

**Rīgas Tehniskā universitāte**

**Ilmārs Blumbergs**

**Kompozīta materiāla izturības modelēšana**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2010

**Rīgas Tehniskā universitāte**

**TMF**

**Aviācijas institūts**

**Ilmārs Blumbergs**

doktora studiju programmas Transports "Aviācijas transports" doktorants

**Kompozīta materiāla izturības modelēšana**

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība  
Rīga 2010

UDK 678.5.067(043.2)  
BI 920 K

Blumbers I. Kompozīta materiāla izturības modelēšana  
Promocijas darba kopsavilkums.  
-R.:RTU,2010. -27 lpp.

Iespiests saskaņā ar  
Aviācijas institūta 2010.  
gada 16. jūnija slēdzienu Nr 01



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

ISBN.....

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011. g. .... Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātes Aviācijas institūtā, Lomonosova ielā 1, B korpusā, B-3 auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

J. Jansons Dr.habil.sc.ing., profesors  
LU Polimēru mehānikas institūta  
direktors

V. Šestakovs, Dr.habil.sc.ing., profesors  
Aviācijas institūts  
Rīgas Tehniskā universitāte

A. Barchan, Dr.sc.ing., asoc profesors  
Kielces Tehnoloģiju universitāte,  
Polija

## APLIECINĀJUMS

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

Ilmārs Blumbergs.....

Datums .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, pielikumu, 92 attēlus un ilustrācijas, kopā 116 lapaspuses un pielikumu. Literatūras sarakstā ir 34 nosaukumi.

## **1. Darba aktualitāte**

Dotajā darbā izskatītas svarīgas un aktuālas kompozītmateriāla izturības noteikšanas, sagrūšanas prognozēšanas un akustiskās emisijas signālu apstrādes problēmas, kas, ļauj noteikt drošas izstrādājuma izmantošanas robežas un konstatēt šīs robežas sasniegšanu.

## **2. Darba mērķis**

Darba mērķis ir kompozītmateriāla komponentu īpašību izpēte vienlaicīgi pielietojot materiāla īpašību diagnosticēšanu ar akustiskās emisijas metodi un sabrukšanas procesa modeļa izstrādi, lai no vienotas pozīcijas attēlotu sagrūšanas procesus.

Šī mērķa sasniegšanai nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

- Veikt kompozītmateriāla izturības noteikšanas kā arī ietekmējošo faktoru analīzi
- Izgatavot un veikt eksperimentus ar oglekļa šķiedru diegu mikroparaugiem
- Veikt kompozītmateriāla diegu mikroparaugu statiskās izturības un elastības moduļu izkliedes pētījumus
- Izgatavot paraugus un veikt eksperimentus ar akustiskās emisijas signāla pierakstīšanu un izmaiņu pētīšana
- Izstrādāt metodi kā novērtēt eksperimentu rezultātus.
- Izstrādāt modeli, kas ļauj modulēt paraugu sagrūšanu gadījumos ja tiek ņemta vērā diegu kritisko pagarinājumu izkliede un ja tiek ņemta vērā kritisko spriegumu izkliede. Balstoties uz izstrādāto modeli, iegūt kompozītmateriāla spriegumu pieauguma pie stiepes līknes aprakstu.

## **3. Zinātniskā novitāte**

Izstrādājot sabrukšanas modeli tika savstarpēji sasaistīti eksperimentālie rezultāti, sabrukšanas matemātiskais modelis un akustiskās emisijas signāli.

Izstrādātais modelis ļauj aprakstīt ne tikai prognozējamo izturību vienvirziena kompozītmateriāliem, bet arī sabrukšanas raksturu ņemot vērā šķiedru spriegumu un/vai relatīvo pagarinājumu sadalījumu.

Izstrādātā eksperimentālo datu kvalitātes novērtēšanas metodika ļauj savstarpēji salīdzināt un novērtēt dažādus eksperimentālos datus kā arī to atbilstību to paredzam raksturam

Ir veikta akustiskās emisijas signālu analīze kontekstā ar kompozītmateriāla sabrukšanas dinamiku, kas ļauj izdalīt dažādus sabrukšanas procesus kompozītmateriālā.

#### **4. Praktiskā nozīme**

Izstrādāto šķiedrotā kompozītmateriāla sabrukšanas modeli var lietot lai prognozētu kompozītmateriāla izturību pamatojoties uz to komponentu raksturlielumiem. Izstrādātais modelis, kā arī eksperimentu datu kvalitātes novērtēšanas metodika, var tikt lietots zinātniskos un praktiskos nolūkos, kā arī mācību procesā. Izstrādāto modeli var izmantot lai, projektējot izstrādājumu, būtu iespējams izvēlēties optimālas materiāla īpašības, kas nodrošinātu savlaicīgu izstrādājuma sabrukšanas sākuma konstatāciju un vienlaicīgi nodrošinātu maksimālu izturību. Galvenie rezultāti ir publicēti 7 starptautiskos izdevumos rakstu un tēžu veidā. Tie ir izklāstīti 14 starptautiskās konferencēs un semināros.

## 1. Ievads

Arvien plašāk aviācijas nozarē tiek pielietoti kompozītmateriāli. Kompozītmateriāli plaši tiek izmantoti aviorūpniecībā - kaujas, sporta un īpaša pielietojuma vieglo lidaparātu korpusu būvē, kā arī lielo un smago pasažieru lidaparātu korpusu būvē, piemēram, "Boeing-777" un "A380-800" un sevišķi Boeing - 787, kuriem būtiska ekonomiskuma paaugstināšana nebūtu iespējama, kuru izgatavošana nebūtu iespējama bez modernu kompozītmateriālu pielietojuma. Šo lidaparātu drošuma un ilgzināšanas nodrošināšanai nepieciešams zināt attiecīgo kompozītmateriālu statistiskās izturības un noguruma ilgzināšanas raksturlielumu saistību, jāspēj prognozēt šo lielumu izmaiņas, ja tiek mainītas kompozītmateriāla komponentu īpašības.

Racionāli izmantojot kompozītmateriālus lidmašīnu konstrukcijās, var ne tikai samazināt tās svaru, bet arī samazināt tās pašizmaksu un tehniskās apkopes laiku, kā arī izmaksas. No kompozītmateriāliem ir iespējams izgatavot konstrukcijas ar nemainīgu izmēru un formu. Dažādiem kompozītmateriāliem varbūt viena vai vairākas priekšrocības un ne vienmēr atsevišķas priekšrocības var panākt vienlaicīgi.

Lai sasniegtu izvirzīto darba mērķi un sasniegtu minētos rezultātus darbs tika iedalīts astoņās daļās. Darba kodolu sastāda sešas daļas no kurām pirmajā daļā tika aprakstīta vispārēja informācija par kompozītmateriāliem un to pielietošanas priekšrocībām. Otrajā daļā tika veikta dažādu šķiedroto kompozītmateriālu aspektu analīze. Šī analīze iekļauj nepieciešamo informāciju lai vadoties no tās varētu veikt praktiskos pētījumus saistībā ar nosprausto mērķi un sastādīt materiāla sabrukuma modeli. Trešā darba sadaļa ir veltīta tieši praktiskiem pētījumiem. Praktiskajos pētījumos ietilpst statistiskās stiepes slodzes eksperimenti ar mikroparaugiem, statistiskās stiepes slodzes eksperimenti sarežģīti armētiem paraugiem ar akustiskās emisijas signāla pierakstu un dinamiskās stiepes slodzes eksperimenti sarežģīti armētiem paraugiem ar akustiskās emisijas signāla pierakstu. Ceturtajā daļā tiek veikta iegūto eksperimentālo daru analīze un piektajā daļā sagrūšanas modeļa izstrāde. Sestajā daļā ietilps nobeigums ar kopējiem secinājumiem. Pārējās divās daļās ietilpst izmantotās literatūras saraksts un darba pielikumi. Kopumā darbā balstoties uz eksperimentāliem rezultātiem tiks izstrādāts modelis materiāla sabrukšanas dinamikas atainošanai un izturības novērtēšanai, piedevām sabrukšanas gaitu sasaistot ar akustiskās emisijas signālu rādījumiem, kā materiāla iekšējo sagrūšanas procesu atainotājiem.

## 2. Kompozītmateriālu izturības analīze

Šajā nodaļā īsā veidā tiek parādīta svarīgākā informācija uz kuras pamata balstās izstrādātais darbs. Tā piemēram ir izklāstīta kompozītmateriālu klasifikācija lai turpmākajā darbā no vienotas pozīcijas tiktu izprasti lietotie materiālu apzīmējumi. Darbā tiek apzināti un izanalizēti pamat veidi, kā tiek noteikta kompozītmateriālu izturība un īsi tiek apskatīti specifiskie kompozītmateriālu izturību ietekmējošie faktori tādi kā šķiedrota kompozītmateriāla deformācija atkarībā no pieliktās slodzes veida, šķiedru un matricas tilpumu vai blīvumu attiecība. Tiek apskatīts kā un kāpēc mainās šķiedru stiepes atkarība no tās diametra.

Kopumā darbs balstīts uz vairāku zinātnieku līdzšinējiem pētījumiem. Darbā pētot šķiedru stiepes īpašības izmantoti galvenie principi no M. Kleinhofa, Yu. Paramonova, R. Chatys. Tika izskatīti arī A. Griffith un J.Giliman pētījumi, kuri nosaka gan elastības īpašības gan izturības īpašības ņemot vērā plaisu un jaunu virsmu radīšanai patērējamās enerģijas principu. Mehānisko konstrukciju un it īpaši kompozītmateriālu izturības un noguruma ilgizturību ir pētījuši daudzi slaveni zinātnieki, piedāvājot savus materiāla sabrukšanas modeļa veidus. Pirmos trauslā sabrukuma statistiskās teorijas pētījumus veicis V.Veibulls, kā arī J.I.Frenkels un T.A.Kontorova. No matemātiskā viedokļa šīm problēmām viens no pirmajiem ir pievērsies B.V.Gņedenko. V.Veibulla sadalījums ir viens no noturīgā minimuma sadalījuma variantiem: vienādu paraugu ķēdītes izturības sadalījums atbilst viena atsevišķa parauga izturības sadalījuma tipam. Mainās vienīgi sadalījuma parametri. Šis efekts ir t.s. trauslā sabrukuma mēroga faktora izskaidrojuma pamatā: izturība samazinās, ja pārbaudāmā parauga izmērs palielinās.

Kompozītu izturības modeli detalizēti pētījuši M. Kleinhofs, J. Andersons, Ju. Paramonovs, F.Paskuals un V.Mikers. Vājā ķēdes posma modelis nosaka, ka materiālam ir vairākas vājās vietas, kuru tuvumā noguruma uzkrāšanās procesi ir visai viendabīgi un norisinās neatkarīgi viens no otra. Parauga izturība kopumā atbilst vājākās vietas izturībai, līdz ar to atbilst V.Veibulla sadalījumam. Pretējā traktējuma pamatā ir pieņēmums, ka starp vājajām vietām notiek spriegumu pārdalīšanās process un mainās bojājumu uzkrāšanās. Sabrukums notiek brīdī, kad uzkrājušies bojājumi pārsniedz noteiktu robežu.

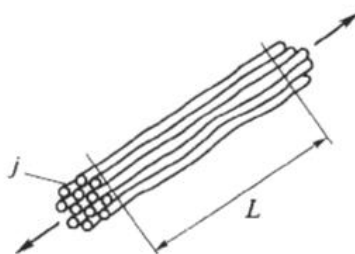


Ir vairākas publikācijas, kas veltītas kompozītmateriālu un to komponentu izturības un ilgizturības statistisko datu analīzei. Vērtīgi šo publikāciju pārskati atrodami J.Ņemeca, S.V.Serensena, V.S.Streļajeva, kā arī V.P.Tamuža un V.D.Protasova rediģētajos darbos. Šķiedru izturības statistisks pārskats izklāstīts T.A.Kontorovas, G.M.Barteņeva, L.G.Sedrakjana u.c. autoru darbos. Eksperimentālo datu apstrādei tiek izmantoti minētie sadalījumi: V.Veibulla, lognormālais un normālais sadalījums. V.P.Tamužs, J.A.Gutāns, V.V.J.Padget, A.S.Watson, R.L.Smith, W.A.Curtin piedāvā tādu V.Veibulla sadalījuma uzlabojumu, kas ļauj labāk ņemt vērā parauga garumu. J.Andersons, R.Joffe, M.Hojo, S.Ochiai šo piedāvājumu lietoja savos eksperimentālajos stikla šķiedru izturības sadalījuma pētījumos. Piedāvāts izmantot arī sadalījumu ortogonālos polinomos, kas pazīstams kā A tipa Grama-Šarljē rinda. L.G.Sedrakjans rekomendē izmantot četru parametru sadalījumu, kas būtībā ir V.Veibulla sadalījuma vispārinājums (ieviests zemākais un augšējais ilgizturības sliexsnis).

V.V.Bolotina kompozītmateriālu sabrukumu mehānikai veltītajā darbā vērojama vispārīga pieeja kompozītmateriālu sabrukuma problēmai un tā pamatā ir kinētisko modeļu izmantošana. Bet ir vajadzīgs liels sākuma informācijas apjoms, lai aprēķinātu noguruma ilgizturību, izmantojot šo teoriju.

Lai noteiktu iespējamo noguruma efektu izmantošanu darba mērķa sasniegšanai, kā arī labāk izprast materiālā notiekošos procesus tika veikts neliels ilgizturības un noguruma apskats.

Darbā izvirzītā mērķa sasniegšanai ļoti liela nozīme ir tieši šķiedru un diegu pētījumiem tāpēc šajā nodaļā papildus tiek izanalizēta atsevišķu šķiedru un diegu kritisko vērtību uzvedība. Starpība starp šķiedru un diegu parādīta 1. attēlā. Analizējot šķiedras un diegus parādās to parametru izkliede kā būtisks to raksturlielums.



**1. att.** Diega, kas sastāv no daudzām šķiedrām -j, slogojuma shematiskais attēls

Būtisks parametrs ir arī parauga garums ko savos darbos pētījuši Miķelsons, Gutāns. Stiepes slogojumus šķiedru buntēm vai diegu paraugiem pētījuši Vasiļjevs un

Tarnopolski. Pāreju no kompozītmateriāla komponentu raksturlielumu sadalījuma uz kompozītmateriāla raksturlielumiem kopumā pirmo reizi pārrunāja F.Peirss un H.Danielss. H.Danielss ieguva fundamentālu rezultātu: viņš pierādīja, ka neatkarīgi no atsevišķu šķiedru izturības sadalījuma veida sagraujošās slodzes sadalījums kūlim, kas sastāv no  $N$  šķiedrām, tiecas uz normālu sadalījumu, ja šķiedru skaits ir pietiekami liels.

D.Gjusers un J.Gurlands ierosināja aplūkot kompozītmateriālu kā ķēdi, kas sastāv no noteikta kritiska garuma šķiedru kūļiem.

Pēc sabrukuma šķiedras nevis sabrūk pilnībā, bet gan sadalās līdz noteiktam kritiskam garumam. Ievērojot šo pieņēmumu, B.Rozens veica šķiedru kompozītmateriālu sabrukuma analīzi, pieņemot, ka to veido secībā savienotu kūļu ķēde, kas tiek iekļauta sloģojuma uzņemšanā šķiedras neefektīvajā garumā.

C.Zvēbens aprēķinos ieviesa spriegumu koncentrēšanos, ņēma vērā sabrukuma secību defekta vietā, kas veidojas pēc blakus esošo šķiedru grupas sabrukuma, kā arī pierādīja, ka visas slāņainās paketes sabrukumam pietiek arī ar dažiem (2 - 3) līdzās esošiem sabrukumiem.

Sakarā ar to, ka tika pieņemts lēmums darbam nepieciešamos eksperimentus un paraugus šiem eksperimentiem izgatavot pašiem tika apskatīta un izanalizēta ražošanas faktoru ietekme uz kompozītmateriāla izturību, kā arī izanalizēti dažādi materiālu diagnostikas veidi. Analīzes rezultātā tika izvēlēta akustiskās emisijas metode. Nodaļas noslēgumā tiek piedāvāts neliela ekspluatācijas faktoru ietekme uz kompozītmateriāliem. Šāds ieskats bija nepieciešams lai novērtētu analizējamā materiāla stāvokļa izmaiņas novērtējumu šo ārējo faktoru ietekmē.

### **3. Praktiskie eksperimentālie pētījumi**

#### **Ogļšķiedras mikroparaugu eksperimenti**

Galvenā ideja šajā nodaļā veiktajiem eksperimentiem ir izprast atsevišķo diegu saplīšanas procesus pieņemot, ka tieši šie ir nozīmīgākie procesi, kas ļaus prognozēt materiāla izturību un sabrukšanas gaitu, kā arī vislabāk atspoguļojas akustiskās emisijas signāla izmaiņās. Lai sasniegtu pētījuma mērķi tika veikti dažādi eksperimenti, kuros uzsvars netika likts uz maksimāli precīzu šķiedru vai matricas izturības un elastības moduļa noteikšanu (precīza vērtību noteikšana ir resursu

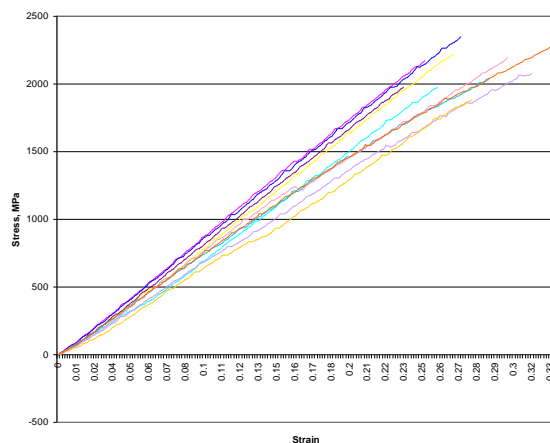
ietilpīga un konkrētājā gadījumā ir vēlama, bet ne nepieciešama), bet gan kopsakarību noteikšanu un ietekmes uz kopējo materiāla izturību novērtēšanu.

Eksperimentos pētāmie mikroparaugi bija ogļšķiedras diegi ar diametru 150  $\mu\text{m}$  (neregularitāte 20  $\mu\text{m}$ ) no auduma LU-3, impregnēti ar epoksīda sveķiem ED-20, cietinātāju Politelēn-poliāmin un plastifikātoru Dibutilftolat. Kā jau minēts iepriekš, testi un aprēķini tika veikti pēc tā sauktā nulles kārtas modeļa. Nulles kārtas modelis ir monotropisks modelis, kurā tiek ignorēta matricas izturība un elastības modulis pieņemot, ka slānis darbojas tikai šķiedru virzienā. Tas nozīmē, ka elastības modulis, perpendikulārā virzienā, virzienam kurā darbojas stiepes spēks  $E_2=0$ , bīdes modulis  $G_{12}=0$  un Puasona attiecība  $\nu_{12}=0$ . Kopumā šos procesus var aprakstīt ar šādām formulām:  $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$        $\sigma_2 = 0$ ;  $\tau_{12} = 0$ , kur  $E_1 = E_f \nu_f$ ;  $\sigma_1$ - mikroparauga izturība šķiedrām paralēlā virzienā;  $\sigma_2$ - mikroparauga izturība šķiedrām perpendikulārā virzienā;  $\varepsilon_1$ - pagarinājums šķiedrām paralēlā virzienā;  $\tau_{12}$ - bīdes spriegums;  $E_f$ - šķiedru elastības modulis;  $\nu_f$ - šķiedru tilpuma daļa;

Šāds modelis ir pareizs gadījumiem, kad šķiedru izturība ir daudz lielāka par matricas izturību.

Eksperimenti tika veikti, uz statisko slogojumu pieliekot stiepes spēku pie normāliem atmosfēras mitruma un temperatūras apstākļiem. Slogojuma pieauguma ātrums bija 1 mm/min. Testējamo paraugu garumi bija 15, 40 un 60 mm. Stiepes spēks tika mērīts no nulles līdz parauga sagrūšanas brīdim. Eksperimenti tika veikti uz iekārtas, kas speciāli paredzēta mazu slodžu mērīšanai (līdz 2,5 kN). Visi mērījumi tika veikti automātiski digitālā veidā ar eksperimentālai iekārtai līdzīgu nākošo oriģinālo datu apstrādes programmu. Eksperimenti tika veikti, mērot slogojuma spēku un skavu pārvietošanās distanci.

Attēlā 2 ir redzami daži iegūto slogojuma līkņu paraugi 15 mm gariem mikroparaugiem. No līknēm redzams, ka elastības modulis, kas atainojās kā līnijas linearitāte, ir pieņemams kā nemainīga vērtība katram atsevišķam mikroparaugam, bet mainīgs savstarpēji salīdzinot paraugus, kas atainojās kā līniju slīpums attiecībā pret koordinātu asīm.



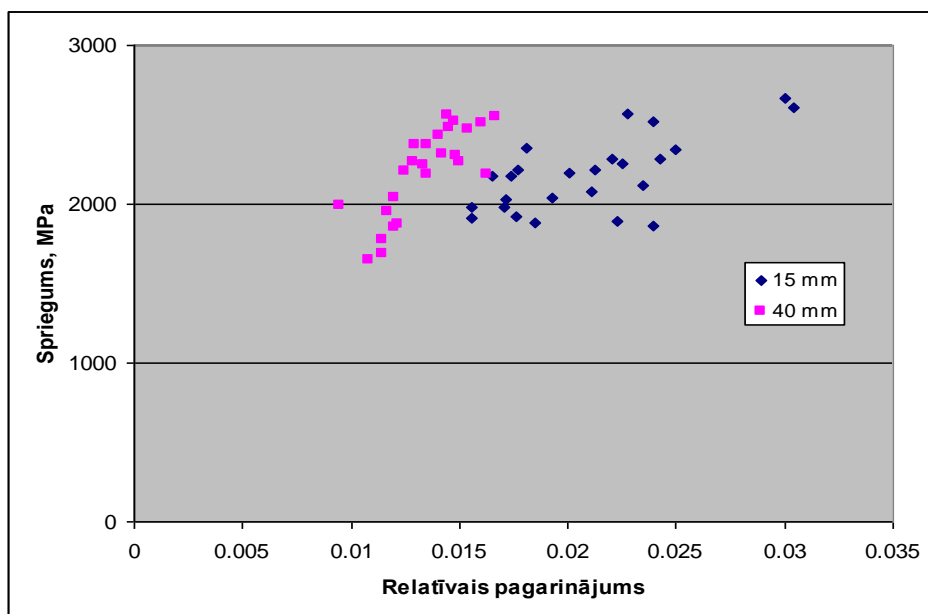
**2. att.** Statists slogojums 15 mm gariem ogļšķiedras mikroparaugiem

1.tabula

	Eksperimentālo datu izkliede				
	Derīgie mērījumi	Sagaidāmā vērtība	Minimums	Maksimums	Standarta nobīde
kritiska deformācija 15mm	25	0.021	0.016	0.030	0.0040
elastības modulis 15mm	25	106493.1	77863.7	131630.9	15291.70
kritiskais spriegums 15mm	25	2181.7	1864.4	2663.7	233.89
kritiska deformācija 40mm	25	0.013	0.009	0.017	0.0018
elastības modulis 40mm	25	164576.7	134458.9	209910.1	14851.59
kritiskais spriegums 40mm	25	2202.4	1643.9	2554.6	278.81
kritiskais spriegums 60mm	45	1980.904	1299.454	2520.874	260.1377

Attēlā 3 savukārt ir redzamas paraugu kritisko vērtību izkliede diviem dažādiem mikroparaugu garumiem. No attēla redzams, ka īsākajiem paraugiem salīdzinot ar garākiem ir lielāka relatīvo pagarinājumu izkliede, savukārt garākiem paraugiem ir nedaudz lielāka kritisko spriegumu izkliede. Izanalizējot mērījumu procesu tika iegūti iespējamie izkļedes iemeslu skaidrojumi. Iegūtie dati tiek izmantoti nākamajos pētījumos.

Pētījuma gaitā tika iegūta skaitliska informācija par trīs dažādu garumu viena ogļšķiedras diega mikroparaugu īpašībām. Tika iegūtas spriegumu – deformācijas raksturlīknes kompozītmatereālu paraugiem ar dažādiem garumiem, kas savukārt ļauj iegūt stiprības, elastības moduļa un kritisko pagarinājumu sadalījumu.



**3. att.** Divu dažādu garumu mikroparaugu relatīvā pagarinājuma un spriegumu eksperimentālo vērtību izkliede

### Akustiskās emisijas datu eksperimenti statistiskam slogojumam

Pētījuma uzdevums bija iegūt akustiskās emisijas signālus lai izprastu sarežģīti armēta oglekļa šķiedru kompozītmateriāla sabrukšanas gaitu. Šim nolūkam tika izgatavoti pētāmie paraugi saskaņā ar standartu PN-EN 10002-1+AC1,1997. Paraugi tika izgatavoti no daudzslāņu ogļšķiedras auduma, kura diegu diametrs ir 3 nm ar neregularitāti 0,2 nm. Kā saistviela tika izmantota epoksīda-fenolo-anilīno-formaldehīda saistviela. Kompozītmateriāla paraugam ir 11 slāņu ar dažādos virzienos ( $0_4^0 / +45_8^0 / 90_3^0$ ) orientētiem diegiem. Slogojuma laikā tika pierakstīti 16 parauga stāvokli raksturojoši akustiskās emisijas signālu parametri

Veicot eksperimentus, tika iegūtas materiāla īpašību vērtības pie statistiskām slodzēm Eksperimenti tika veikti ar mērķi noteikt sabrukšanas procesā radītos akustiskos signālus un pēc tiem identificēt mehāniskos procesus materiālā. Slogojums tika veikts no nulles vērtības līdz parauga sabrukumam. Paraugi tika pārbaudīti ar stiepes slogojumu, un slogojuma spēka pieaugums bija lineārs ar ātrumu 2 mm/min, kas uzskatāms par statistisku. Eksperimenti tika veikti pie normālas temperatūras, mitruma un spiediena. Parauga šķērsriezuma parametri ir 2.5\*11.0 mm, slāņu salikums  $0_4^0 / +45_8^0 / 90_3^0$ , vidējā izturība 6 paraugiem ir 275 MPa.

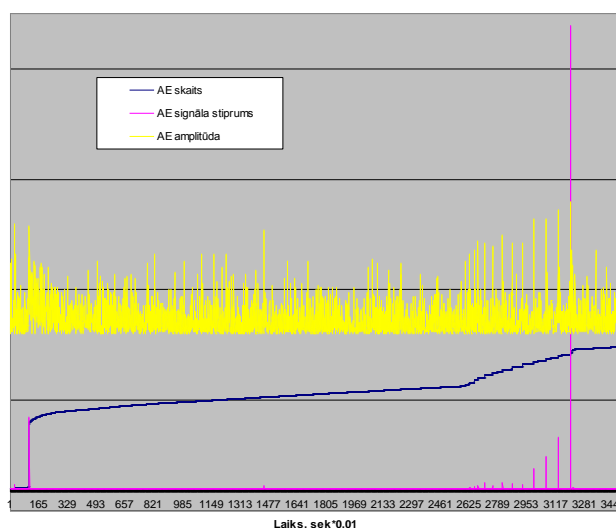
Attēlā 4. redzami trīs viena parauga testēšanas uzņemtie laikā akustiskā signāla parametri, kuriem izmainīts mērogs lai vienā laika skalā lai vieglāk varētu redzēt šo signālu kopsakarības. Tā attēlā labi redzams ka AE signāla amplitūda visa

slojuma laikā mainās minimāli ar izņēmumu sākuma daļā un beigu daļā. Pirmajā slojuma fāzes daļā ir neliels amplitūdas pieaugums daudzo nelielo notikumu dēļ, kuri saistīti ar pirmā slojuma efektu. Otrs sistemātisks signāla pieaugums ir vērojams slojuma beigu daļā un tas ir saistīts ar stiprāko šķiedru sagrūšanas procesu.

2.tabula

Testēto ogļšķiedras kompozītmateriālu izturība

Parauga numurs	Kritiskais slojuma spēks, $F_{max}$ , N	Kritiskais spriegums, $\sigma_{max}$ , MPa
1	7790,50	286,64
2	7643,85	277,95
3	7338,20	266,84
4	6832,34	248,44
5	7963,73	288,86
6	8712,61	316,82
<i>Sagaidāmā vērtība</i>	<i>7713,55</i>	<i>275,925</i>



4. att. Akustiskās emisijas signāli statiska slojuma laikā

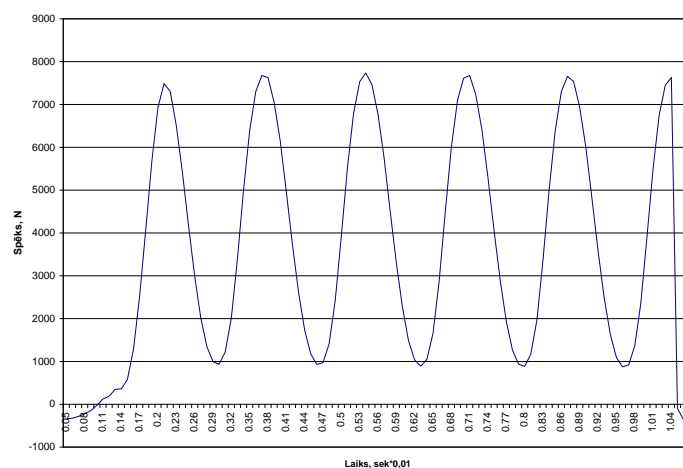
#### Akustiskās emisijas datu eksperimenti dinamiskam slojumam

Slojums tika veikts ar frekvenci 6 Hz, ciklu amplitūdu no 1000 N līdz 95% no maksimālās stiepes izturības, apkārtējās vides temperatūra 19 C un eksperiments tika veikts līdz parauga sabrukšanai. Paraugu sagrūšana notika paredzētajā vietā (aptuveni vidusdaļā), kā tas redzams 5.attēlā, un tas raksturo pareizus slojuma apstākļus paraugā. Viens slojuma paraugs dinamiskam slojumam parādīts

6.attēlā.Slojuma laikā tika pierakstīti 16 parauga stāvokli raksturojoši akustiskās emisijas signālu parametri



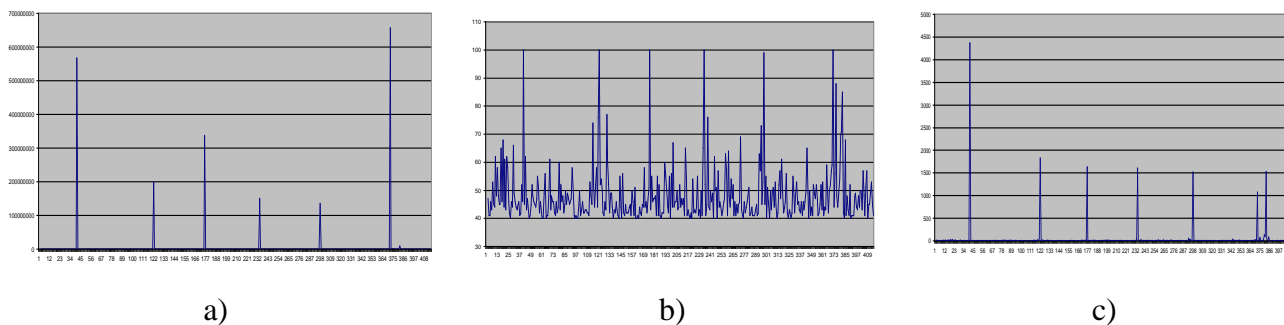
5.att. Pārbaudīts sarežģīti armēts ogļšķiedras paraugs



6.att. Slojuma spēks atkarībā no laika

Lai mazinātu skavu ietekmi uz paraugu stiprinājuma vietām, tās tika speciāli sagatavotas. Paraugu stiprinājumi tika aplīmēti ar vidēja graudu lieluma smilšpapīru ar graudaino pusi uz iekšpusi. Šāda paraugu sagatavošana ļauj uzlabot sašeri starp skavām un paraugu, nepalielinot saspiešanas spēku, kurš savukārt var ietekmēt parauga izturību, kā arī pie ilglaicīga cikliska slojuma paraugu stiprinājumi var sākt izdilt un izslīdēt no skavām.

Attēlos 7 a, b un c parādīts akustiskais signāls paraugam kurš izturēja 6 slojuma ciklus. Katram ciklam ir augsta akustiskā emisijas enerģija (7 a), kā arī ir augsts notikumu skaits (7 c), bez tam katru ciklu ļoti labi var izdalīt pēc AE signāla amplitūdas (7 b). Slojuma sākumā pie pirmā cikla redzama tā pati ainu, kā pie statiskā slojuma, un tas būtu pirmā slojuma efekts. 7 c attēlā ir redzams, ka notiek liels skaits nelielu notikumu.



**7.att.** AE signāla enerģija atkarībā no laika (a); AE signāla amplitūda atkarībā no laika (b); AE notikumu skaita atkarība no laika (c) cikliskam stiepes sloojumam

Šajā gadījumā sākotnēji atbrīvotā AE enerģija ir relatīvi lielāka nekā pie statistiskā sloojuma, bet ir jāņem vērā tas, ka šoreiz sloojums notiek daudz ātrāk un līdz 95% no vidējās paraugu maksimālās stiepes izturības. Tas nozīmē, ka šajā gadījumā notiek ne tikai matricas plaisāšanas process, bet sabrūk arī dažas vājākās šķiedras un notiek slāņu delaminēšanās process. Šāds eksperiments ar lieliem sloojumiem ļauj viegli apskatīt vairākas sabrukšanas mehānisma fāzes.

#### 4. iegūto eksperimentālo datu analīze

Šis pētījums tika veikts ar mērķi noteikt, kā atšķiras mikroparaugu īpašību sadalījums, un lai rastu atbildi, kādi varētu būt iemesli gan materiāla dažādām maksimālām spriegumu un elastības īpašībām, gan atšķirībām to sadalījumos. Pētījumā tika izmantoti jau iepriekš apskatītie eksperimentālie materiāla īpašību dati. Kopumā tiks apskatīti trīs dažādu garumu paraugi, kuri visi ir izgatavoti vienā sērijā un tāpēc var pieņemt, ka to īpašības atšķiras nedaudz. Vienlaikus jāņem vērā arī fakts, ka paraugi tika izgatavoti ar rokām bez automatizācijas un tas šajos paraugos ievieš lielāku parametru izkliedi, nekā tā būtu reālos laminātos.

Izmēģinot paraugus uz stiepes izturību galvenie materiāla sabrukšanas iemesli sloojuma sākumā ir diegu un matricas delaminācija, kā arī delaminācija starp materiāla slāņiem. Sloojuma sākumā šķiedras diegi netiek saplēsti, bet gan tie tiek „izvilkti” no matricas. Tas nozīmē, ka paraugu izturību mazāk nosaka matricas materiāls, bet vairāk adhēzija starp šo materiālu un šķiedrām. Savukārt sloojuma beigu posmā sabrukšana notiek sabrūkot materiāla šķiedrām. Kopumā sabrukšanas procesu šķīrotiem kompozītiem var iedalīt trijās fāzēs:



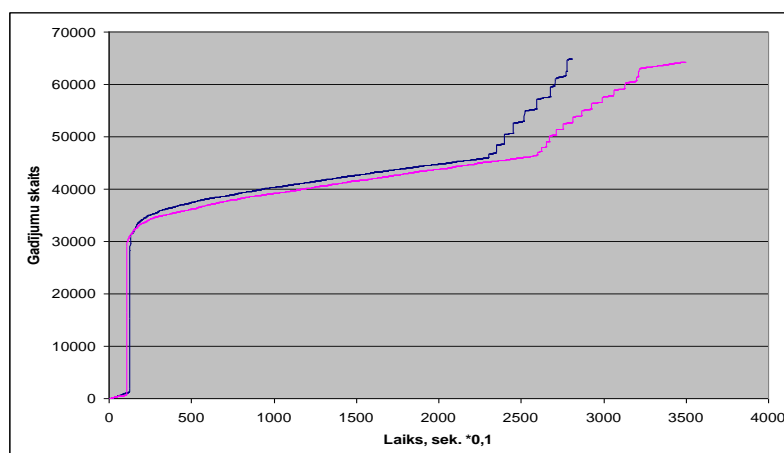
- 1.fāze – kad signāls ar minimālu enerģiju parādās ( $e = 3.31e^1 \div 3,52e^3$  eV). Tas atbilst plaisu veidošanās procesam parauga malās;
- 2.fāze – raksturo lielu enerģijas atbrīvošanos ( $e = 8.98e^6 \div 2,3e^7$  eV). Tās lielums norāda uz plaisu veidošanos parauga tilpumā;
- 3.fāze – sasniedzot sabrukšanas robežu, notiek šķiedru un matricas sabrukšanas process, kas atspoguļojas akustiskā signāla enerģijas lielumā ( $[e] =$  of  $2,09[e]8$  of  $[e]V$ ).

Signāla raksturs apstiprina pieņēmumu, ka sagrūšanas procesi kompozītmateriāla struktūrā notiek pakāpeniski un beidzas ar lavīnveida šķiedru sabrukumu. No signālu rakstura var noteikt, kādi no sagrūšanas procesiem konkrētajā laikā notiek paraugā. Tā lielais gadījumu skaita pieaugums ar relatīvi mazu signāla stipruma pieaugumu slogojuma sākuma daļā raksturo mazus, bet daudzus nenožīmīgus procesus, savukārt relatīvi mazais notikumu pieaugums ar lielu signāla stiprumu raksturo spēcīgāko šķiedru sagrūšanas procesu.

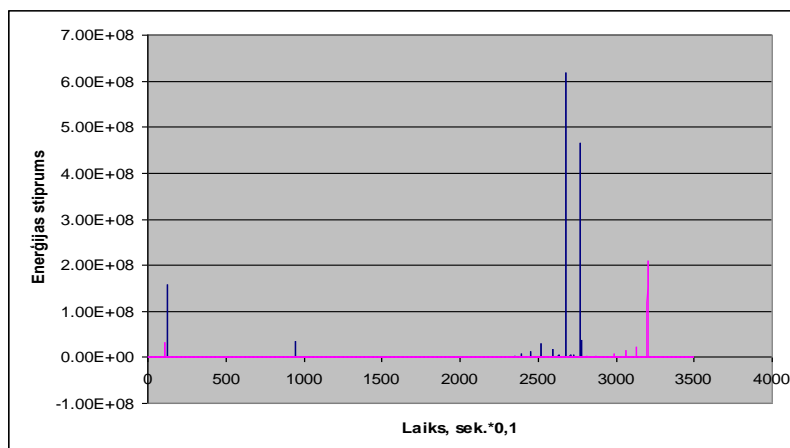
Attēlos 8 un 9 savukārt ir redzami un var salīdzināt divu paraugu akustiskos signālus slogojuma laikā. Attēlos paraugs kura akustiskās emisijas signālu summa attēlota ar zilo līniju saplīsa ātrāk uzrādot kritisko slogojuma spēku 6685 N, bet otrs paraugs attēlots ar lillā līniju uzrādīja 6549 N kritisko slogojuma spēku. No 8 attēla var redzēt ka signālu skaits ir aptuveni vienāds, kas arī tika sagaidīts, jo abi paraugi ir vienādi pēc izmēriem un materiāla. Ilglaicīgas parauga novērošanas gadījumā problēmu materiāla stāvokļa diagnosticēšanai pēc signālu summas rada blakus trokšņu atfiltrēšana jo to skaits var krietni pārsniegt paša parauga sabrukšanas procesu radīto notikumu signālu skaitu. Savukārt 9. attēlā mēs redzam kā uz grafiku ir atsaucies lielāks elastības modulis un lielāka parauga izturība. Tā no 8. attēla mēs redzam ka paraugs kurš attēlots ar zilo krāsu un ir mazāk elastīgs, bet toties izturīgāks salīdzinoši rada krietni lielāku akustiskās emisijas signāla stiprumu.

Pieņēmums attiecībā uz AE signāla uzvedību saistībā ar individuālo diegu pētījumu ir, ka elastības moduļa dispersija ietekmē kopējo sagrūšanas procesu, palielinot signāla amplitūdu slogojuma zonā, kas tuva kritiskai, jo, kā liecina pētījums, vairākas izturīgākās šķiedras saplīsis pirms kritiskā slogojuma sasniegšanas, savukārt dažas no vājākām šķiedrām ar lielāku elastību izturēs līdz pat kritiskā slogojuma sasniegšanai un tad sabruks, veicinot lavīnveida sabrukšanu. Šo

pieņēmumu apstiprina lielais AE signāla stipruma pieaugums slogojuma beigu daļā pie relatīvi nelielas signāla amplitūdas pieauguma.



**8. att.** Akustiskā signāla skaita summa diviem paraugiem



**9 att.** Akustiskā signāla stiprums diviem paraugiem

Apskatot dinamisko izmēģinājumu datus apskatīsim tos uz parauga, kurš izturēja 6 slogojuma ciklus, pamata. Pirmajā ciklā AE uzrādīja to slāņu sabrukumu, kuri atrodas  $90^\circ$  leņķī pret slogojumu un tāpēc ir visvieglāk sagraujami. Pēc tam notiek šķiedru delaminācija no matricas, kā arī intensīva pašas matricas plaisāšana. Nākamajos 4 ciklos sabrukšana pamatā notiek slāņos, kuri atrodas  $45^\circ$  leņķī pret slogojumu. 6.ciklā notiek šķiedru sabrukšanas process slāņiem, kuri ir orientēti  $0^\circ$  leņķī pret slogojuma spēku. Šo ciklu raksturo lielāka signālu enerģija, bet mazāks notikumu skaits. Matrica beigu posmā jau būtībā ir sagrauta.

Ir jāatceras, ka šķiedras tiek sagrautas pie katra cikla, bet ja salīdzina pirmos 5 ciklus, tad gadījumu skaits ir relatīvi mazs salīdzinājumā ar beidzamo ciklu.

Veicot eksperimentus, uzskatāmi var saskatīt materiāla uzvedību pie statiska slogojuma un pie dinamiska slogojuma. Eksperimenti ar ogļšķiedras lamināta paraugiem palīdzēja noskaidrot, ka akustiskās emisijas metode ļauj viegli izdalīt sabrukšanas procesus materiālā un ir piemērojama materiāla īpašību noteikšanā, bet, lai varētu veikt kvantitatīvu atlikušās ilgmūžības novērtējumu, ir jāveic padziļināts pētījums ar dažādu kompozītmateriālu paraugu testēšanu. Savukārt pats sabrukšanas process, sarežģīti armētā paraugā, sākotnēji notiek kompozīta matricā un beidzas ar lavīnveida materiāla sabrukumu, kuru daļēji veicina elastības moduļu un izturības īpašību sajaukums.

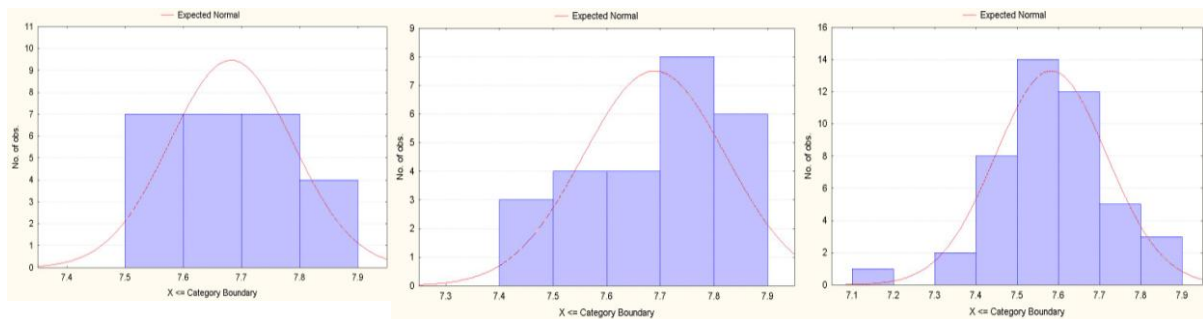
Apskatot iegūtos datus no statistikas skatu punkta, veicot aprēķinus, iegūst, ka eksperimentālo vērtību nobīde no paredzamajām vērtībām 15 mm paraugu spriegumiem ir  $k=0,12$ , 40 mm paraugiem –  $0,077$ , bet elastības moduļiem 15 mm paraugiem  $k=0,08$  un 40 mm paraugiem -  $0,10$ .

Savukārt, apskatot skaitliski izkliedes procentu, kādu sastāda izkliede pret vidējo sprieguma vērtību, iegūst pretēju sakarību – 15 mm gariem paraugiem izkliede sastāda 10%, 40 mm - 12% savukārt 60 mm - 13%. Tas nozīmē, ka, apskatot tikai spriegumu sadalījumu, to maksimālās un minimālās vērtības garākiem paraugiem atšķiras vairāk nekā īsākiem. Salīdzinot elastības moduļus redzams, ka garāko paraugu elastības moduļi ir koncentrētāki, savukārt, salīdzinot nobīdes, šoreiz var konstatēt, ka atšķirībā no spriegumiem elastības moduļi garākiem paraugiem ir ar mazāku izkliedi 14% - 15 mm gariem paraugiem un 9% - 40 mm gariem paraugiem.

Kā jau tika prognozēts, lielāks skaits eksperimentu ļauj iegūt lielāku atbilstību normālai sadalījuma funkcijai, kā arī pie lielāka paraugu garuma samazinās elastības moduļa izkliede.

Apskatot veikto eksperimentu datus, tika noteikta to atbilstība dažādiem sadalījumiem un vislabāko vidējo sakritību uzrādīja normālais sadalījums, bet spriegumiem logaritmisko vērtību atbilstība normālam sadalījumam. Tā ,piemēram, spriegumu logaritmu sadalījuma atbilstība normālam sadalījumam 15 mm, 40 mm un 60 mm gariem mikroparaugiem redzama 10 a, b un c. attēlā. Pirmajā gadījumā  $d_2 = 0,088$  un  $c_{n,\alpha}=0,20$ , otrajā  $d_2 = 0,188$  un  $c_{n,\alpha}=0,20$ , un trešajā  $d_2 = 0,076$  un  $c_{n,\alpha}=0,20$ .

Tas nozīmē, ka visos gadījumos var tik pieņemta hipotēze par to, ka eksperimentālie dati atbilst sagaidāmajam sadalījumam, un līdz ar to var atzīt datus par derīgiem.



a)

b)

c)

**10.att.** Spriegumu sadalījums a – 15 mm, b – 40 mm, c - 60 mm gariem mikroparaugiem

Kā jau tika prognozēts, lielāks skaits eksperimentu ļauj iegūt lielāku atbilstību normālai sadalījuma funkcijai, kā arī pie lielāka paraugu garuma samazinās elastības moduļa izkliede. Ir gūts apstiprinājums pieņēmumam, ka īsākos paraugos tika pieļauta neliela neprecizitāte, tos uzstādot, kas noveda pie aptuveni 13% izturības samazināšanās.

Veicot datu analīzi, autors sniedz vienkāršu metodi, kā piecos punktos kvalitatīvi noteikt atsevišķu eksperimentālo datu sēriju kvalitāti. Tātad, lai noteiktu kādu eksperimentālo skaitļu rindas kvalitāti:

- vizuāli jānovērtē to sadalījuma grafiks attiecīgās interesējošās koordinātēs. Ja vērtības grafikā ir centrētas un/vai izvietojušās kādā no līknes veidiem, tad pirmajā punktā novērtējumu dod 0, bet, ja dati atrodas pilnīgi haotiski, tad 0,1, savukārt neitrāls vērtējums ir 0,05;
- jānosaka datu nobīdes rādītājs no paredzamās funkcijas;
- skaitliski jānosaka datu izkliede procentu daļā;
- pēc Kolmogorova-Smirnova kritērija jānosaka datu atbilstība sadalījuma funkcijai. Rezultātā, lai iegūtu interesējošo rādītāju, izdala  $d_2 / c_{n,\alpha}$ ;
- jāskaita iegūtās vērtības. Šādā veidā iegūst vērtību, kurai tuvošanās nullei liecina par kvalitatīviem eksperimentāliem datiem un atbilstību pieņemtajiem nosacījumiem, savukārt, ja iegūtā vērtība pārsniedz 2, tad eksperimentālie dati nav derīgi vai tiem atbilstošie parametri ir izvēlēti nepareizi.

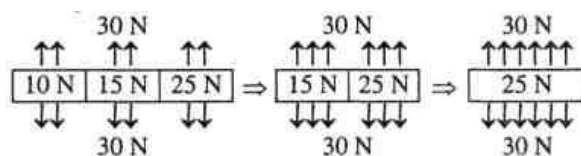
Pētījuma rezultātā tika konstatēti faktori, kas ietekmē mikroparaugu izturību, tās sadalījumu, elastības moduli un tā sadalījumu, tika skaitliski novērtēta dažādu apstākļu ietekme uz eksperimentu rezultātiem, kā arī tika piedāvāts vienkāršs modelis eksperimentālo datu kvalitātes novērtēšanai. Tā, piemēram, spriegumu vērtības 15 mm gariem paraugiem tika novērtētas ar 0,71, bet 40 mm paraugiem – ar 1,18, kas liecina par pieņemamu iegūto datu kvalitāti. Šāds vienkāršots vērtību novērtēšanas

modelis ļauj iegūt kopainu par iegūtajiem eksperimentālajiem datiem un tos savstarpēji salīdzināt. Autora iegūtos eksperimentālos datus var novērtēt kā vidējus – vidēji labus datus, un tas nozīmē, ka dati ir derīgi izmantošanai pētījumos.

## 5 Parauga sagrūšanas prognoze, ņemot vērā diegu individuālās īpašības

Galvenā ideja veicot šo pētījumu sastādīt materiāla sagrūšanas modeli ņemot vērā diegu saplīšanas procesus, pieņemot, ka tieši šie ir nozīmīgākie procesi, kas vislabāk atspoguļojas akustiskās emisijas signāla izmaiņās. Parasti lamināta izturību prognozē pēc tā šķiedru vai diegu maksimāliem spriegumiem vai to sadalījuma. Šajā pētījumā tika apskatītas lamināta prognozējamās izturības vērtības atšķirības un sabrukšanas rakstura atšķirības, ja tā tiek noteikta, vadoties no šķiedru diegu maksimālo pagarinājumu sadalījuma un/vai, ja tiek ņemts vērā izturības sadalījums. Līdz ar to varēs skaitliski novērtēt, cik lielu lomu materiāla izturībā spēlē viens vai otrs izturību nosakošs faktors. Par pamatu sastādāmajam modelim tiek ņemts M. Kleinhofa un Ju. Paramonova darbi šķiedroto komozītu izturības pētījumos.

Izstrādātajam modelim pamatā ir sabrukuma shēma, kas parādīta 14. attēlā.



11.att. Sabrukuma procesa shematisks attēls

Sarežģītākās struktūrās izturība pazeminās un nedaudz pazeminās arī dispersija. H.Danielss pierādīja, ka šķiedru kopuma stiprības sadalījums ir normālais sadalījums ar standarta novirzi, kas ir apgriezti proporcionāls  $\sqrt{n}$ . Taču praksē normālā sadalījuma vietā parasti lieto logaritmiski normālo un V.Veibulla sadalījumus. Netiek izpildīts arī standarta novirzes prognozējamais samazinājums apgriezti proporcionāli  $\sqrt{n}$ . Novērotās novirzes no H.Danieisa modeļa acīmredzot var izskaidrot ar to, ka pieņēmums par vienmērīgu spriegumu sadali starp elementiem ir nepatiess. Kompozītmateriālā, atšķirībā no savstarpēji nesaistītu pavedienu kūļa, sabrukuma attīstība nenotiek vienmērīgi visā tā šķērsgrīzumā, bet bojājuma tuvumā. Šī sabrukuma mehānismu var aprakstīt kā procesu, kas sākas ar noteikta kritisko elementu kopuma sabrukumu (kas atrodas parauga virspusē). Pēc tam sabrukums pārvietojas pa parauga

šķērsgriezumu, rezultātā sagraujot to pilnībā. Pat „aptuvenu vienmērību” var sagaidīt tikai ierobežotā parauga tilpumā, kas pakāpeniski maina savu pozīciju.

Šķērsgriezuma sabrukuma matemātiskais modelis ir aprakstāms ar formulām, kuras nosaka izturību i-tam šķērsgriezumam un paraugam kopā :

$$X_i^* = \max_t (x_t : n_C - K_{Ci}(t) > 0) \quad (1)$$

$$X = \min_{1 \leq i \leq n_L} X_i^* = \min_{1 \leq i \leq n_L} \max_t (x_t : n_C - K_{Ci}(t) \geq 0) \quad (2)$$

kur pirmajā gadījumā  $K_L$  šķērsgriezumu posmos  $0 < K_L < n_L$  parādās bojājumi  $K_{Ci}(t)$ ,  $0 < K_{Ci}(t) < n_C$ ,  $i=1, \dots, K_L$ ,  $n_L$  – posmu vai elementu skaits visā parauga garumā,  $n_C$  – paralēlo elementu skaits,  $K_L$  – gadījuma vērtība,  $K_{Ci}(t)$  – gadījuma laika funkcija, bet otrā gadījumā notiek sabrukuma attīstība vienā vai vairākos šķēlumos. Slogojuma process aprakstāms kā normālu spriegumu pieaugoša secība  $\{x_1, x_2, \dots, x_t, \dots\}$

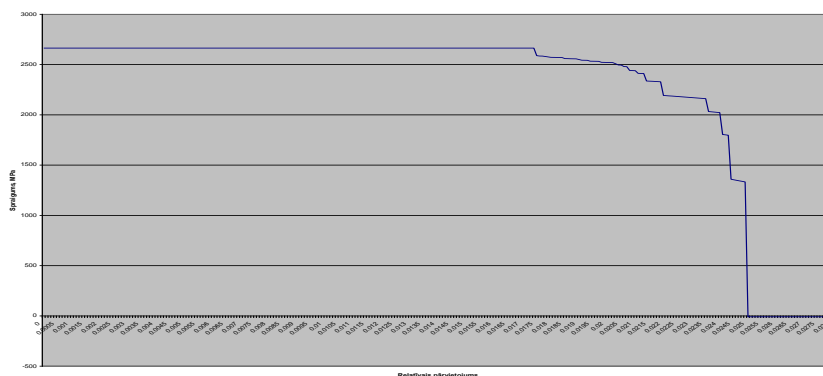
Lai prognozētu materiāla izturību pie stiepes, vadoties no mikroparaugu (diegu) īpašībām, tiks apskatīti trīs varianti - pirmais variants iekļauj stiprības aprēķinu, vadoties no diegu kritiskiem spriegumiem un otrs variants paredz noteikt materiāla izturību, vadoties no diegu kritisko pagarinājumu sasniegšanas kritērija. Trešais variants ir abu iepriekšējo variantu savienojums ar nosacījumu, ka katrs lamināta diegs var saplīst tikai vienu reizi pēc viena no kritērijiem sasniegšanas  $\varepsilon_i \max < \varepsilon$  vai  $\sigma_i \max < E\varepsilon$ , kur  $\varepsilon_i \max$  ir i-tā diega maksimālais relatīvais pagarinājums, savukārt  $\varepsilon$  ir lamināta relatīvais pagarinājums un  $\sigma_i \max$  ir i-tā diega maksimālais spriegums. Visos variantos tiek pieņemts vienkāršots modelis ar pieņēmumu, ka slānis sastāv no  $i$  šķiedru diegiem. Šie diegi savā starpā ir saistīti ar matricas materiālu, un šķiedru tilpuma attiecība pret matricas tilpumu ir tāda pati kā pētāmajos mikroparaugos. Visi diegi un to šķiedras ir ideāli saistīti un deformējas vienādi. Katra šķiedra vai diegs kopā ar matricu aizņem vienādu nosacītu laukuma vienību, un tiem ir vienāda šķiedras un matricas tilpumu attiecība. Rezultātā tiek iegūts ortotropisks lamināts ar 4 elastības konstantām. Lamināta modelis tiek pieņemts kā paralēlas, ģeometriski identiskas šūnas (šķiedra impregnēta matricā). Tiek pieņemts, ka diegs, atrodoties laminātā, var saplīst tikai vienu reizi. Diegu sabrukšana tiek pieņemta kā aptuveni simetriska un līdz ar to, pie stiepes sabrūkot kādam no diegiem, nerodas griezes momenti un laminātā darbojas tikai stiepes spēks virzienā 1, kas darbojas paralēli šķiedrām (nav nobīdes  $y$  virzienā). Šajā pētījumā netiek apskatīti procesi, kas norit materiālā pie spiedes, vērpes vai cērtes, kā arī netiek apskatīta stiepe virzienā 2 (perpendikulāri stiepes spēka virzienam), kā arī bīdes procesi pie stiepes.

Ogļšķiedras lamināta sagrūšanas simulācija pēc spriegumu kritērija vienmērīgam pārvietojumam galvenā ideja ir tāda, ka katra šķiedra vai diegs saplīst, sasniedzot tā kritisko spriegumu  $\sigma_{i \max}$ . Savukārt spriegumi, kādi rodas pie stiepes, sadalās pa visām šķiedrām vai diegiem vienādi  $\sigma_n = \sigma / i$ , kur  $i$  ir veselo šķiedru vai diegu skaits. Tātad pieliekot kādu ārējo spēku, laminātā radīsies spriegums, kas vienmērīgi sadalīsies uz visām šķiedrām, un kāda no šķiedrām saplīsīs, ja šis spriegums būs vienāds vai pārsniegs tās kritisko spriegumu. Sasniedzot šķiedras vai diega kritisko robežu, tas saplīst un līdz ar to kopējā buntē kļūst par vienu šķērsgriezuma laukuma vienību mazāks jeb izturības potenciālā tas izpaužas kā tā samazinājums par  $1/i$ -to daļu. Matemātiski modelis aprakstāms kā:

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon \sum_{i=1}^{n_C} \mathbf{1}(\bar{\sigma}_i < X_i) E_i \varepsilon_i f_i \quad (3)$$

kur  $X_i$  – kritiskais  $i$ -tā šķērsgriezuma spriegums,  $f_1, \dots, f_n$  – laukumi šķēstgriezumiem  $n$ ,  $E_1, E_2, \dots, E_n$  - elastības moduļi

Lai simulētu sagrūšanas procesu tika uzrakstīta neliela datorprogramma Matlab vidē. Aprēķinos netika ņemti vērā diegu kritiskie relatīvie pagarinājumi. Aprēķinātais parauga izturības potenciāla izmaiņas grafiks ir redzams 12.attēlā. Šajā attēlā ar zilo līniju ir redzams, kā samazinās parauga izturības potenciāls pie vienmērīgi pieaugoša pārvietojuma. Grafikā var redzēt sagrūšanas raksturu pie izvēlētajiem nosacījumiem, kā arī katra diega ietekmi uz kopējo izturības potenciālu, vai citiem vārdiem sakot cik lielu spriegumu paraugs spēs izturēt pēc katra nākamā vājākā diega sagrūšanas.



**12.att.** Izturības potenciāla samazināšanās pēc kritisko spriegumu sasniegšanas kritērija 15mm gariem paraugiem

Ogļšķiedras lamināta sagrūšanas simulācijai pēc pagarinājumu kritērija vienmērīgam pārvietojumam pamatā ir ideja, ka katra šķiedra vai diegs saplīst, sasniedzot tā kritisko pagarinājumu  $\epsilon_i$  max. Savukārt spriegumi, kādi rodas pie stiepes, netiek ņemti vērā. Tiek pieņemts, ka visu šķiedru pagarinājumi ir vienādi un tie ir vienādi ar lamināta pagarinājumu. Tātad pieliekot kādu ārējo spēku, laminātā radīsies pagarinājums, kas būs vienāds visās šķiedrās, un kāda no šķiedrām saplīsīs, ja šis pagarinājums būs vienāds vai pārsniegs tās kritisko lielumu. Sasniedzot šķiedras vai diega kritisko robežu, tas saplīst un līdz ar to kopējā buntē kļūst par vienu šķērsriezuma laukuma vienību mazāks jeb izturības potenciālā tas izpaužas kā tā samazinājums par  $1/i$ -to daļu. Matemātiski tas izsakāms kā :

$$\sigma(\epsilon) = \epsilon \sum_{i=1}^{n_c} \mathbf{1}(\epsilon \bar{\epsilon}_i E_i < X_i) E_i \bar{\epsilon}_i f_i \quad (4)$$

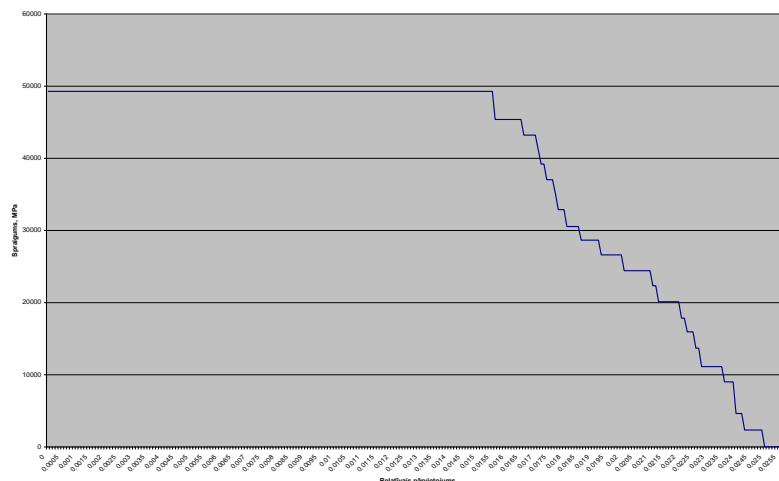
kur  $\bar{\epsilon}_i = \epsilon_i / \epsilon$  relatīvā deformācija  $i$ -tajam elementam pie vidējā šķēluma deformācijas  $\epsilon$ , gadījumu vērtību  $\bar{\epsilon}_i$  sadalījums nav atkarīgs no  $\epsilon$

Lai simulētu šāda veida lamināta sabrukšanu, tika uzrakstīta neliela programma, izmantojot datorprogrammu Matlab. Aprēķinātajā variantā tika izmantoti 25 mikroparaugu dati no zināmajiem eksperimentālajiem datiem. Līdz ar to var pieņemt, ka tika radīts virtuāls paraugs, kas sastāv no 25 diegiem. Lai simulētu sagrūšanu tiek ģenerēta paredzamo pārvietojumu rinda. Šīs vērtības katrā aprēķinu solī tiek salīdzinātas ar visu paraugu kritiskajām pārvietojumu vērtībām. Ja  $n$ -tā aprēķinātā pagarinājuma vērtība ir vienāda vai lielāka par  $i$ -to parauga kritisko vērtību, tad izturības potenciāls tiek samazināts par  $1/i$ -tās daļas vērtību, kur  $i$  ir veselo diegu skaits. Nākošajos aprēķinu soļos šī kritiskā spriegumu vērtība vairs netiek apskatīta. Šādi tiek virtuāli saplēstas visas šķiedras un noteikti šķiedru saplīšanas punkti. Aprēķinātais parauga izturības potenciāla izmaiņas grafiks ir redzams 13.attēlā. Šajā attēlā ar zilo līniju ir redzams, kā samazinās parauga izturības potenciāls pie vienmērīgi pieaugoša pārvietojuma.

Ogļšķiedras lamināta sagrūšanas simulācijai pēc pagarinājumu un spriegumu kritērija papildus iepriekš minētajiem pieņēmumiem un nosacījumiem papildus tiek pieņemti šādi simulācijas nosacījumi: virtuāli tiek testēts virtuāls paraugs, kas sastāv no  $i$  skaita šķiedru; šo šķiedru mehāniskās īpašības ir zināmas; paraugam tiek pielikts



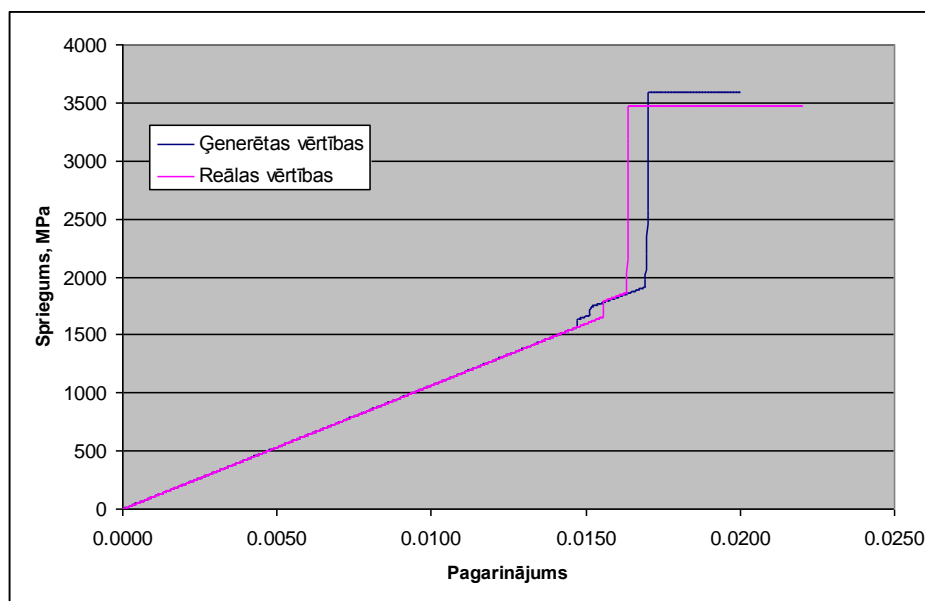
stiepes sloojums ar vienmērīgu ātrumu; apskatāmie spriegumi ir spriegumi, kādi darbojas uz nesagrautajām šķiedrām; katrs diegs var saplīst tikai vienu reizi pēc viena no nosacījumiem, kas izpildās pirmais; pēc katra diega saplīšanas spriegumi, kādi darbojas uz atlikušajām šķiedrām, palielinās par sagraudās šķiedras daļu; spriegumi sadalās pa visiem diegiem vienmērīgi.



**13.att.** Izturības potenciāla samazināšanās pēc kritisko pagarinājumu sasniegšanas kritērija 15mm gariem paraugiem

14. attēlā tiek attēlots gadījums ar kritisko pagarinājumu un spriegumu nosacījumu sasniegšanu uzģenerētām un reālām vērtībām. Lai simulētu materiālā notiekošos procesus mums ir nepieciešams zināt diegu mikroparaugu sagaidāmo izturību, kritisko pagarinājumu un to standarta nobīdes, savukārt, kā jau tika apskatīts iepriekš, eksperimentālo datu sadalījuma funkcija ir normāla sadalījuma funkcija. 14. attēlā ir attēlots spriegumu pieaugums materiālā simulētiem datiem ar normālu sadalījuma funkciju un 15mm garo paraugu nobīdes un mēroga koeficientiem. Kā redzams salīdzinot simulēto datu grafiku ar eksperimentālo datu prognozes grafiku, ir vērojama ļoti laba gan rakstura gan kritisko vērtību sakritība.

Ja salīdzinām iegūtās materiāla kritiskās vērtības ar vidējām vērtībām tad piemēram 15 mm gariem paraugiem kritiskā deformācija ir 0,021 un kritiskais spriegums 2181,7 MPa, bet aprēķinu vērtības attiecīgi ir 0,01633 un 1870 MPa. Savukārt 40 mm gariem paraugiem kritiskā deformācija ir 0,013 un kritiskais spriegums 2202,4 MPa, bet aprēķinu vērtības attiecīgi ir 0,010 un 2190 MPa



**14. att.** Ogļšķiedras paraugu sagrūšanas simulācija

Tātad ja mums ir nepieciešams novērtēt lamināta kompozītmateriāla izturību vai piemeklēt tādas šķiedru īpašības, kuras apmierinātu mūsu izvirzītās prasības ir jāzina diegu mikroparaugu kritisko pagarinājumu vērtības un to izkliede, kā arī kritiskie spriegumi un to izkliede. Vērtību sadalījumi pietiekami lielam skaitam diegu tiecās uz normālu sadalījuma likumu. Galvenā priekšrocība šādai materiāla kritisko parametru novērtēšanai ir tieši paša sabrukšanas rakstura novērtēšanas iespēja. Testējot gatavus kompozītmateriāla lamināta paraugus viegli var noteikt kritiskos spriegumus un pagarinājumus, bet grūti noteikt materiāla sabrukšanas trauslumu vai plastiskumu. Vienīgi pielietojot nesagraujošās diagnostikas metodes mēs varam iegūt vispārīgu sabrukšanas ainu, bet pielietojot izstrādāto modeli ir viegli precīzi skaitliski noteikt kādā sabrukšanas stadijā materiāls atradīsies pie konkrētiem slogojumiem.

Paraugu sabrukšanas analīze ļauj ne tikai labāk prognozēt materiāla maksimālo izturību kopumā un novērtēt potenciālā materiāla sagrūšanas ātrumu, bet arī saprast akustiskās emisijas signālu dabu.

## 6. Nobeigums

### Darba secinājumi:

- Paraugu sabrukuma rezultātu sasaistīšana ar akustiskās emisijas signālu uzvedību, materiāla sagrūšanas laikā, ļauj savstarpēji pārliecināties par

akustiskā signāla pareizu sapratni un izstrādātā sabrukšanas modeļa atbilstību reāliem sabrukšanas procesiem paraugos.

- Iegūtiem rezultātiem ir praktisks pielietojums, kā arī tas ir papildināms un izmantojams tālākai pilnveidei

#### **Darba izpildes rezultātā iegūta sekojoša informācija un rezultāti:**

- Tika veikta kompozītmateriāla izturības noteikšanas, kā arī to ietekmējošo faktoru analīze
- Tika izgatavoti un veikti 200 eksperimenti ar oglekļa šķiedru diegu mikroparaugiem
- Tika veikta kompozītmateriāla diegu mikroparaugu statistiskās izturības un elastības moduļu izkliedes analīze
- Tika izgatavoti 50 sarežģīti armēti paraugi un veikti eksperimenti ar akustiskās emisijas signāla pierakstīšanu un izmaiņu pētīšanu
- Tika izstrādāta metode kā novērtēt eksperimentu rezultātus
- Tika izstrādāts modelis, kas ļauj modulēt paraugu sagrūšanas dinamiku gadījumos, ja tiek ņemta vērā diegu kritiskā pagarinājuma izkliede un, ja tiek ņemta vērā kritisko spriegumu izkliede. Balstoties uz izstrādāto modeli tika iegūts kompozītmateriāla spriegumu pieauguma pie stiepes līknes apraksts.

#### **Praktiskais pielietojums ir sekojošs**

- Izstrādātais modelis ļauj novērtēt un optimāli izvēlēties materiālu īpašības projektēšanas laikā
- Izstrādātā modeļa sasaiste ar akustiskās emisijas signālu ļauj mums, pielietojot akustiskās emisijas devējus, brīdināt par konstrukcijas izturības maksimuma sasniegšanu.
- Izstrādātā eksperimentālo datu kvalitātes novērtēšanas metodika ļauj savstarpēji salīdzināt un novērtēt dažādus eksperimentālos datus, kā arī to atbilstību to paredzamam raksturam.

#### **Personīgo publikāciju saraksts**

1. J. Paramonovs, J. Andersons, M. Kleinhofs, I. Blumbergs, „MINIMAXDM Distribution Family for Analysis of the Tensile Strength of a Unidirectional

- Composite”; Mechanics of Composite Materials, Rīga, Latvija, vol 46, Nr.3, 24-28 maijs 2010, 397-414 lpp., ISSN 0203-1272
2. I.Blumbergs, R. Chatis, M. Kleinhofs, „Experimental Research of Carbon Fibber Composite Material Characteristics”(IVth International Conference On Scientific Aspects of Unmanned Aerial Vehicle, Suchedniów/k.Kielc, Poland, 5 – 7.may 2010.; 46-51 lpp. ISBN 978-83-88592-70-6
  3. I.Blumbergs ,R. Chatis, M. Kleinhofs, „Experimental Research of Carbon Fibber Composite Material Zero order Model Characteristics” Chapter Edited by prof. Zdzigniew Koruba “Monografy - SCIENTIFIC ASPECTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLE” Polish SOCIETY OF Theoretical and Applied Mechanics (in print)
  4. J. Paramonovs, J. Andersons, M. Kleinhofs, I.Blumbergs „MINIMAXDM Distribution Family for Analysis of the Tensile Strength of a Unidirectional Composite”, Mechanics of Composite Materials, Springer New York, USA, vol 46,No. 3 2010, 275-287 lpp., 11029 ISSN 0191-5665
  5. I.Blumbergs, M. Kleinhofs. Experimental research of composite material characteristics using acoustic emission//RRDPAE 2008 conference CD, oct. 16-17, 2008. (ISSN: 1425-2104)/ Brno,Čehija
  6. I.Blumbergs, M. Kleinhofs. Experimental research of composite material acoustic emission characteristics.// 3rd International Conference „Supply on the wings” Conference manual, nov.11-13, 2008, Frankfurt, Germany
  7. I.Blumbergs, M. Kleinhofs, Rafal Chatys. Experimental research of composite material characteristics.//Mašīnzinātne un transports (sērija 6, sējums27),2008, Rīga , Latvija