdz 1700 μ s. Sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 48 % no sagrūšanas slodzes, parametrs Dur palielinās līdz 1500 μ s. Sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 90 % no sagrūšanas slodzes, parametrs Dur palielinās līdz 1950-2000 μ s. Sagrūšanas etapā AE signālu ilgums sastāda 2000 μ s.



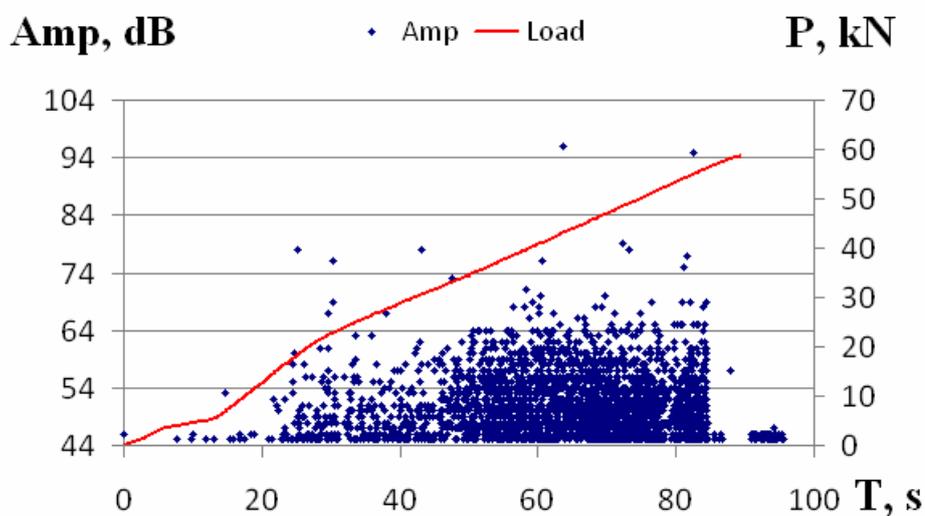
5.23. att. Signāla ilgums (Dur) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

5.1.1.2. Paraugu, kas tika pakļauti sākotnējai slogošanai, izmēģinājumu rezultāti

Paraugi ar garenisku šķiedru orientāciju attiecībā pret slodzes vektoru

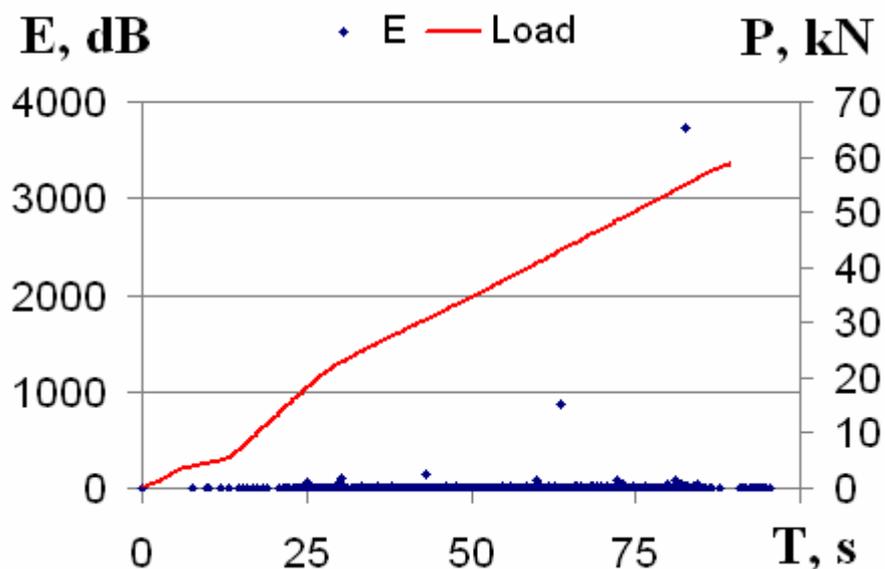
AE signālu amplitūdas vērtība Amp atkarība no laika T (5.24. att.) slogošanas procesa sākumā atsevišķajiem signāliem sasniedza 53 dB, bet vidēji nepārsniedza 45 dB. Slodzei

sasniedzot 30 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 63-80 dB. Kad slodze sasniedza 58 % no sagrūšanas vērtības amplitūdas vērtības palielinājās līdz 75 dB, bet pēdējā slogošanas etapā, paraugam sagrūstot, sasniedza 100 dB.



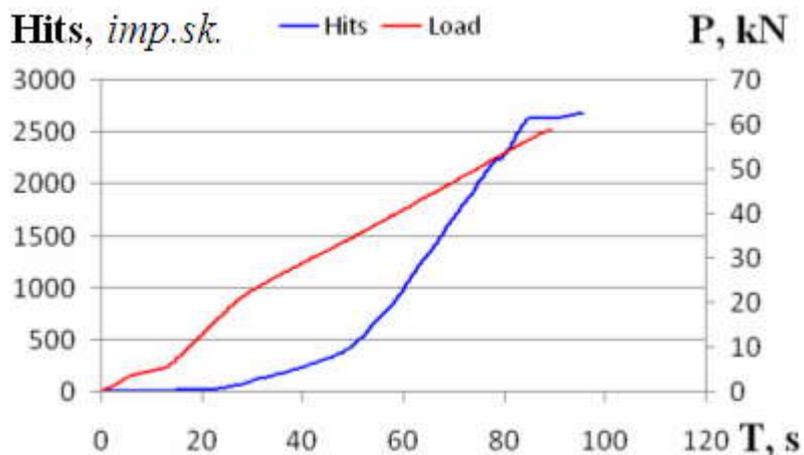
5.24. att. AE signālu amplitūdas (Amp) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Enerģijas E vērtība atkarība no laika T (5.25. att.) sākotnējā etapā vidēji sasniedz 2 dB un praktiski nemaina savu vērtību līdz 30 % no sagrūšanas slodzes. Sasniedzot 30 % no sagrūšanas slodzes, enerģija sāka krasi palielināties un atsevišķos gadījumos sasniedz 70 dB. Kad slodze sasniedza 58 % no sagrūšanas vērtības enerģijas vērtība var sasniegt līdz 200 dB. Parauga sagrūšanas etapā AE signālu enerģijas vērtības sasniedz 3700 dB.



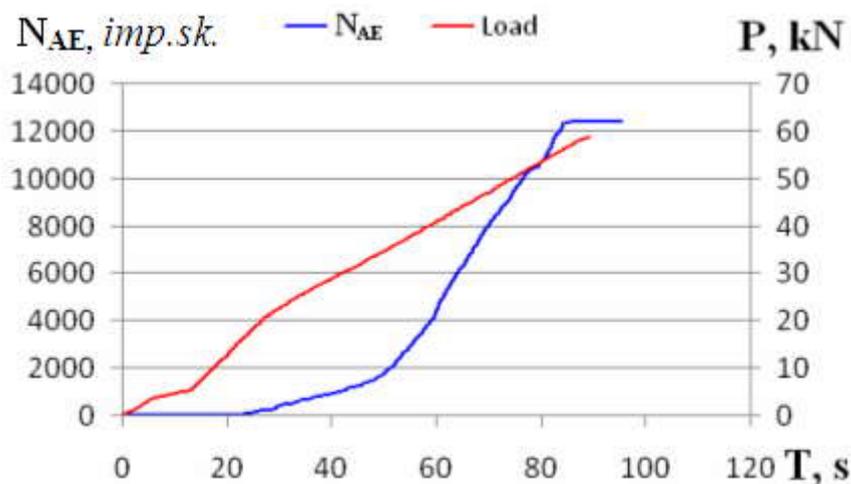
5.25. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

AE impulsu summa *Hits* atkarības no laika *T* analīze (5.26. att.) ļāva atklāt divus raksturīgus impulsu skaita pieauguma etapus. Pirmo, sākot ar 30 % no sagrūšanas slodzes, nomaina otrs, straujš impulsu skaita pieaugums (sasniedzot 58 % līmeni no sagrūšanas slodzes).



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

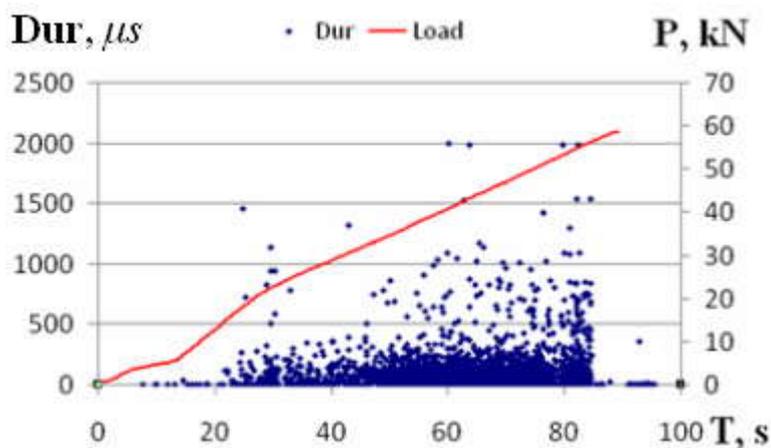
Summārā AE skaita N_{AE} atkarība no laika *T* (5.27. att.) ilustrē divas N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas. Pirmās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 30 % no sagrūšanas slodzes. Otrās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 58 % no sagrūšanas slodzes.



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

Tajā pašā laikā vairākuma signālu ilgums *Dur* atkarība no laika *T* (5.28. att.) sākotnējā slodzes etapā palielinās no 100 μ s līdz 200 μ s. Sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 30 %

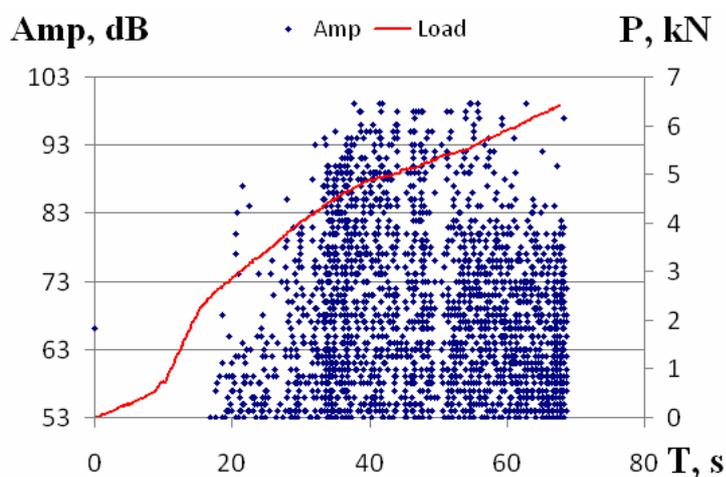
no sagrūšanas slodzes, parametrs Dur palielinās no 250 μs līdz 450 μs . Sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 58 % no sagrūšanas slodzes, parametrs Dur palielinās līdz 1350 μs . Sagrūšanas etapā AE signālu ilgums sastāda 2000 μs .



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

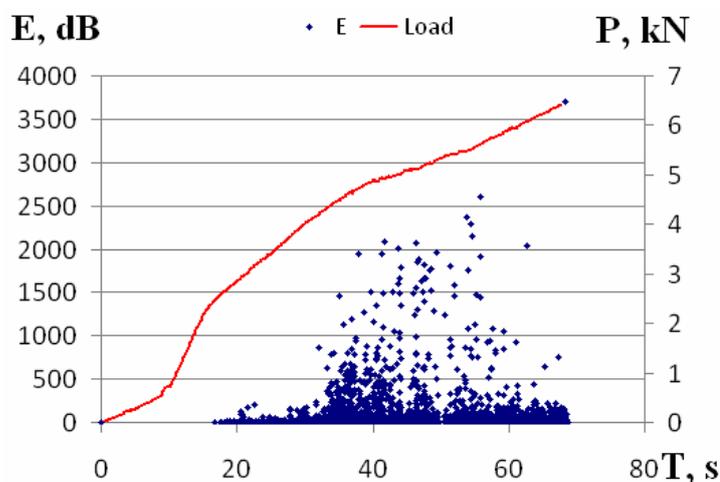
Paraugi ar transversālu šķiedru orientāciju attiecībā pret slodzes vektoru

AE signālu amplitūdas vērtības Amp atkarība no laika T (5.29. att.) slogošanas procesa sākumā atsevišķajiem signāliem sasniedza 69 dB, bet vidēji nepārsniedza 53 dB. Pēc tam, kad slodze sasniedza 38 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 89 dB. Nākamais amplitūdas pieaugums tika novērots pie 61 % no sagrūšanas vērtības un sasniedz 100 dB. Šis līmenis saglabājas arī pēdējā slogošanas etapā, paraugiem sagrūstot.



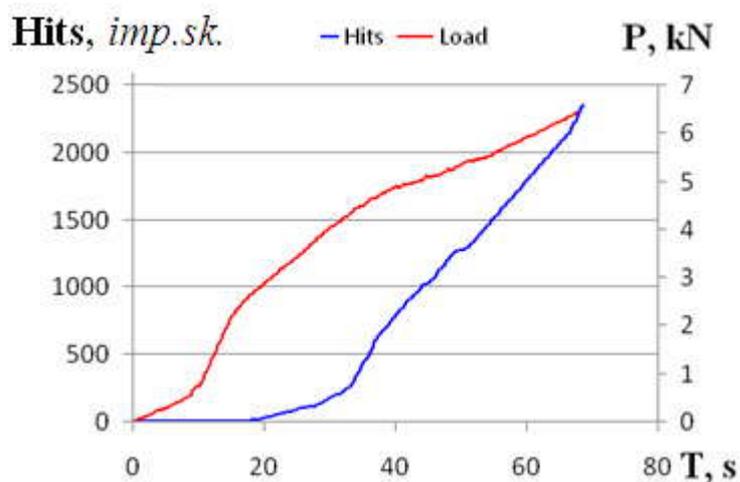
5.29. att. AE signālu amplitūdas (Amp) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Enerģijas E atkarība no laika T (5.30. att.) vērtības sākotnējā etapā vidēji sasniedz 2 dB un praktiski nemaina savu vērtību līdz 38 % no sagrūšanas slodzes. Sasniedzot 61 % no sagrūšanas slodzes, enerģija sāk strauji palielināties un sasniedz 700 dB. Parauga sagrūšanas etapā AE signālu enerģijas vērtības pārsniedz 3700 dB.



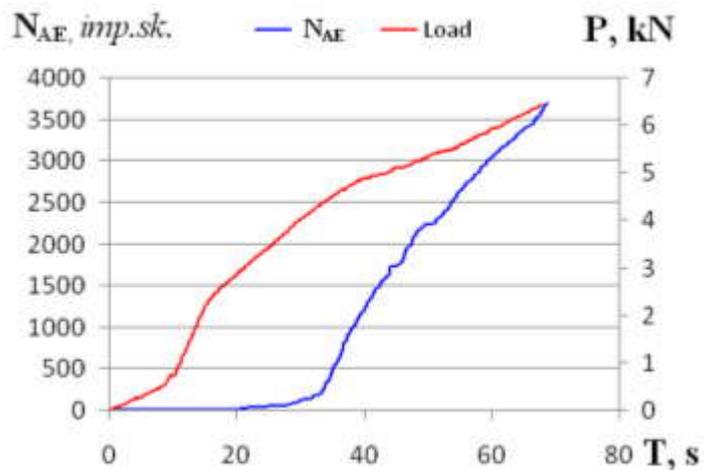
5.30. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

AE impulsu summas $Hits$ atkarība no laika T analīze (5.31. att.) ļāva atklāt divus impulsu skaita pieauguma posmus (sasniedzot attiecīgi 38 % un 61 % no sagrūšanas slodzes).



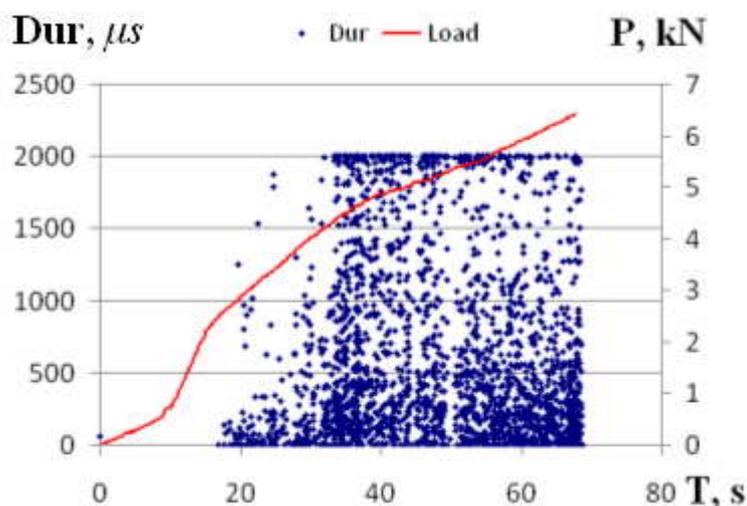
5.31. att. AE impulsu summas ($Hits$) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Summārā AE skaita N_{AE} atkarība no laikā T (5.32. att.) uzrāda divas N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas. Pirmās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 38 % no sagrūšanas slodzes. Otrās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 61 % no sagrūšanas slodzes.



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

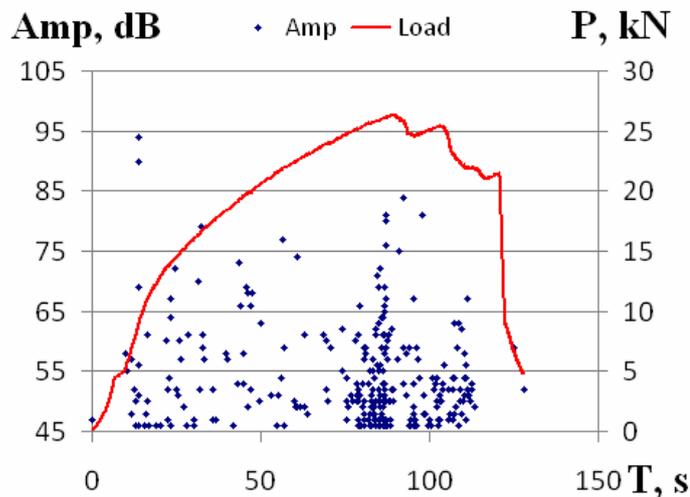
Tajā pašā laikā vairākuma signālu ilgums Dur atkarība no laikā T (5.33. att.) sākotnējā složošanas etapā sasniedz 100 μs . Sasniedzot 61 % no sagrūšanas slodzes līmeņa, parametrs Dur palielinās līdz 2000 μs un saglabā savu vērtību līdz parauga pilnīgai sagrūšanai.



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

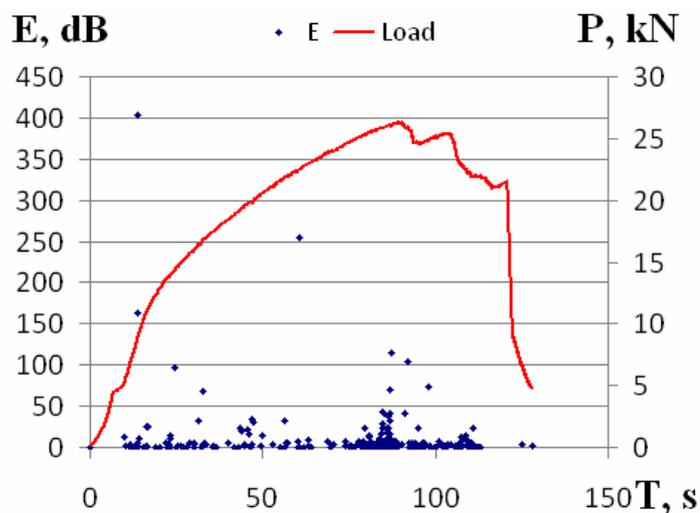
Krusteniskas formas paraugi

AE signālu amplitūdas vērtības Amp atkarība no laikā T (5.34. att.) složošanas procesa sākumā lielākai daļai signālu sasniedza 60 dB. Slodzei sasniedzot 45 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 70 dB. Parauga složošanas etapā no 90 % līdz 100 % amplitūdas vērtības palielinās no 76 dB līdz 84 dB. Pēdējo složošanas etapu raksturo kārtējais amplitūdas vērtības samazinājums.



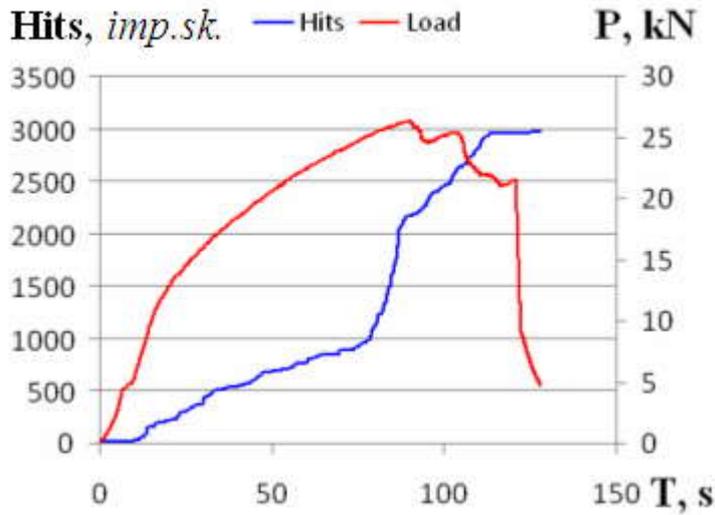
5.34. att. AE signālu amplitūdas (Amp) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

Enerģijas E atkarība no laikā T (5.35. att.) vērtības slogošanas procesa sākumā nepārsniedz 20 dB lielākajai daļai signālu. Sasniedzot 45 % no sagrūšanas slodzes, tika pamanīts enerģijas vērtības pieaugums līdz 100 dB. Parauga slogošanas etapā no 90 % līdz 100 % no sagrūšanas slodzes enerģijas vērtības sasniedz līdz 260 dB. Pēdējo slogošanas etapu raksturo kārtējais enerģijas vērtības samazinājums.



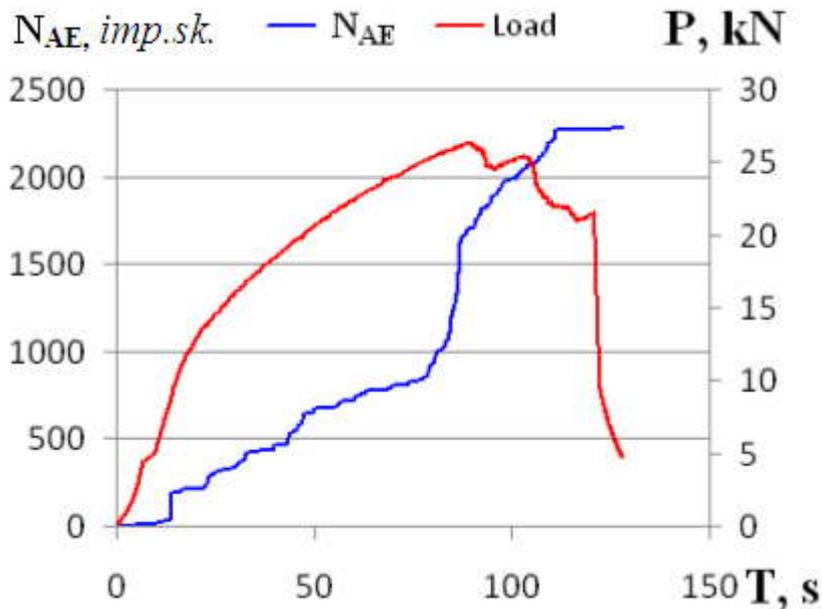
5.35. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

AE impulsu summas $Hits$ atkarības no laika T analīze (5.36. att.) uzrāda divus sagrūšanas etapus, kurus raksturo $Hits$ pieauguma rakstura izmaiņas, sasniedzot 90 % no sagrūšanas slodzes.



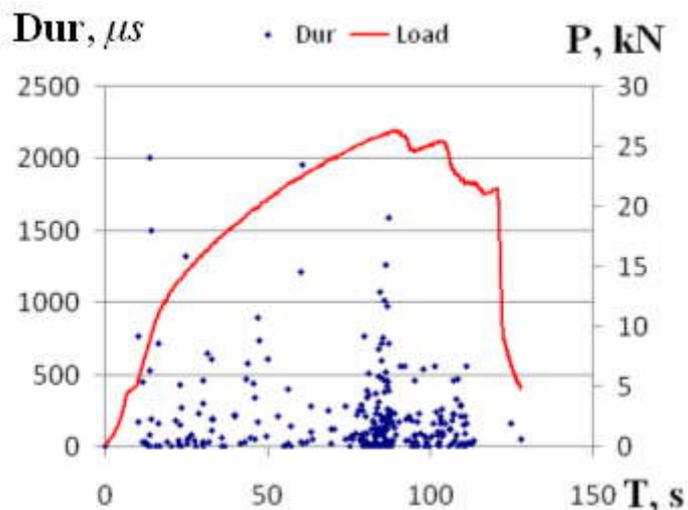
5.36. att. AE impulsu summas (*Hits*) un slodzes (*P*) izmaiņas laikā (*T*)

Summārā AE skaita N_{AE} atkarība no laikā T (5.37. att.) uzrāda divu sagrūšanas etapu esamību. N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 90 % no sagrūšanas slodzes (robeža starp pirmo un otro etapu).



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

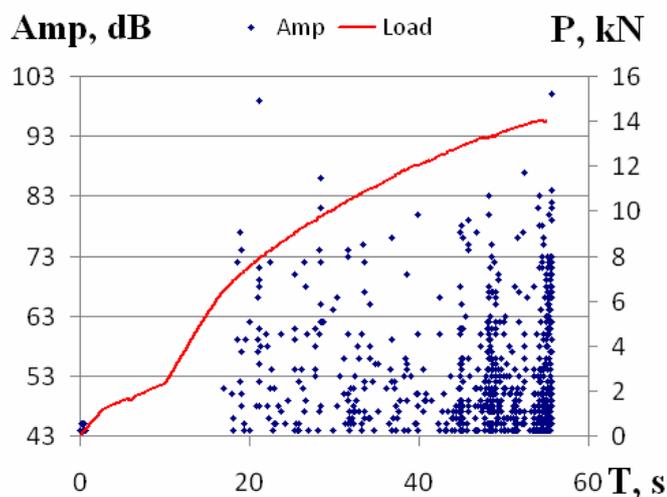
Vairākuma signālu ilgums Dur atkarība no laikā T (5.38. att.) sākotnējā složošanas etapā sasniedz 750–800 μ s. Pēc tam, sasniedzot slodzes līmeni, kas sastāda 90 % no sagrūšanas slodzes, palielinās līdz 1700 μ s un tad būtiski samazinās.



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

Maltas krusta formas paraugi

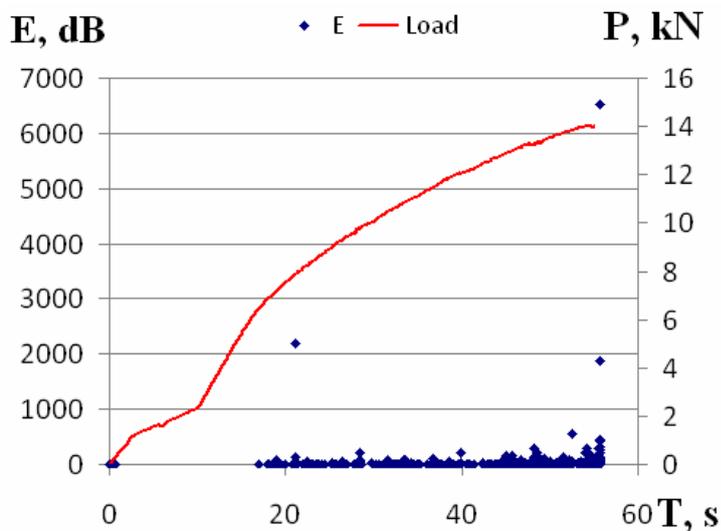
AE signālu amplitūdas vērtības Amp atkarība no laikā T (5.39. att.) slodzes procesa sākumā vidēji nepārsniedza 50 dB. Slodzei sasniedzot 48 % no sagrūšanas vērtības, atsevišķu signālu amplitūdas vērtības pieauga līdz 60 dB. Tālāk, slodzei palielinoties līdz 92 %, parauga amplitūdas vērtība sasniedza 85–96 dB. Sagrūšanas brīdī amplitūdas vērtība sastāda 100 dB.



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

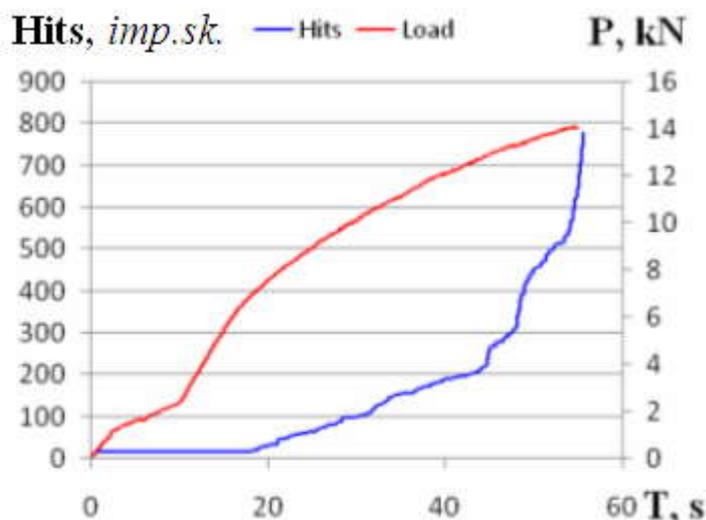
Energijas E atkarība no laikā T (5.40. att.) vērtība nepārsniedz 30 dB sākotnējā slodzes palielināšanas etapā (līdz 48 % no sagrūšanas slodzes vērtības). Slodzes palielināšanas etapā, diapazonā

no 48 % līdz 92 % no sagrūšanas slodzes, enerģijas vērtība nepārsniedz 200 dB, pēc 90 % sasniedz 1000 dB. Galīgās parauga sagrūšanas brīdī enerģijas E vērtība pārsniedza 2500 dB.



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

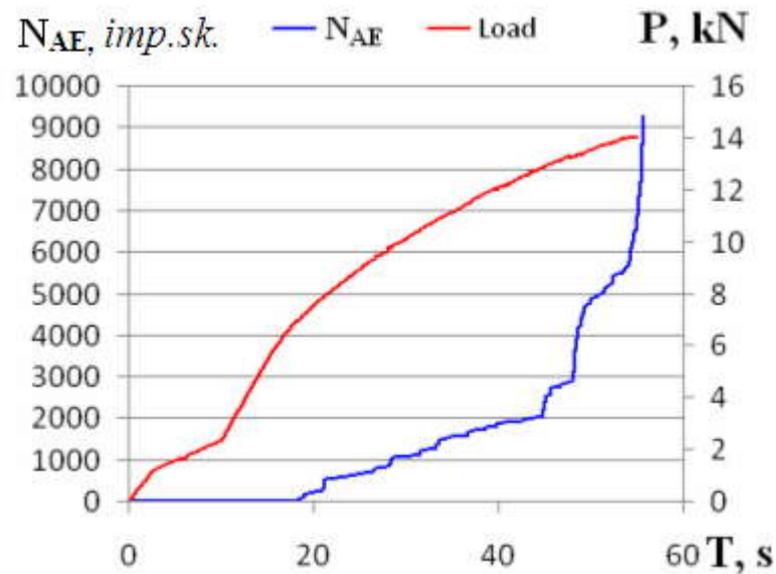
AE impulsu summas $Hits$ atkarības no laika T analīze (5.41. att.) uzrāda divas pieauguma rakstura izmaiņas. Pirmās $Hits$ pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 48 % no sagrūšanas slodzes. Otrās $Hits$ pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 92 % no sagrūšanas slodzes.



5.41. att. AE impulsu summas ($Hits$) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

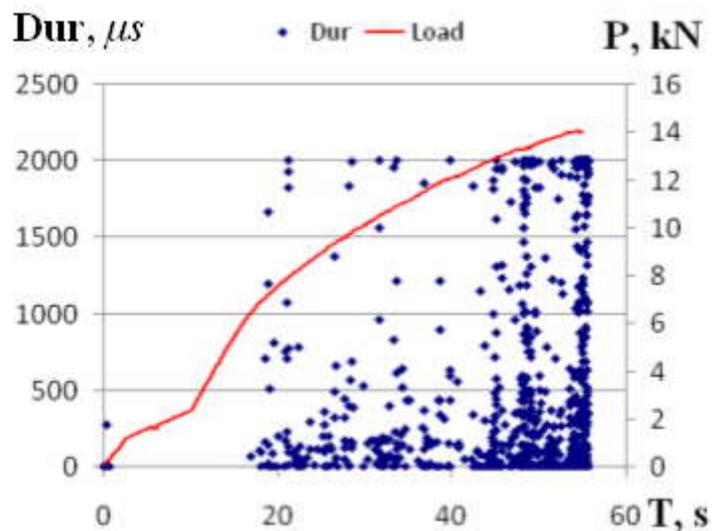
Summārā AE skaita N_{AE} atkarība no laika T (5.42. att.) uzrāda divas pieauguma rakstura izmaiņas. Pirmās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 48 % no

sagrūšanas slodzes. Otrās N_{AE} pieauguma rakstura izmaiņas notiek, sasniedzot 92 % no sagrūšanas slodzes.



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

Tajā pašā laikā vairākuma signālu ilgums Dur atkarība no laikā T (5.43. att.) sākotnējā slogošanas etapā sasniedz 250 μs . Sasniedzot 92 % no sagrūšanas slodzes līmeņa, parametrs Dur palielinās līdz 2000 μs .



5.43. att. Signāla ilguma (Dur) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

5.1.2. KM paraugu sagraušanas procesa analize

Eksperimentālie paraugi, kas netika pakļauti sākotnējai slogošanai

Taisnstūra formas paraugu ar gareniski orientētām šķiedrām sagraušanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano – un mikrolīmenī (līdz 30 % no sagraušanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 66 % no sagraušanas slodzes). Otrā etapu raksturo šķiedru delaminācija, kas trešajā etapā beidzas ar tās galīgo pārrāvumu.

Taisnstūra formas paraugu ar transversāli orientētām šķiedrām sagraušanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano – un mikrolīmenī (līdz 30 % no sagraušanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 74 % no sagraušanas slodzes). Otrā etapu raksturo šķiedru delaminācija, kas trešajā etapā beidzas ar tās galīgo pārrāvumu.

Krusteniskas formas paraugiem raksturīgi divi sagraušanas etapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano- un mikrolīmenī (līdz 45 % no sagraušanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 80 % no sagraušanas slodzes). Otrais etaps ir saistīts ar šķiedru delamināciju un relatīvi nelielu šķiedru pārrāvumu skaitu.

Maltas krusta formas paraugu sagraušanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano – un mikrolīmenī (līdz 48 % no sagraušanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 90 % no sagraušanas slodzes). Otrā etapu raksturo šķiedru delaminācija, kas trešajā etapā beidzas ar tās galīgo pārrāvumu.

Eksperimentālie paraugi, kas tika pakļauti sākotnējai slogošanai

Taisnstūra formas paraugu ar gareniski orientētām šķiedrām sagraušanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano – un mikrolīmenī (līdz 30 % no sagraušanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 58 % no sagraušanas slodzes). Otrā etapu raksturo šķiedru delaminācija, kas trešajā etapā beidzas ar tās galīgo pārrāvumu.

Taisnstūra formas paraugu ar transversāli orientētām šķiedrām sagraušanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano – un mikrolīmenī (līdz 38 % no sagraušanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 61 % no sagraušanas slodzes). Otrā etapu raksturo šķiedru delaminācija, kas trešajā etapā beidzas ar tās galīgo pārrāvumu.

Krusteniskas formas paraugiem raksturīgi divi sagrūšanas etapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano- un mikrolīmenī (līdz 45 % no sagrūšanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 90 % no sagrūšanas slodzes). Otrais etaps ir saistīts ar šķiedru delamināciju un relatīvi nelielu šķiedru pārrāvumu skaitu.

Maltas krusta formas paraugu sagrūšanas procesu raksturo trīs pamatetapi: pirmais etaps ir saistīts ar bojājumiem nano – un mikrolīmenī (līdz 48 % no sagrūšanas slodzes), kas visos izmēģinājumos, beidzas ar matricas plaisāšanu (līdz 92 % no sagrūšanas slodzes). Otro etapu raksturo šķiedru delaminācija, kas trešajā etapā beidzas ar tās galīgo pārrāvumu.

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 sloģšanai.

5.1.3. Eksperimentālo pētījumu rezultātu statistiskā analīze

Lai novērtētu iegūto rezultātu ticamību tika veikta eksperimentālo datu statistiskā apstrāde, balstoties uz zināmām pieejām [63,72,76,81,98,99,142,143,144].

Balstoties uz varbūtisko pieeju darbā tika noteikti sekojošie statistiskie raksturojumi:

- vidējā vērtība (\bar{X}),
- statistiskā dispersija (S^2),
- vidējā kvadrātiskā novirze (S),
- mazās izlases vidējā kļūda (μ),
- mazās izlases robežkļūda (Δ).

Sadalījuma likums ir pilnīgs gadījuma lieluma raksturlielums, bet gadījumos, kad ir mazs novērojumu skaits, noteikt sadalījuma likuma veidu un novērtēt tā parametru vērtības ar pietiekamu precizitāti ir neiespējami. Tāpēc gadījuma lieluma raksturojumam, ja ir mazs novērojumu skaits, izmanto skaitliskus raksturlielumus.

Varbūtību integrāļa tabulas tiek izmantotas liela apjoma izlasēm no bezgalīgi lielas ģenerālkopas. Bet pie $n < 100$ rodas neatbilstība starp tabulas datiem un robežas varbūtību; ja $n < 100$, kļūda kļūst ievērojama. Neatbilstība rodas galvenokārt no ģenerālkopas vienību sadalījuma rakstura. Ja izlases apjoms ir liels, ģenerālkopas sadalījuma īpatnībām nav lielas nozīmes, jo izvēlētajā rādītāja novirzes no ģenerālā raksturlieluma sadalījums lielā izlasē vienmēr ir normāls.

Neliela apjoma izlasēs $n \leq 30$ ģenerālās kopas sadalījuma raksturs ietekmē izlases kļūdu sadalījumu. Tāpēc izlases kļūdas aprēķinam nelielam novērojumu skaitam (mazāk par 100 vienībām) atlasi jāveic no kopas, kurai ir normāls sadalījums.

Mazo izlašu teoriju izstrādāja angļu statistiķis Gossets V. (darbojās zem pseidonīma 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).

Kā jau tika minēts, mazās izlases gadījumā tikai normāla sadalījuma ģenerālkopai var aprēķināt gan ticamības varbūtības, gan ģenerālās vidējās ticamības robežas.

Stjudenta sadalījuma varbūtību blīvumu raksturo funkcija:

$$f(t, n) = B_n \left(1 + \frac{t^2}{n-1} \right)^{-n/2} \quad (5.1)$$

kur t — kārtējais mainīgais;

n — izlases apjoms;

B — vērtība, kas ir atkarīga tikai no n .

Stjudenta sadalījumam ir tikai viens parametrs: $d(f)$ — brīvības pakāpju skaits (dažreiz tiek apzīmēts ar k).

Šis sadalījums, līdzīgi kā normālais, ir simetrisks attiecībā pret punktu $t = 0$, bet lēzenāks. Palielinoties izlases apjomam un attiecīgi arī brīvības pakāpju skaitam, Stjudenta sadalījums ātri tuvojas normālajam sadalījumam. Brīvības pakāpju skaits ir vienāds to pazīmju individuālo vērtību skaitam, kas ir nepieciešamas meklējamā raksturlieluma noteikšanai.

Dispersijas aprēķinam jābūt zināmai vidējai vērtībai. Tāpēc dispersijas aprēķinam $d(f) = n - 1$.

Vidējo statistisko vērtību nosaka saskaņā ar formulu:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.2)$$

kur n — novērojumu skaits (izlases elementu skaits),

x_i — i -tā novērojuma rezultāts.

Statistisko dispersiju nosaka saskaņā ar formulu:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (5.3)$$

Dispersijas novērtējumu var noteikt saskaņā ar formulu (5.2), bet praksē, aprēķinu vienkāršošanai, izmanto sekojošu attiecību:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - N \cdot \bar{X}^2 \quad (5.4)$$

Tādējādi, dispersijas novērtējumu vienkāršāk noteikt saskaņā ar šo formulu:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^2 - N \cdot \bar{X}^2) \quad (5.5)$$

Bieži pielieto vērtību, kas ir vienāda ar dispersijas kvadrātsakni. To mēra tajās pašās vienībās, kā gadījuma vērtību, un sauc par vidējo kvadrātisko novirzi:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (5.6)$$

Mazās izlases vidējā kļūda tiek aprēķināta pēc formulas:

$$\mu = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5.7)$$

Mazās izlases robežklūda tiek aprēķināta pēc formulas:

$$\Delta = t(k)\mu \quad (5.8)$$

Aprēķinos izmantojam varbūtību $F(t) = 0,95$.

Ģenerālās vidējās vērtības robežas ir sekojošas:

$$\bar{x}_i - \Delta_i \leq \bar{x}_i \leq \bar{x}_i + \Delta_i \quad (5.9)$$

Eksperimentālo datu vērtības ir sakopotas tabulas veidā EXCEL programmā un parādītas Pielikumā 5.

Statistisko raksturlīknes aprēķinu rezultāti parādīti Pielikumā 6.

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.

Visos gadījumos sākotnējais slogojuma etaps ir saistīts ar materiāla bojājumiem nano- un mikrolīmenī, kuriem seko matricēs plaisāšana. Otrais etaps ir saistīts ar šķiedru delamināciju ar to turpmāku pilnīgu sagrūšanu.

Sākotnējā slogošanas etapā atsevišķu AE impulsu vērtības var sasniegt ievērojamas vērtības, kas ir saistīts ar berzes procesiem stiprināšanas ierīcē, izvēloties spēli. Bet šie signāli nav saistīti ar materiāla bojājumu mehānismiem.

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 notiek 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 notiek vienlaicīgi.

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 matricē sagrūšanas procesā, bet nedaudz mazāka nekā šķiedru sagrūšanas procesā.

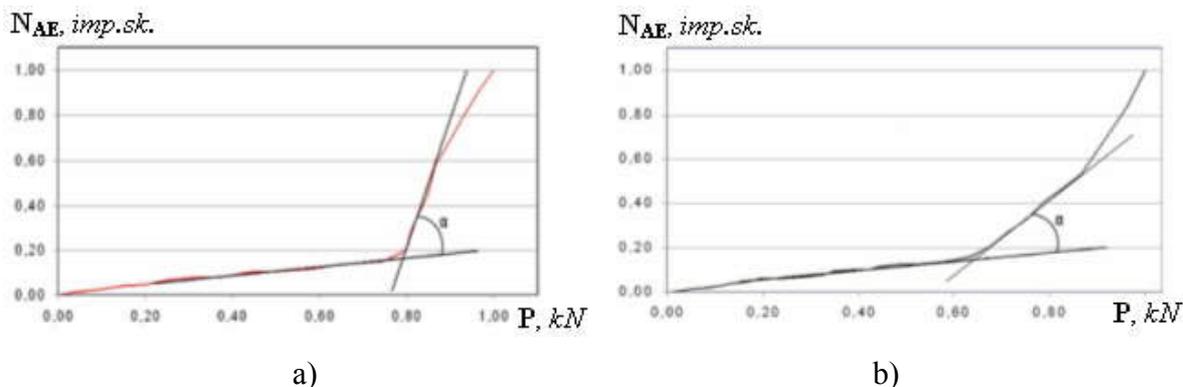
Visprecīzāk šķiedru sagrūšanas procesu raksturo AE signālu enerģijas izmaiņas, jo AE signāliem slogojuma procesa sākumā ir neliels ilgums.

5.1.5. Materiālu bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumi

5.1.5.1. Vienā virzienā vērstā kompozītmateriāla bojājumu pakāpes akustiskās emisijas novērtējumu kritēriji statistiskajā slogojumā

Iegūtajām summārā skaita atkarībām no slogojuma ir vienāds AE summārā skaita izmaiņu raksturs katram izmēģinājumu paraugam: lēnā AE pieaugums posmus nomainu posms ar tā strauju palielināšanos (5.44. att.). Daži autori atklāja šīs likumsakarības gan statistiskajiem, gan cikliskajiem slogojumiem [66,126].

Minēto posmu krustojanos veido leņķi α [52,53,66,126].



5.44. att. Summārā skaita (N_{AE}) atkarības no slogojuma (P) grafiks relatīvās vienībās paraugiem ar iezīmētu leņķi α :

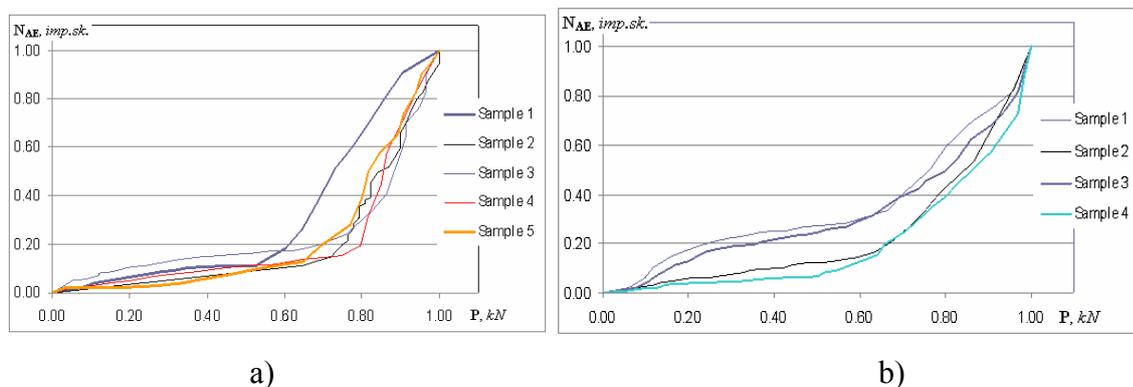
a) ar transversālu šķiedru izvietojumu; b) ar garenisku šķiedru izvietojumu

Paraugiem ar garenisku šķiedru orientāciju šis lūzums sākas rajonā no 60 līdz 70 % (5.45. att., a), kas liecina, ka materiālā notiek matricē plaisāšana ar turpmāku delamināciju, kas noslēdzas ar nesošo šķiedru sagrūšanu, kā rezultātā paraugs pilnībā sagrūst.

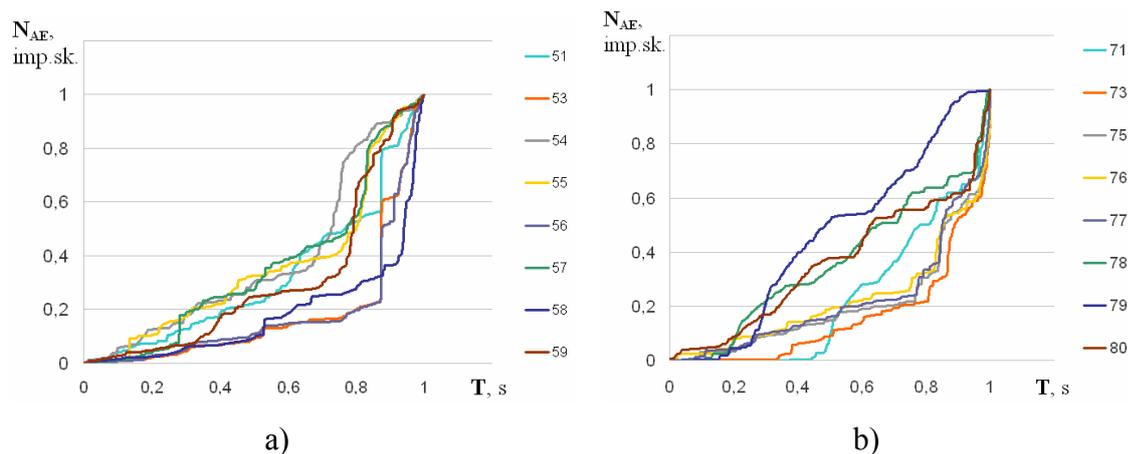
Paraugiem ar transversālu šķiedru orientāciju šis lūzums sākas rajonā no 60 līdz 75 % (5.45. att., b), kas liecina, ka materiālā notiek matricē plaisāšana ar turpmāku delamināciju, kas noslēdzas ar saistošo šķiedru sagrūšanu, kā rezultātā paraugs pilnībā sagrūst.

Krusteniskas formas paraugiem šis lūzums sākas rajonā no 80 līdz 90 % (5.46. att., a), kas liecina, ka materiālā notiek matrices plaisāšana ar turpmāku delamināciju, kas noslēdzas ar nesošo šķiedru sagrūšanu, kā rezultātā paraugs pilnībā sagrūst.

Maltas krusta formas paraugiem šis lūzums sākas 90 % rajonā (5.46. att., b), kas liecina, ka materiālā notiek matrices plaisāšana ar turpmāku delamināciju, kas noslēdzas ar saistošo šķiedru sagrūšanu, kā rezultātā paraugs pilnībā sagrūst.



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



5.46. att. Summārā skaita (N_{AE}) atkarības no slogojuma (P) grafiks relatīvās vienībās:
a) krusteniskas formas paraugiem; b) Maltas krusta formas paraugiem

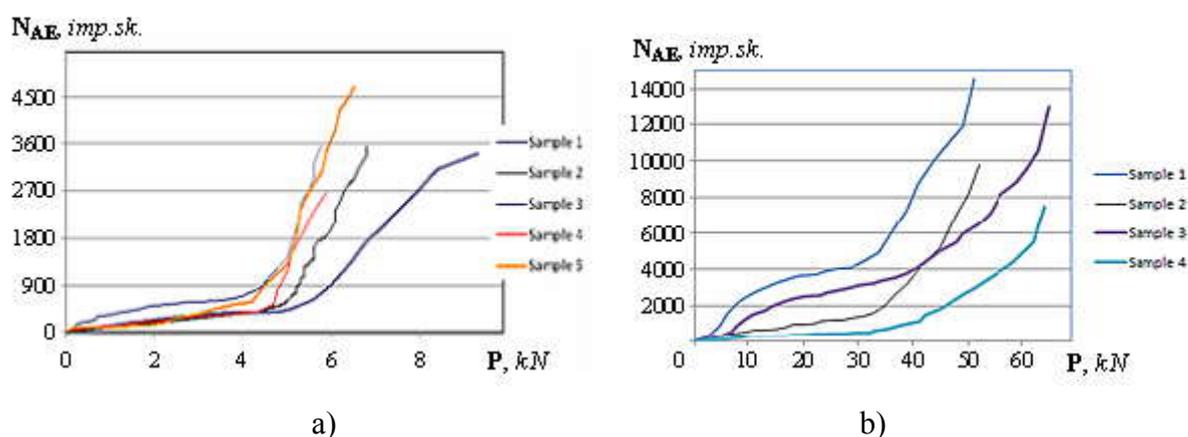
Šī leņķa veidošanās raksturo degradācijas procesa sākšanos, tas saglabājas līdz pat sagrūšanai.

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

5.1.5.2. KM sagraušanas intensitātes novērtēšanas akustiskās emisijas kritērijs

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

Grafiks 5.47. att. raksturo šo likumsakarību, apstiprinot, ka pie mazākām leņķa α vērtībām paraugs sagraūst pie lielākām slodzēm [51].



5.47. att. Summārā skaita (N_{AE}) atkarības no slogojuma (P) grafiks:

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

5.1.5.3. Kompozītmateriāla konstrukciju sagraušanas veida noteikšanas akustiskā emisijas metode

Veicot pētījumu rezultātu analīzi, tika atklātas divas galvenās summārās AE izmaiņu sakarības, kas ir parādītas 5.48. att. (a un b) relatīvās vienībās [1,14,22].

Dotā KM sagraušanas rakstura novērtējuma metode tika patentēta [1].

Kad slodzes vektors iedarbojās gar šķiedrām, tika novērota vienmērīga summārās AE palielināšanās (summārās AE izmaiņas gradients bija mainīgs un sasniedza maksimumu pirms sagraušanas, sk. 5.45. att., b).



a)

b)

5.48. AE atkarība no slodzes:

a) galvenokārt šķiedru sagrūšanas gadījumā; b) galvenokārt matricas sagrūšanas gadījumā (■ — konstrukcijas sagrūšanas brīdis)

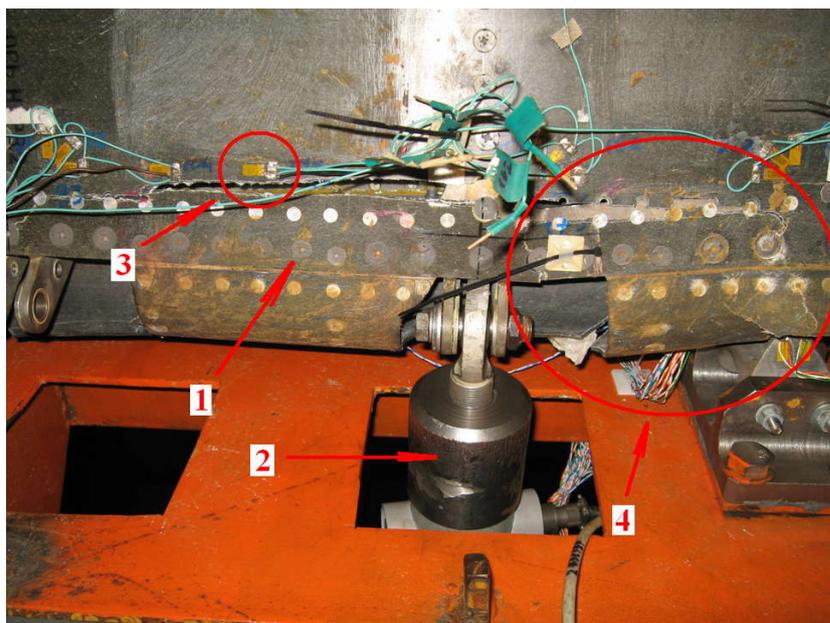
Kad slodzes vektors iedarbojās perpendikulāri šķiedru virzienam, palielinoties slodzei, tika novērots no diviem posmiem sastāvošs summārās AE raksturojums (sk. 5.45. att., a): pirmajā posmā summārā AE palielinājās ar mazu ātrumu, otrajā — summārā AE palielinājās ar ievērojami lielāku ātrumu. Bojājuma analīze parādīja, ka sagruva matrice: notika materiāla delaminācija bez nesošo šķiedru sagrūšanas. Tādā veidā šāds summārās AE izmaiņu raksturs liecina par kompozītmateriāla matricas sagrūšanu.

5.2. Reālu kompozītmateriālu aviācijas konstrukciju bojājamības novērtējums

5.1. nodaļā iegūtie paraugu eksperimentālie dati ļāva noteikt to bojājamības novērtējuma kritēriju, balstoties uz AE mērījumu datiem. Lai novērtētu to pielietojamību praksē reālu konstrukciju bojājamības kontrolei, tika veikti atbilstoši stenda resursa izmēģinājumi ar AE metodes pielietojumu [50].

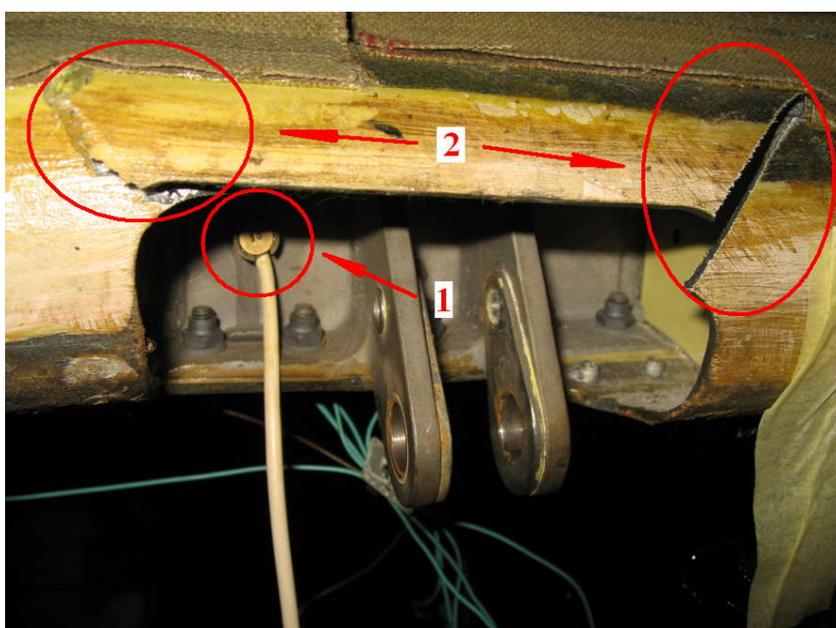
Reālu konstrukciju no KM izmēģinājumu metodika un pielietojamais aprīkojums, kā arī AE signālu reģistrācijas metodoloģija aprakstīti dotā darba 3. nodaļā. Par izmēģinājumu un kontroles objektu tika izvēlēts tuvas maģistrāles lidmašīnas spārna elerons (sk.p.3.2.3.).

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 būsteri sastādīja $P_B = 56,3$ kN (5742 kg). Sagrūšana tika konstatēta maketa būstera stiprināšanas zonā. Elerona apakšējā paneļa sagrūšanas skats parādīts 5.49. att., bet elerona priekšējā gala skats parādīts 5.50. att.



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

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



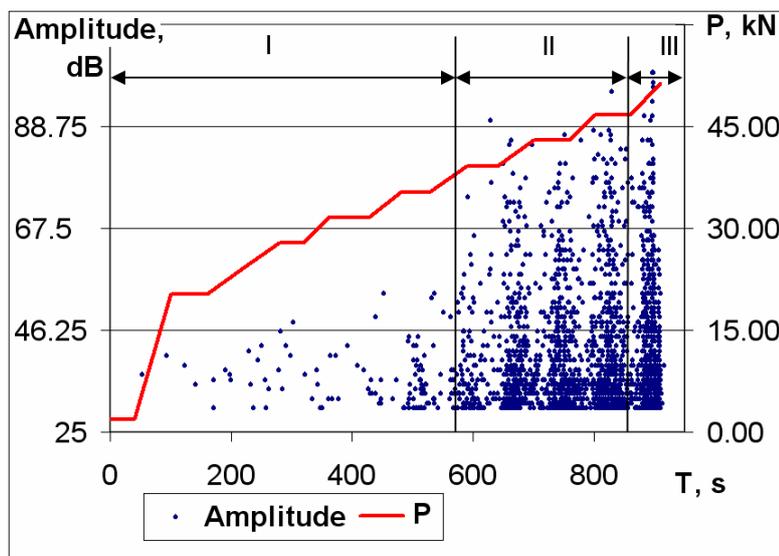
5.50. att. Elerona deguna sagrūšana no augšējā paneļa puses pjezopārveidotāja (AE devēja)

stiprinājuma vietā:

1 — AE devējs; 2 — sagrūšanas vietas

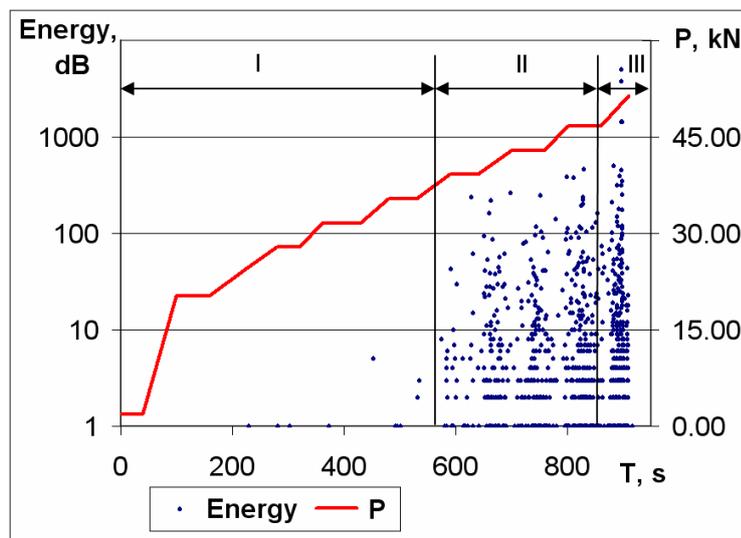
Elerona sagrūšanas procesu var raksturot, balstoties uz informatīvu AE parametru analīzi [50]. Turklāt, tāpat kā paraugiem no KM, elerona sagrūšanas procesam ir raksturīgas trīs pamatstadijas. Piemēram, AE signālu amplitūdas atsevišķajām sagrūšanas stadijām vidēji

mainījās sekojošā veidā (5.51. att.): pirmajai stadijai — līdz 60 dB, otrajai — līdz 90 dB un trešajai — līdz 100 dB.



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

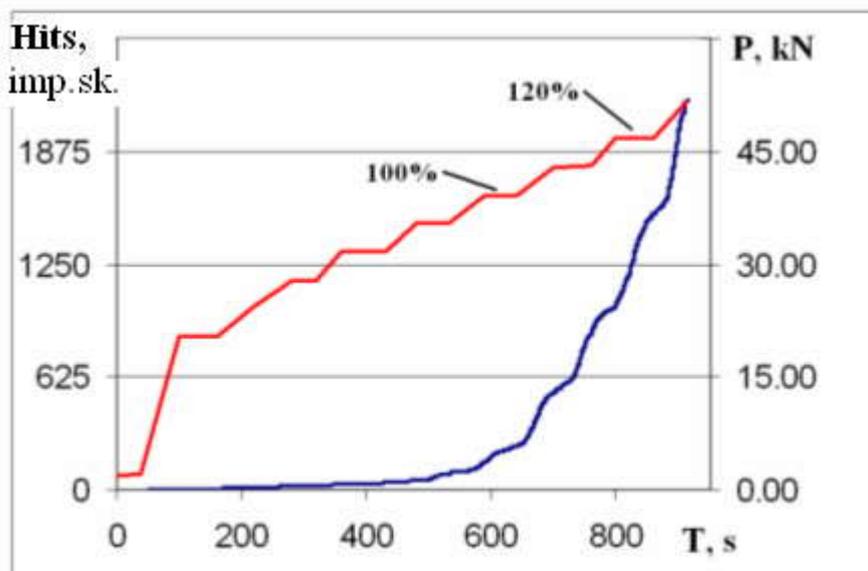
Sagrūšanas procesa stadiju secību visspilgtāk raksturo AE signālu enerģijas izmaiņas grafiks pēc laika (5.52. att.). Pirmajā stadijā enerģijas vērtība nepārsniedz 10 dB. Otrajā stadijā enerģijas vērtības sasniedz 500 dB, trešajā — līdz 5000 dB.



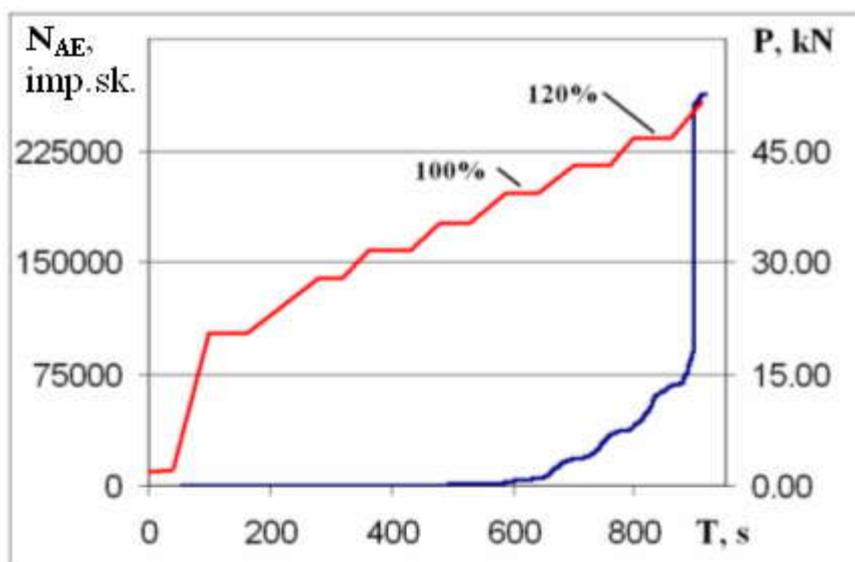
5.52. att. AE signālu enerģijas (E) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)

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 (5.53., 5.54., 5.55. att.).

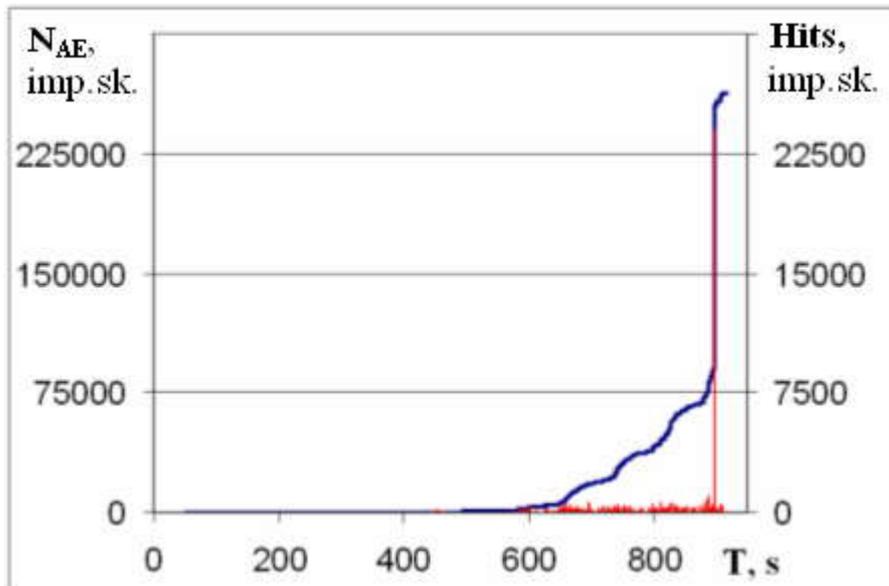
No iegūtiem datiem (5.53., 5.54., 5.55. att.) var secināt, ka elerona konstrukcijas intensīva sagrašanās tika novērota slogojuma etapā līdz 100 % no sagrašanās slodzes, bet turpmākajam sagrašanās procesam bija katastrofisks raksturs līdz pat pilnīgai sagrašanai, kas iestājās, sasniedzot 129 % no sagrašanās slodzes.



5.53. att. AE impulsu summas ($Hits$) un slodzes (P) izmaiņas laikā (T)



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



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

Ekspierimentālie 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, mm^2), kurš ļauj noteikt bojājuma laukumu.
 - b) Piedāvāta jauna metālisku materiālu un konstrukciju nogurumizturības novērtējuma metode, kuru 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 slogojuma režīmos un paņēmienu, 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 sagrūst – 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 pieļaujamas 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. Nasibullins A., Banovs M. *Noguruma plaisas rašanās un attīstības kontrole ar akustiskās emisijas metodi*// 48. RTU studentu zinātniskās konferences materiāli. – 2007. – 185.–185. lpp.
6. Urbahs A., Banovs M., Doroško S. *Kuģa gāzturbīnu dzinēju kompresoru disku akustiskās emisijas kontrole*// *Maritime Transport and Infrastructure* – 2010. – 2010. – 93.–98. lpp.
7. 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.
8. 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.
9. *20-Channel Loading System “SERVOTEST”, OPERAITING AND MAINTENANCE MANUAL*, 1980. – 105 p.
10. Banov M., Doroshko S., Nasibullin A., Turko V. *Undercarriage fatigue test control by acoustic emission method*// *Ultragarsas.* – 2006. – N2(59). – 16–18 p.
11. 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.
12. 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.
13. Berrier D. *Vandenberg ground support equipment for the space shuttle*// *AIAA Paper.* – 1981. – N294. – 1–13 p.

14. Doroshko S., Harbuz Y. *Acoustic emission analysis of fatigue crack development// Mechanika – 2012. – 2012. – 73–76 p.*
15. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C.A. *Fracture analysis by use of acoustic emission// Eng. Fract. Hech. – 1968. – V1, N1. – 105–122 p.*
16. Ebert L.J., Gadd J.D. *A Mathematical Model for Mechanical Behavior of Interfaces in Composite Materials// Metals Park. – 1965. – 89–113 p.*
17. Eisenblatter I. *Schall emissions analyse// Ein neues zerstörungsfreies Prüfverfahren. – 1972. – Bd.11, N10. – 62–67 s.*
18. Elber W. *Fatigue crack closure under cyclic tension// Engineering Fracture Mechanics. – V2, N1. – 1970. – 37–44 p.*
19. Euro Standard EN 1330-9: 2000. *Terms. Acoustic Emission Conceptions.*
20. Euro Standard EN 13554: 2002. *Acoustic Emission. General regulations.*
21. Gerberich W.W., Alteridge D.G., Lessar I.F. *Acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture// Met. Trans. – 1975. – V6, N2. – 797–801 p.*
22. Harbuz Y., Chepusov A. *Methods of acoustic emission diagnostics of pre-destruction state// Transport means 2012. – 2012. – 228–231 p.*
23. Hartbower C.E., Reuter W.G., Horais C.F. *Acoustic emission for the detection of weld and stress – corrosion cracking// Acoustic emission. – 1972. – 187–221 p.*
24. Herrmann L.R., Pister K.S. *Composite properties of Filament – resin systems// ASME Paper. – 1963. – N63-WA-239.*
25. Hill R., Stephens R. *Sonic emission during deformation of solids// Arch. Akust. – 1971. – V6, N1. – 45–57 p.*
26. Huguet S., Godin N., Gaertner R., Salmon L., Villard D. *Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester// Composites Science and Technology. – 2002. – N62. – 1433–1444 p.*
27. Hutton P.H., Skorpik I.R. *In – flight fatigue crack monitoring using acoustic emission// ISA Trans. – 1981. – V20, N1. – 59–63 p.*
28. ISO 12716:2001. *Non-destructive testing – Acoustic emission inspection – Vocabulary.*
29. ISO 6892-1:2009. *Metallic materials. – Tensile testing. – Part 1: Method of test at room temperature.*
30. Kaiser J. *Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugleichprüfung von metallischen Werkstoffen// Archiv für das Eisenhüttenwesen. -1953. – H.1/2. – 43–45 s.*

31. Kies J.A. *Maximum strains in the resin of fibre – glass composites*// *NRL Rep.* – N5752. – 1962.
32. McElroy J. *Acoustic emission warning system for a fiberglass member*// *US 4317368 G01H 1/00.* – 1982.
33. 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.
34. Nasibullin A., Urbahs A., Banov M. *Acoustic emission monitoring of fatigue crack origination during titanium specimens tests* // *RTU zinātniskie raksti.* – 2010. – Ser. 6, Sēj. 34. – 61–67. lpp.
35. Parrish B. *Acoustic emission techniques for in flight structural monitoring*// *SAE Technical Paper Series.* – 1960. – N8. – 14–19 p.
36. Pless W.H. *Acoustic emission detection of fatigue crack growth in a production – size aircraft wing test article under simulated flight loads*// *Materials Evaluation.* – 1978. – V36, N5. – 41–46 p.
37. Pollock A. *Metals Handbook*// *ASM International.* – 1989. – 9th Ed., V17. – 278–294 p.
38. Radon I.C., Pollock A.A. *Acoustic emission and energy transfer during crack propagation*// *Eng. Pract Mech.* – 1972. – V4, N2. – 295–310 p.
39. Shaniavski A. *Modeling of Fatigue Cracking of Metals. Synergetics for Aviation.* – Ufa: *Publishing House of Scientific and Technical Literature “Monograph”,* 2007. – 500 p.
40. Shaniavski A., Banov M., Zaharova T. *Principles of physical mesomechanics at the nanostructure level of fatigue of metals. Part I. Model of nucleation of fatigue cracks under the surface of titanium alloy BT3 – 1*// *Physical mesomechanics.* – 2010. – V13, N1. – 61–72 p.
41. 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.
42. Shaniavski A., Urbahs A., Banov M., Nasibullin A., Carjova K. *Analysis of the mechanism of destruction of aircraft components*// *International Congress on Engineering and Tehnology.* – 2013. – 167–172 p.
43. Tatro C. A., Liptal R. G., Harris D. O. *Acoustic emission technique in materials research*// *J. Nondestructive Testing.* – 1971. – V3, N3. – 215–275 p.

44. Tetelman A., Chow R. *Acoustic emission testing and microcracking processes// Acoustic Emission.* – 1972. – 30–40 p.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Urbahs A., Banov M., Doroshko S., Turko V. *Non-destructive inspection of aircraft landing gear during residual strength testing// Ultragarsas=Ultrasound.* – V64, N1. – 2009. – 43–45 p.
49. Urbahs A., Banov M., Doroshko S., Turko V. *Non-destructive inspection of aircraft landing gear during residual strength testing // ULTRAGARSAS.* – V64, N1. – 2009. – 43–45 p.
50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. 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.
55. Urbahs A., Doroshko S., Banov M., Nasibulin A. *Fatigue crack growth assessment tool design cyclic checks// LR patents LV 13853 B.* – 2009.

56. Urbahs A., Harbuz Y., Urbaha J. *Evaluating Of Damageability Of Materials At Fatigue Loading Based On Signals Of Acoustic Emission*// *Mechanika* – 2015. – 2015. – p.
57. Urbahs A., Shaniavski A., Banov M., Carjova K. *Evaluation of an Acoustic Emission Criterion of Under Surface Fatigue Cracks Development Mechanism in Metals*// *Transport means* – 2012. – 2012. – 131–134 p.
58. 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.
59. Wakayama Shuichi, Ikeda Chikako, Ikeda Junji. *AE monitoring of microdamage during proof test of bioceramics for artificial joints*// *Journal of Acoustic Emission*. – 2006. – V24. – 228–233 p.
60. Whitney J.M. *Stress analysis of thick laminated composite and sandwich plates*// *Composite Mater.* – V6. – 1972. – 426–440 p.
61. Wood B.R.A. *The use of acoustic emission for structural integrity assurance*// *Nondestructive Testing-Australia*. – 1981. – V18, N6. – 9–15 p.
62. Алешин Н.П., Лупачев В.Г. *Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие*. – Минск: Вышшая школа, 1987. – 264 с.
63. Архирейский А.А., Рассоха Е.Н. *Статистическая обработка данных о надежности: Методические указания к выполнению расчетно-графической работы*. – Оренбург: ГОУ, 2004. – 35 с.
64. Банов М.Д., Коняев Е.А., Урбах А.И. *Оценка долговечности конструкционных материалов ГТД по параметрам АЭ*// *Диагностирование и прогнозирование технического состояния ГТД*. – 1985. – 13–16 с.
65. Банов М.Д., Коняев Е.А., Романов В.М., Урбах А.И. и др. *Разработка методики и аппаратуры для определения усталостной долговечности лопаток турбин ГТД*// *Совершенствование методов технической эксплуатации летательных аппаратов*. – Рига: РКНИИ ГА, 1985. – 67–69 с.
66. 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.
67. Банов М.Д., Коняев Е.А., Троенкин Д.А. *Способ контроля усталостных трещин* // *А.С. СССР №1070469*. – 1982.
68. Банов М.Д., Урбах А.И. *Акустикоэмиссионное устройство для контроля качества изделия*// *А.С. SU N 1523992*. – 1989.

69. Банов М.Д., Урбах А.И. Способ контроля газораспределения поршневых двигателей// А.С. N 4914062106 – 1991.
70. Баранов В.Н., Молодцов К.И. Акустикоэмиссионные приборы ядерной энергетики. – Н.: Атомиздат, 1980. – 144 с.
71. Беды П.И. Дефектоскопия деталей при эксплуатации авиационной техники. – Москва: Воениздат, 1978. – 231 с.
72. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Изд. “Наука”, 1983. – 415 с.
73. Боровиков А.С., Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В. Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии. – Минск: Наука и Техника, 1983. – 356 с.
74. Бородин Ю.П. Техническая диагностика конструкции планера самолета с использованием метода акустической эмиссии// Тез. Докл. Всесоюзной НТК „Акустическая эмиссия материалов и конструкций”. – 1984, – Ч.11. – 91–92 с.
75. Вакара К.Б. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
76. Верременюк 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.
77. Волъкенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 211 с.
78. Воскобойник М.С., Максютинский П.Ф. Конструкция и прочность летательных аппаратов гражданской авиации. – М.: Машиностроение, 1991. – 448 с.
79. Выборнов Б.И. Методы неразрушающего контроля качества материалов и изделий авиационной техники. Часть 1. – М.: Машиностроение, 1980. – 104 с.
80. Выборной Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
81. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка. – М.: Статистика, 1978. – 248 с.
82. Гвинтовкин И.Ф., Стояненко О.М. Справочник по ремонту летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1977. – 312 с.
83. Гвинтовник И.Ф., Стояненко О.М. Справочник по ремонту летательных аппаратов. – Транспорт, 1977. – 311 с.
84. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 22 с.
85. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В. В. Неразрушающий контроль. Книга 3. Электромагнитный контроль. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.

86. Гишваров А.С. Анализ эксплуатационных разрушений летательных аппаратов и двигателей. Уч. Пособие. – Уфа: УГАТУ, 2003. – 289 с.
87. Голего Н.Л. Ремонт летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1984. – 422 с.
88. ГОСТ 24778 – 81. Пластмассы. Метод определения прочности при сдвиге в плоскости листа. (ICS 83.120: Reinforced plastics).
89. ГОСТ 27677 – 88. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
90. ГОСТ 6794 – 75. Масло АМГ-10. Технические условия.
91. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. -М.: Изд-во стандартов, 1976. – 372 с.
92. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. – Н.: Наука, 1983. – 106 с.
93. Донин А.Р. Расчет долговечности сварных изделий по активности акустической эмиссии. – М.: Дефектоскопия, 1980, №6. – 52–57 с.
94. Дробот Ю.Б., Грешников В.А. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
95. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико – эмиссионным методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
96. Зенушкин В.Н., Макин Ю.Н., Груздков С.К. Ремонт ЛА и АД: пособие по проведению слесарно-механической практики. – М.: МГТУ ГА, 2004. – 86 с.
97. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 181 с.
98. 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.
99. Кацман Ю.Я. Статистическая обработка экспериментальных данных: методические указания к лабораторным работам. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 38 с.
100. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – Москва: Наука, 1974. – 312 с.
101. Колмогоров В.Д., Соседов В.Н. Прибор акустико – эмиссионный АФ – 15. Руководство по эксплуатации ЩЮ2.739.018 РЭ. – Кишинев: Волна, 1983. – 118 с.
102. Коняев Е.А., Банов М.Д., Урбах А.И. и др. Исследование, разработка и внедрение методов контроля усталостных повреждений турбины двигателя НК – 8 – 2У при ремонте// Отчет о НИР. – N0288/066382. – 1988.

103. Коняев Е.А., Зуев А.Е., Вайнберг В.Е., Банов М.Д., Павелко В.П. Способ измерения скорости роста усталостной трещины в листовом материале// А.С. СССР №725020. – 1978.
104. Кортен Х.Т. Разрушение армированных пластиков. – М.: Химия, 1967. – 165 с.
105. Кручинский Г.А. Технологические процессы ремонта летательных аппаратов и авиационных двигателей: учеб. пособие. – М.: МГТУ ГА, 2002. – Ч.3. – 217 с.
106. Крылов К.А., Хаймзон М.Е. Долговечность узлов трения самолетов. – М.: Транспорт, 1976. – 183 с.
107. Лозовский В.Н., Бондал Г.В., Каксис А.О., Колтунов А.Е. Диагностика авиационных деталей – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
108. Макин Ю.Н. Основы производства ЛА и АД. Конструкции их композиционных материалов. Текст лекций. – М.: МГТУГА, 2007. – 187 с.
109. Макин Ю.Н., Ерошкин А.Н., Комиссарова О.В. Основы производства ЛА и АД: текст лекций. – М.: МГТУГА, 1996. – 140 с.
110. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению.– Москва: Машиностроение, 1973. – 200 с.
111. Методическое руководство по применению капиллярных методов неразрушающего контроля для оценки технического состояния изделий авиационной техники. – М.: МГА, 1982. – 109 с.
112. МИ 572 – 84. Методические указания. Прибор акустико – эмиссионный ГСП Аргус – 7 АФ – 15. Методика проверки. – Введ. 1984.
113. Михайлов С.П., Щербинин В.Е. Физические основы магнитографической дефектоскопии. – М.: Наука, 1992. – 240 с.
114. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. – 245 с.
115. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1987. – 217 с.
116. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – К.: Наукова думка, 1977. – 277 с.
117. Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике. – М.: Наука, 1998. – 239 с.
118. Попов П.М., Соколова О.Ф. Проектно – технологические и управленческие функции по конструкции самолетов (ЛА). Правила их формулирования: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 274 с.

119. Прибор акустико – эмиссионный АФ – 15: Руководство по эксплуатации ЩЮ 102. 739.018 РЭ. – Кишинев: ВНИИНК, 1983. – 118 с.
120. Прибор акусто-эмиссионный АФ-15. Руководство по эксплуатации ШЮ 2.739.018 РЭ. – Кишинев: ПО „Волна”, 1987. – 14 с.
121. Ривин Г.Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: учеб. пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 75 с.
122. Самолет Ту-154, Ту-154А, Ту-154Б. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. Книга 5, часть 2. Шасси – М.: Машиностроение, 1974. – 285 с.
123. Селихов А.И., Лешаков П.С. Внешние нагрузки на прочность летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1968. – 287 с.
124. Смирнова Н.Н. Техническая эксплуатация летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1990. – 423 с.
125. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико – механические аспекты. – Ростов: РГУ, 1986. – 157 с.
126. Урбах А.И. Диагностика повреждений и прогнозирование разрушений авиационных конструкций акустико – эмиссионным методом. – Рига: РАУ, 1996. – 123 с.
127. Урбах А.И. Критерии эффективности промышленного акустико – эмиссионного контроля// Труды РАТИ. – 1992. – 21–27 с.
128. Урбах А.И., Романов В.Н., Банов Н.Д., Коняев Е.А. Методика и аппаратура диагностики состояния силовых элементов авиадвигателей с использованием акустической эмиссии// Применение неразрушающих методов контроля в промышленности. – 1981. – 37–38 с.
129. Урбах А.И., Муховецкий Ю.П. Исследование возможности акустико – эмиссионного контроля титановых дисков для выявления нитридных включений и субмикротрещин. – Технический отчет предприятия п/я В – 8683, N 024 – 0575, Рыбинск, 1993. – 38 с.
130. Acoustic Emission: Diagnostikas jaunumi / Internets. – <http://www.acousticemission.net/medical.asp>
131. NDT Resource Centr: Introduction to Ultrasonic Testing / Internets. – <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/description.htm>
132. Pocket AE-2™: Portable 2-Channel Acoustic Emission System: Product Bulletin / Internets. – [http://www.pacndt.com/downloads/Pocket %20AE-2_46-06.pdf](http://www.pacndt.com/downloads/Pocket%20AE-2_46-06.pdf)

133. *Temp. & Humid. Chambers: Product Bulletin / Internets.* –
http://www.adymis.com/files/project_3641/Lab_Kompanion/171-175._klimaticheskaya_kamera_TH-TG_Models.pdf.
134. *Ближнемагистральный пассажирский самолёт Sukhoi Superjet 100 (SSJ): raksts / Internets.* – http://www.uacrussia.ru/ru/models/civil/superjet_100/
135. *Инновации: raksts / Internets.* – http://www.fea.ru/FEA_news_1759.html
136. *Российский авиалайнер Sukhoi Superjet-100 (SSJ-100): raksts / Internets.* –
<http://forum.meta.ua/topic/p/6538937.html>
137. *Самолет Sukhoi Superjet-100: летно-технические характеристики: izziņa / Internets.* – <http://lprime.ru/News/20120509/752508815.html>
138. *Самолет Sukhoi Superjet-100: летно-технические характеристики: raksts / Internets.* – <http://www.avianews.com.ua/2012/07/19/samolet-sukhoi-superjet-kharakteristika/>
139. *Самолет Ту-154 (Туполев): raksts / Internets.* – http://www.mskavia.ru/?page_id=806
140. *Самолет Ту-154: izziņa / Internets.* – <http://www.aero-news.ru/tu-154/>
141. *Самолет Ту-154: летно – технические характеристики: izziņa / Internets.* –
<http://ria.ru/spravka/20100410/220437195.html>
142. *Статистика в аналитической химии: raksts / Internets.* –
<http://chemstat.com.ru/node/17>
143. *Статистика: raksts / Internets.* – <http://www.kryaradm.ru/old/stat/qvybor4.html>
144. *Статистическая помощь: raksts / Internets.* – <http://www.stathelp.ru/ots/g7p7.html>
145. *Суперджет 100: raksts / Internets.* – <http://avia.pro/blog/superdzhhet-100>
146. *Ту-154: izziņa / Internets.* – <http://www.vesti.ru/doc.html?id=302072&cid=380>
147. *Что мешает подняться ввысь новым авиа- и автомоделям: raksts / Internets.* –
<http://moole.ru/blog/mmc/news/263409-что-meshaet-podnjatsja-vvys-novym-avia-i.html>
148. *Шасси: izziņa / Internets.* – http://cnit.ssau.ru/virt_lab/shassi/index.htm

PIELIKUMI

1. pielikums

Visbiežāk sastopamo KM konstrukciju defektu tabula

Metode un lietošanas ieteikumi	Prasības izstrādājuma virsmai un defekta dobumam	Konstatējamā defekta tips	Metodes izšķirtspēja
1	2	3	4
Kapilāru metode	Defekta virsmā nav pieļaujama vielu klātbūtne; nav pieļaujami kontrolējamās virsmas pārklājumi. Rz 10–20	Jebkurš virsmas defekts	Defekti ar atvērumu no 0,1 μm līdz 0,3–0,4 mm. Defekta dziļums 10 reizes lielāks par atvērumu. Ticamība ir atkarīga no virsmas ģeometrijas
Ultraskaņas metode (pietiek ar vienpusēju piekļuvi kontrolējamā objekta virsmai)	Pārklājumi un nepiederošas vielas defekta dobumā samazina kontroles ticamību. RA 2,5	Jebkurš defekts neviendabības vai struktūras neviendabības veidā. Gan virsmas, gan zem virsmas defekti	Virsmas defekts — atvērums 0,1 μm, dziļums 0,1 mm. Zem virsmas defekti dziļumā līdz 2–2,5 m ar atstarojošu virsmu ne mazāku par 0,3 mm
Virpuļstrāvu metode (obligāta divpusēja piekļuve pie kontrolējamā izstrādājuma virsmām)	Nav pieļaujami elektrovadoši pārklājumi. Rz20	Virsmas UT	Atvērums 0,05 mm, dziļums 0,2 mm
Radiācijas metode (obligāta divpusēja piekļuve pie kontrolējamā izstrādājuma virsmām). Jālieto, ja nav iespējams izmantot citas NK metodes		Gan izstrādājuma virsmā, gan tilpumā	Atvērums vairāk par 0,1 mm biezumam līdz 40 mm, bet augstāk — ne mazāk kā 25 % no biezuma

1. pielikuma turpinājums

1	2	3	4
Magnētiskā pulvera metode (obligāta divpusēja piekļuve pie kontrolējamā izstrādājuma virsmas). Var lietot tikai feromagnētiskiem materiāliem	Nepiederošu vielu, oksidēšanās vai plāvas atrašanās nav pieļaujama. Magnētiskas neviendabības metinātajos savienojumos nav pieļaujamas	Virsmas un zemvirsmas defekti.	Virsmas defekts — atvēruma 1 μm, dziļums 3 mm. Zemvirsmas defekti — 1,5-2 mm dziļumā

2. pielikums

Tradicionālo nesagraujošās kontroles metožu kopsavilkuma tabula [4]

Metode un lietošanas ieteikumi	Prasības izstrādājuma virsmai un defekta dobumam	Konstatējamā defekta tips	Metodes izšķirtspēja
1	2	3	4
Kapilāru metode	Defekta virsmā nav pieļaujama vielu klātbūtne; nav pieļaujami kontrolējamās virsmas pārklājumi. Rz 10–20	Jebkurš virsmas defekts	Defekti ar atvērumu no 0,1 μm līdz 0,3-0,4 mm. Defekta dziļums 10 reizes lielāks par atvērumu. Ticamība ir atkarīga no virsmas ģeometrijas
Ultraskaņas metode (pietiek ar vienusējū piekļuvi kontrolējamā objekta virsmai)	Pārklājumi un nepiederošas vielas defekta dobumā samazina kontroles ticamību. RA 2,5	Jebkurš defekts neviendabības vai struktūras neviendabības veidā. Gan virsmas, gan zem virsmas defekti	Virsmas defekts — atvērums 0,1 μm, dziļums 0,1 mm. Zem virsmas defekti dziļumā līdz 2-2,5 mm ar atstarojošu virsmu ne mazāku par 0,3 mm
Virpuļstrāvu metode (obligāta divpusēja piekļuve pie kontrolējamā izstrādājuma virsmām)	Nav pieļaujami elektrovadoši pārklājumi. Rz 20	Virsmas UT	Atvērums 0,05 mm, dziļums 0,2 mm
Radiācijas metode (obligāta divpusēja piekļuve pie kontrolējamā izstrādājuma virsmām). Jālieto, ja nav iespējams izmantot citas NK metodes		Gan izstrādājuma virsmā, gan tilpumā	Atvērums vairāk par 0,1 mm biezumam līdz 40 mm, bet augstāk — ne mazāk kā 25 % no biezuma

2. pielikuma turpinājums

1	2	3	4
Magnētiskā pulvera metode (obligāta divpusēja piekļuve pie kontrolējamā izstrādājuma virsmas). Var lietot tikai feromagnētiskiem materiāliem	Nepiederošu vielu, oksidēšanās vai plāvas atrašanās nav pieļaujama. Magnētiskas neviendabības metinātajos savienojumos nav pieļaujamas	Virsmas un zemvirsmas defekti.	Virsmas defekts — atvērums 1 μm , dziļums 3 mm. Zemvirsmas defekti — 1,5-2 mm dziļumā

3. pielikums

Izmēģinājumu iekārtas WPM galvenie tehniskie parametri

Parametra nosaukums	Vērtība
1	2
1. Pētāmo paraugu skaits	1
2. Gabarīti, mm	3000x3000x5000
3. Slogojuma kanālu skaits	1
4. Maksimālā statiskā slodze, kN	200
5. Maksimālā slogojuma frekvence, Hr	25
6. Dinamisko slogojumu maksimālā amplitūda, kN	200
7. Aktīvās sprūdes darba gaita, mm	100
8. Patērētā elektroenerģija, kW	0,5
9. Maksimālā darba spiediena vērtība hidrosistēmā, mPa	15,0
10. Elektropadeves spriegums	1 fāze, 220 V, 50 Hz
11. Eļļas sūkņu stacijas ražīgums, l/min	200
12. Eļļas sūkņu stacijas spiediens, kg/cm ²	210
13. Mērījumu kanālu skaits	2
- tenzometrisku tiltu	2
14. Tenzodevēji	
- nominālā pretestība, Ω	200,4 +/- 0,2
- veids	KF5P1- 10 – 200 – A – 12

3. pielikuma turpinājums

1	2
- jutība	2,17
15. Nominālā temperatūra, °C	15 +/- 10 °C

4. pielikums

TH – TG – 1500 modeļa mitrumpiesātinājuma kameras tehniskais raksturojums

Parametra nosaukums	Vērtība
1	2
1. Kameras tilpums, l	1500
2. Temperatūra, °C	5 līdz 100
3. Mitrums, %RH	20 līdz 95
4. Dzesētājs	Gaisa dzesētājs
– noslodze, V	470x2
5. Sildītājs	Ni – Cr vadi
– noslodze, V	3000
6. Sensori	
– temperatūras	Pt 100
– mitruma	elektroniskais
6. Gaisa sūkņi	4 ventilatori
– noslodze, V	4x60 V
7. Gabarītmēri (G x P x A), mm	
iekšējie	1000x1000x1500
ārējie	1450x1900x2065
8. Svars, kg	2065
9. Barošanas spriegums, V	1 fāze, 220 V, 50 Hz

5. pielikums

5. p., 1. tab.

Dati paraugiem ar garenisku šķiedru orientāciju, kas netika pakļauti sākotnējai sloģošanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μ s	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
1	28	2560	1174	759	67	47
7	39,6	2278	1840	690	66	42
2	19,1	2543	1068	711	72	49
3	18	2208	1884	809	56	24
4	20	2198	1085	809	56	24
5	18	2616	1526	977	69	34
8	23	2832	1086	611	72	39
6	21	2473	1007	709	76	24
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μ s	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
1	45	1160	2380	1401	79	428
2	53,8	1078	2763	1701	79	128
3	48,1	743	2880	1988	78	437
4	41	808	2473	1488	78	266
5	37	1098	2130	2000	73	318
6	43	916	2953	2000	73	318
7	38	832	2521	1988	78	266
8	44	773	2974	1990	81	274
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μ s	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
1	60	3315	15850	2000	100	1497
2	57,8	2836	16267	1937	98	1114
3	55,1	3472	14807	2000	100	1317
4	52	2648	15040	2000	100	1612
5	54	2986	15743	2000	100	1436
6	55	3632	15937	2000	100	1725
7	57	3582	14811	2000	100	1725
8	61	2616	15231	2000	100	1436

Dati paraugiem ar garenisku šķiedru orientāciju, kas tika pakļauti sākotnējai sloģošanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μs	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
12	22	18	155	1251	65	17
14	21	21	248	1394	67	11
15	19,1	36	168	1377	70	34
11	18	22	330	1292	64	23
13	19	18	295	1892	67	29
16	18	44	369	1457	72	16
19	23	37	376	1457	72	16
20	31	33	351	1955	72	13
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μs	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
12	36	262	2062	1998	85	621
14	27,4	154	1898	1912	84	453
15	43,1	452	3280	1890	79	581
11	41	275	2605	1996	86	397
13	35	121	1286	1940	94	468
16	39	278	1911	2000	87	447
19	28	272	2260	1999	80	375
20	43	181	3390	1932	79	250
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μs	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
12	51,2	2334	13668	1964	97	3706
14	48	2726	11923	2000	100	2612
15	55,1	4488	11295	2000	100	2559
11	52	2517	12253	2000	100	2737
13	53,4	4237	11732	2000	99	2532
16	57,9	3553	10428	2000	100	4140
19	58,5	2774	10813	2000	100	3961
20	62,4	2403	12436	1999	100	3189

Dati paraugiem ar transversālu šķiedru orientāciju, kas netika pakļauti sākotnējai slogošanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μs	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
22	0,6	88	303	1316	62	15
21	0,9	18	81	1468	63	17
23	1,2	53	373	1808	64	17
24	1	105	408	1455	69	13
27	0,6	99	353	1341	62	13
26	1,1	78	559	1745	66	19
29	0,4	16	343	1912	64	22
30	1,2	16	320	1348	64	12
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μs	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
22	4,5	106	465	2000	92	911
21	4,7	552	717	1810	90	393
23	3,8	618	878	2000	87	284
24	4,1	566	616	2000	90	329
27	3,3	585	897	1991	96	384
26	4,4	551	642	2000	93	435
29	4,4	722	628	2000	86	357
30	3,53	110	752	2000	87	352
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μs	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
22	6	2566	4350	2000	100	1955
21	5,7	2405	3818	2000	99	1997
23	6,3	2039	4158	2000	100	1502
24	5,1	2445	4005	2000	100	1713
27	4,9	2057	3494	2000	95	1803
26	5,8	2606	3882	2000	100	1346
20	5,8	2862	4049	2000	98	1592
30	4,3	2253	4497	1950	98	1113

Dati paraugiem ar transversālu šķiedru orientāciju, kas tika pakļauti sākotnējai sloģšanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μs	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
34	2,8	18	55	1251	65	17
35	3,4	21	48	1394	67	11
36	3	36	68	1377	70	34
37	3,6	22	30	1292	64	23
38	1,9	18	95	1892	67	29
31	0,8	44	69	1457	72	16
32	1,3	37	76	1457	72	16
33	1	33	51	1955	72	13
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μs	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
34	4,4	262	206	1998	85	621
35	4,5	154	189	1912	84	453
36	3,8	452	328	1890	79	581
37	4,3	275	260	1996	86	397
38	3,5	121	128	1940	94	468
31	4,1	278	191	2000	87	447
32	3,9	272	226	1999	80	375
33	4,1	181	339	1932	79	250
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μs	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
34	6,4	2334	3666	1964	97	3706
35	6,9	2726	4192	2000	100	2612
36	5,8	4488	4129	2000	100	2559
37	6,2	2517	3825	2000	100	2737
38	5,3	4237	3573	2000	99	2532
31	5,7	3553	4042	2000	100	4140
32	5,8	2774	3081	2000	100	3961
33	6,2	2403	3843	1999	100	3189

Dati krusteniskas formas paraugiem, kas netika pakļauti sākotnējai sloģšanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μ s	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
42	15	426	538	193	66	18
43	16	130	223	223	65	16
44	20,9	90	566	566	67	16
45	16,3	340	538	538	62	13
46	12,1	366	366	302	69	11
47	14,7	62	274	274	63	15
48	14,3	88	564	564	68	21
49	15,7	199	453	453	67	17
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μ s	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
42	31	1298	2540	1349	82	720
43	30,2	503	1940	1841	77	531
44	30,7	383	1343	1996	89	542
45	28,3	1104	2653	1971	74	520
46	27,3	632	2260	1952	74	433
47	26,5	120	1711	1908	74	433
48	28,2	232	1590	1553	84	543
49	26,4	315	1106	1415	79	646

Dati krusteniskas formas paraugiem, kas tika pakļauti sākotnējai sloģošanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μ s	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
51	15	272	396	177	61	9
53	11,7	125	304	153	62	14
54	12,98	355	343	236	66	34
55	9,3	215	191	192	69	11
56	10,1	244	405	143	53	18
57	13,79	287	270	116	61	15
58	12,8	146	148	153	63	10
59	13,53	393	278	121	61	10
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μ s	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
51	29,9	755	1530	374	68	26
53	26,8	721	1221	1331	70	60
54	25,8	589	1086	717	80	70
55	26,3	619	1794	553	84	104
56	27,3	577	402	1378	73	97
57	25,5	588	1219	553	84	104
58	27,2	958	558	1451	69	34
59	23,3	738	979	457	67	35

Dati Malta krusta formas paraugiem, kas netika pakļauti sākotnējai sloģošanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μ s	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
62	2,3	17	140	1742	68	15
61	1,5	30	272	1752	56	35
63	6	24	241	1680	53	12
65	6,63	21	160	1745	63	31
66	5,87	36	206	1894	64	15
70	5,1	14	183	1973	53	38
64	6,18	17	245	1998	61	22
69	7	35	195	1846	56	25
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μ s	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
62	14,5	261	1059	2000	83	224
61	10,9	564	2812	1846	77	214
63	10	396	1552	1846	84	316
65	13,1	483	6428	1997	78	156
66	13,5	279	7904	1995	84	275
70	13,8	414	4137	1825	74	313
64	12,3	455	2371	2000	83	268
69	12,7	379	6001	2000	82	253
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μ s	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
62	16,2	1123	9822	2000	99	2689
61	15,5	804	8940	2000	100	2173
63	15,9	1227	10675	2000	99	3455
65	14,9	934	10208	2000	97	2450
66	15	988	11468	2000	96	3333
70	14,2	1164	8130	2000	100	4036
64	14,7	720	10185	2000	100	3820
69	15	1035	9087	2000	99	3521

Dati Malta krusta formas paraugiem, kas tika pakļauti sākotnējai sloģšanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μ s	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
75	7,9	48	353	1994	68	66
76	7	42	524	1928	71	44
77	8,3	46	304	1780	67	55
71	6,63	37	160	1658	65	37
78	6,76	48	184	1862	73	61
79	5,83	70	266	1862	62	45
73	7,18	21	160	1659	64	69
80	5,2	46	158	1779	64	49
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μ s	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
75	15	710	7485	1892	81	216
76	14,8	564	6142	2000	83	299
77	13,98	665	6937	1992	81	236
71	13,1	482	6428	1981	81	145
78	13,26	752	7904	1862	78	256
79	13,79	562	6744	1918	76	224
73	12,8	231	5120	1875	77	300
80	13,53	702	7650	1938	72	720
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μ s	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
75	16,37	1000	11745	2000	100	6516
76	16,16	780	9588	2000	100	5461
77	15,8	931	10856	2000	100	5732
71	15,97	1043	12045	1994	100	6760
78	15	994	11924	1999	100	6034
79	15,12	1070	8468	1975	99	5493
73	14	773	9247	2000	100	6516
80	14,3	970	11668	2000	100	5100

6. pielikums

6. p., 1. tab.

Statistiskais aprēķins paraugiem ar garenisku šķiedru orientāciju, kas netika pakļauti sākotnējai sloģošanai

Parauga Nr.	$P1$, kN	Hits1, imp.sk.	N_{AE1} , imp.sk.	$Dur1$, μ s	$Amp1$, dB	$E1$, dB
$\bar{X}1$	23,34	2463,5	1333,75	759,38	66,75	35,38
S^21	53,98	49278,9	131741	11998,8	53,93	109,7
$S1$	7,35	221,99	362,96	109,54	7,34	10,47
μ	2,6	78,48	128,33	38,73	2,6	3,7
Δ	6,13	185,22	302,85	91,4	6,13	8,74
Parauga Nr.	$P2$, kN	Hits2, imp.sk.	N_{AE2} , imp.sk.	$Dur2$, μ s	$Amp2$, dB	$E2$, dB
$\bar{X}2$	43,74	926	2634,25	1819,5	77,38	304,38
S^22	29,76	26743,1	93105,6	64298,9	8,27	9745,7
$S2$	5,45	163,53	305,13	253,57	2,88	98,72
μ	1,93	57,82	107,88	89,65	1,02	34,9
Δ	4,55	136,45	254,6	211,58	2,4	82,37
Parauga Nr.	$P3$, kN	Hits3, imp.sk.	N_{AE3} , imp.sk.	$Dur3$, μ s	$Amp3$, dB	$E3$, dB
$\bar{X}3$	56,49	3135,88	15460,8	1992,13	99,75	1482,75
S^23	9,31	172988	312488	496,13	0,5	43157,1
$S3$	3,05	415,92	559,01	22,27	0,71	207,74
μ	1,08	147,05	197,64	7,88	0,25	73,45
Δ	2,55	347,04	466,43	18,59	0,59	173,34

Statistiskais aprēķins paraugiem ar garenisku šķiedru orientāciju, kas tika pakļauti sākotnējai slogošanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μs	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
$\bar{X}1$	21,39	28,63	286,5	1509,38	68,63	19,88
S^21	18,49	101,13	7679,71	70759,1	10,84	65,27
<i>S1</i>	4,3	10,06	87,63	266,01	3,29	8,08
μ	1,52	3,56	30,98	94,05	1,16	2,86
Δ	3,59	8,39	73,12	221,95	2,75	6,74
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μs	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
$\bar{X}2$	36,56	249,38	2336,5	1958,38	84,25	449
S^22	38,55	10493,7	518605	2032,55	25,64	13595,7
<i>S2</i>	6,21	102,44	720,14	45,08	5,06	116,6
μ	2,2	36,22	254,61	15,94	1,79	41,22
Δ	5,18	85,47	600,88	37,62	4,23	97,29
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μs	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
$\bar{X}3$	54,81	3129	11818,5	1995,38	99,5	3179,5
S^23	21,45	725200	1032532	160,84	1,14	447533
<i>S3</i>	4,63	851,59	1016,14	12,68	1,07	668,98
μ	1,64	301,08	359,26	4,48	0,38	236,52
Δ	3,86	710,55	847,85	10,58	0,89	558,19

Statistiskais aprēķins paraugiem ar transversālu šķiedru orientāciju, kas netika pakļauti sākotnējai slogošanai

Parauga Nr.	$P1$, kN	$Hits1$, imp.sk.	N_{AE1} , imp.sk.	$Dur1$, μ s	$Amp1$, dB	$E1$, dB
$\bar{X}1$	0,88	59,13	342,5	1549,13	64,25	16
S^21	0,09	1476,13	17521,7	55802,4	5,36	11,71
$S1$	0,31	38,42	132,37	236,23	2,31	3,42
μ	0,11	13,58	46,8	83,52	0,82	1,21
Δ	0,26	32,06	110,45	197,1	1,93	2,86
Parauga Nr.	$P2$, kN	$Hits2$, imp.sk.	N_{AE2} , imp.sk.	$Dur2$, μ s	$Amp2$, dB	$E2$, dB
$\bar{X}2$	4,09	476,25	699,38	1975,13	90,13	430,63
S^22	0,25	54702,5	20616	4461,55	11,84	39685,4
$S2$	0,5	233,89	143,58	66,79	3,44	199,21
μ	0,18	82,69	50,76	23,62	1,22	70,43
Δ	0,42	195,15	119,8	55,73	2,87	166,22
Parauga Nr.	$P3$, kN	$Hits3$, imp.sk.	N_{AE3} , imp.sk.	$Dur3$, μ s	$Amp3$, dB	$E3$, dB
$\bar{X}3$	5,49	2404,13	4031,63	1993,75	98,75	1627,63
S^23	0,44	79275,6	98854,6	312,5	3,07	91837,1
$S3$	0,66	281,56	314,41	17,68	1,75	303,05
μ	0,23	99,55	111,16	6,25	0,62	107,14
Δ	0,55	234,93	262,34	14,75	1,46	252,86

Statistiskais aprēķins paraugiem ar transversālu šķiedru orientāciju, kas tika pakļauti sākotnējai sloģšanai

Parauga Nr.	$P1$, kN	$Hits1$, imp.sk.	N_{AE1} , imp.sk.	$Dur1$, μ s	$Amp1$, dB	$E1$, dB
$\bar{X}1$	2,23	28,63	61,5	1509,38	68,63	19,88
S^21	1,24	101,13	394	70759,1	10,84	65,27
$S1$	1,11	10,06	19,85	266,01	3,29	8,08
μ	0,39	3,56	7,02	94,05	1,16	2,86
Δ	0,93	8,39	16,56	221,95	2,75	6,74
Parauga Nr.	$P2$, kN	$Hits2$, imp.sk.	N_{AE2} , imp.sk.	$Dur2$, μ s	$Amp2$, dB	$E2$, dB
$\bar{X}2$	4,08	249,38	233,38	1958,38	84,25	449
S^22	0,11	10493,7	5213,13	2032,55	25,64	13595,7
$S2$	0,33	102,44	72,2	45,08	5,06	116,6
μ	0,12	36,22	25,53	15,94	1,79	41,22
Δ	0,28	85,47	60,24	37,62	4,23	97,29
Parauga Nr.	$P3$, kN	$Hits3$, imp.sk.	N_{AE3} , imp.sk.	$Dur3$, μ s	$Amp3$, dB	$E3$, dB
$\bar{X}3$	6,04	3129	3793,88	1995,38	99,5	3179,5
S^23	0,24	725200	129870	160,84	1,14	447533
$S3$	0,49	851,59	360,37	12,68	1,07	668,98
μ	0,17	301,08	127,41	4,48	0,38	236,52
Δ	0,41	710,55	300,69	10,58	0,89	558,19

6. p., 5. tab.

Statistiskais aprēķins krusteniskas formas paraugiem, kas netika pakļauti sākotnējai sloģošanai

Parauga Nr.	$P1$, kN	$Hits1$, imp.sk.	N_{AE1} , imp.sk.	$Dur1$, μ s	$Amp1$, dB	$E1$, dB
$\bar{X}1$	15,63	212,63	440,25	389,13	65,88	15,88
S^21	6,27	20792,3	18678,5	25002,4	5,84	9,27
$S1$	2,5	144,2	136,67	158,12	2,42	3,04
μ	0,88	50,98	48,32	55,9	0,85	1,08
Δ	2,09	120,31	114,03	131,93	2,02	2,54
Parauga Nr.	$P2$, kN	$Hits2$, imp.sk.	N_{AE2} , imp.sk.	$Dur2$, μ s	$Amp2$, dB	$E2$, dB
$\bar{X}2$	28,58	573,38	1892,88	1748,13	79,13	546
S^22	3,42	177160	311416	70744,7	30,41	9534,29
$S2$	1,85	420,9	558,05	265,98	5,51	97,64
μ	0,65	148,81	197,3	94,04	1,95	34,52
Δ	1,54	351,2	465,63	221,93	4,6	81,47

6. p., 6. tab.

Statistiskais aprēķins krusteniskas formas paraugiem, kas tika pakļauti sākotnējai sloģošanai

Parauga Nr.	$P1$, kN	$Hits1$, imp.sk.	N_{AE1} , imp.sk.	$Dur1$, μ s	$Amp1$, dB	$E1$, dB
$\bar{X}1$	12,4	254,63	291,88	161,38	62	15,13
S^21	3,69	8693,98	8278,13	1559,7	21,43	67,55
$S1$	1,92	93,24	90,98	39,49	4,63	8,22
μ	0,68	32,97	32,17	13,96	1,64	2,91
Δ	1,6	77,8	75,92	32,95	3,86	6,86
Parauga Nr.	$P2$, kN	$Hits2$, imp.sk.	N_{AE2} , imp.sk.	$Dur2$, μ s	$Amp2$, dB	$E2$, dB
$\bar{X}2$	26,51	693,13	1098,63	851,75	74,38	66,25
S^22	3,51	16807,3	213018	206636	51,7	1069,36
$S2$	1,87	129,64	461,54	454,57	7,19	32,7
μ	0,66	45,84	163,18	160,72	2,54	11,56
Δ	1,56	108,17	385,1	379,29	6	27,29

Statistiskais aprēķins Maltas krusta formas paraugiem, kas netika pakļauti sākotnējai slogošanai

Parauga Nr.	<i>P1</i> , kN	<i>Hits1</i> , imp.sk.	<i>N_{AE1}</i> , imp.sk.	<i>Dur1</i> , μs	<i>Amp1</i> , dB	<i>E1</i> , dB
$\bar{X}1$	5,07	24,25	205,25	1828,75	59,25	24,13
<i>S</i> ² 1	4,19	72,5	2031,36	13795,1	30,79	96,7
<i>S1</i>	2,05	8,51	45,07	117,45	5,55	9,83
μ	0,72	3,01	15,93	41,53	1,96	3,48
Δ	1,71	7,1	37,61	98	4,63	8,2
Parauga Nr.	<i>P2</i> , kN	<i>Hits2</i> , imp.sk.	<i>N_{AE2}</i> , imp.sk.	<i>Dur2</i> , μs	<i>Amp2</i> , dB	<i>E2</i> , dB
$\bar{X}2$	12,6	403,88	4033	1938,63	80,63	252,38
<i>S</i> ² 2	2,27	10186,4	6265375	6850,84	14,27	2863,7
<i>S2</i>	1,51	100,93	2503,07	82,77	3,78	53,51
μ	0,53	35,68	884,97	29,26	1,34	18,92
Δ	1,26	84,21	2088,53	69,06	3,15	44,65
Parauga Nr.	<i>P3</i> , kN	<i>Hits3</i> , imp.sk.	<i>N_{AE3}</i> , imp.sk.	<i>Dur3</i> , μs	<i>Amp3</i> , dB	<i>E3</i> , dB
$\bar{X}3$	15,18	999,38	9814,38	2000	98,75	3184,63
<i>S</i> ² 3	0,43	30870,3	1128320	0	2,21	449359
<i>S3</i>	0,65	175,7	1062,22	0	1,49	670,34
μ	0,23	62,12	375,55	0	0,53	237
Δ	0,55	146,6	886,3	0	1,24	559,32

Statistiskais aprēķins Malta krusta formas paraugiem, kas tika pakļauti sākotnējai sloģšanai

Parauga Nr.	$P1$, kN	$Hits1$, imp.sk.	N_{AE1} , imp.sk.	$Dur1$, μ s	$Amp1$, dB	$E1$, dB
$\bar{X}1$	6,85	44,75	263,63	1815,25	66,75	53,25
S^21	1,02	184,79	16627,4	14390,5	14,21	129,93
$S1$	1,01	13,59	128,95	119,96	3,77	11,4
μ	0,36	4,81	45,59	42,41	1,33	4,03
Δ	0,84	11,34	107,59	100,09	3,15	9,51
Parauga Nr.	$P2$, kN	$Hits2$, imp.sk.	N_{AE2} , imp.sk.	$Dur2$, μ s	$Amp2$, dB	$E2$, dB
$\bar{X}2$	13,78	583,5	6801,25	1932,25	78,63	299,5
S^22	0,62	28640	832312	2943,64	12,84	31326,9
$S2$	0,79	169,23	912,31	54,26	3,58	176,99
μ	0,28	59,83	322,55	19,18	1,27	62,58
Δ	0,66	141,21	761,22	45,27	2,99	147,68
Parauga Nr.	$P3$, kN	$Hits3$, imp.sk.	N_{AE3} , imp.sk.	$Dur3$, μ s	$Amp3$, dB	$E3$, dB
$\bar{X}3$	15,34	945,13	10692,6	1996	99,88	5951,5
S^23	0,77	12612,1	1955675	76,29	0,13	360263
$S3$	0,88	112,3	1398,45	8,73	0,35	600,22
μ	0,31	39,71	494,43	3,09	0,13	212,21
Δ	0,73	93,7	1166,85	7,29	0,3	500,81