

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**I. Blumbergs**

**Kompozīta materiāla izturības modelēšana**

**PROMOCIJAS DARBS**

2010

**Rīgas Tehniskā universitāte**

**TMF**

**Aviācijas institūts**

**Ilmārs Blumbergs**

doktora studiju programmas "Aviācijas transports" doktorants

**Kompozīta materiāla izturības modelēšana**

Promocijas darbs

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

Rīga 2010



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

This work has been supported by the European Social Fund within the project „Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University”.

Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта „Поддержка развития докторантуры РТУ”.

## Saturs.

1. Ievads.....	4
1.1 Aktualitāte .....	4
1.2 Kompozītmateriālu pielietojuma tendences lidmašīnu konstrukcijās .....	7
1.3 Kompozītmateriālu pielietošanas priekšrocību piemēri .....	11
1.4 Darba mērķis .....	14
1.5 Zinātniskā novitāte .....	16
1.6 Praktiskā nozīme .....	16
1.7 Pētāmā matereāla apskats .....	17
1.7.1 Kompozītmateriālu polimēru veida saistvielas.....	18
1.7.2 Šķiedroto armējošo materiālu īpašības.....	22
1.7.3 Sprieguma un deformācijas līknes.....	24
1.8 Kompozītmateriālu remonts .....	25
2. Kompozītmateriālu izturības analīze.....	30
2.1 Kompozītmateriālu klasifikācija .....	30
2.2 Kompozītmateriālu stiprība un elastība.....	32
2.3 Šķiedru un matricas attiecība.....	35
2.4 Šķiedru un matricas savstarpējā mijiedarbība .....	38
2.5 Ražošanas faktori, kas ietekmē kompozītmateriālu īpašības.....	42
2.6 Kompozītmateriālu mehānisko īpašību noteikšana un diagnostika.....	43
2.7 Kompozītmateriālu nogurums un ilgizturība.....	47
2.8 Šķiedru izturība .....	50
2.9 Eksploatācijas faktoru ietekmes uz kompozītmateriālu statistiskajām un noguruma īpašībām analīze .....	55
3. Praktiskie eksperimentālie pētījumi .....	58
3.1 Ogļšķiedras mikroparaugu eksperimenti.....	58
3.2. Akustiskās emisijas datu eksperimenti statiskam slogojumam .....	64
3.2. Akustiskās emisijas datu eksperimenti dinamiskam slogojumam.....	69
4. Iegūto eksperimentālo datu analīze .....	72
4.1 Ogļšķiedras mikroparaugu eksperimentu analīze.....	72
4.2. Akustiskās emisijas datu apstrāde, lai noteiktu kompozītmateriāla sabrukuma stāvokli .....	85
4.3. Ogļšķiedras mikroparaugu eksperimentu elastības un izturības parametru statistiskā analīze.....	93
5 Parauga sagrūšanas prognoze, ņemot vērā diegu individuālās īpašības.....	98
5.1. Ogļšķiedras lamināta sagrūšana pēc spriegumu kritērija vienmērīgam pārvietojumam .....	99
5.2 Ogļšķiedras lamināta sagrūšana pēc pagarinājumu kritērija vienmērīgam pārvietojumam .....	101
5.3 Ogļšķiedras lamināta sagrūšana pēc pagarinājumu un spriegumu kritērija .....	103
6. Nobeigums.....	111
7. Literatūra .....	114
8. Pielikums .....	117

# 1. Ievads.

## 1.1 Aktualitāte

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 paaugstinašana nebūtu iespējama, kuru izgatavošana nebūtu iespējama bez modernu kompozītmateriālu pielietojuma. Šo lidaparātu drošuma un ilgizturības nodrošināšanai nepieciešams zināt attiecīgo kompozītmateriālu statiskās izturības un noguruma ilgizturības raksturlielumu saistību, jāspēj prognozēt šo lielumu izmaiņas, ja tiek mainītas kompozītmateriāla komponentu īpašības, kompozītu izgatavošanas tehnoloģijas nenodrošina pilnīgu izstradājumu īpašību vienādību.

1.1 tabulā salīdzinātas izturības īpašības, blīvums un citas īpašības dažādiem aviācijā izmantotiem materiāliem. Kā redzams no tabulas, visizturīgākie ir tērauda materiāli, kuru stiepes izturība sasniedz 1260 MPa, tomēr to lielās masas dēļ ( $\gamma = 7,8 \text{ g/cm}^3$ ) relatīvie raksturlielumi tērauda materiāliem ir sliktāki. Parasti tēraudu izmanto šasijas izgatavošanai. Visai plaši lidmašīnu konstrukcijās tiek izmantoti alumīnija un titāna sakausējumi, jo tiem ir ievērojami mazāka masa salīdzinot ar tēraudu ( $2,7$  un  $4,5 \text{ g/cm}^3$  attiecīgi), kā arī tiem ir labi izturības rādītāji. Titāna sakausējumiem relatīvā izturība ir lielāka nekā alumīnija sakausējumiem, tomēr to augstās cenas dēļ tos pielieto retāk – tikai augsti noslogotos un atbildīgos konstrukcijas elementos (ugunsdrošības starpsiena, dzinēja piekares elementi). Alumīnija sakausējumi ir visvairāk izmantotie sakausējumi, tomēr arvien vairāk to vietā sāk izmantot kompozītmateriālus. Kompozītmateriālu izturības parametri ir salīdzināmi ar alumīnija sakausējumu parametriem, tomēr to relatīvais svars ir ievērojami mazāks, bet noguruma īpašības ievērojami lielākas.

Šobrīd visizplatītākie ir stiklšķiedru un ogļšķiedru kompozīti. Stiklšķiedru kompozītiem ir relatīvi liela stiprība, izturība pret mainīgām slodzēm un termiskiem/siltuma triecieniem/sitieniem, augsta radiocaurīdība, izturība pret koroziju un eroziju, tie labi padodas mehāniskai apstrādei. Vēl viena būtiska stiklšķiedras kompozītu priekšrocība salīdzinājumā ar pārējiem kompozītmateriāliem ir to salīdzinoši zemā cena. Pirmo reizi stiklšķiedru kompozīti tika pielietoti lidmašīnu konstrukcijā četrdesmito gadu sākumā antenu aptecētājos un vēlāk dažāda tipa palīgkonstrukcijās. Mūsdienās stiklšķiedru kompozīti tiek

pielietoti dažādās lidmašīnās: iznīcinātājos, pasažieru un sporta lidmašīnās. Tā, piemēram, iznīcinātājam Eurofighter 2000 10% planiera masas un 12% planiera virsmas ir no stiklšķiedras kompozīta. Vieglām lidmašīnām (līdz 1000 kg) un vispārīgās nozīmes planieriem stiklplastīti pašlaik ir pamatmateriāls, jo konstrukcijas ir iespējams izgatavot darbnīcā pēc vienkāršas tehnoloģijas.

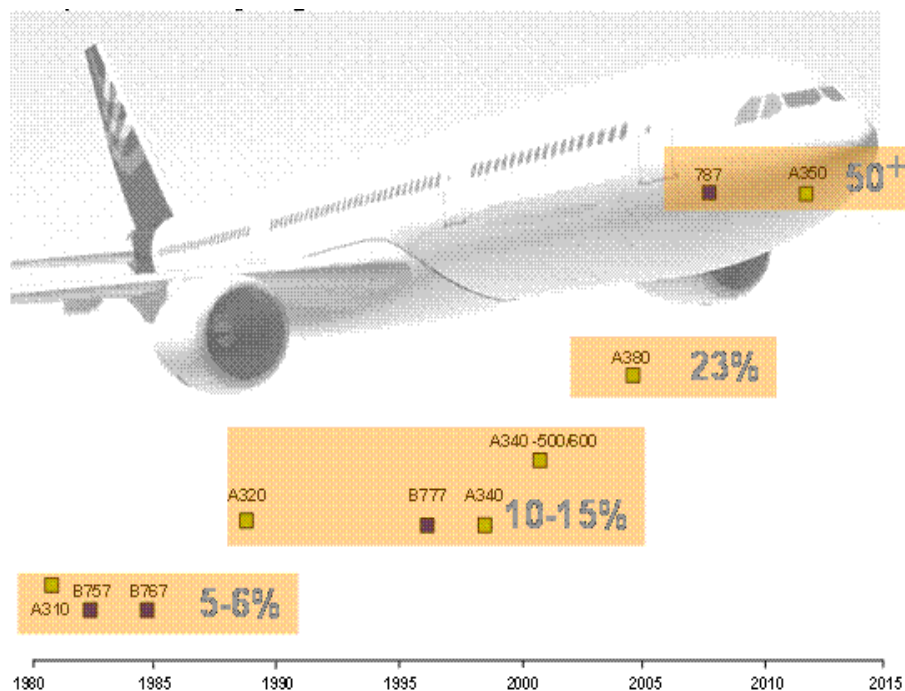
1.1.tabula

Dažādu materiālu īpašības					
Materiāli	Kritiskais spriegums, MPa	Elastības modulis, GPa	Materiāli	Kritiskais spriegums, MPa	Elastības modulis, GPa
Tērauds	770-2200	180-210	Polietilēns	20-45	6-8,5
Alumīnijs	260-700	69-72	Neilons	80	2,8
Titāns	1000-1200	110	Polipropilēna šķiedras	730-930	4,4
Tērauda stieple (20-1500μm)	1500-4400	180-200	Stikla šķiedras (3-19μm)	3100-5000	72-95
Alumīnija stieple (150μm)	290	69	Polietilēna šķiedras (20-40μm)	2600-3300	120-170
Titāna stieple (100-800μm)	1400-1500	120	Augstas izturības oglekšķiedras (5-11μm)	7000	300
Epoksīds	60-90	2,4-4,2	Augsta moduļa oglekšķiedras (5-11μm)	2700	850

Perspektīvākais KM aviācijas konstrukcijām ir oglekšķiedru KM. Tam ir augstas stiprības un stingruma īpatnējās īpašības, termiska izturība līdz 570 K, mazs lineārās izplešanās termiskais koeficients, laba erozijas izturība un izturība pret agresīvu vidi. Oglekšķiedras kompozīts ir pamatmateriāls, kurš tiek pielietots militārās un pasažieru maģistrālās lidmašīnās. Iznīcinātājā EF 2000 40% planiera masas un 70% planiera virsmas sastāv no oglekšķiedras KM. Jaunākajā ASV iznīcinātājā F-22 oglekšķiedru KM tiek pielietoti

apšuvuma paneļos, spārna starp lonžeros, nespēka špangoutos. Apšuvuma paneļos kompozītmateriālu plātnes tiek pielietotas savienojumā ar šūnām. Oglekļšķiedras KM tiek plaši pielietoti „STEALTH” tehnoloģijā. Bumbvedējā F-117A oglekļakompozīts tiek pielietots kā radioabsorbējošs materiāls.

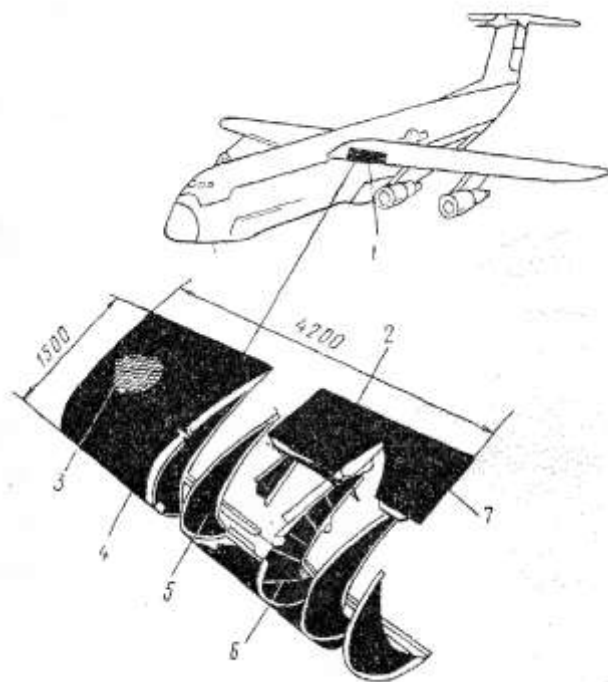
Boroplastīti tiek pielietoti gadījumos, kad ir nepieciešama augsta spiedes stiprība, kā arī kad konstrukcijas elementi strādā paaugstinātas temperatūras apstākļos. Tie dod lielāku masas samazināšanu, bet boroplastīti ir pārāk dārgi un tiek izmantoti galvenokārt eksperimentālas konstrukcijās un aerokosmiskajā rūpniecībā.



1.1.att. Kompozītu izmantošana (%), atkarība no lidmašīnas masas

Iznicinātājam F-15 0,4% planiera masas ir boroplastīti. KM arvien plašāk tiek pielietoti metālisku profilu stiprības palielināšanai un aizsardzībai pret koroziju. Visefektīvākā ir KM pielietošana integrālās konstrukcijās, kas dod iespēju izvairīties no daudzām saskares vietām, savienojumiem, samazināt detaļu skaitu un ražošanas izdevumus uz būtiskas konstrukcijas masas samazināšanas rēķina.

Parasti masas pazemināšana mūsdienu kara lidmašīnu ražošanā ir apmēram 20%; perspektīviem gaisa kuģiem – ap 25%; perspektīviem militāriem kuģiem – līdz 30...35%; kosmisko aparātu konstrukcijām – līdz 40%. No šķiedrām (stikla, ogļu, organisko un bora) visplašāk pielietotas oglekļa un Kevlara tipa aramīda šķiedras.

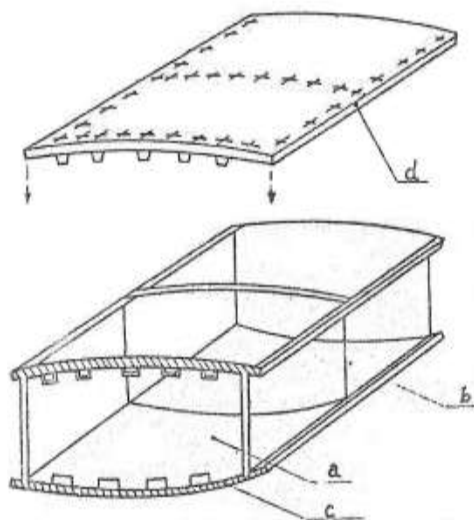


1.2.att. Lidmašīnas C-5 priekšspārns no epoksīda boroplasta: 1- augsti noslogots elements, kas strādā stipras korozijas iedarbības apstākļos; 2- hermētiķis, aplāts ar caurspīdīgiem epoksīda sveķiem aizsardzībai pret apkārtējās vides iedarbību; 3- alumīnija šūnu aizpildītājs; 4- malējais paneļa elements- zibensnovedējs (titāna); 5- apšuvums no epoksīda boroplasta; 6- virzošā spēka pievada stingrības ribas; 7- priekšspārns

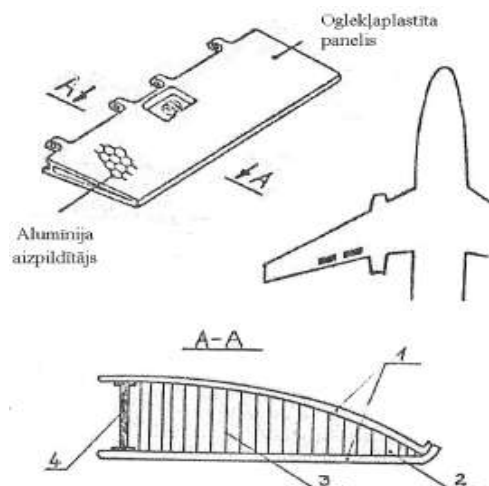
## 1.2. Kompozītmateriālu pielietojuma tendences lidmašīnu konstrukcijās

Gaisa kuģu spārna konstrukcijās šobrīd jau bieži izmanto oglekļa šķiedras un hibrīdu oglekļa un bora šķiedru maisījumu. Tā, piemēram, militārām lidmašīnām F-15 spārna priekšējo malu (priekšspārns), lidmašīnas F-111 fizelāžas paneļus, dažu kara lidmašīnu šasijas nišu vārtņes, kā arī nesošo konstrukciju elementus izgatavo no oglekšķiedras (sk. 1.2.tab.). Savukārt civilās aviācijas lidmašīnās B-737 uzstādīti interceptori, kas izgatavoti no oglekšķiedras, lonžeroni, ribas un apšuvums no stikla šķiedras uz lidmašīnām L-1011, B-757,767, A-300 (sk. 1.3.tab.).





1.3.att. Spārna sekcijas no kompozītmateriāla konstrukcija a) riba; b) lonžerons; c) monolīts spārna apakšējais apšuvums; d) piestiprināmais augšējais apšuvums



1.4.att. Lidmašīnas B-737 interceptors 1) apšuvums no oglekļplastīta 2) alumīnija šūnu aizpildītājs; 3) riba no stiklplastīta; 4) alumīnija fittingi un lonžerons

1.2.tabula

### Militārā aviācija

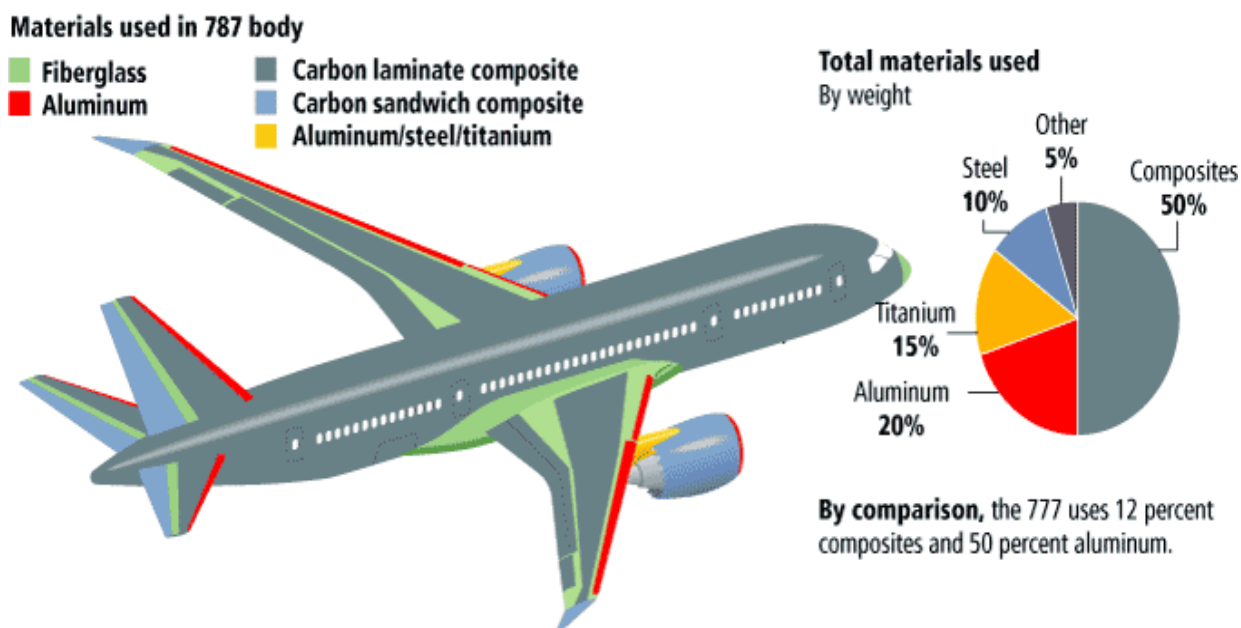
Gaisa kuģis	Kompozītmateriāla elementi, kompozītu sastāvs, %
F-16	Boroepoksīda apšuvums, virziena stūres un stabilizators.
Rafale	Spārnojuma (kesona, ķīla, ķīla deguna, virziena stūres, stabilizatorā) oglekļa epoksīda apšuvums 23%
F-18	Spārna, spārnojuma, fizelāžas konstrukcijas 27%
Lockheed	Oglekļaepoksīda elerona apšuvums 28%
F-22	KM masa 24% no konstrukcijas masas. Oglekļplastīti: apšuvums, lonžeroni, nespēka špangouti.
ЯК-130	Oglekļplastīti: spārnojums, spārna mehānizācijas elementi, lūkas un pārsegi.
ARES	Lidmašīnu konstrukcija sastāv vairāk nekā uz 50% no masas ir izgatavota no KM.
EF2000	Oglekļplastīti: 40% no planiera masas, 70% no planiera virsmas. Stiklplastīti: 10% no planiera masas, 12% no planiera virsmas.

1.3.tabula

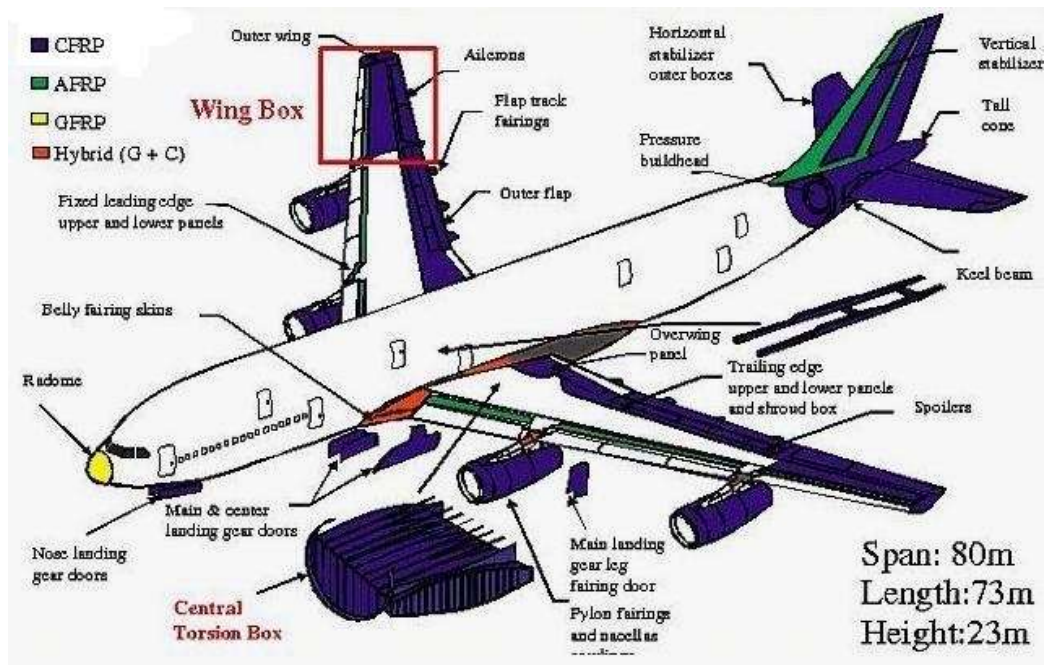
## Civilā aviācija

Gaisa kuģis	Kompozītmateriāla elementi, kompozītu sastāvs, %
L-1011	Kesona stabilizatora boroepoksīda apšuvums, masas samazināšana par 28%, oglekļaepoksīda ķīlis.
DC-10/AH-70	Oglekļaepoksīda ķīlis/Oglekļaepoksīda ventilatori
B-737	Oglekļaepoksīda interceptori, masas samazināšana par 17%, Oglekļaepoksīda stabilizators, masas samazināšana par 22%.
B-767, B-757	KM apjoms 3%, interceptori, eleroni, stūres, spārnojums (masas samazināšana par 921 kg).
B-787	Kompozītu sastāvs 50% (sk. 16. att.)
A380	40% sastāv no grafiņa, kompozītmateriāla elementus (sk. 6. att.)

Vispārīgās lidmašīnu izgatavošanas tendences ir no kompozītmateriāliem izgatavot lidmašīnu vadības virsmu konstrukcijas, spārnojumu (kesona, ķīla, virziena stūres, stabilizatora konstrukcijās), šasijas vērtnes, kravas nodalījumu vērtnes, gaisa savācējus (pamatā no stikla-, bora-, oglekļa-, organoplastītiem).



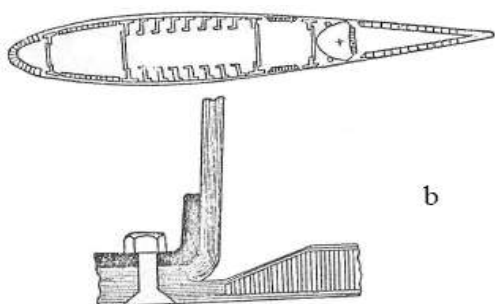
1.5.att. B-787 materiālu sastāvs



1.6.att. A380 kompozītmateriālu elementi

Kompozītmateriāla īpašības ir atkarīgas no tajā ietilpstošo komponentu īpašībām, to sastāva un šķiedru savstarpējā izvietojuma (orientācijas) attiecībā pret slodzes darbības virzienu. Materiāla galvenais nesošais elements, kas nosaka mehānisko raksturojumu līmeni, ir šķiedras aizpildītājs dažādu tekstila struktūru veidā.

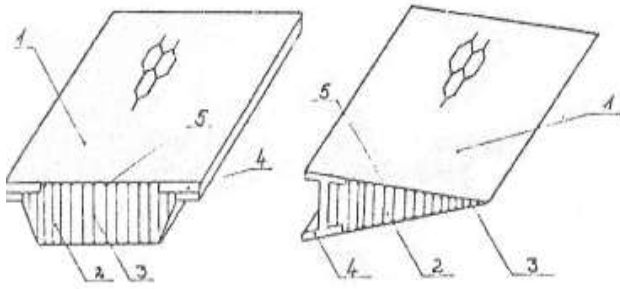
Kā aizpildītāji tiek izmantoti divu tipu oglekļa šķiedras – vienvirziena oglekļa lentas un grīste, kā arī bora šķiedras monošķiedru un kompleksu borostikla pavedienu veidā.



1.7.att. Oglekļa kompozīta panelis

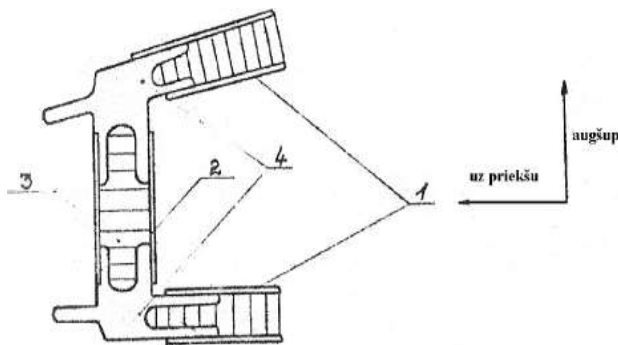
a) vispārēja paneļa forma b) paneļa daļas ar stringeru šķēlums

Par putuplastiem (vai gāzpildītām plastmasām) sauc vieglus polimēru materiālus ar šķietamo blīvumu (terminoloģija no ГОСТ 409-68) no 15-20 līdz 300-500 kg/m<sup>3</sup>, kurus putojot iegūst no dažādiem polimēriem sintētiskajiem sveķiem. Pēc makrostruktūras šie materiāli dalās putainajos (slēgti dobumainajos) un porainajos (ar savienotiem dobumiem-porām). Slēgti dobumainā struktūra ir cietajiem putuplastiem, atvērti-poraina, sūkļveidīga - elastīgajiem.



1.8.att. Konstrukcija ar šūnu aizpildītāju  
 1) virsslānis; 2) šūnu aizpildītājs; 3) šūnu aizpildītājs ar aizpildītām šūnām ; 4) lonžerons; 5) savienojums (līme, metinājums, lodmetāls)

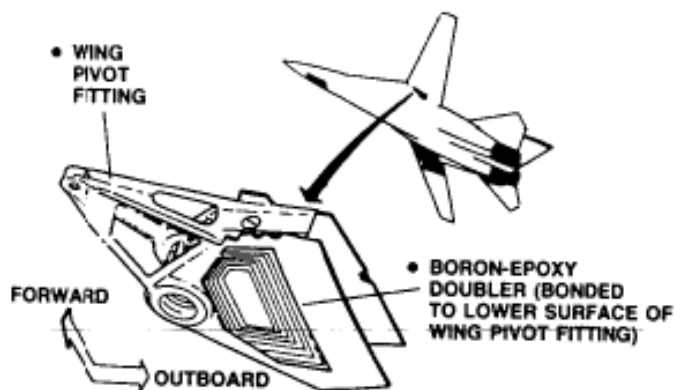
Putuplastu īpašības atkarīgas no to blīvuma un no polimera bāzes ķīmiskā rakstura. Visaugstākā izturība ir plātņu putuplastiem, kurus iegūst, no lineāra termoplastiskā polimēra - polistirola un polivinilhlorīda (ПC-1, ПC-4, ПХВ) - kompozīcijas ar apjoma piesēšanās metodi. Taču šo materiālu ekspluatācijas maksimālā temperatūra nepārsniedz 60-70° C.



1.9.att. Apšuvuma un lonžerona sienas savienošana  
 1) apšuvums no KM; 2) siena no KM; 3) alumīnija šūnu aizpildītājs; 4) titāna uzgalis

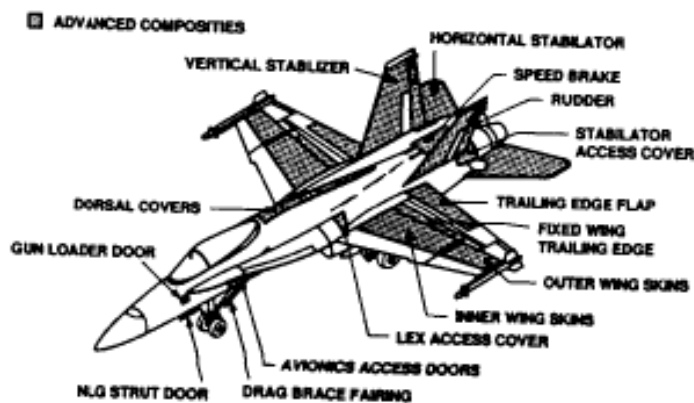
### 1.3 Kompozītmateriālu pielietošanas priekšrocību piemēri

Kā jau iepriekšējā nodaļā minēts, kompozītmateriāli arvien vairāk tiek izmantoti dažādās lidmašīnu konstrukcijās. Kāpēc tad kompozītmateriālus pielieto? Lai atbildētu uz šo jautājumu, piedāvāju dažus piemērus. Tā, piemēram, General Dynamics (tagad Lockheed Martin) izgatavotai kaujas lidmašīnai F-111 ar kustīgu spārnu konstrukciju (piekļaujamu pie lieliem ātrumiem), sākotnēji no tērauda izgatavotais spārna pamateņģojums (sk. 1.10.att.) bieži plīsa noguruma plaisu veidošanās dēļ. Plaisu veidošanās pamatā tika konstatētas centrālās plaknes rajonā. Vienkāršākais risinājums būtu palielināt plaknes biezumu apdraudētajā rajonā, tomēr kā efektīvāku un lētāku risinājumu izvēlējās pastiprināt esošo detaļu ar borona-epoksīda uzlikām, kuras tika pielīmētas apdraudētajām vietām. Šajā gadījumā šāds risinājums tika pielietots ekonomisku apsvērumu dēļ, bet kopumā šis piemērs parāda kompozītmateriāla pielietošanas iespējas.



1.10.att. F-111 spārna pamat eņģojums

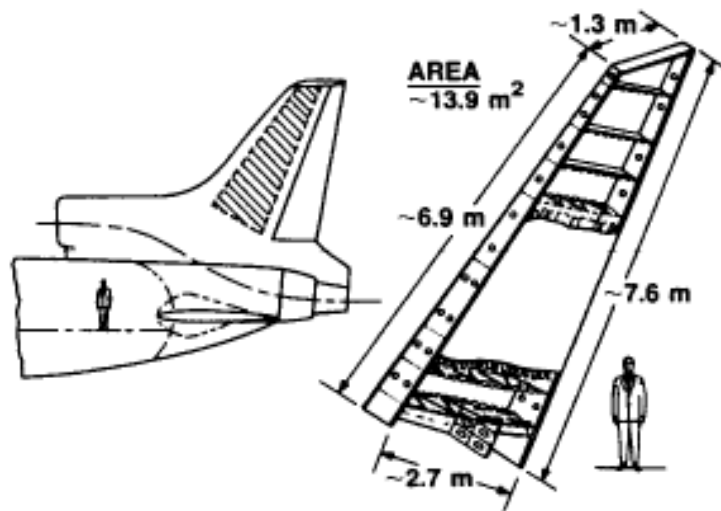
Vēl citai kaujas lidmašīnai Boeing F-18 kompozītmateriāli jau no paša sākuma tiek pielietoti ļoti plaši. Pārsvārā tie ir oglekļa epoksīda kompozītmateriāli (sk. 1.11.att.). Kādēļ tik plaši tiek pielietoti oglekļa kompozītmateriāli šādās otrās paaudzes daļēji kompozītmateriālu lidmašīnās? Viena no atbildēm ir fakts, ka šādā veidā viegli var ietaupīt vismaz 10% svara. Otrs būtisks ieguvums ir detaļu skaita samazinājums (apmēram 30%) un no tā izrietošais izmaksu samazinājums.



1.11.att. F-18C/D kompozītmateriālu pielietojums

Ieguvums no parastās tehniskās apkopes veikšanas, pielietojot kompozītmateriālus metālu vietā, ir pat 50% mazākas nepieciešamās cilvēku darba stundas un šis rādītājs – lidojumu stundu attiecība pret tehniskās apkopes stundām - ir ļoti svarīgs lidmašīnas uzticamības rādītājs.

Civilās aviācijas lidmašīnai Lockheed L-1011 vertikālā ķīļa sija (sk. 1.12.att.), izgatavojot to no kompozītmateriāla, ir tik viegla, ka to var panest viens cilvēks, neskatoties uz to, ka tā ir 7 m gara. Tomēr izstrādājot šo konstrukciju, projektētāji sastapās ar problēmu, kā savienot divas kompozītmateriālu detaļas, kā rezultātā nācās konstrukciju pastiprināt.



1.12.att. Lockheed L-1011 vertikālais stabilizators

Inženieru mērķis, izstrādājot jauno virzienstūri, bija ne tikai samazināt izstrādājuma svaru, bet arī aprēķināt izmaksu starpību starp kompozītmateriāla konstrukciju un alumīnija sakausējumu konstrukciju. Alumīnija sakausējumu izgatavošanas izmaksas ir aptuveni 5% no kopējām izmaksām turpretī oglekļa epoksīdam 14%. Lai gan izejmateriāla cenas kompozītmateriāliem ir gandrīz 3 reizes lielākas, tomēr kopējās izmaksas visai konstrukcijai ir par 10% zemākas. Tas saistīts ar to, ka lielu iespaidu uz kopējām izmaksām atstāj darbaspēka izmaksas gan pie mezgla salikšanas, gan ražošanas apkalpošanas (sk. 1.4.tab.). Būtībā izstrādājuma izmaksas pārsvarā nosaka tieši nepieciešamā darbaspēka izmaksas un tas arī nosaka to, ka kopējās izmaksas kompozītmateriālu izstrādājumiem ir lētākas par alumīnija izstrādājumiem, neskatoties uz to, ka izejmateriāls kompozītmateriāliem ir dārgāks.

1.4. tabula.

L-10011 vertikālā stabilizatora izmaksas

Izmaksu pozīcija	Alumīnija konstrukcijas	Kompozītu konstrukcijas
	izmaksas %	izmaksas %
Izgatavošanas un sākotnējā kopsalikuma izmaksas	49	52
Strukturālā salikuma darba izmaksas	18	11
Palīgdarbi	27	21
Materiāla izgatavošana	5	14
Kopsalikuma materiāli	1	2
Kopējās izmaksas	198,000	180,000

Racionāli izmantojot kompozītmateriālus lidmašīnu konstrukcijās, var ne tikai samazināt tās svaru, bet arī samazināt tās pašizmaksu (tiek rekomendēts izgatavot vienkāršas konstrukcijas detaļas – apšuvums, lonžeronu sienīņas) 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.

#### KM priekšrocības:

- augsta īpatnēja stiprība
- augsts stingrums (elastības modulis 130-140GPa)
- augsta nodilumizturība
- augsta nogurumizturība

#### KM trūkumi:

- augsta cena
- īpašību anizotropija
- paaugstināta ražošanas zinātnes ietilpība
- speciālu dārgu izejvielu nepieciešamība

### **1.4 Darba mērķis**

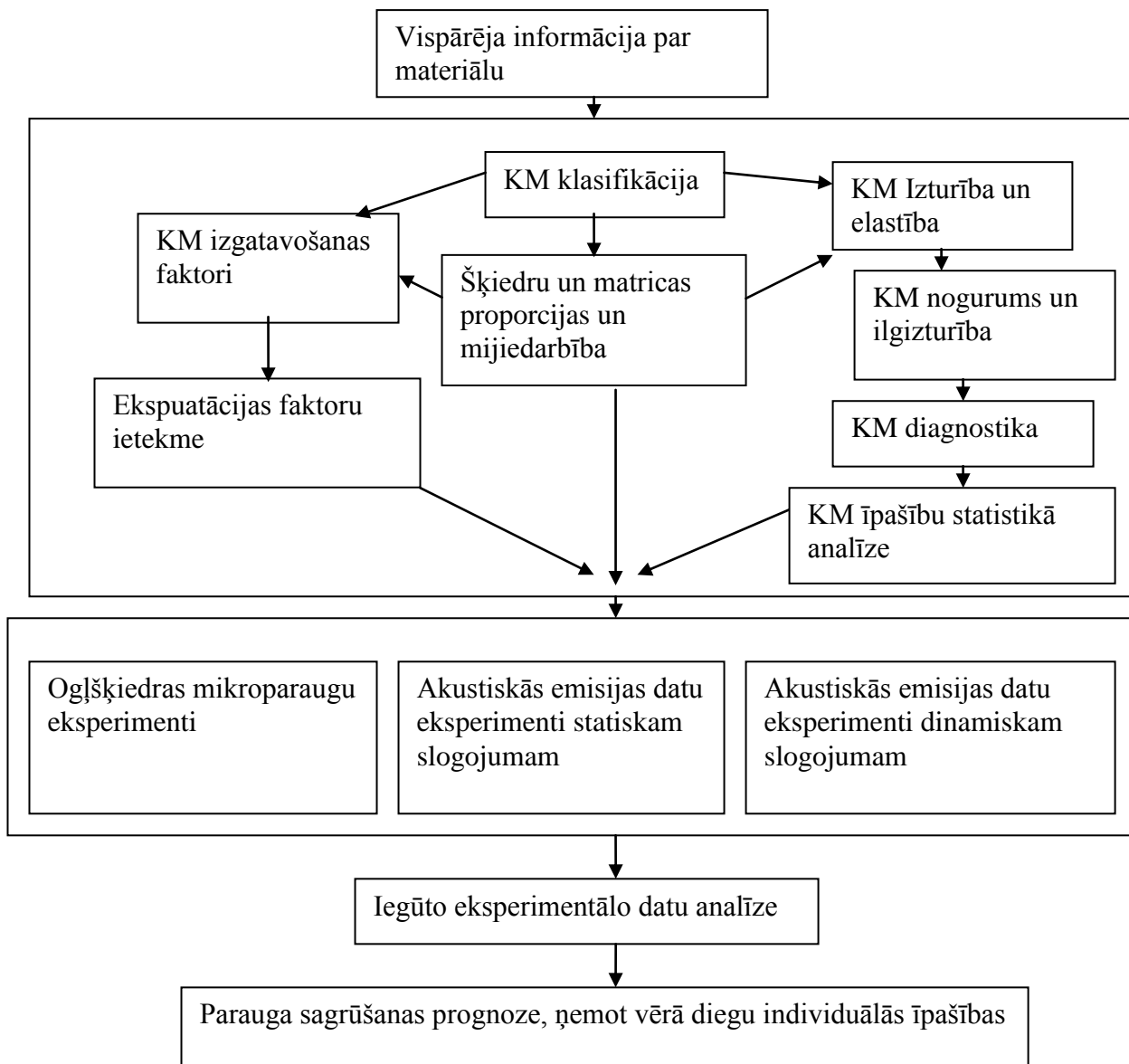
Darba mērķis ir vienvirziena kompozītmateriāla komponentu īpašību izpēte vienlaicīgi pielietojot matereāla īpašību diagnostiku ar akustiskās emisijas metodi un matemātiskā modeļa izstrāde, lai no vienotas pozīcijas attēlotu sagrušanas procesus.

Šī mērķa sasniegšanai nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

1. Veikt kompozītmateriāla izturības noteikšanas kā arī ietekmējošo faktoru analīzi
2. Izgatavot un veikt eksperimentus ar oglekļa šķiedru diegu mikroparaugiem
3. Veikt kompozītmateriāla diegu mikroparaugu statistiskās izturības un elastības moduļu izkliedes pētījumus
4. Izgatavot paraugus un veikt eksperimentus ar akustiskās emisijas signāla pierakstīšanu
5. Veikt akustiskās emisijas signālu analīzi kontekstā ar dažādiem mehāniskiem procesiem, kas noris matereālā
6. Izstrādāt metodi kā novērtēt eksperimentu rezultātus.
7. 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.

Lai īstenotu daba uzdevumu dabs tika organizēts pēc attēlā 1.13 redzamās shēmas. Shēmā tiek noteikta darbību secība un savstarpējās saiknes shematiskā veidā.



1.13 att. Kopējā nepieciešamās informācijas secības shēma

Lai sasniegtu izvirzīto darba mērķi un sasniegtu minētos rezultātus darbs tika iedalīts astoņās daļās. Darba kodolu sastāda piecas daļas no kurām pirmajā daļā tiek aprakstīta vispārēja informācija par kompozītmateriāliem un to pielietojuma priekšrocībām. Otrajā daļā tiek 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. Sestā daļa ir nobeiguma daļa kurā ietilpst galvenie darba secinājumi. Septītā daļa ir izmantotās literatūras saraksts un astotajā daļā ietilpst darba pielikumi. Kopumā darbā balstoties uz eksperimentāliem rezultātiem tiek izstrādāts modelis materiāla sabrukšanas dinamikas atainošanai un izturības novērtēšanai, piedevām sabrukšanas gaitu sasaistot ar akustiskās emisijas signālu rādījumiem, kā materiāla iekšējo sagrūšanas procesu atainotājiem.

### **1.5 Zinātniskā novitāte**

1. Izstrādātais modelis ļauj aprakstīt ne tikai prognozējamo izturību vienvirziena kompozītmateriāliem, bet arī sabrukšanas raksturu ņemot vērā šķiedru spriegumu un/vai relatīvo pagarinājumu sadalījumu.
2. Izstrādātā eksperimentālo datu kvalitātes novērtēšanas metodika ļauj savstarpēji salīdzināt un novērtēt dažādus eksperimentālos datus kā arī to atbilstību to paredzam raksturam
3. Ir veikta akustiskās emisijas signālu analīze kontekstā ar kompozītmateriāla sabrukšanas dinamiku, kas ļauj izdalīt dažādus sabrukšanas procesus kompozītmateriālā.

### **1.6 Praktiskā nozīme**

Izstrādāto šķiedrotā kompozītmateriāla sabrukšanas modeli var lietot lai prognozētu kompozītmateriāla izturību. 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.

## 1.7 Pētāmā matereāla apskats

Pateicoties vairākām plastmasu pozitīvām īpašībām tās arvien vairāk tiek izmantotas visu veidu preču ražošanā tai skaitā kompozītmateriālu izstrādājumu ražošanā. Apskatot plastmasas kā materiālu, tiek izdalītas divas to grupas: polimēri un kompozītmateriāli. Polimēri – plastmasu, gumijas, krāsu, līmju un ķīmiskās šķiedras pamats. Terminu „polimērs” 1833.gadā ieviesa zviedru ķīmiķis Berzeliusom. Polimēri ir patstāvīga materiālu klase ar fizikāli – mehānisko ķīmiskas vielas īpašību kompleksu, veidotu no ļoti garām lineārām vai vītām molekulām. Tīklveida polimēros visu polimēra masu var pieņemt kā vienotu telpisku molekulu. Lielākajai daļai polimēra molekulu skeleti ir kā ķēdīte, kura sastāv no oglekļa atomiem. Makromolekulām, kuras sastāv no vairākiem vienāda tipa posmiem, ir elastīga daba un izteiktas relaksācijas īpašības. (Relaksācija ir stabila stāvokļa atjaunošana laika gaitā pēc materiāla deformācijas) Polimēri vēl iedalās dabiskajos vai biopolimēros (naturālais kaučuks, skābes, olbaltums) un sintētiskajos (polietilēns, poliamīdi, epoksīda sveķi). Sintētiskos polimērus iegūst, polimerizējot zemmolekulāros savienojumus (monomērus).

Par plastiskām masām sauc augstmolekulārus organisko savienojumu materiālus, kas spēj pie noteiktas temperatūras un spiediena pieņemt uzdoto formu un saglabāt to izstrādājuma ekspluatācijas laikā. Plastmasas var būt vienkomenta un daudzkomponentu. Atsevišķi izdala kompozītmateriālus, kas sastāv no divām un vairāk komponentēm ar krasi atšķirīgām īpašībām.

Polimēri var būt šķīdinātājā šķīstoši vai lineārie (polipropilēns, polistirols, polietilēns) un nešķīstoši vai telpiskie (vulkanizēts kaučuks, fenoloformaldeģidnie, poliefira sveķi). Šķīstošos polimērus veido lineāras molekulu ķēdes. Tiem piemīt spēja pāriet plastiskā stāvoklī. Telpiskos polimērus veido telpiska molekulu ķēde.

Plastmasu sastāvā bez polimēra vēl ir pildviela, krāsviela, plastifikators un cietinātājs. Pildviela plastmasai var nodrošināt labāku karstumizturību, siltumvadāmību, ugunsizturību un izturību. Optimālais pildvielas daudzums plastmasā ir apmēram 65%. Pildvielas mēdz būt pulverveidīgas un šķiedrainas, organiskas un neorganiskas. Plastifikators (zem un augst molekulārie šķidrums - dibutilftolats, trikrezilfosfāts) nepieciešams, lai atsevišķi plastmasas elementi labi savietotos un lai tiktu iegūts plastisks izstrādājums. Ar laiku plastifikators var iztvaikot un izstrādājums kļūst trausls. Krāsvielas pievieno, lai piešķirtu izstrādājumam konkrētu krāsu, uzlabotu ilgizturību, izturību pret ūdens uzsūkšanu, siltuma uzņemšanas vai siltuma atdeves spēju. Krāsvielas var būt organiskas un neorganiskas.

Plastmasas iedalās cietajās (ar lielu elastības moduli –  $E > 0,1 \text{MPa}$ ), ar mazu deformāciju (līdz  $0,25 \text{mm}$ ) un elastīgajās (ar mazu moduli un lielu elastību).

Plastmasas izstrādājumos pielieto konstrukciju plastmasas, kurām ir šādas īpašības:

- Tecēšanas robeža pie stiepes  $\sigma_T > 2 \text{MPa}$
- Elastības modulis  $E > 10 \text{MPa}$
- Temperatūra, pie kuras materiāls kļūst mīksts  $t > 55 \text{C}^0$
- Cietība pēc Brineļa metodes  $H_B > 2 \text{MPa}$

### 1.7.1 Kompozītmateriālu polimēru veida saistvielas.

Kompozītmateriālos ļoti bieži kā saistviela tiek izmantotas dažāda veida plastmasas un tāpēc, runājot par kompozītmateriāliem, ir svarīgi zināt plastmasu īpašības. Kopumā atkarībā no plastmasas sastāva cietās plastmasas var būt termoreaktīvas un termoplastiskas.

1.5 tabula

Termoreaktīvo plastmasu grupas un veidi

Sveķu nosaukums	Veids	Pielietojums
Fenoloformaldegida sveķi	Fenoplasts, šķiedrāts, tekstilšķiedrāts, asbošķiedrāts, stikltekstiloīts	Līmju sagatavošana, kārtainas plastikas, elektrotehniski izstrādājumi
Amido- un amino-formaldegida sveķi	Aminoplasts, bumolīts, kārtainie plastīti	Dekoratīvās detaļas
Epoksīda sveķi	Epoksīdkompozīts, līme	Līmju un stiklplastītu ražošana
Poliefīra sveķi	Stiklšķiedra, mastika	Stiklšķiedras detaļu ražošana

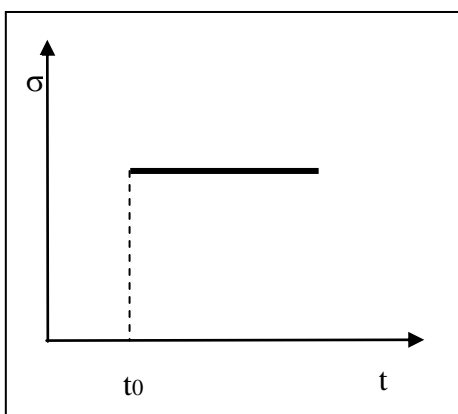
Termoreaktīvās plastmasas pamatā ir polimēri, kurus uzkaršējot tie pāriet neizšķīdināmā nekūstošā stāvoklī. Izstrādājumi, kurus iegūst no presmateriāla ar termoreaktīvām saistvielām, sacietē presformā presformu karsējot un tie tiek izņemti karsti bez atdzesēšanas. Termoreaktīvie materiāli nav otrreizēji pārstrādājami. Termoreaktīvās plastmasas (sk. 1.5.tab.) iegūst polikondensācijas reakcijas ceļā. Polikondensācija ir process, kurā izejmateriālu karsējot no tā tiek izkarsēts ūdens, spirts un citas vielas, un no zemmmolekulārām izejvielām iegūst augstmolekulārus savienojumus.

Termoplastisko plastmasu pamatā ir polimēri, kurus uzkaršējot tie kļūst plastiskāki, bet atdziestot tie kļūst cieti. Šo īpašību tie saglabā arī pēc vairākkārtējas uzkaršēšanas un atdzesēšanas. Šīs plastmasas ir otrreizēji pārstrādājamas. Termoplastiskās plastmasas iegūst, polimerizējot zemmmolekulārās vielas. Vielas, kuras var polimerizēt, sauc par monomēriem.

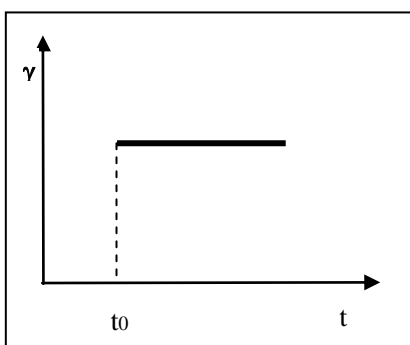
Vairākus monomērus var polimerizēt vienlaicīgi, tādā veidā iegūstot vielu ar abu monomēru īpašībām (sopolimērus).

Termoplastu un sopolimēru labās tecēšanas īpašības karstā stāvoklī ļauj pielietot augstas produktivitātes ražošanas metodes (liešana zem spiediena, formēšana ar vakuuma palīdzību).

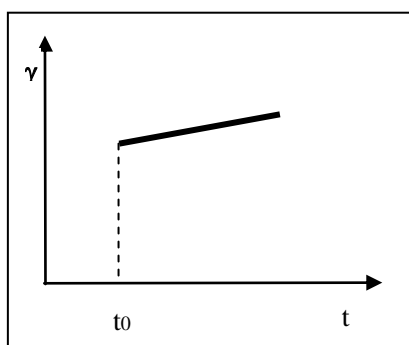
Cietu ķermeni raksturo tā elastība, bet šķidrumu – viskozitāte. Plastmasas ir attiecināmas pie viskozi – elastīgiem materiāliem. Atšķirības starp viskozi – elastīgiem un elastīgiem materiāliem parādītas 1.14.att. Abiem ķermeņiem laika momentā  $t=t_0$  tiek pielikts spēks.



a)



b)



c)

1.14. att. Deformācijas atkarība no sprieguma: a) elastīgiem materiāliem atkarībā no laika ilguma; b) un c) viskozi - elastīgiem materiāliem atkarībā no laika ilguma

Nobīdes deformācijas  $\gamma$  līkne pie pielikta konstanta spēka dažādiem materiāliem ir atšķirīga – elastīgiem materiāliem tā ir konstanta, bet viskozi - elastīgiem tā ir atkarīga no laika

$$\gamma(t) = [1/G_c(t)]\sigma \quad (1.1)$$

kur  $G_c(t)$  izsaka elastības moduļa atkarību no laika.

Vispārīgā gadījumā viskozi elastīgā ķermeņa deformāciju var sadalīt trijās daļās

$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \quad (1.2)$$

kur  $\gamma_1$  – Guka elastīgā deformācija,

$\gamma_2$  – aizkavētā elastīgā deformācija (vai viskozi - elastīgā deformācija, kas saistīta ar molekulu ķēžu konfigurācijas izmaiņām)

$$\gamma_2 = \sigma (1/G) \psi(t) \quad (1.3)$$

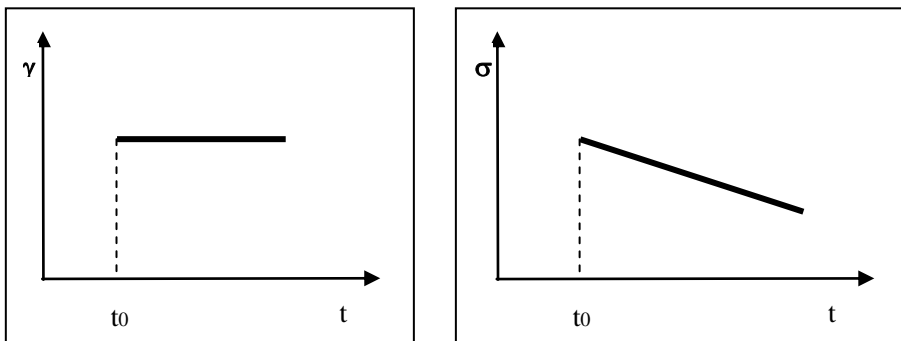
kur  $\psi(t)$  – aizkavētās elastības funkcija.

Deformācija  $\gamma_2$  ir atgriezeniska. Tā pakāpeniski laika gaitā izzūd pēc slogojuma noņemšanas. Tas nozīmē, ka notiek elastīga atjaunošanās.

$\gamma_3$  – neatgriezeniskā plastiskā deformācija, kas proporcionāla pieliktā slogojuma laikam.

$$\gamma_3 = \sigma (t/\eta) \quad (1.4)$$

Deformējot viskozi elastīgu ķermeni, spriegumi  $\sigma (t) = \gamma G_z(t)$  pie pastāvīgas deformācijas kritīsies (sk. 1.15.att.).



**a**

**b**

1.15.att. Sprieguma izmaiņa viskozi - elastīgam ķermenim (b) atkarībā no laika ilguma (a) pie pastāvīgas deformācijas

Šādu parādību sauc par sprieguma relaksāciju, bet  $G_z(t)$  ir elastības moduļa atkarības no laika funkcija jeb relaksācijas modulis. Elastības modulis lielā mērā ir atkarīgs no temperatūras. Lai noteiktu sprieguma un deformācijas attiecības, ir jānosaka attiecību tips.

Polimēros un kompozītmateriālos tie var būt šādi:

- lineārs – tad ir lineāri elastīgs ķermenis;
- nelineārs - tad ir nelineāri elastīgs ķermenis;
- reoplastisks – tad ir materiāls ar no laika atkarīgām elastības īpašībām;
- plastisks - tad ir materiāls, kura īpašības nosaka tā slogojuma vēsture.

Plastmasu un to komponentu mehāniskās īpašības.

Plastmasu mehānisko īpašību aprakstīšanai izmanto augstelastības teoriju. Pie deformācijas, ņemot vērā temperatūras ietekmi, polimēri var atrasties trijās stadijās.

Stiklošanās temperatūra  $T_{ct}$  raksturo salizturību polimēriem, kuri konstrukcijās tiek izmantoti augstelastīgā stadijā. Šī temperatūra raksturo materiāla ekspluatācijas īpašību augšējo temperatūras robežu. Apakšējo robežu raksturo trausluma temperatūra  $T_{xp}$ . Starp stiklošanās un tecēšanas  $T_{tek}$  robežām materiāls atrodas augstelastīgā stadijā. Ja materiāla temperatūra pārsniedz tecēšanas robežu, tad tas zaudē spēju saglabāt savu formu.  $T_{xp}, T_{ct}, T_{tek}$  ir relatīvi raksturlielumi, jo atkarīgi no mērījumu metodes, temperatūras izmaiņas ātruma un slodzes.

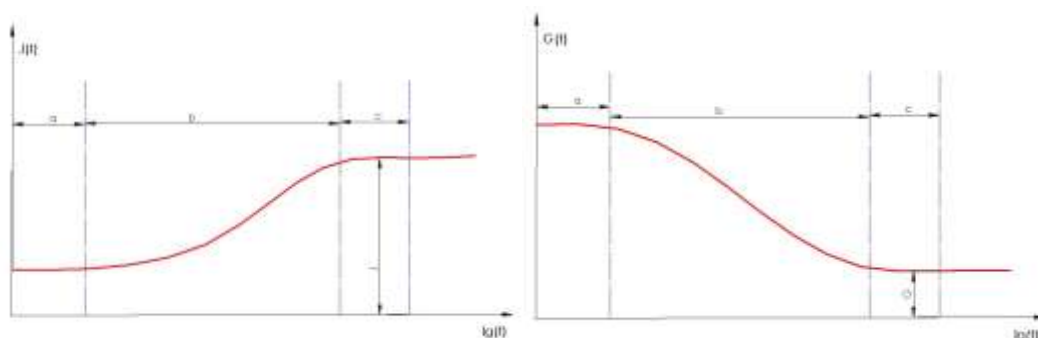
Lai aprakstītu plastmasu stāvokli un prognozētu tās īpašības, tiek izmantota fenomenoloģiskā teorija viskozi - elastīgam ķermenim. Lai nodrošinātu ilgstošu izstrādājuma izturību, izvēlas tikai slogojumu, kas rada mazas deformācijas. Pieļaujamo spriegumu līmeni nosaka plastmasas uzbūves veids.

Teorijai ir vispārīgs veids un to var izmantot, lai noteiktu materiāla uzvedību stiepē, spiedē un cērtē. 1.16.attēlā ir shematiski attēlotas spriegumu relaksācijas un cietās tecēšanas līknes, materiālam atrodoties zem konstanta slogojuma laika gaitā. Relaksācijas un cietās tecēšanas procesi ir cieši saistīti savā starpā un uzskatāmi gandrīz pretēji viens otram. Šo procesu galvenie raksturlielumi ir nobīdes modulis  $G$  un padevība  $J= 1/G$

Atkarībā no temperatūras elastības modulis samazinās un polimērs pakāpeniski iziet caur stiklošanās, augstelastības, viskozi - tekošu un tekošu stāvokli (1.16.att.). Ciešā saikne starp temperatūru un laiku (kā arī līkņu raksturs) ļauj izdarīt šādus secinājumus:

- a) polimēru elastības koeficients nav konstante (tam ir atkarība no laika);
- b) tas, vai polimērs ir uzskatāms par plastisku vai cietu, ir atkarīgs no temperatūras, slogojuma ilguma un slogojuma ātruma;

c) pārejas temperatūru atrašanās vietu svarīgi zināt plastmasu praktiskajam pielietojumam.



1.16.att. Spriegumu plūstamības un relaksācijas vispārīgas līknes

a – stiklveida stāvoklis; b – augstelastīgā pāreja; c – augstelastīgais stāvoklis; d – tecēšanas stāvoklis

Ražošanas stadijā ir svarīgas šādas polimēru īpašības:

- a) laba armējošā materiāla adhēzija (pielipšana);
- b) maza materiāla nosēšanās pie atdzišanas;
- c) zema viskozitāte un ilgstoša „dzīvotspēja”;
- d) ātra sacietēšana.

## 1.7.2 Šķiedroto armējošo materiālu īpašības

Kā armatūru kompozītmateriālos izmanto dažāda veida un formas šķiedras. Armējuma šķiedru forma ir atkarīga no to izcelsmes veida un tālākas apstrādes. Tā, piemēram, šķiedras var būt vērptu un nevērptu diegu, lenšu, dažādos veidos pītu audumu un citos veidos. Visbiežāk armējumam no sintētiskajām šķiedrām izmanto stiklšķiedru, ogļšķiedru, organiskās un bora šķiedras. Gadījumos, kad kompozītmateriālos izmanto metālus, armējumam izvēlas tērauda, volframa, titāna un citu metālu stieples.

Armējošā materiāla šķiedrai var būt neviendabīga struktūra un līdz ar to mehānisko īpašību anizotropija. Materiāli ar izteiktu anizotropiju ir organiskās šķiedras, ogļšķiedras un bora šķiedras. Stikla šķiedra un metāliskās šķiedras tiek uzskatītas par viendabīgām un izotropām. Šķiedru īpašību anizotropija var būtiski ietekmēt kompozītmateriālu īpašības.

### **1.7.2.1 Stiklšķiedra**

Stikla šķiedru plaši pielieto nemetāliskajās konstrukcijās. Ar salīdzinoši mazu blīvumu  $(2,4-2,6) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  tiem ir augsta izturība, zema siltumvadāmība, kā arī augsta noturība pret ķīmisko un bioloģisko iedarbību.

Stikla šķiedras pavediena šķērsriezuma laukums pamatā ir aplis, tomēr tiek ražoti arī ar dobu vidu un profilēti (trīsstūra, kvadrāta, sešstūra un taisnstūra) pavedieni. Nepārtrauktus pavedienus iegūst, velkot izkausētu stikla masu caur atvērumu ar diametru 0,8-3,0 mm un ar tālāko ātru stiepšanu līdz 3-19 mkm diametram. Centrbēdzes šķiedras iegūst, velkot nepārtraukti stikla šķiedru un vēlāk to sadalot noteiktos garumos vai sadalot izkausēto stikla masu ar noteiktu garumu, kuru vēlāk izstiepj ar centrālās metodes.

Kvarca šķiedru pamatā iegūst no stieņiem, velkot tos garumā, jo kvarcam pat pie temperatūras 2400 K ir ļoti augsta viskozitāte, kas apgrūtina formēšanu no izkausēta stāvokļa.

Pēc savas izturības stikla šķiedra ievērojami (no vienas līdz divām kārtām) pārspēj stiklu bloku veidā. Stikla šķiedras izturību galvenokārt nosaka šķiedras virsmas stāvoklis, kas savukārt atkarīgs no tās formēšanas apstākļiem. Stikla šķiedra ir relatīvi siltumizturīga – paaugstinoties temperatūrai līdz 1200 K kvarca šķiedras elastības modulis pieaug.

Elastības modulis samazinās nenozīmīgi līdz pat temperatūrai, pie kuras paliek mīksts. Stikla šķiedru kā armējošo elementu kompozītmateriālos pielieto diegu, lenšu, dažādi pītu audumu un citos veidos.

### **1.7.2.2 Organiskās šķiedras**

Lai iegūtu kompozītmateriālus ar polimēra matricu un augstu izturību, pielieto šķiedras ar aromātisko poliamīdu bāzi.

Organiskām šķiedrām ar augstu stiepes izturību un augstu elastības moduli vēl piemīt arī tādas labas īpašības kā termostabilitāte, labas dielektriskās un materiāla noguruma īpašības. Pateicoties zemajam blīvumam, organiskās šķiedras pēc īpatnējās izturības pārspēj visas zināmās armējošās šķiedras un metālus, atpaliekot pēc rādītājiem tikai ogļšķiedrai un bora šķiedrai. Organiskās šķiedras labi padodas tekstila apstrādei. Tās saglabā apmēram 90% izturības, salīdzinot ar sākotnējo izturību pirms auduma aušanas.

### **1.7.2.3 Ogļšķiedra**

Ogļšķiedrai piemīt daudzas vērtīgas un dažas pat unikālas īpašības. Ogļšķiedrai piemīt labas siltumizturības īpašības, zems berzes un termiskās izplēšanās koeficients, laba noturība pret atmosfēras un ķīmisko iedarbību, dažādas elekto-fizikālās īpašības (no pusvadītāja līdz vadītājam) kā arī labas īpatnējās mehāniskās īpašības.



Ogļšķiedra iedalās karbonizētā (termoapstrādes temperatūra 1173-2273 K, oglekļa saturs 80–90%) un grafitizētā (termoapstrādes temperatūra 3273 K, oglekļa saturs 99%).

Eksistē divi izejmateriālu tipi ogļšķiedras iegūšanai: ķīmiskā šķiedra (PAN) un oglekļa piķis - peki. Ogļšķiedras iegūšanas process no PAN materiāla sevī ietver materiāla tekstila sagatavošanu, oksidēšanos un apstrādi augstā temperatūrā (karbonizāciju un grafitizāciju). Lētākā materiāla ieguve no naftas un akmeņogles darvas sevī ietver šķiedras formēšanu, izlaižot izkausēto izejvielu (370–620 K) caur veidni ar diametru 0,3mm. Pēc tam šķiedru izstiepj līdz izstiepšanas pakāpei 100000–500000%. Tā tiek iegūta augsta materiāla iekšējās struktūras (makromolekulu) orientācija. Karbonizācija un grafitizācija piķa šķiedrām noris analogiski PAN šķiedrām.

#### 1.7.2.4 Bora šķiedra

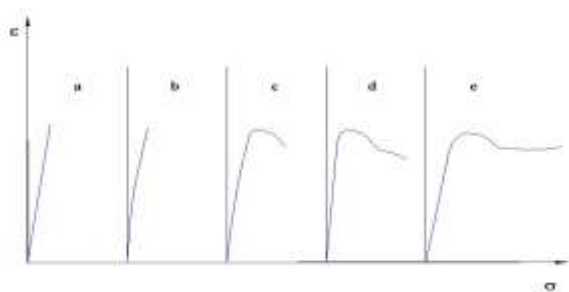
Kompozītmateriāliem, veidotiem ar bora šķiedrām, ir augsta stiepes un spiedes izturība, nogurumizturība un augsts elastības modulis. Bora šķiedru mīnuss ir visai neviendabīga struktūra un izmēri. Lai novērstu šos trūkumus un uzlabotu izturības rādītājus, šķiedras tiek kodinātas, kā arī atdzesēšanas procesā tiek ievērota īpaša tīrība.

Bora šķiedras tiek ražotas diega veidā un tiek uztītas uz spoles vai lentas veidā ( 5–50 cm platumā) cauraustas ar citām šķiedrām.

Bora šķiedras parasti izmanto polimērmateriālos ar polimēra vai alumīnija matricu. Kompozītmateriāliem ar alumīnija matricu ir vairākas priekšrocības – tādas kā augstāka darba temperatūra un iespēja apstrādāt kompozītmateriālu parastās metālapstrādes iekārtās. Materiāliem, kuros ir iekļautas bora šķiedras, ir pazemināta elektro un siltumvadāmība.

#### 1.7.3 Sprieguma un deformācijas līknes

Sprieguma un deformācijas līkne ir viens no svarīgākajiem materiālu raksturojošiem rādītājiem. Kompozītmateriālā ar polimēra matricu deformācijas diagramma uzrāda materiāla trauslumu vai plastiskumu. Pēc polimēru deformācijas līknēm var vizuāli noteikt to trauslo vai plastisko raksturu. Stiepes diagrammu lielā mērā ietekmē parauga virsmas kvalitāte, jo pat neliels iegriezums tajā var būtiski samazināt materiāla izturību un tas jāņem vērā.



1.17.att. Raksturīgās polimēru materiālu deformācijas līknes

a – trausls  $\epsilon \leq 1$  %; b- trausls ar mainīgu struktūru pie deformācijas  $\epsilon \leq 1$  %; c – viskozs (plastisks) ar tecēšanas robežu un izliekuma veidošanos pie  $\epsilon \leq 10\%$ ; d- ar tecēšanas robežu; e – aukstā izstiepe

Amorfos termoplastus nevar pielietot konstrukcijās, kuras darbojas temperatūrās, kas augstākas par  $T$  stiklošanās, bet pie temperatūras, kas zemāka par  $T$  trausluma materiāls kļūst trausls.

Lai novērstu izstrādājumu pāragru iziešanu no ierindas, tiek ņemts drošības koeficients, kuru nosaka no ilgzturības līknēm, vēlams ņemot vērā temperatūru, kādā izstrādājums darbosies.

## 1.8 Kompozītmateriālu remonts

Svarīga kompozītmateriālu priekšrocība ir iespēja gaisa kuģos kompozītmateriālus pielietot ne tikai konstrukciju veidošanai, bet arī kompozītmateriālu, metālisku un jauktu konstrukciju remontam. Bojātu elementu remonta process ar kniedētiem uzliktņiem ir ļoti darbietilpīgs un ne vienmēr bojātai vietai var piekļūt no abām pusēm.

Šobrīd dažādi uzņēmumi izmanto vienu no šādām metodēm:

- metālisku un kompozītmateriālu uzliktņu izmantošana, kas uzstādītas ar līmes palīdzību vai ar bulskrūvēm, kniedētām savienojumiem;
- atslāņošanas remontu metode ar sveķu injekciju;
- moduļu metode, kad bojātais daļas lauks mainās uz jaunu;
- vietējais remonts šūnu konstrukcijām.

Kompozītmateriālu remonta metodi un veidu izvēlas atkarībā no tā, kādi bojājumi ir konstrukcijai. Bojājumi var būt nelieli, kuri nepārkāpj konstrukcijas integritāti un neietekmē ekspluatācijas īpašības. Šādiem bojājumiem nav nepieciešams remonts visā gaisa kuģim aprēķinātajā dzīves ciklā. Bojājumi, kas varētu samazināt gaisa kuģa dzīves laiku, bet neietekmē konstrukcijas integritāti, var tikt likvidēti ar kārtējiem reglamentu darbiem.

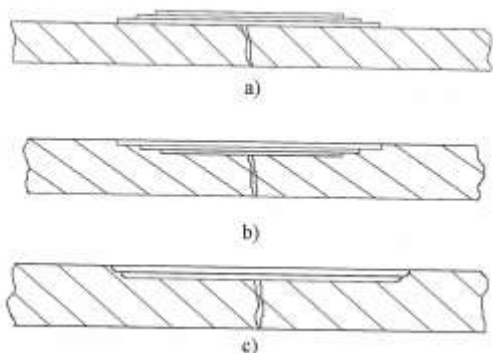
Rekomendējamas remontu metodes kompozītmateriāliem:

- augsti noslogotas konstrukcijas remontu kompozītmateriāliem veikt ar bulskrūvju un kniedētām savienojumiem;
- viegli noslogotas plānlokšņu konstrukcijas remontē ar līmes savienojuma palīdzību;

- kombinētas konstrukcijas var remontēt ar līmes un mehāniskiem savienojumiem;
- uzliktņu metodē labāk pielietot tādu pat materiālu, kāds ir pašai konstrukcijai;
- remontam lauka apstākļos izmanto līmes savienojumu un tikai nelielu bojājumu novēršanai, jo ir grūti nodrošināt salīmēšanas kvalitāti lielā laukumā.

Lidmašīnas planiera konstrukciju elementu atteikumu un bojājumu analīze rāda, ka plaisu skaits uz vienu lidmašīnu sastāda ievērojamu daļu no kopējā defektu skaita. Pārejot uz planiera ekspluatāciju pēc stāvokļa, elementu kārtējo remontu veic ekspluatācijas uzņēmumi, kas noved pie darbietilpīguma palielināšanās. Sakarā ar to tiek piedāvāts veikt planiera konstrukcijas nespēka elementu remontu, pielietojot uzliktņus no kompozītmateriāliem un aukstas sacietēšanas līmes. Uzliktņa no augstas stiprības oglekļaplastīta un pamatkonstrukciju savienojums ar līmi ir ekspluatējamo konstrukciju ilgzturības paaugstināšanas efektīvs līdzeklis, ko pielieto arī jaunu konstrukciju projektēšanā.

Remonts var tikt veikts ar dažādu tipu kompozītmateriālu uzliktņiem (sk. 1.18.att.) atkarībā no bojājuma vietas. Remonts var atjaunot 100% sākotnējās izturības. Ja bojātai virsmai nav jābūt aerodinamiski gludai, tad uzliktnis tiek piestiprināts pie virsmas, kas ir vienkāršāks pēc tehnoloģijas. Gadījumā, ja ir nepieciešams nodrošināt minimālo pretestību, tad uzliktnis tiek iegremdēts. Tas var būt kāpņveida, kas nodrošina pakāpenisku pieskares spriegumu nodošanu, un riņķveida.



1.18.att. Uzliktņu tipi: a) virsmas; b) kāpņveida; c) riņķveida

Salīmēšana ir pamatveids, lai savienotu kompozītmateriālu ar metālisku vai kompozītmateriāla konstrukcijas daļu. Tā ir konstrukcijas elementu neizjaukama savienojuma veidošana ar līmes slāni bez materiāla īpašību būtiskas izmaiņas šuves zonā. Salīmēšana atšķiras no metināšanas ar to, ka tiek saglabāta robeža starp līmi un savienojamām detaļām. Stiprību nodrošina savienojamo virsmu mijiedarbība ar līmes slāni. Šādas metodes priekšrocības ir viendabīgu un neviendabīgu materiālu savienošanas iespējamība, virsmas

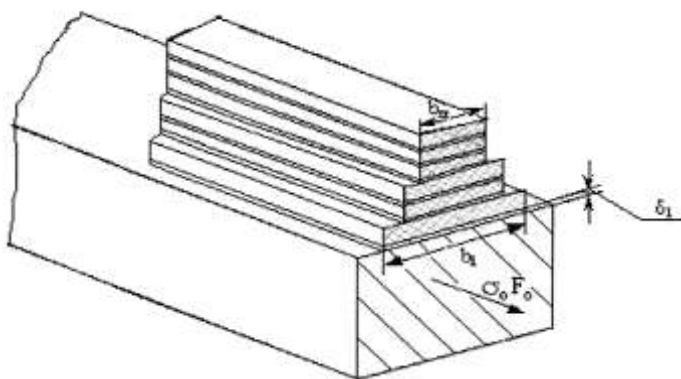
gluduma saglabāšanās hermētiskums, laba vibroizturība un izturība pret plaisu attīstīšanos. Salīmēta savienojuma stiprība un kvalitāte ir atkarīgas no vairākiem faktoriem, daudzi no kuriem var būt viens otru izslēdzoši vai var vienlaicīgi izmainīt vairākus salīmēta savienojuma raksturojumus. Pie šiem faktoriem var pieskaitīt salīmējama materiāla īpašības (makromolekulu struktūra, šķīdība, slapināmība, virsmas stāvoklis un citi), līmes īpašības (makromolekulu struktūra un polaritāte, slapināšanas īpašība un citi), kā arī savienojamu detaļu forma un kontakta virsma, līmes uzklāšanas veids un salīmēšanas režīms. Ja materiālu stingrumi ir ievērojami (piemēram, borokompozīts un alumīnijs), tad salīmēšanai pielieto amortizējošas starplikas no materiāla ar mazāku stingrumu, kas izslēdz spriegumu koncentrācijas paaugstināšanas iespējamību savienojumos.

Atsevišķos gadījumos kompozītmateriālu uzliktnis var veicināt korozijas attīstīšanos, kas tiek novērsts ar neitralizējošām starplikām (piemēram, starp oglekļaplastīta uzliktni un dūralumīnija apšuvumu ir nepieciešams ieklāt stikla auduma slāni).

Līmes slānī rodas lieli pieskares spriegumi, kuri var novest pie slāņa sagrūšanas. Tāpēc saliktu konstrukciju stiprība ir tiešā veidā atkarīga no līmes slāņa parametriem un pieļaujamiem spriegumiem.

1.19.attēlā ir parādīta aprēķinu shēma saliktai konstrukcijai. Reāla konstrukcija tiek reducēta līdz norādītajai aprēķina shēmai pie šādiem pieņēmumiem:

- konstrukcijas metāliskajā daļā un kompozītmateriālu slāņos darbojas tikai normāli spriegumi, kuri ir vienmērīgi sadalīti pa elementu šķēlumiem;
  - līmes slāņos darbojas tikai pieskares spriegumi;
  - slodze ir pielikta konstrukcijas metāliskajai daļai;
  - uzliktnis iesaistās darbā līmes slāņa nobīdes dēļ;
- lieces momenti saliktajā konstrukcijā netiek ņemti vērā.



1.19.att. Saliktas konstrukcijas aprēķina shēma.

Lai veiktu līmējuma izturības aprēķinus ir nepieciešami šādi dati:

$F_0, E_0$  – konstrukcijas metāliskas daļas šķēluma laukums un elastības modulis;

$F_i, E_i$  – uzliktņa i-tā slāņa šķēluma laukums un elastības modulis;

$b_i, \delta_i, G_i$  – līmes i-tā slāņa platums, biezums un nobīdes modulis.

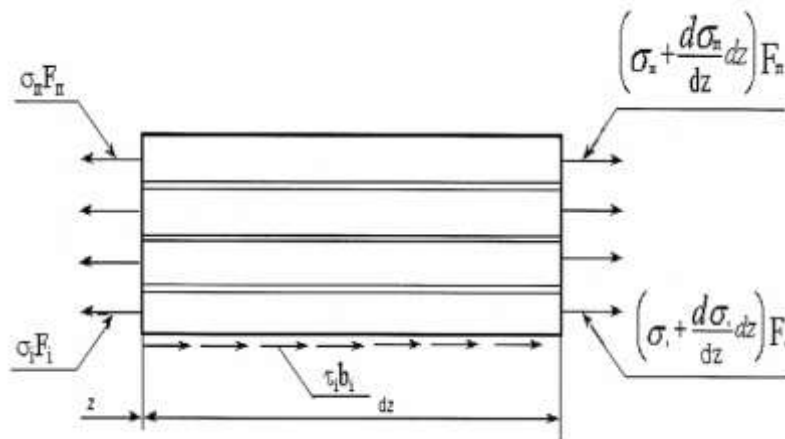
Koordināšu sākums ( $z=0$ ) atrodas šķēlumā, kur sākas uzliktnis.

Aprēķinu veic bezgalīga garuma metāliskam stienim ar uzliktni no kompozītmateriāliem. No kombinēta stieņa (salikta) n atšķeltas daļas līdzsvara nosacījuma:

$$\sigma_0(Z) = \frac{P}{F_0} - \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{F_0} \sigma_i \quad (1.5)$$

No uzliktņa elementa, kas atrodas attālumā  $z$  no koordināšu sākumpunkta līdzsvara nosacījuma, var noteikt pieskares spriegumus līmes i-tajā slānī, kuri ir izteikti ar normāliem spriegumiem, kuri darbojas uzliktnī:

$$\tau_i(Z) = -\frac{1}{b_i} \sum_{k=1}^n F_k \frac{d\sigma}{dZ} \quad (1.6)$$

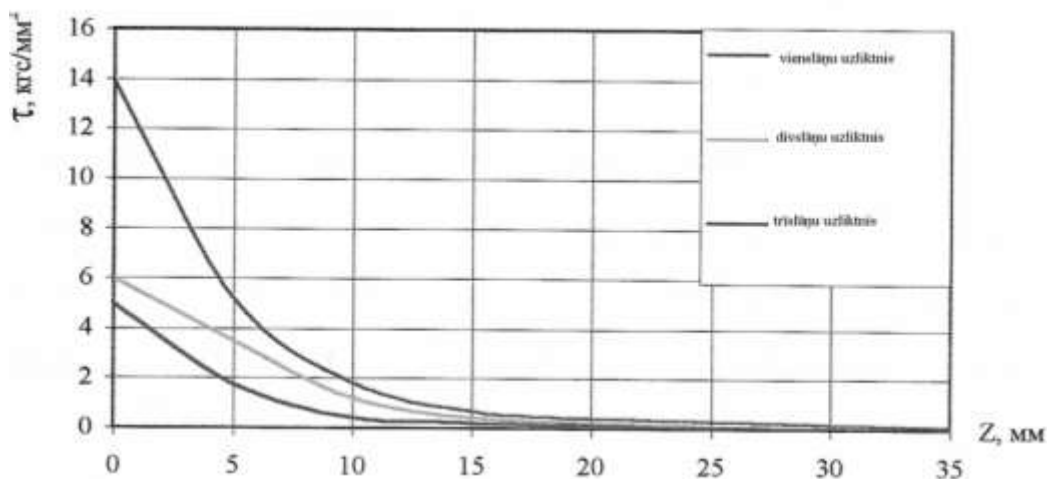


1.20.att. Uzliktņa elementa līdzsvara shēma

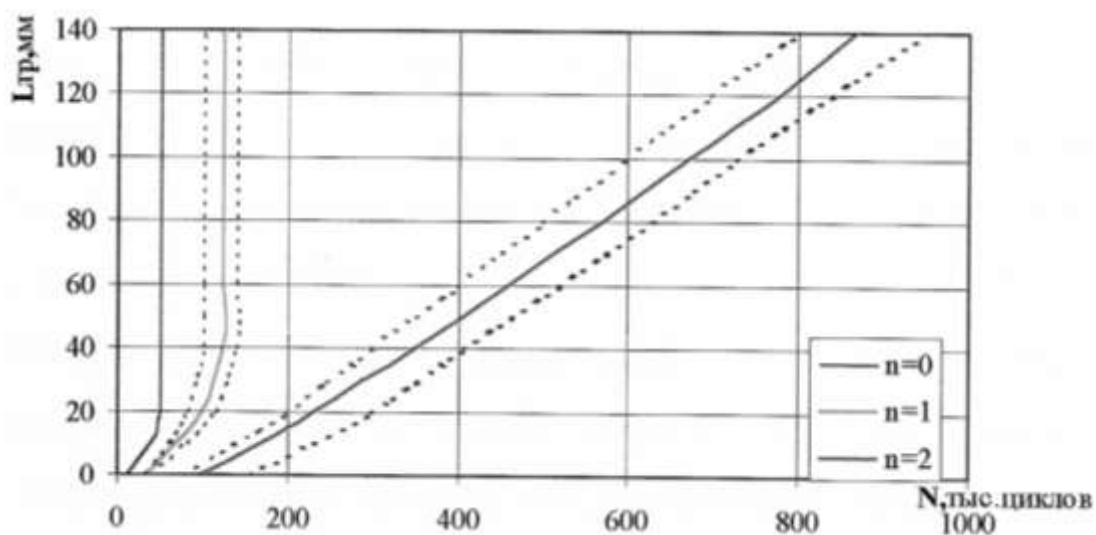
Nezināma funkcija  $\sigma_i(z)$  tiek atrasta pie kombinēta stieņa deformācijas potenciālas enerģijas minimuma nosacījuma.

Pieskares spriegumu samazināšanai tiek rekomendēts uzstādīt daudzslāņu uzliktņus. To apstiprina aprēķina rezultāti (sk. 1.21.att.), kuri rāda, ka jau divslāņu uzliktnis samazina pieskares spriegumus bojājuma zonā vairāk nekā trīs reizes. Stikla auduma slāņu skaita ietekmes pētījumi uz paraugu ilgizturību ar uzliktņiem no kompozītmateriāliem, kurus veica inženieris M.Jeljaškevičs, parādīja ievērojamu ilgizturības paaugstināšanos.

Tika izmēģināti seši paraugi bez uzliktņa, seši ar vienslāņa uzliktni un seši ar divslāņa uzliktni. Eksperimenta rezultāti (sk. 1.22.att.) parādīja, ka divslāņu uzliktnis nodrošina bojātās konstrukcijas nepieciešamo ilgzturību.



1.21.att. Uzliktņa slāņu skaita ietekme uz pieskares spriegumiem



1.22.att. Uzliktņa slāņu skaita ietekme uz ilgzturību.

## 2. Kompozītmateriālu izturības analīze

### 2.1 Kompozītmateriālu klasifikācija

Kompozītmateriālus pamatā iedala pēc to saistvielas veida, pildvielas sakārtojuma un izgatavošanas tehnoloģijas. Par pazīmi kompozītmateriālu klasifikācijai tiek izmantots arī armatūras tips un armatūras uzklāšana uz matricas. Tā kā ir daudz dažādu uzklāšanas veidu, tad izdevīgākā veida atrašanai tiek izmantota datorizēta uzklājuma projektēšana.

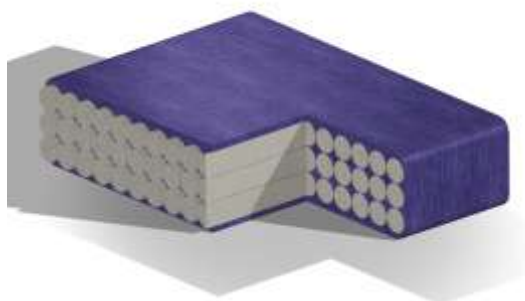
Pēc armatūras tipa var izdalīt divas lielas kompozītmateriālu grupas:

- matrica un haotiski novietotas nelielas daļiņas;
- matrica un nepārtrauktas šķiedras vai plēves, liktas pēc noteiktas shēmas.

Haotiskā armējuma gadījumā diskrētās daļiņas ir izvietotas vienmērīgi visos virzienos un pēc formēšanas materiāls iegūst kvaziizotropiskas īpašības. Tas nozīmē, ka materiāla īpašības ir anizotropiskas mikro līmenī, bet makro līmenī (izstrādājumā) tās ir izotropiskas.

Materiāli ar orientētu garas šķiedras struktūru pēc savstarpējā šķiedru izvietojuma tiek iedalīti trijās grupās:

- vienā virzienā orientētas šķiedras kompozītmateriāli (2.1.att.);
- divos virzienos orientētas šķiedras vai daudzslāņu kompozītmateriāli (2.2.att.);
- trīsdimensionāli orientētas šķiedras vai telpiski cauršūti kompozītmateriāli (2.3.att.).



2.1.att. Virzienā orientētas šķiedras kompozītmateriāli



2.2.att. Divos virzienos orientētas šķiedras vai daudzslāņu kompozītmateriāli



2.3.att. Trīsdimensionāli orientētas šķiedras vai telpiski cauršūti kompozītmateriāli

Vienā virzienā orientētas šķiedras kompozītmateriālus iegūst, klājot visas šķiedras vienā virzienā un apzīmē 1:0 (sk. 2.1.att.) Ja šķiedras šādā materiālā ir liktas vienmērīgi, tad šāds materiāls ir monotropisks plaknē, kas perpendikulāra armējuma virzienam.

Daudzslāņu kompozītmateriālus iegūst no armētām šķiedrām vai auklām, kas kārtotas dažādos virzienos. Ja šķiedras savstarpēji veido  $90^\circ$  leņķi un slāņu attiecība ir 1:1, tad šādu materiālu sauc par ortogonāli armētu un līdzsvarotu (sk. 2.2.att.). Ja armējuma leņķis nav  $90^\circ$ , tad tiek iegūts divos virzienos orientēts neortogonāls armējums. Trijos virzienos, ar savstarpēju leņķi  $60^\circ$ , vienādās kārtās klātas šķiedras materiāls tiek saukts par zvaigžņveida struktūras materiālu. Tie ir izotropiski plaknē, kas paralēla šķiedras slāņu likšanas plaknēm. Materiālus ar vairākiem slāņiem, kuros šķiedras izvietotas zem dažādiem leņķiem, sauc par sarežģīti armētiem. Šāda armējuma rakstura pieraksta piemērs –  $(0^0_6/\pm 45^0_4/-90^0_3)_s$ . Tas nozīmē, ka paketē ir 6 slāņi likti zem  $0^\circ$  leņķa, 4 slāņi pārī zem  $45^\circ$  leņķa un 3 slāņi zem  $90^\circ$  leņķa. Pakete atkarībā no slodzēm var tikt atkārtota s reizes.

Audumus, kurus pielieto kompozītmateriālu armēšanā, var iedalīt divās principiāli atšķirīgās grupās - plaknes un telpiskos. Plaknes audumos šķiedra vijas viena slāņa robežās, tāpēc kompozītmateriāls, kas izgatavots no šāda auduma, būs daudzslāņu.

Daudzslāņu audumos vai trīsdimensionāli orientētas šķiedras materiālos stipri vīta pamatšķiedra vijas ap gandrīz taisnām, lineārām šķiedrām vairākos slāņos (sk. 2.3.att.). Attīstoties trīsdimensionālai audumu aušanai, ir radusies iespēja izveidot telpiski armētu plastiku sēriju, kuru izgatavošanā var izmantot dažādas nepārtrauktās šķiedras, to skaitā arī ogļšķiedru. Telpisko audumu pielietošana kompozītmateriālos ir ļāvusi par kārtu uzlabot to stiepes izturību.

Kompozītmateriālu īpašības nosaka ne tikai tā komponentu īpašības, bet arī savstarpējo robežu īpašības, savukārt robežu īpašības nosaka materiāla izgatavošanas tehnoloģija. No vienas puses, kompozītmateriāli ļauj vieglāk izgatavot detaļas ar sarežģītām



virsmām, bet, no otras puses, viens un tas pats izstrādājums izgatavots no vienāda materiāla, bet pēc dažādām tehnoloģijām, dos pavisam citas detaļas īpašības, tāpēc jāņem vērā, ka pats kompozītmateriāls rodas detaļas izgatavošanas laikā un ir ļoti svarīgi izplānot tā izgatavošanas tehnoloģiju, kā arī ņemt vērā pēc iespējas vairāk citas ar kompozītmateriālu izstrādājumu izgatavošanu saistītās nianšes.

## 2.2 Kompozītmateriālu stiprība un elastība

Svarīga orientētu šķiedru kompozītmateriālu īpašība ir to atšķirīgā elastība un stiprība dažādos virzienos. Ņemot vērā šo īpašību šādiem kompozītmateriāliem var noteikt to elastību un stiprību katrā virzienā. Vienkāršākajā gadījumā, kad sloņojuma asis sakrīt vai ir perpendikulāras šķiedru orientācijai un šķiedras ir orientētas vienā virzienā, materiāla elastību un izturību var noteikt pēc formulām:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{11}} - \nu_{21} \cdot \frac{\sigma_2}{E_{22}} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_2 = -\nu_{21} \cdot \frac{\sigma_1}{E_{11}} + \frac{\sigma_2}{E_{22}} \quad (2.2)$$

$$\gamma_{12} = \tau_{12} / G_{12} \quad (2.3)$$

kur  $E_{11}$ -elastības modulis 1 virzienā

$E_{22}$ -elastības modulis 2 virzienā

$G_{12}$ - bīdes modulis 1-2 asīs

$\nu_{21}$  - Puasona attiecība virzienā 1

$\nu_{21}$  - Puasona attiecība virzienā 2.

Puasona attiecība raksturo, cik lielu pārvietojumu virzienā 1 radīs pārvietojums virzienā 2 un otrādi. No šiem vienādojumiem var izteikt spriegumus:

$$\sigma_1 = \frac{E_{11} \cdot \varepsilon_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} + \frac{\nu_{21} \cdot E_{11} \cdot \varepsilon_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_{22} \cdot \varepsilon_1 \cdot \nu_{12}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} + \frac{E_{22} \cdot \varepsilon_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (2.5)$$

$$\tau_{12} = G_{12} \gamma_{12} \quad (2.6)$$

kur

$\sigma_1$  un  $\sigma_2$  spriegumi virzienā 1 un 2

$\tau_{12}$  tangensālie spriegumi

No formulām redzams, ka materiālam ar vienā virzienā orientētām šķiedrām jāzina četras elastības konstantes, savukārt izotropam materiālam tikai divas. Šīs konstantes pamatā tiek noteiktas eksperimentāli. Kompozītmateriālos nevar aprēķināt bīdes moduļus, zinot E vai  $\nu$ .

Apskatot laminātus, ir lietderīgi pārrakstīt formulas (2.1-2.6). matricas veidā, kur:

$$\varepsilon_{12} = \mathbf{S} \sigma_{12} \quad \varepsilon_{12} = \{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \gamma_{12}\} \quad \sigma_{12} = \{\sigma_1 \sigma_2 \tau_{12}\}$$

{ } iekavas nozīmē matricas stabiņu

$$\mathbf{S} := \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Tā kā  $S_{12} = S_{21}$ , tad

$$\sigma_{12} = \mathbf{Q} \varepsilon_{12} \quad (2.8)$$

kur stīvuma matrica izteikta:

$$Q := \begin{pmatrix} \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{\nu_{21} \cdot E_{11}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12} \cdot E_{22}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{pmatrix} \blacksquare$$

$$Q_{12} = Q_{21}$$

No matricēs S redzams, ka tās pirmais stabiņš dos pagarinājumus, ko radīs vienas vienības liels spriegumu  $\sigma_1$  palielinājums, savukārt matricēs Q otrais stabiņš dos nepieciešamo spriegumu, lai radītu vienu vienību lielu pagarinājumu  $\varepsilon_1$  un tā tālāk. No matricu īpašībām  $Q = S^{-1}$ .

Laminātveida kompozītmateriālos slāņi, no kā sastāv lamināts, atrodas zem dažādiem leņķiem pret spēka pielikšanas virzienu. Tāpēc ir nepieciešams izprast vienkāršāku gadījumu, kad spēks ir pielikts vienam slānim virzienā, kurš atšķiras no šķiedru virziena.

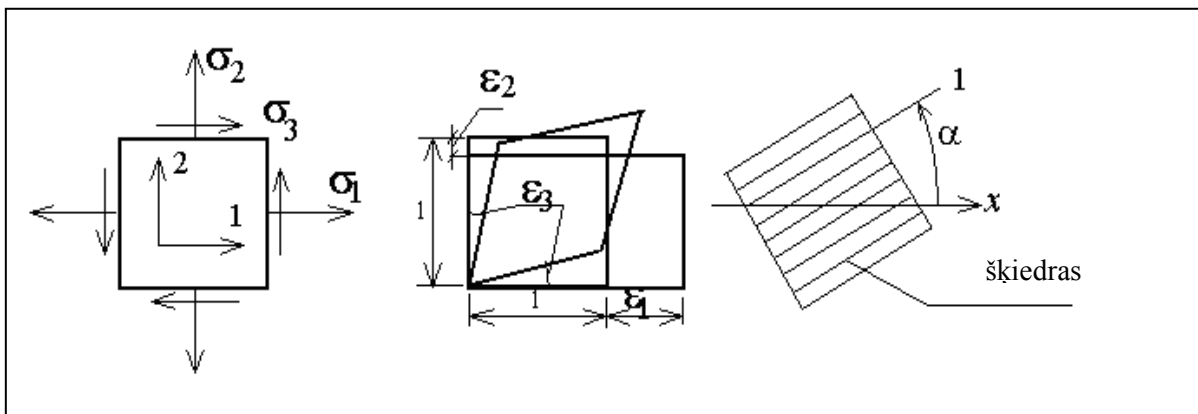
$$\sigma_{12} = T \sigma_{xy} \quad \text{un} \quad \bar{\varepsilon}_{12} = T \bar{\varepsilon}_{xy} \quad (2.9)$$

kur,

$$\sigma_{12} = \{\sigma_1 \ \sigma_2 \ \tau_{12}\} \quad \sigma_{xy} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}$$

$$\bar{\varepsilon}_{12} = \{\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ 0,5\gamma_{12}\} \quad \bar{\varepsilon}_{xy} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ 0,5\gamma_{xy}\}$$

kur virzieni 01 ir šķiedru virziens, 02 šķiedrām perpendikulārs virziens, 12 plakne, ko veido šie vektori, 0x un 0y savstarpēji perpendikulāri spēku pielikšanas virzieni, xy plakne ko veido spēku vektori 0x un 0y, kas atrodas leņķī  $\Phi$  pret plakni 12.



2.4.att. Šķiedrota kompozītmateriāla deformācija pie piliktajām slodzēm

Transformācijas matrica šajā gadījumā būs:

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

kur  $m = \cos(\Phi)$  un  $n = \sin(\Phi)$

### 2.3 Šķiedru un matricas attiecība

Plāksnes (tape) sastāv no pavedieniem-diegiem (tows), kuri savukārt sastāv no šķiedrām (fibres). Slāņa biezums mūsdienu kompozītmateriāliem ir aptuveni 0,1 mm un tas ir daudz lielāks nekā šķiedras diametrs. Reālā slānī šķiedras atrodas gadījuma izvietojumā kā attēlots 2.5.attēlā.

Tā kā reālais sadalījums nav zināms un to ir grūti paredzēt, tad pastāv daži idealizēti sadalījuma modeļi un tie būtu – kvadrātveida 2.6.attēlā, heksogonāls 2.7.attēlā un šķiedras slāņa 2.8.attēlā.

Tā kā kompozītmateriāls sastāv no divām komponentēm – šķiedrām (f) un matricas (m), tad to savstarpējām proporcijām ir jābūt noteiktām vai nu pēc masas m vai tilpumiem v

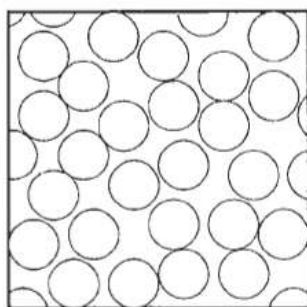
$$v_f = V_f / V_c \quad v_m = V_m / V_c \quad (2.11)$$

$$m_f = M_f / M_c \quad m_m = M_m / M_c \quad (2.12)$$

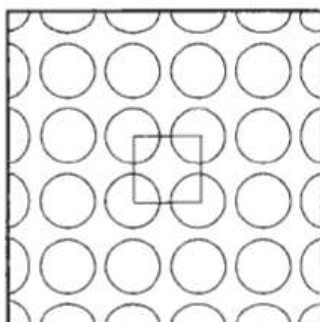
Tā kā,  $V_c = V_f + V_m$ , un  $M_c = M_f + M_m$ , tad

$$v_f + v_m = 1 \quad m_f + m_m = 1 \quad (2.13)$$

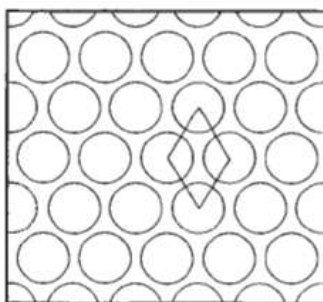
$$v_f = (\rho_c / \rho_f) m_f \quad v_m = (\rho_c / \rho_m) m_m \quad (2.14)$$



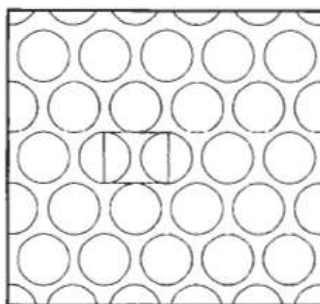
2.5.att. Reālais šķiedru izvietojums slāņa šķērsgriezumā ( $v_f=0,65$ )



2.6.att. Kvadrātiskais šķiedru sadalījums slāņa šķērsgriezumā ( $v_f=0,65$ )



2.7.att. Heksogonālais šķiedru sadalījums slāņa šķērsgriezumā ( $v_f=0,65$ )



2.8.att. Sakārtotas kārtas šķiedru sadalījums slāņa šķērsgriezumā ( $v_f=0,65$ )

kur  $\rho_f$ ,  $\rho_c$  un  $\rho_m$  ir šķiedru blīvums, matricas blīvums un kompozīta blīvums. Materiāla analīzē tilpuma vienības tiek lietotas, ja vēlas iesaistīt slāņa stīvuma koeficientus, savukārt masas vienības tiek lietotas, jo tās parasti ir vieglāk nomērīt vai eksperimentālā veidā noteikt no jau izgatavotā materiāla.

Pie šķiedru un matricas attiecību noteikšanas parasti tiek pielietoti divi to noteikšanas veidi. Pirmais veids ir, ja zināma šķiedru masa, kāda ir nepieciešama parauga izgatavošanai un paša parauga masa. Tad, atņemot no kopējās parauga masas šķiedru masu, iegūst matricas masu. Lai noteiktu šķiedru masu, ir jānosver tā attiecībā pret garuma vai laukuma vienību un attiecīgi jāpareizina ar slāņu daudzumu vai garumu.

Otrs veids ir noteikt parauga blīvumu un zinot šķiedru un matricas blīvumus un tilpumus. Šādā gadījumā var atrast teorētisko kompozītmateriāla blīvumu pēc formulas:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (2.15)$$

Ja ieliekam  $\rho_c = \rho_c^c$ ; un ņemot vērā (2.13) iegūst

$$v_f = (\rho_c^c - \rho_m) / (\rho_f - \rho_m) \quad (2.16)$$

Piemēram, ja ir oglekšķiedras-epoksīda kompozītmateriāls ar šķiedrām AS4 un matrica EPON DPL-862, kur  $\rho_f = 1.79 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_m = 1.2 \text{ g/cm}^3$ . Pieņemot, ka  $\rho_c^c = 1.56 \text{ g/cm}^3$ , tad no izt. (2.16) izriet  $v_f = 0.61$ . Šis rezultāts ir aptuvens, jo tas neņem vērā šķiedru impregnāciju. Lai noteiktu precīzu šķiedru tilpuma daļu, ir ķīmiski vai krāsni karsējot jāatbrīvojas no matricas. Rezultātā, izmantojot formulas (2.12 un 2.14), no iegūtām masām  $M_f$  un  $M_c$  izsaka  $m_f$  un  $v_f$ . Tālāk, izmantojot formulu (2.15), iegūst  $\rho_c$  un, salīdzinot to ar  $\rho_c^c$ , var noteikt šķiedru materiāla porainību vai spēju uzņemt matricu  $v_p$ .

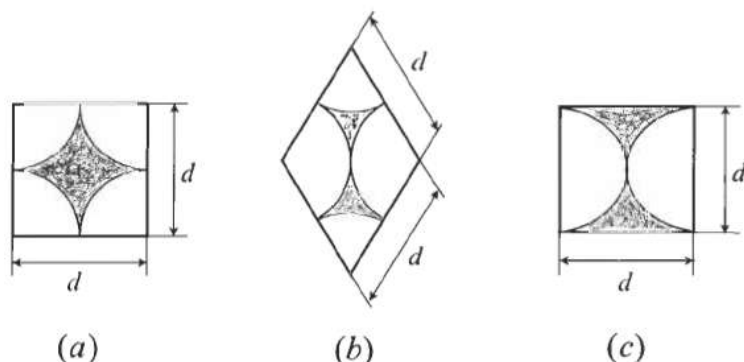
$$v_p = 1 - (\rho_c^c / \rho_c) \quad (2.17)$$

Augstāk apskatītajam materiālam veicot šīs procedūras, var noteikt, ka  $M_f = 0.72$ . un no vienādojuma (2.14) un (2.17) iegūst  $v_f = 0.63$ ,  $\rho_c = 1.58 \text{ g/cm}^3$ , un  $v_p = 0.013$ .

Reāliem kompozītmateriāliem šī attiecība ir aptuveni  $v_f = 0.5-0,65$ . Zemāks šķiedru īpatsvars materiālā noved pie zemākas slāņa izturības un stīvuma pie stiepes slogojuma šķiedru garenvirzienā, bet lielāks šķiedru īpatsvars un sevišķi tuvojoties maksimālajam, noved pie spiedes izturības samazināšanās šķiedru garenvirzienā šķiedru vājo savstarpējo saikņu dēļ. (bonding)

Tā kā šķiedrām ir riņķveida šķērsriezums, tad eksistē tāds minimāls šķiedru tilpuma īpatsvars, kad tas ir atkarīgs no šķiedru izvietojuma. Tipiskiem šķiedru izvietojumiem, kuri

parādīti 2.9 attēlā, minimālais šķiedru izvietojums un tiem atbilstošais tilpuma īpatsvars parādīti 2.6, 2.7, 2.8.attēlā.



2.9.att. Aizpildāmie tilpumi starp šķiedrām kvadrātveida (a), heksogonāla (b) un sakārtotas kārtas (c)

Šķiedru tilpumu īpatsvaru, attiecīgi kvadrātveida, heksogonāla un sakārtotas kārtas, var noteikt pēc formulām:

$$v_f^u = (1/d^2)(\pi d^2/4) = \pi/4 = 0,785$$

$$v_f^u = (2/d^2 3^{1/2})(\pi d^2/4) = 0,907 \quad (2.18)$$

$$v_f^u = (1/d^2)(\pi d^2/4) = \pi/4 = 0,785$$

Šķiedru un matricas proporciju noteikšana ir svarīgs process, kā izgatavojot paraugus, tā arī pēc to izgatavošanas pārbaudot reālos paraugus. Kompozītmateriāla matricas un šķiedru attiecību analīze tiek pielietota turpmākajā darbā un ir pamats korektu stiprības un elastības īpašību noteikšanai.

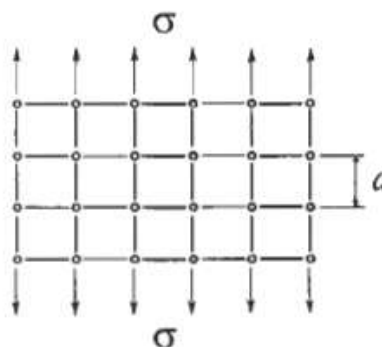
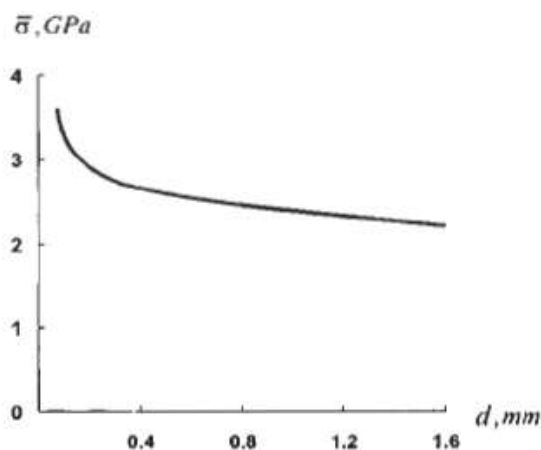
## 2.4 Šķiedru un matricas savstarpējā mijiedarbība

Vissvarīgākā moderno kompozītmateriālu īpašība ir saistīta ar ļoti augstu vienvirziena slāņu izturību, tajā pat laikā saglabājot zemu blīvumu. Šo priekšrocību galvenokārt nodrošina šķiedras. No šī faktora izriet jaunas pielietojuma iespējas, aizvietojojam tradicionālos alumīniju vai tēraudu. Bet kas nosaka augsto šķiedru izturību? Galvenokārt to nosaka ļoti mazie šķiedru izmēri, un ir pierādīts, ka tievas stieplītes izturība būs krietni augstāka par tādu pašu viengabalainu paraugu. Sakarība starp stieples diametru un izturību ir parādīta 2.10.attēlā.

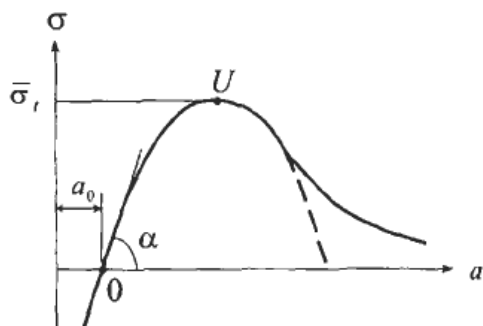
Apskatīsim nedaudz sīkāk to, vai eksistē kāds maksimums bezgalīgi mazai stieplei un kāpēc veidojas šāda sakarība starp stieples diametra samazināšanos un izturības pieaugumu.

Uz pirmo jautājuma daļu atbildi sniedz cietvielu fizika. Ja pieņem idealizētu cietvielas modeli ar regulāru atomu izvietojumu, kā parādīts 2.11.attēlā, un nosaka spriegumus, kuri spējīgi sagraut šo sistēmu. Spriegumu atkarība no atomu savstarpējiem attālumiem, vadoties no cietvielu fizikas, ir parādīta 2.12.attēlā, kur līknes punkts 0 atbilst nenoslogotam sistēmas stāvoklim, bet punkts U atbilst maksimālam teorētiskam spriegumam  $\bar{\sigma}_1$ . Sākotnējais leņķa  $\alpha$  tangens raksturo materiāla elastības moduli E. Lai noteiktu  $\sigma_1$  līkni, var lietot sinusveida aproksimāciju J.Giliman, priekš 0U segmenta.

$$\sigma = \bar{\sigma}_1 \sin 2\pi \frac{a - a_0}{a_0} \quad (2.19)$$



2.10.att. Stieples izturības atkarība no tās diametra 2.11.att. Matereāla atomu modelis



2.12.att. Atomu savstarējās iedarbības līkne (—) un sinusveida aproksimācija (----)

Ieviešot pagarinājumu  $\varepsilon$

$$\varepsilon = (a - a_0) / a_0 \quad \text{iegūst}$$



$$\sigma = \bar{\sigma}_1 \sin 2\pi\varepsilon \quad (2.20)$$

un elastības moduli E var noteikt kā:

$$E = \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) \Big|_{c=0} = 2\pi\bar{\sigma}_1 \quad (2.21)$$

un

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{E}{2\pi} \quad (2.22)$$

Apskatot šāda veida modeli, var iepazīties ar vēl vienu svarīgu materiāla īpašību, tam sabrūkot – ar enerģiju, kas jāpatērē, lai sagrautu materiālu, un to nosaka pēc formulas:

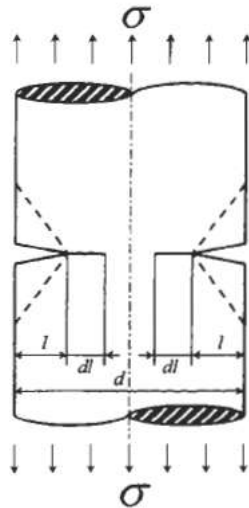
$$2\gamma = \int_{d_0}^{\infty} \sigma(a) da \quad (2.23)$$

Tā kā materiāla sabrukšana būtībā ir divu jaunu virsmu veidošanās, tad  $\gamma$  var uzskatīt par virsmas veidošanās enerģiju – enerģiju, kas tiek patērēta, lai izveidotu vienu laukuma vienību.

Atbildi uz otro jautājumu, kāpēc šķiedras ir izturīgākas par pilnīgiem materiāliem, sniedz A.Griffith pētījumi, kas savukārt ir cietvielu fizikas pamati. Pieņemot, ka šķiedra atrodas nospriegotā stāvoklī un tajā ir izveidojusies plaisa, kā parādīts 2.13.attēlā. Plaisas garums  $l$  ir daudz mazāks par šķiedras diametru  $d$ . Spriegumi šķiedrā var tikt izteikti kā  $\sigma = E\varepsilon$  un elastības potenciāls izteikts kā:

$$U = 0,5\sigma\varepsilon = \sigma^2/2E \quad (2.24)$$

Kad plaisa parādās, pagarinājuma enerģija tiek atbrīvota materiāla tilpumā plaisas rajonā. Pieņemot, ka šis tilpums ir kā konisks riņķis, kā parādīts ar pārtrauktām līnijām 2.13.attēlā, un augstums ir proporcionāls plaisas garumam  $l$ ,



2.13.att. Šķiedra ar plaisu

šajā gadījumā kopējā atbrīvotā enerģija būs:

$$W=0,5k\pi(\sigma^2/E)l^2d \quad (2.25)$$

kur k ir proporcionalitātes konstante. No otras puses, jaunas plaisas veidošanās patērē enerģiju:

$$S=2\pi\gamma ld \quad (2.26)$$

kur  $\gamma$  ir virsmas enerģija. Savukārt plaisa progresēs un šķiedra saplīsīs, ja:

$$dW/dl > dS/dl$$

Līdz ar to

$$\sigma > \bar{\sigma}_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{kl}} \quad (2.27)$$

Svarīgākais secinājums no šīs formulas ir fakts, ka, nosakot kritiskos spriegumus  $\sigma_c$ , virs kuriem šķiedra ar plaisu nevar eksistēt,  $\sigma_c$  ir atkarīgs no absolūtā plaisas garuma nevis attiecības  $d/l$ . Bet priekš garām šķiedrām ar  $2l < d$ , jo tievāka ir šķiedra, jo mazāka plaisa tajā var būt un līdz ar to lielāks ir kritiskais spriegums  $\sigma_c$ .

Izanalizējot matricas un šķiedru savstarpējo mijiedarbību tika iegūti nepieciešamie nosacījumi paraugu izturības un elastības īpašību noteikšanas un analīzes ticamības novērtēšanai, kā arī matemātiskā modeļa izstrādei.

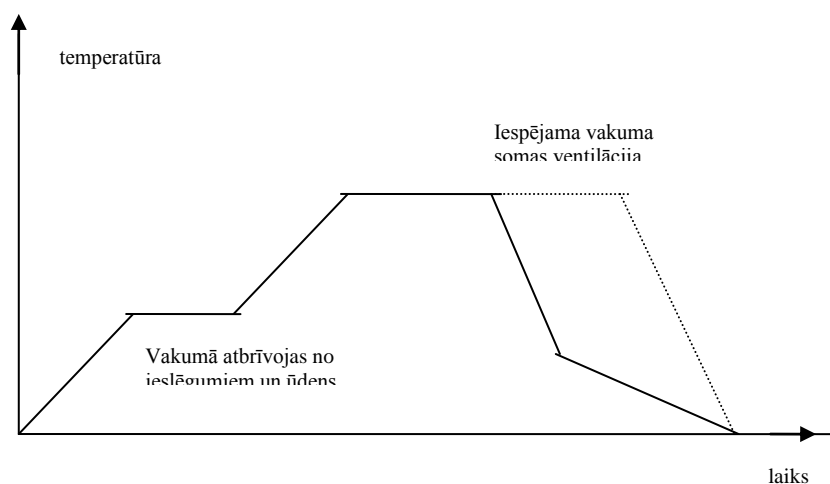
## **2.5 Ražošanas faktori, kas ietekmē kompozītmateriālu īpašības**

Protams, izvēloties kompozītmateriāla elementus, svarīgi ir ne tikai to stiprības parametri, bet arī tādi faktori kā pildvielas šķiedru elastība, kas mainās, mainoties diega diametram, un tas savukārt ir svarīgi, lai no šķiedrām varētu izgatavot vēlamā pinuma audumu. Tāpat ir arī ierobežojums šķiedru skaitā, cik ir iespējams iekļaut noteikta šķērsriezuma kompozītmateriālā, jo ir jāizvairās no šķiedras kontakta ar citu šķiedru. Aprēķinos matricas un armatūras attiecības var tikt dotas vai nu pēc to tilpumu attiecības vai pēc masu attiecības.

Svarīgs posms matereāla īpašību veidošanā ir matereāla noturēšanai (curing). Materiāla noturēšana ir process, kas nepieciešams, lai palīdzētu savienot matricai ar šķiedrām molekulārā līmenī. Noturēšanai nepieciešamo siltumu var pievadīt, ievietojot izstrādājumu speciālās krāsnīs, apsildāmās presformās vai apsildāmās veidnēs. Lai paātrinātu termoaktīvo matricu polimerizēšanos, materiālam tiek pievadīts siltums. Divkomponentu epoksīdiem siltums rodas, reaģējot to komponentēm un tiek novadīts. Būtībā šādiem materiāliem, jo lielāka ir to temperatūra, jo ātrāk tie izveido nepieciešamās savstarpējās saiknes. Siltums ir nepieciešams, jo: 1) dažiem katalizatori un cietinātāji nereaģē zem kritiskās temperatūras; 2) molekulārā aktivitāte ir nepieciešama, lai rastos kontakts starp ķīmiskajiem elementiem; 3) lai labāk izvadītu ūdeni un izgarojumus no materiāla tilpuma; 4-) lai iegūtu vienmērīgu sadalījumu (saistviela vieglāk izplatās un sajaucas). Spiediens ir nepieciešams, lai labāk savienotu šķiedras ar matricu un izspiestu lieko saistvielu.

Tipiska materiāla noturēšanas temperatūras diagramma laikā parādīta 2.14.attēlā, kur laiks parasti ilgst vairākas stundas, bet temperatūra simtos grādu pēc Celsija. Diagramma sākas ar pakāpenisku temperatūras palielināšanu. Tālāk tiek radīti vakuuma apstākļi, lai atbrīvotu materiālu no nevēlamā ūdens tvaika un izgarojumu ieslēgumiem. Tālāk temperatūra pakāpeniski tiek palielināta līdz maksimālai temperatūrai, kas tiek noturēta vairākas stundas, lai radītu ciešas saiknes starp stiegrām un pildvielu, kā arī starp materiāla slāņiem. Pēc materiāla noturēšanas tajā ir gandrīz pilnībā izveidojušās savstarpējās saiknes un saistviela ir sacietējusi, taču augstās temperatūras dēļ tai vēl ir zema cietība.

Noturēšanas laikā var tikt pielietots spiediens, lai vēl vairāk uzlabotu saikņu veidošanos materiālā. Pēc materiāla izturēšanas augstākajā temperatūrā seko materiāla pakāpeniska atdzesēšana, kura ilgst aptuveni stundu, lai izvairītos no termālā šoka. Spiediens savukārt var tikt samazināts ātri.



2.14.att. Tipiska kompozītmateriāla noturēšanas līkne

Pētījumam izgatavoti mikroparaugi to nelielo izmēru un trausluma dēļ netika izgatavoti pielietojot vakuma metodi

## 2.6 Kompozītmateriālu mehānisko īpašību noteikšana un diagnostika

Šobrīd visā pasaulē joprojām tiek veikta plaša kompozītmateriālu stāvokļa nesagraujošās diagnostikas metožu un līdzekļu meklēšana. Tiek risināti divi uzdevumi: 1) kompozītmateriālu fizikāli-mehānisku raksturojumu noteikšana konstrukcijas ražošanās procesā, kā arī pēc tā; 2) fizikāli-mehānisku raksturojumu izmaiņas noteikšana ekspluatācijās procesā.

Izstrādājumu nesagraujošas kontroles veikšanā liela nozīme ir efektīvākas diagnosticēšanas metodes pareizai izvēlei. Diagnostikā pielieto akustiskas, ultraskaņas, dielektriskas, siltuma, radioviļņa un citas metodes. Tomēr kā kontroles pamatmetodi šobrīd pielieto vizuālo apskati un klauzcināšanas metodi galvenokārt atslāņošanās tipa bojājumu robežu precizēšanai. Lai atvieglotu diagnostiku, kompozītmateriālos tiek ielikti dažādi indikatori, pēc kuru stāvokļa turpmāk tiek veikta defektēšana.

Iespējamie sagrūšanas veidi/tipi/gadījumi, kuri var tikt atrasti, izmantojot nesagraujošas kontroles metodes, ir: matricas pārrāvums/plīsums, šķiedras pārrāvums/plīsums vai robežas „šķiedra-matrica” sagrūšana.

Balstoties uz izstrādājumu stāvokļa diagnostikas metožu analīzi, tās var tikt sadalītas aktīvās un pasīvās metodēs.

Aktīvas metodes balstās uz dažādu izmēģinājuma slodžu (mehānisku, hidrostātisku un temperatūras) pielikšanu izstrādājumam, kuru lielums ir ievērojami mazāks nekā sagrūšanas slodze, ar tālāku izstrādājuma reakcijas noteikšanu uz pārbaudes slodzi un sakarības noteikšanu ar sagrūšanas slodzi, vai salīdzināšanu ar etalonu (hologrāfiska metode, akustiskas emisijas metodi).

Pasīvas metodes balstās uz analītisku, funkcionālu, korelācijas sakarību noteikšanu, kuras nosaka fizisku parametru savstarpējo sakarību, kuri tiek noteikti tieši izstrādājumā, ar to stiprību (ultraskaņas, siltuma metodes).

Viens no pamatnosacījumiem, kas nodrošina kompozītmateriālu drošumu ekspluatācijā, ir efektīva kontrole pēc ražošanas. Ļoti labi sevī pierādīja siltuma metode, kura ir diagnostikas pamatmetode firmas „McDonnell Aircraft Co.” rūpnīcās. Materiāla fizikāli-mehānisku raksturojumu novērtējums tiek veikts pēc siltuma aktivitātes lieluma, kuru var noteikt pēc sakarības:

$$A = A_3 \pm \Delta q \sqrt{\pi \tau / T_0} \quad (2.28)$$

kur  $A_3$  – etalona siltuma aktivitāte;

$T_0 = T_H - T_C$  – siltuma plūsmas ātrums/intensitāte, t.i. starpība starp sildīšanas bloka un ārējās vides temperatūrām.

Analizējot siltuma plūsmu starpību atkarību no laika, var spriest par materiāla struktūru un īpašībām. Ja nav koncentrētu defektu, pie materiāla īpašību izmaiņas siltuma plūsmu starpību līknes atkarība no laika  $\Delta q = f(\tau)$  atbilst likumam  $\Delta q \sqrt{\tau} = const$  un atšķiras tikai ar ordinātas lielumu  $\Delta q$ .

Siltuma plūsma, kas tiek virzīta kontrolējamā materiāla iekšpusē, nepārtraukti tiek salīdzināta ar siltuma plūsmu etalonā, un ja ir struktūras neviendabīgums izstrādājuma biežumā vai atslāņošanās tipa defekti, slikti salīmētas vietas, plaisas, kuras ir orientētas perpendikulāri normālai siltuma plūsmai, uz  $\Delta q = f(\tau)$  sakarību līknēm rodas būtiskas novirzes.

Šāda kontroles metode tiek pielietota, lai iegūtu informāciju par dažādiem izstrādājumiem - no mikroelektronikas komponentiem līdz daudzu metru gariem paneļiem. Šīs metodes priekšrocības: nav nepieciešams kontakts ar izstrādājumu, liela jutība, kontroles iespējamība pie piekļūšanas no vienas puses un procesa automatizācijas iespējamība.

Šķiedru pārrāvuma/plīsuma gadījumā, arējās slodzes iedarbības rezultātā veidojas mikroplaisas un notiek sprieguma elastīgu viļņu ģenerācija cietos ķermeņos kā to struktūras lokālas dinamiskas pārveidošanas rezultāts. Vispārējā gadījumā akustiskas emisijas (AE) veidošanās ir saistīta ar vielas iekšējās struktūras mijiedarbību ar spriegumiem, kuri rodas arēju slodžu, temperatūru ruckšanas, ķīmisku pārveidojumu darbības rezultātā. AE pētīšana kompozītmateriālos ir daudz sarežģītāka nekā vienveidīgas uzbūves metālos un materiālos. Tas ir skaidrojams ar kompozītmateriālu sagrūšanas sarežģīto raksturu, ko nepieciešams ņemt vērā AE kontroles rezultātu analīzē, tā kā atslāņošanās, atsevišķu šķiedru pārrāvumi/plīsumi un pārrāvumu berze izraisa AE impulsus ar dažādām amplitūdām un frekvenču spektriem. Dažādiem kompozītmateriāliem ir akustiskās emisijas raksturīgas atšķirības, piemēram, stiklplastītam piemīt atbalss efekts. AE informācijas pamatavoti ir – impulsu skaits novērošanas periodā un skaitīšanas ātrums, kas vienāds impulsu skaitam kādā novērošanas intervālā. Faktiski tiek reģistrēti ne visi AE impulsi, bet tikai tie, kuri pārsniedz noteiktu līmeni  $U_1$  un tad par parametru tiek ņemts summārais impulsu skaits -  $\sum A(\varepsilon)$ . AE summārais impulsu skaits  $\sum A(\varepsilon)$  izstrādājumā, kurš veidojas pie sprieguma  $\sigma$ , var tikt aprēķināts:

$$\sum A(\varepsilon) = c(\sigma / \sigma_e)^m (t / t_e)^n \quad (2.29)$$

kur  $\sigma_e$  – robežspriegums, kas rodas etalonā sagrūšanas darbības rezultātā;  $t$ ,  $t_e$  – AE impulsu rīšanas laiks līdz pastāvīgam līmenim kontrolējamā izstrādājumā un etalonā pie sprieguma;  $c$ ,  $m$ ,  $n$ , - nemainīgi parametri, kuru vērtības var tikt noteiktas pie izstrādājuma sloģojuma ne mazāk kā ar diviem pastāvīgas slodzes līmeņiem  $\sigma$  un  $\sigma_e$ .

Kontroles veikšanai ar AE metodi ir nepieciešama kontrolējamā parauga nosloģošana, kas prasa nosloģošanas rezultātu novērtēšanas efektīvu metodiku un atbilstošu aprīkojumu.

Konstrukcijas daļām, kuras strādā uz stiepi vai starpslāņu bīdi ekspluatācijas slodžu iedarbībā, stiprības un elastības moduļu izmaiņu nosaka galvenokārt porainības izmaiņa, stieģrojuma koeficienta izmaiņa, armatūras sadalģjuma koeficienta stieģrojuma virzienā izmaiņa un armatūras stiprģbas izmaiņa. No šiem parametriem ir atkarģģgi tģdi fizģskie

raksturojumi kā ultraskaņas svārstību izplatīšanas ātrums, gaismaurlaidības koeficients un siltumaktivitāte, kurus var izmērīt ar nesagraujošas kontroles metodēm.

Šajā gadījumā diagnostikas mērķiem piemērotāka ir ultraskaņas metodes pielietošana, kura balstās uz elastīga ultraskaņas signāla izplatīšanas parametru izpētāmajā vidē noteikšanu. Diagnostikas pamatparametri ir elastīgu viļņu ātrums un rimšana, frekvenču spektrs un ultraskaņas enerģijas, kas izgāja caur materiālu, intensitāte. Augtāka diagnostikas precizitāte tiek sasniegta pie ultraskaņas viļņu izplatīšanas ātruma noteikšanas. Rimšanas koeficienta noteikšanas precizitāte ir tikai 15-20%, kaut arī tas ir vairāk atkarīgs no stiprības izmaiņas.

Ultraskaņas enerģijas intensitātes un impulsa frekvenču spektra noteikšanas metodes netiek plaši pielietotas, jo tās stipri ietekmē izstrādājuma virsmas stāvoklis, pārveidotāju kontakts ar kontrolējamo virsmu, elastīgu viļņu interferences un difrakcijas parādības materiālā izstrādājuma ģeometrisko raksturojumu dēļ.

Ultraskaņas svārstību metodes vienkāršums, aprīkojuma kompakts ļauj izmantot to kompozītmateriālu stāvokļa kontrolei kā ražošanā tā arī ekspluatācijā.

Mitruma uz kompozītmateriāliem iedarbojas negatīvi. Ūdens absorbcija rada kaitīgu ietekmi uz kompozītmateriālu noguruma īpašībām, kas noved pie matricas atmīkstināšanās. Tāpēc var tikt novērota ievērojama īpašību pasliktināšanās pie aksiālas slodzes. Mitruma uzkrāšanās novērtējumam materiālā rekomendē pielietot dielektriskās caurlaidības metodi. Noturīgāks pret mitruma iedarbību ir oglekļakompozīts, pēc tā – organokompozīts, bet vismazāk noturīgs ir stiklkompozīts.

Defekts pavājinā atdalīta slāņa mehānisku saistību ar kontroles objekta pamatmasu. Tas ļauj pielietot impedances metodi, kura balstās uz pārveidotāja svārstību režīma izmaiņas defektu dēļ. Zonā bez bojājumiem kompleksa impedance  $\xi_H$  tiek noteikta ar visiem izstrādājuma slāņiem kā viens vesels. Defekta zonā  $\xi_H$  modulis parasti samazinās un mainās tā arguments.  $\xi_H$  izmaiņa maina pārveidotāja kompleksu pārnese koeficientu  $P = U_1 / U_2 = [P]e^{j\psi}$ , kur  $U_1$  un  $U_2$  – elektrisku spriegumu kompleksas vērtības uz pjezoelementiem;  $\psi$  – fāžu nobīdes leņķis starp spriegumiem  $U_1$  un  $U_2$ . Parasti  $U_1 = const$ , tāpēc pārnese koeficienta modulis ir proporcionāls  $U_2$ .

Kopumā izanalizējot matereāla pētīšanas un stāvokļa diagnosticēšanas metodes tika izlemts turpmākajos pētījumos pievērsties akustiskās emisijas metodei.

## 2.7 Kompozītmateriālu nogurums un ilgizturība

Darba gaitā tiks parādīts, ka akustiskā signāla dažādi parametri mainās pēc vienādām likumsakarībām kā statiskas slodzes gadījumā tā noguruma slodzes gadījumos. Tāpēc lai iepazītos ar to kas ir matereāla nogurums un kādi parametri to raksturo tika veikta arī neliela noguruma analīze.

Materiāla nogurums ir spēja izturēt daudzkārtējas atkārtotas slodzes bez tā sabrukšanas. Cits noguruma apzīmējums ir ilgizturība. Zem mainīga slogojuma iedarbības radītā materiāla sprieguma, kas mazāks par īslaicīgo pieļaujamo spriegumu, vietējo sprieguma koncentratoru zonā materiālā veidojās mikroplaisas. Tās var ar laiku palielināties un savienoties savā starpā, kas noved pie šķērsriezuma laukuma samazināšanās un spriegumu pieauguma. Šādā veidā detaļas izturība progresīvi samazinās, līdz sasniedz kritisko robežu un notiek trausla veida materiāla sabrukšana.

Materiāla noguruma izturību izsaka noguruma līkne, kura apraksta materiāla izturības atkarību no spriegojuma ciklu skaita. Noguruma līkne tiek izteikta ar formulu:

$$N \cdot \sigma_{\max}^m = C \quad (2.30)$$

Logaritmiskajā koordinātu sistēmā vienādojumu izsaka:

$$\lg N = C - m \lg \sigma_{\max} \quad (2.31)$$

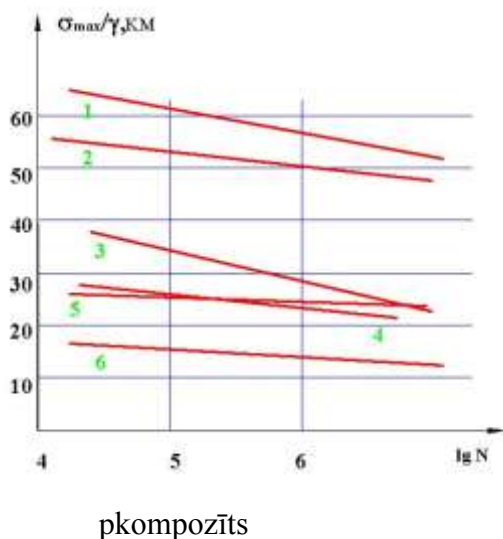
kur, m un c līknes parametri;

$\sigma_{\max}$  - maksimālie spriegumi, kas rodas ekspluatācijas laikā;

N - slogojuma ciklu skaits.

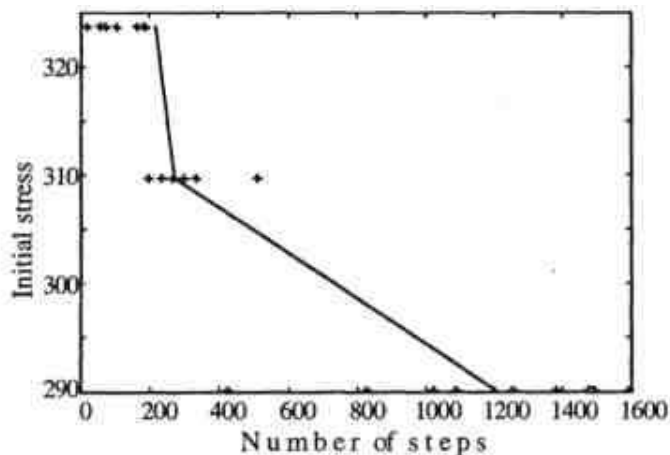
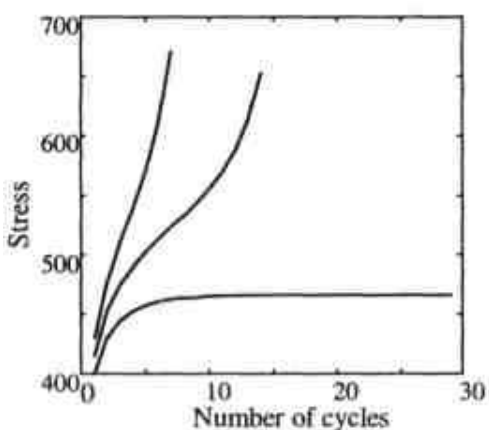
Dažādu kompozītmateriālu noguruma līknes parādītas 2.15.attēlā. No tām redzams, ka līkņu slīpums un asis ir krietni mazākas nekā citiem konstrukciju materiāliem, izmantojamiem aviācijas konstrukcijās. Parametru vērtības atšķiras pat par kārtu. Tas norāda uz krietni labākām kompozītmateriālu noguruma īpašībām.





2.15.att. Tipiskas noguruma līknes epoksīda matricas šķiedrotiem kompozītiem. 1- vienā virzienā orientēts bora kompozīts; 2- vienā virzienā orientēts oglekļa kompozīts; 3 - vienā virzienā orientēts oglekļa kompozīts (saspiešana); 4 - oglekļa kompozīts 1:1 (0<sup>0</sup>/ 90<sup>0</sup>); 5 - oglekļa kompozīts 1:1 (saspiešana); 6 – stikla pkompozīts

2.16.attēlā ir parādīta secība  $\{s_0, s_1, s_2, \dots\}$ , kas atbilst dažādiem sākuma spriegumiem  $S_0$ , kur  $S_0$  - sākuma maksimālais spriegums ciklā pie cikliskas slodzes ar pastāvīgu nominālo slodzi. Līdzīgas līknes var redzēt noguruma izmēģinājumos, ievērojot kompozītmateriāla parametru izmaiņas.



2.16.att. un 17.att. Ciklu skaita izmaiņas līdz sabrukumam

Ja vienādojumu  $S_0 / (1 - F(s)) = s$  ir iespējams atrisināt, tad secībai  $\{s_0, s_1, s_2, \dots\}$  ir robeža, un spriegumu kāpināšana tiek pārtraukta. Tas ir atkarīgs no  $S_0$ . Atbilstošo maksimālo spriegumu  $S_0$  var pieņemt kā noguruma robežu. Ja spriegums  $S_0$  ir lielāks par noguruma robežu, tad

$$\text{funkciju } S' = S \text{ un } S'' = \frac{S_0}{1 - F(S)}$$

grafiki nekrustojas. Spriegumu kāpināšana netiek

pārtraukta un notiek parauga sabrukums. Var aprēķināt ciklu skaitu līdz sabrukumam un iegūt noguruma līkni. Ir parādīts, ka noguruma līkne var būt aprakstīta ar tuvinātu formulu:

$$S = C_1 - C_2 \tan(N(S) / C_3 - \pi / 2). \quad (2.32)$$

Šo formulu ir vieglāk izmantot nekā secības veidā  $\{s_0, s_1, s_2, \dots\}$ .

2.16.attēlā ir redzamas lielas izmaiņas ciklu skaitā līdz sabrukumam no dažiem cikliem (augšējā līknē) un līdz bezgalībai (apakšējā līknē). Tāpēc šis modelis var būt lietots tikai sprieguma šaurā intervālā. Noguruma līknes piemērs ir parādīts 2.17.attēlā. M.Kleinhofa eksperimentu dati ir parādīti ar (+) un aprēķina rezultāti ir parādīti ar taisnas līnijas fragmentiem.

Kopumā darbs balstīts uz vairāku zinātnieku līdzšinējiem pētījumiem. Darbā pētot šķiedru stiepes īpašības izmantoti galvenie principi no M. Kleinhofa, R. Chatys, A. Griffith un J.Giliman pētījumiem, 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 traušlā 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. traušlā 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 tādus V.Veibulla sadalījuma uzlabojumus, 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 sliekšnis).

V.P.Tamužs un V.S.Kuksenko savos darbos piedāvāja dispersa sabrukuma teoriju saliktā sprieguma apstākļos. Šī teorija ir L.M.Kačanova pakāpeniskā bojājamības parametra pieauguma ideja, kā arī N.N.Afanasjeva statistiskās noguruma teorijas vispārinājums. Izklāstītā modeļa ietvaros ietilpst arī statistiskā izturības aprēķina teorija, ko izvirzījis S.D.Volkovs.

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.

## 2.8 Šķiedru izturība

Šķiedru stiprība ir relatīvi augsta, tomēr tā ir zemāka nekā tai vajadzētu būt teorētiski, un tas nozīmē, ka kompozītmateriālam ar šķiedru matricu ir mikroplaisas vai citi defekti, kas ar gadījuma izkliedi ir izkliedēti visā materiāla tilpumā. Šo pieņēmumu apstiprina arī fakts, ka šķiedras izturība samazinās, palielinoties tās garumam. Borona šķiedras izturības atkarība no tās garuma (Miķelsons, Gutāns) ir attēlota 2.18.attēlā. Tātad, jo garākas ir šķiedras, jo lielāka varbūtība, ka materiālā ir bojājums. Spriegumi šķiedru segmentos ar vienādiem garumiem, bet ņemti no vienas šķiedras arī ir atšķirīgi. Tipisks izturības sadalījums borona šķiedrām ir parādīts 2.19.attēlā.

Pirmais svarīgais izturības izkļiedes rādītājs ir izturības izkļiede

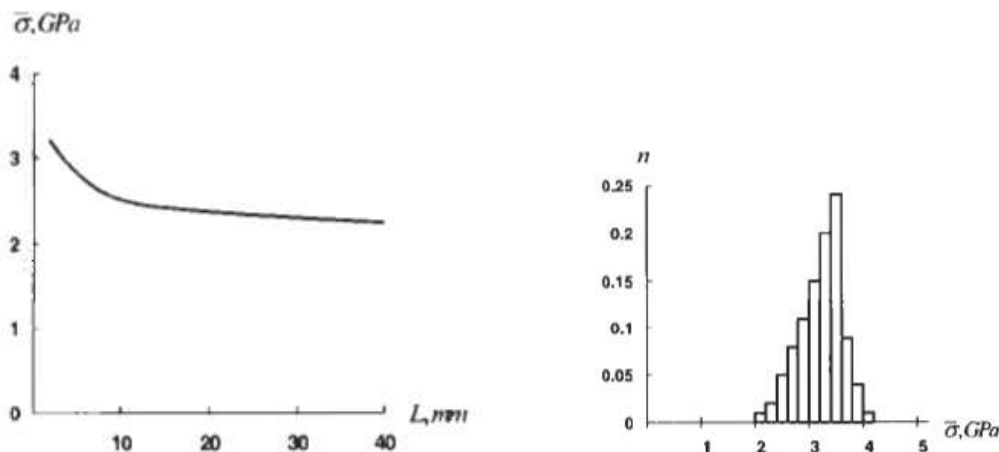
$$\overline{\Delta\sigma} = \overline{\sigma}_{\max} - \overline{\sigma}_{\min} \quad (2.33)$$

Gadījumā, kas parādīts 2.18.attēlā  $\overline{\sigma}_{\max} = 4,2GPa$   $\overline{\sigma}_{\min} = 2GPa$   $\overline{\Delta\sigma} = 2,2GPa$ .

Lai uzzīmētu diagrammu, kura attēlota 2.19.attēlā, slogojums ir sadalīts pieaugumu kopumā,

kur uz vertikālās ass atlikts  $n=N_o/N$  ( $N_o$  ir sabrukušo šķiedru skaits noteiktajā slogojuma pieaugumā un  $N$  ir kopējais šķiedru skaits). Šādu diagrammu sauc par frekvences vai blīvuma diagrammu. Šāda diagramma ļauj noteikt sagaidāmo šķiedras izturības vērtību pēc formulas:

$$\bar{\sigma}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\sigma}_i \quad (2.34)$$



2.18.att. Šķiedru izturības atkarība no tās garuma 2.19.att. Izturības sadalījums šķiedrām

un izturības izkliede ir:

$$d_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{\sigma}_m - \sigma_i)^2} \quad (2.35)$$

Šķiedru izturības izkliedi raksturo izturības variācijas koeficients, kuru nosaka:

$$r_\sigma = \frac{d_\sigma}{\bar{\sigma}_m} 100\% \quad (2.36)$$

Augstāk apskatītajām borona šķiedrām tas ir 12,5% ( $\bar{\sigma}_m = 3,2$  un  $d_\sigma = 0,4$ )

Lai demonstrētu šķiedru izturības ietekmi uz vienvirziena slāņa izturību, tiks apskatīta šķiedru bunte, t.i., sistēma ar aptuveni paralēlām šķiedrām ar dažādām izturībām un dažādiem to garumiem, kā parādīts 2.20.att. Tipiska slogojuma pagarinājuma diagramma šķiedrām pie stiepes slogojuma parādīta 2.21.att. (Vasiļjevs un Tarnopolski) Kā redzams diagrammās, ir divi nelineāri segmenti. Nelinearitāte 0 slogojuma tuvumā ir saistīta ar dažādiem šķiedru garumiem buntītē, savukārt pie slogojuma maksimālām vērtībām nelinearitāte saistīta ar vājāko šķiedru saplīšanu.

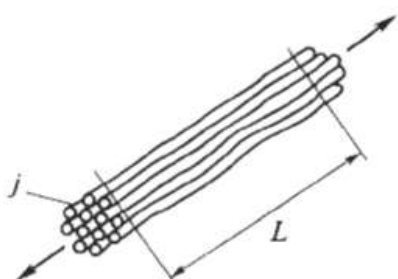
Pāreju no kompozītmateriāla komponentu raksturlielumu sadalījuma uz kompozītmateriāla raksturlielumiem kopumā pirmo reizi pārrunāja F.Peirss un H.Daniels.

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.

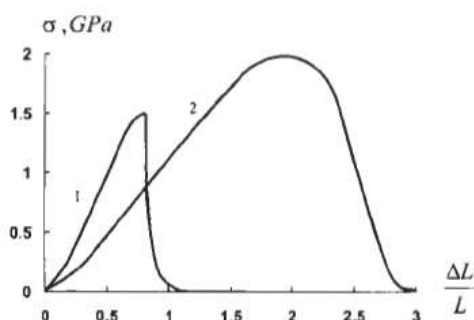
D.Gjusers un J.Gurlands ierosināja aplūkot kompozītmateriālu kā ķēdi, kas sastāv no noteikta kritiska garuma šķiedru kūļiem.

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 slogojuma 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.



2.20.att. Diega, kas sastāv no daudzām šķiedrām, slogojuma shematisks attēls



2.21.att. Sprieguma- pagarinājuma līkne ogļšķiedras un aramīda šķiedras diegiem

Izturības izkliede var būt svarīgāka nekā sagaidāmā izturība. Būtībā kamēr sagaidāmā izturība šķiedru buntītēm krītas, kopējais spēks  $F$  pieaug. Tātad ir labāk, ja ir šķiedras ar relatīvi zemāku izturību un zemu izkliedi nekā izturīgākas šķiedras ar lielu izturības izkliedi.

Augstāk minētajā piemērā tika apskatīti tā saucamie sausi paraugi – bez saistvielas. Tālāk tiks apskatīts, kā izturības sadalījums izmainās, ja tas pats materiāls tiek imregnēts ar saistvielu.

Lai gan matricas cietība parasti ir daudz zemāka par šķiedru cietību un matrica praktiski neuzņem slogojumu, tomēr šķiedras, savienotas ar matricu, darbojas pēc pavisam

citas sabrukšanas mehānikas un spēj izturēt krietni lielākus slogojumus. Materiāla izturības pieaugums ir parādīts 2.1.tabulā.

2.1.tabula

Šķiedras	Šķiedru jūtīgums pret bojājumiem	Dažādu šķiedru izturības pieaugumi		Stiprības pieaugums (%)
		Maksimālais stiepes spēks F (N) Sausa buntīte (diegs)	Kompozīta buntīte (diegs)	
Ogļšķiedra	liela	14	26	85,7
Stiklšķiedra	vidēja	21	36	71,4
Aramidšķiedra	maza	66	84	27,3

Matricas ietekme uz izturības izkliedi ir ievērojama. Kā redzams 2.2.tabulā, materiāliem ar matricu to izturības izkliedes koeficients ir par kārtu zemāks nekā individuālām buntītēm.

2.2.tabula

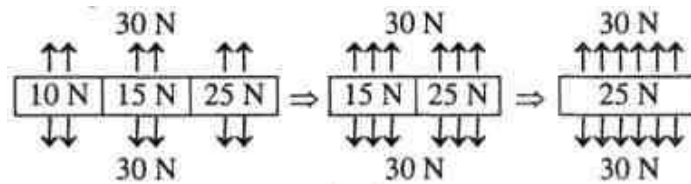
Šķiedras	Matricas ietekme uz izturības izkliedi	
	Variācijas koeficients $r_z$ (%) šķiedras	kompozīts
Stikla	29	2,0
Ogles	30	4,7
Aramīda	24	5,0
Borona	23	3,0

Stiprības izkliedi ietekmē arī individuālu šķiedru diegu un auduma izgatavošanas kvalitāte. Kā redzams 2.22.attēlā, diega diametrs tā garumā ir mainīgs, kas attiecīgi noved pie dažādiem spriegumiem.



2.22.att. Oglekļa šķiedras diegs ar epoksīda saistvielu

Faktu, ka kompozītmateriāla komponentu statistiskās izturības izkliede lielā mērā nosaka kompozītmateriāla izturību, pierāda vienkāršs piemērs: trīs paralēli komponenti ar dažādu izturību 10 N, 15 N un 25 N pie vienāda slodzes sadalījuma kopā spēj izturēt tikai 30 N, t.i., abiem pēdējiem komponentiem izturības izkļedes rezultātā īstenojas tikai vājākā komponenta izturība. Sabrukuma process shematiski parādīts 2.23.attēlā.



2.23.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 (vēl darba stāvoklī) 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 šķērsgrīzumu, rezultātā sagraujot to pilnībā. Pat „aptuvenu vienmērību” var sagaidīt tikai ierobežotā parauga tilpumā, kas pakāpeniski maina savu pozīciju.

Tālākajā darbā sagrūšanas modeļa izstrādē tiks izmantots Ju. Paramonova un M. Kleinhofa pētījumos izstrādātais matemātiskais modelis, kurš sīkāk tiks aprakstīts piektajā nodaļā. Šķērsgrīzuma sabrukuma matemātiskais modelis ir aprakstāms ar formulām, kuras nosaka izturību  $i$ -tam šķērsgrīzumam un paraugam kopā :

$$X_i^* = \max_t (x_t : n_C - K_{Ci}(t) > 0) \quad (2.37)$$

$$X = \min_{1 \leq i \leq n_L} X_i^* = \min_{1 \leq i \leq n_L} \min_t \max(x_t : n_C - K_{Ci}(t) \geq 0) \quad (2.38)$$

kur pirmajā gadījumā  $K_L$  šķērsriezumu 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. Slopojuma process aprakstāms kā normālu spriegumu pieaugoša secība  $\{x_1, x_2, \dots, x_t, \dots\}$

Savukārt atšķirības elastības moduļos  $E_n$  attiecīgi šķērsriezumu laukumos  $f_n$  tik ņemtas vērā

caur vidējo spriegumu  $\sigma(\varepsilon) = \varepsilon \sum_{\varepsilon E_i < X_i} E_i f_i / \sum_{j=1}^{n_c} f_j$ , un šķērsriezuma izturība ir

$$\sigma = \max_{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)$$

## 2.9 Eksploataācijas faktoru ietekmes uz kompozītmateriālu statistiskajām un noguruma īpašībām analīze

Mitruma, kas atrodas apkārtējā vidē dažādās formās, ar laiku iekļūst visos organiskajos materiālos. No šāda materiāla ir arī kompozītmateriāla matrica. Mitruma nokļūšana matricā izraisa pakāpenisku materiāla sabrukšanu. Tomēr ir noskaidrots, ka mitrums izjauc tikai otrās kārtas saiknes starp polimēru ķēdēm, bet primārās saiknes tas neietekmē. Mitruma piekļuve materiālā ir atgriezenisks process un tas neizraisa pilnīgu materiāla sabrukšanu.

Mitruma rada ievērojamu ietekmi uz materiāla izturības īpašībām tikai pie kopīgas mitruma un augstas temperatūras iedarbības. Šī īpašība jāņem vērā virsskaņas lidmašīnām, kurām detaļu aerodinamiskās uzkaršanas un lielā mitruma ietekme var izraisīt materiāla sabrukšanu.

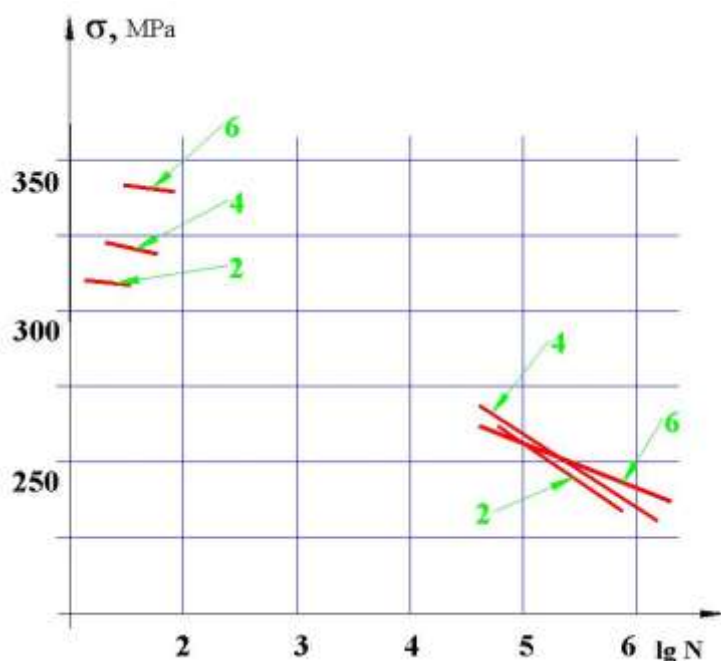
Materiāliem, kurus izmanto lidmašīnās, kas pārvietojās zem virsskaņas ātruma, stiprības īpašības nepasliktinās, jo nav nelabvēlīgo eksploataācijas faktoru.

Kompozītmateriāli ir izturīgi pret ķīmiski aktīvo materiālu (piemēram, degviela) iedarbību. Projektējamās lidmašīnas konstrukcijā tiek izmantota epoksīda sveķu matrica, kurai ir augsta ķīmiskā noturība pret ķīmiski aktīvo vielu iedarbību.

Materiāla statisko izturību ietekmē šādi eksploataācijas īpašību faktori:



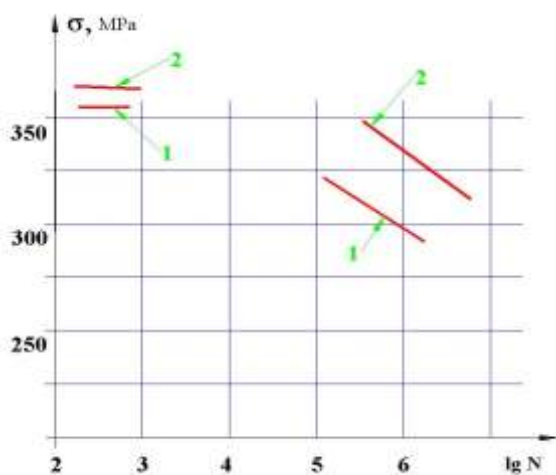
- ekspluatācijas temperatūru robežās ( $-50^{\circ}\text{C}$  līdz  $+60^{\circ}\text{C}$ ) nenotiek stipra statistiskās izturības īpašību pasliktināšanās un var pieņemt, ka temperatūra tās neietekmē. (sk. 2.24.att.)
- ilgstošas kompozītmateriāla uzglabāšanas laikā tā matricā turpinās polimerizācijas procesi, kas izraisa nelielu maksimālo pieļaujamo spriegumu pie stiepes un elastības moduļa palielināšanos.
- (sk. 2.25.att.)



2.24.att. Temperatūras ietekme uz oglekļa kompozītu. 2 -  $+20^{\circ}\text{C}$ ; 4 -  $+60^{\circ}\text{C}$ ; 6 -  $-50^{\circ}\text{C}$

Ekspluatācijas faktori noguruma īpašības ietekmē šādā veidā:

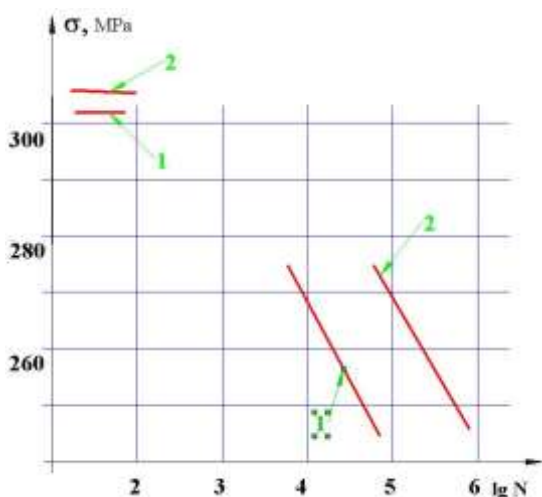
- augstfrekvences spriegumu maiņa izraisa būtisku līkņu nobīdi uz ilgizturības īpašību pasliktināšanās pusi, kas nozīmē ilgizturības vērtību samazināšanos pat par kārtu. (sk. 2.26.att.);
- temperatūras izmaiņa lidmašīnas ekspluatācijas apstākļu robežās praktiski neietekmē ilgizturību. Tomēr, izejot no šīm robežām, materiāla ilgizturība būtiski krītas;
- hipotēzē par lineāru noguruma bojājumu summēšanu (tiek izmantota noguruma īpašību novērtēšanai) tiek pieņemts, ka visu uzkrāto bojājumu summa ir vienāda ar 1 un to neietekmē slodžu sekošanas kārtība, kaut arī šāda ietekme ir un parastiem konstrukciju materiāliem tā ir ievērojama, tomēr kompozītmateriāliem tā ir salīdzinoši neliela (10-15%) un šo ietekmi ņem vērā, ieviešot drošības koeficientu. (sk. 2.25.att.).



2.25.att. Ilgstošas glabāšanas ietekme uz oglekļa kompozītmateriāla īpašībām.

1- normāli apstākļi ( $t=+20^{\circ}\text{C}$ );

2- noturēts 2,5 gadus



2.26.att. Ātri mainīgas slodzes ietekme uz oglekļa kompozītmateriāla īpašībām.

1 – noslogojums ar augstu slodzes maiņas frekvenci;

2 - normāli apstākļi ( $t=+20^{\circ}\text{C}$ )

Rezultātā var izdarīt šādus secinājumus:

- Temperatūras izmaiņa robežās, kurās tiek izmantota lidmašīna, neietekmē kompozītmateriālu statisko un noguruma izturību;
- Spriegumu koncentrācija un augstfrekvences spriegumu maiņa izraisa būtisku izturības samazināšanos;
- Projektējamai lidmašīnai mitruma ietekmi tāsniecīgās iedarbības uz statisko un noguruma izturību dēļ var neņemt vērā;
- Kompozītmateriālus var izmantot degvielas bāku sieniņu izgatavošanai, jo tie ir izturīgi pret ķīmiski aktīvu vielu iedarbību.

### 3. Praktiskie eksperimentālie pētījumi

#### 3.1 Ogļšķiedras mikroparaugu eksperimenti

Pētījums tika vērsts uz to lai eksperimentāli noteiktu ogļšķiedras-epoksīda kompozītmateriālu īpašības un atrastu dažādas īpašību izkliedes kopsakarības un novērtētu to ietekmi uz kopējo materiāla izturību. Lai izpētītu mikroparaugu elastības moduļa un stiprības sadalījumu un tā ietekmi uz materiāla izturību, tika veikti eksperimenti ar mikroparaugiem, pielietojot nulles kārtas modeli. Paraugi tika testēti uz stiepi un uzmanība tika pievērsta ogļšķiedras diega stiprības un elastības īpašībām. Saproto mikroparaugu mehāniskās īpašības un vadoties no tām, var prognozēt izstrādājuma īpašības, tāpēc izprast pēc iespējas labāk procesus, kas notiek mikroparaugos, ir ļoti svarīgs uzdevums. Savukārt pēc tam tika veikti eksperimenti uz stiepes slodzi sarežģīti armētiem paraugiem, kuri izgatavoti no tā paša kompozīta kā mikroparaugi. Vienlaicīgi ar stiepes diagrammu tika uzņemts akustiskais signāls ko radija matereāls pie stiepes. Iegūtie rezultāti tika savstarpēji salīdzināti lai noteiktu iespējamās kopsakarības un matereāla sagrūšanas dabu.

Eksperimentos pētāmie mikroparaugi bija ogļšķiedras diegi ar diametru 150  $\mu\text{m}$  (neregularitāte 20  $\mu\text{m}$ ), impregnēti ar epoksīda sveķiem ED-20, cietinātāju Politenpoliamin un plastifikatoru 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:

$$\sigma = E_1 \varepsilon_1 \quad (3.1)$$

$$\sigma_2 = 0; \quad (3.2)$$

$$\tau_{12} = 0 \quad (3.3)$$

kur

$$E_1 = E_f \nu_f \quad (3.4)$$

$\sigma_1$ - 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. Apskatāmajā gadījumā ogļšķiedras izturība ir daudzkārt lielāka par epoksīda izturību, tātad šis modelis ir pielietojams. Protams, šim modelim ir daudz vienkāršošanu, kā arī daudzi faktori var ietekmēt sprieguma-pagarinājuma rādījumus un līdz ar to analīzes rezultātus, bet tajā pašā laikā, manuprāt, šis ir vislabākais modelis tieši attiecīgo interesējošo parametru īpašību apskatīšanai, kā arī līdz ar to materiālā notiekošo procesu izpratnei.

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) un tā ir parādīta 3.1.att. Visi mērījumi tika veikti automātiski digitālā veidā ar eksperimentālai iekārtai līdzīgu nākošo oriģinālo datu apstrādes programmu.

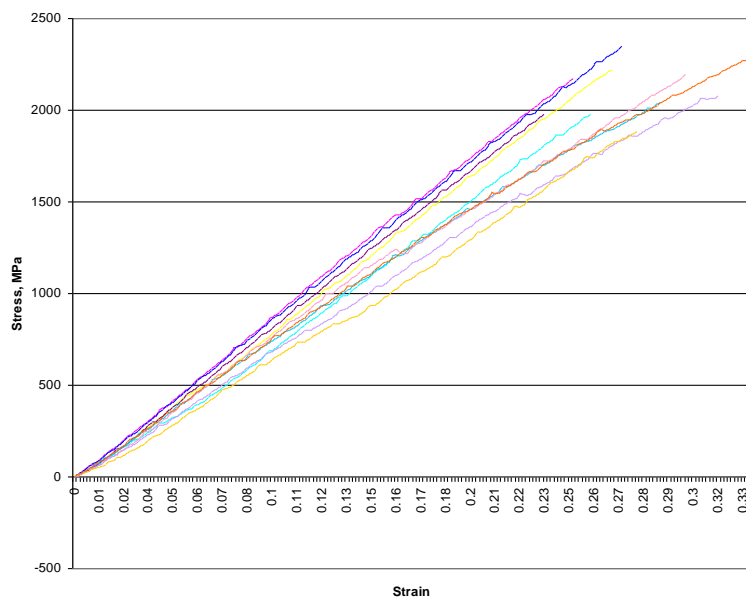


3.1.att. Testēšanas iekārta ar nostiprinātu mikroparaugu

Eksperimenti tika veikti, mērot sloģojuma spēku un skavu pārvietošanās distanci. Kā jau minēts iepriekš, parauga pagarinājuma noteikšanai no skavu pārvietošanās distances ir būtisks trūkums – tas ievieš visai lielas kļūdas skavu elastības dēļ un paraugu stiprinājuma bāzes elastības dēļ, bet šīs kļūdas katrai mērījumu sērijai ir konstantas, un tas nozīmē, ka šīs kļūdas neietekmē sadalījuma raksturu. Šīs mērīšanas metodes pluss ir vienkārša realizācija. Tā kā uzsākot eksperimentu nolūks bija izpētīt diegu elastības un izturības raksturu, nevis precīzi noteikt elastības parametrus, tad šāda mērījumu metode ir uzskatāma par pieļaujamu.

Lai iegūtu spriegumu raksturlielumus atkarībā no sloģojuma spēka, bija nepieciešams noteikt mikroparauga šķērsriezuma laukumu. Tā kā paraugiem ir ļoti neliels diametrs, kā arī tas ir mainīgs parauga garumā, tad tika pielietota optiskā mērījumu metode, kur diegu palielinājumā ar digitālā mikroskopa palīdzību izmērīja ar speciālas attēla apstrādes programmu. Programma mēra diega diametru tās garumā un nosaka vidējo diametru, kas attiecīgi tika pieņemts, veicot aprēķinus. Kad no mikroparauga diametra tika noteikts vidējais šķērsriezuma laukums, izdalot to ar spēku, kas uz to darbojas, tika iegūti vidējie spriegumi, kādi darbojas diega garumā. Viens no mikroparauga fotoattēliem, kurā redzams tā diametra mainīgums attēlots att. 3.3

Veicot dažas vienkāršas matemātiskas darbības, tika iegūtas sprieguma- pagarinājuma līknes apskatāmiem ogļšķiedras mikroparaugiem, un piemērs šīs līknes dažiem 15 mm garajiem paraugiem ir redzamas 3.2.attēlā.



3.2.att. Statists sloģojums 15 mm gariem ogļšķiedras mikroparaugiem

Kā redzams 3.2.attēlā, katrs paraugs uzvedas līdzīgi, bet ne vienādi. Variācija ir novērojama kā izturības vērtību sadalījumā, tā arī elastības koeficienta sadalījumā (līkņu stāvuma atšķirība). Vēl no attēla redzams, ka grafiki visai tuvu apraksta taisnu līniju un tāpēc varam pieņemt, ka elastības modulis katram paraugam eksperimenta laikā ir nemainīgs. Tā kā sarežģīti armēti materiāli sastāv no daudziem šādiem diegiem, tad ir sagaidāms, ka šo materiālu mehāniskās īpašības uzvedīsies līdzīgi kā mikroparaugu īpašības. 3.2.attēlā redzams arī tas, ka katram diegam atsevišķi ir visai laba izteikta lineāra pagarinājuma un sprieguma sakarība. Tātad, kā jau tika sagaidīts, paraugiem ir noteikts maksimālās izturības sadalījums, bez tam pēc dažādiem līkņu slīpumiem redzams, ka paraugiem ir arī zināms elastības koeficientu sadalījums.

Veiktajos eksperimentos starpība starp maksimālo un minimālo stiprību iekļāvās sagaidāmajā diapazonā un tas būtu  $\pm 16\%$  (sk. 3.1.tabulu). Izklīdes pamatā ir paraugu izgatavošanas tehnoloģijas ietekme (paraugi tika izgatavoti ar rokām bez automatizācijas vai speciālām ražošanas iekārtām). Vēl, veicot eksperimentus, bija grūti nodrošināt paraugu vertikālītāti jeb šķiedru virziena sakrišanu ar spēka pielikšanas virzienu, tos nostiprinot testēšanas iekārtā, kas līdz ar to arī radīja zināmu izturības izklīdi.

3.1.tabula

	Eksperimentālo datu rezultāti				
	Derīgie mērijumi	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

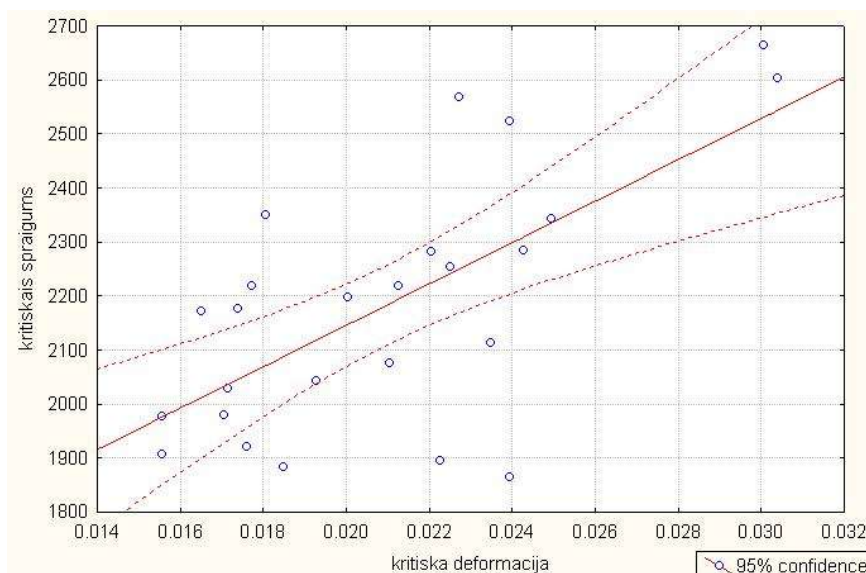
Jāņem vērā arī fakts, ka diegu diametrs nav ideāli vienāds un, kā tas redzams 3.4.attēlā, tas var visai būtiski mainīties, tāpat kā nedaudz mainās šķiedru un matricas tilpumu attiecība. Šāda izmēru variācija ir viens no iemesliem kas palielina kritisko parametru variāciju.

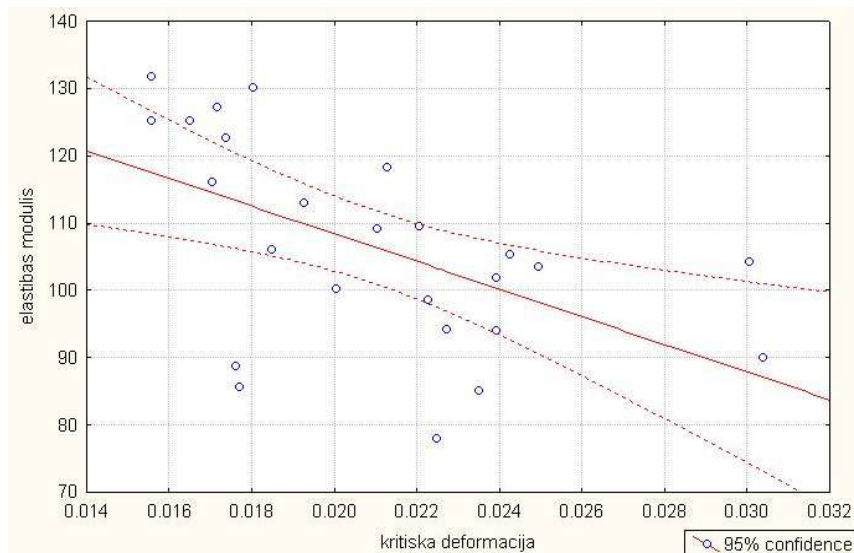


3.3.att. Ogļšķiedras diega mikroparaugs palielinājumā

Lai panāktu mazāku izkliedi, varētu katru paraugu caurskatīt caur mikroskopu un atlasīt vienādākos paraugus, bet tāds nebija pētījuma mērķis. Pētījuma mērķis ir izpētīt reālus audumos sausto diegu parametrus, tātad diegu diametru atšķirības tiek pieņemtas kā dabisks defekts. Līdz ar to elastības moduļa izkliede bija nedaudz lielāka nekā tika gaidīts, bet, kā jau minēts iepriekš, daļēji pie tā ir vainojama mērīšanas metode.

Pēc veiktās eksperimentu sērijas parādās zināma sakarība starp kritisko deformāciju un spriegumiem, kā arī elastības moduli. Kopumā, kā redzams 3.4 attēlā, mazāk elastīgie paraugi uzrādīja vājākus stiprības rezultātus.



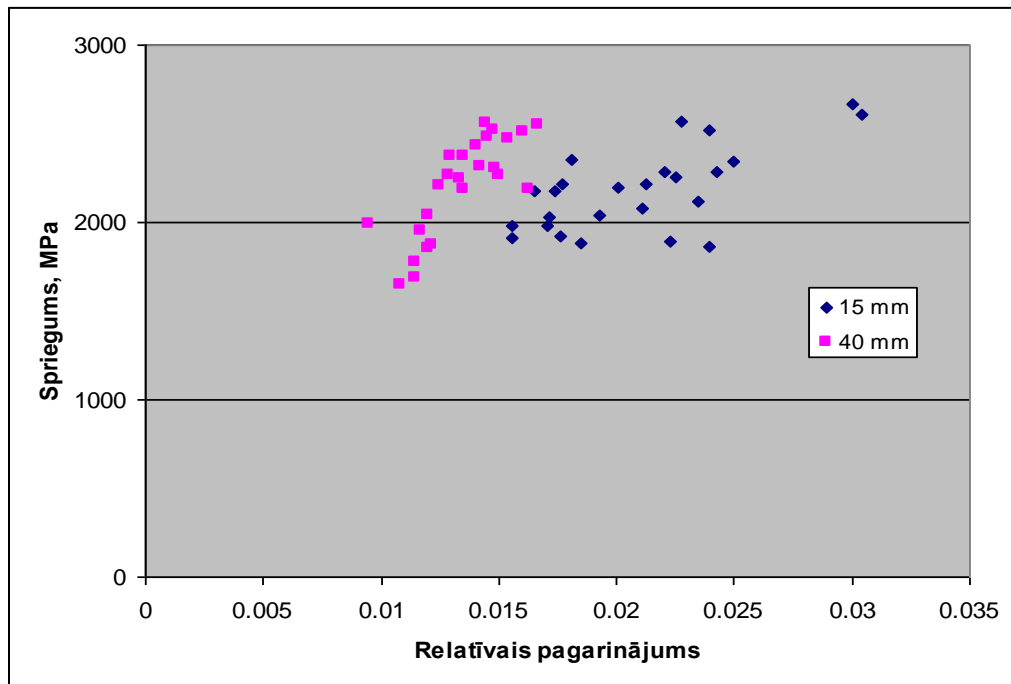


3.4.att. Stiprības un elastības moduļu eksperimentālās vērtības 15 mm gariem ogļšķiedras diegu mikroparaugiem (sakārtoti augošā kritiskās deformācijas secībā)

Kopumā, veicot un sagatavojot eksperimentus, tika izdalītas šādas problēmas – pirmkārt, ir grūti nodrošināt paraugu linearitāti vai taisnumu to izgatavošanas laikā. Diegi pirms impregnēšanas ir ļoti trausli un lokani, tāpēc tos ir grūti pārklāt ar epoksīda matricu. Tikko kā diegam pieskaras ar uzklājamo epoksīdu, tā diegs pielīp epoksīdam un raujas līdz uzklāšanas instrumentam. Tāpēc ir nepieciešams diegu galus nostiprināt un piedevām, lai nodrošinātu diegu taisnumu, diegiem ir jāpieliek neliels noslogojums. Šāds noslogojums un pati epoksīda uzklāšanas procedūra, protams, nedaudz samazina diega izturību, kā arī palielina izturības izkliedi. Impregnējot audumu, vidējais bojājums, kāds tiek izdarīts šķiedrām, ir mazāks, tāpēc arī audumos ir sagaidāma nedaudz mazāka parametru izkliede.

Vēl viena problēma, ar kuru nācās sastapties veicot eksperimentus, ir tā saucamā cilvēka faktora ietekme. Tā kā nebija speciālas palīgierīces, ar ko nodrošināt paraugu iestādīšanas spailēs vertikālītāti, tad zināma daļa paraugu noteikti, vairāk vai mazāk, tika nostiprināti ar kādu nobīdi no vertikālītātes. Katra nobīde no vertikālītātes nozīmē zemāku uzrādīto paraugu izturību. Kopumā vertikālītāte tika nodrošināta ar vizuālo metodi, panākot, lai paraugs sakrīt ar zināmu vertikālu atskaites līniju. Šāda metode ir pietiekami precīza garākiem paraugiem, bet īsiem paraugiem sakrišanas pilnību noteikt ir grūtāk. Šo nostiprināšanas ietekmi labi var redzēt 3.5.attēlā, kur ir salīdzinātas divu garumu paraugu izturības. 3.5.attēlā ir redzams, ka 15 mm gariem paraugiem parametru izkliede ir lielāka nekā 40 mm paraugiem.





3.5.att. Mikroparaugu garuma ietekme uz to kritiskām vērtībām

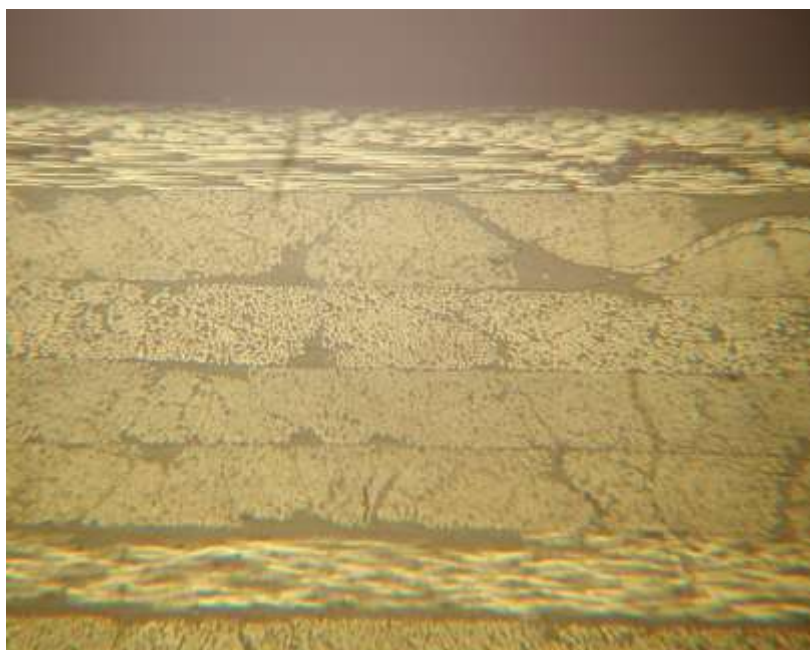
Eksperimentu rezultātā tika iegūti eksperimentālie dati par mikroparaugu īpašībām. Iegūtā informācija tika apkopota lai varētu novērtēt paraugu stiprības un elastības modulus, kā arī relatīvos pagarinājumus. Tika iegūtas spriegumu – deformācijas raksturlīknes, spriegumu-relatīvā pagarinājuma, elastības moduļa- relatīvā pagarinājuma kā arī elastības moduļa-kritisko spriegumu grafiki kompozītmateriālu mikro paraugiem ar dažādiem garumiem. Tika iegūta skaitliska informācija par atsevišķa ogļšķiedras diega mikroparaugu īpašībām un faktoriem, kas tās nosaka. Iegūtie rezultāti tika izmantoti tālākajos pētījumos.

### 3.2. Akustiskās emisijas datu eksperimenti statiskam slogojumam

Eksperimentu mērķis bija iegūt atbilstošiem slogojumiem 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 izmantots epoksīda-fenolo-anilīno-formaldehīda saistviela. Kompozītmateriāla paraugam ir 11 slāņu ar dažādos virzienos orientētiem diegiem (sk. 3.6.att.). Konkrētais fotouzņēmums tika uzņemts netālu no sabrukšanas vietas pēc parauga izmēģinājuma to speciāli apstrādājot (slīpējot un pārklājot slīpēto vietu ar aizsargšķidrumu). Paraugā labi redzams, ka jau netālu no sabrukšanas vietas nav manāma

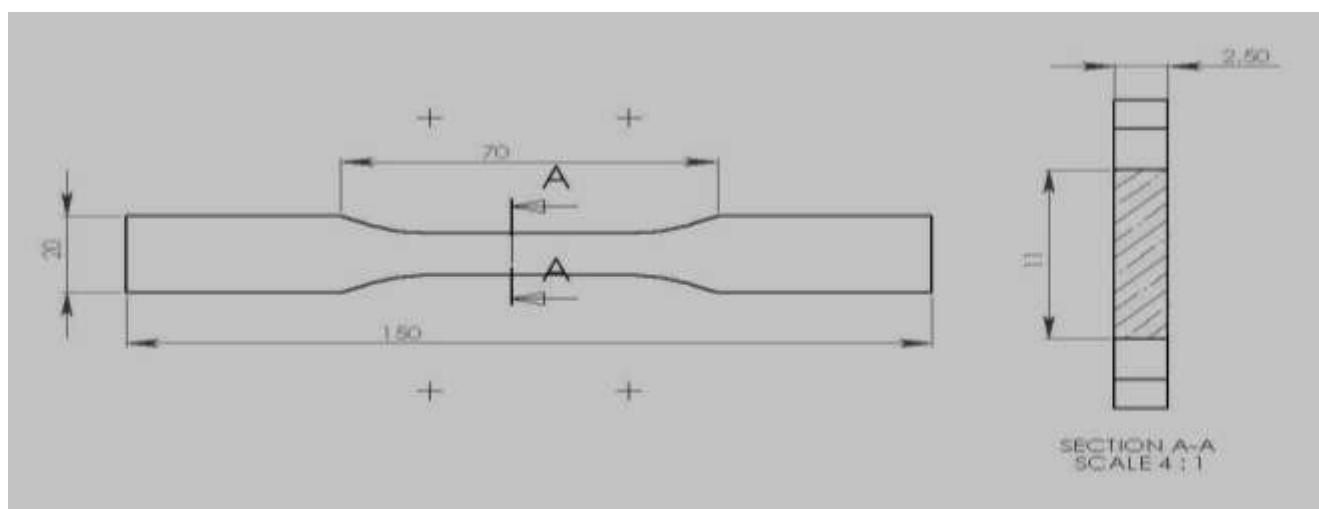
šķiedru delaminācija vai citi sabrukšanas procesi toties ir ļoti saskatāms matereāla nevienmērīgums (tumšie laukumi attēlo vietas kuras aizpilda tikai epoksīda sveķi).

Veicot eksperimentus, tika pētītas materiāla īpašības kā pie statiskām slodzēm, tā pie dinamiskām slodzēm. Eksperimenti tika veikti ar mērķi noteikt sabrukšanas procesā radītos akustiskos signālus un pēc tiem identificēt mehāniskos procesus matereālā.

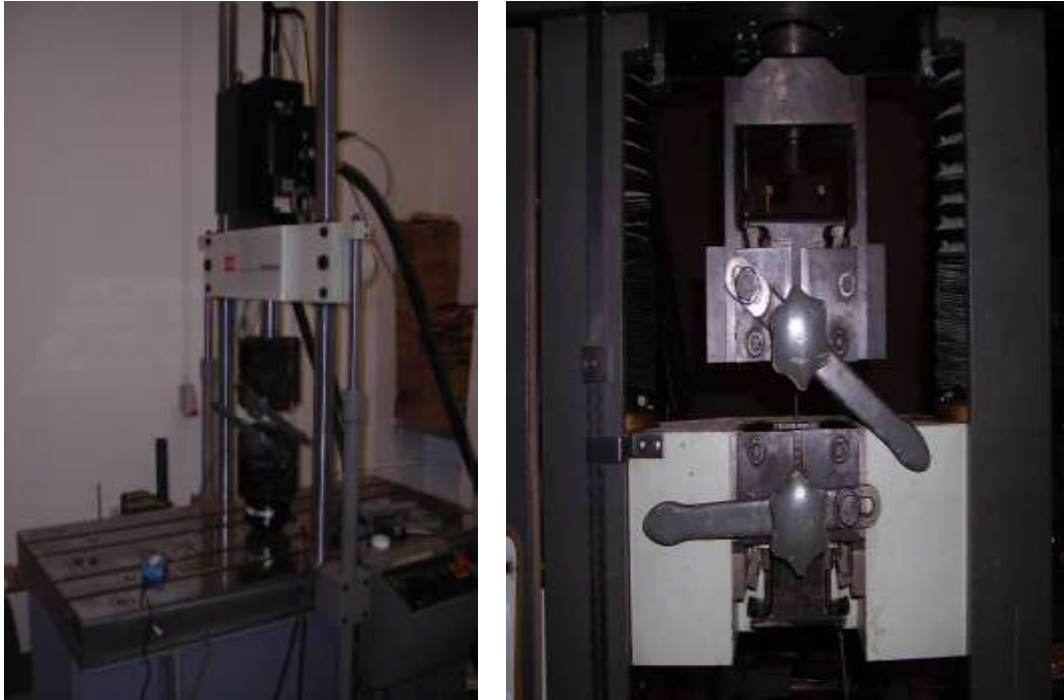


3.6.att. Testējamais ogļšķiedras kompozītmateriāls T300 ar slāņojumu  $0_3 / + -45_2 / 90_4$

Paraugi, kuru izmēri parādīti attēlā 3.7. tika sagatavoti statiskiem un dinamiskiem eksperimentiem uz iekārtas FP2 100/1 un INSTRON (sk. 3.8.att.).

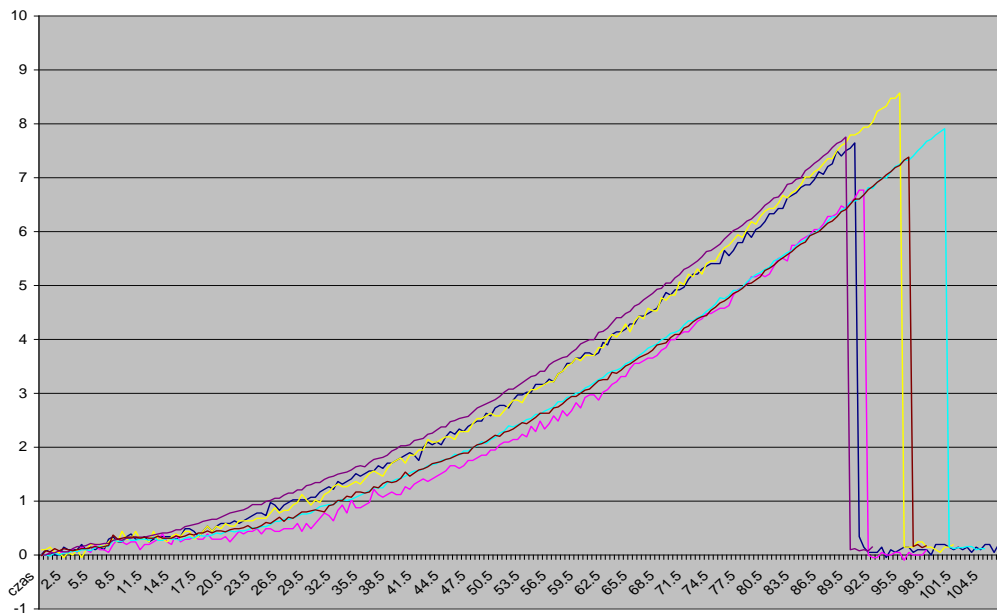


3.7.att. Parauga izmēri



3.8.att. Iekārta INSTRON attēlā pa kreisi un FP2 100/1 attēlā pa labi

Statiskās stiepes slodzes eksperimentu sērija ar 6 paraugiem ir attēlota 3.9.attēlā. Šo eksperimentu laikā tika uzņemti arī sabrukšanas procesa radītie akustiskās emisijas signāli



3.9.att. Statiskais slogojums

Slojums tika veikts no nulles vērtības līdz parauga sabrukumam. Grafika sākumā ir redzama skavu elastības ietekme uz slojuma grafiku, kas izpaužas kā nelineārs slojumu spriegumu pieaugums sākumdaļā. Paraugi tika pārbaudīti ar stiepes slojumu, un slojuma spēka pieaugums bija lineārs ar ātrumu 2 mm/min, kas uzskatāms par statistisku. Eksperimenti tika veikti pie normālas temperatūras, mitruma un spiediena. Paraugu sagrūšana notika paredzētajā vietā (aptuveni vidusdaļā), kā tas redzams 3.10.attēlā, un tas raksturo pareizus slojuma apstākļus paraugā. Parauga šķēsgriezuma parametri ir 2.5\*11.0 mm, slāņu salikums  $0^0_4 / -+45^0_8 / 90^0_3$ , vidējā izturība 6 paraugiem ir 275 MPa.

Starpība paraugu uzvedībā pamatā ir manāma maksimālo vērtību izkliedē, un to diapazons ir no 6,83 līdz 8,51 kN, savukārt līkņu slīpums sarežģīti armētiem paraugiem atšķiras visai maz. Izturības izkliede polimēru kompozītmateriālam ir visai mazs – mazāks par 15% no vidējās vērtības (sk. 3.2.tab.). Šī starpība pamatā ir saistīta kā ar parauga materiāla izgatavošanas tehnoloģiju, tā ar paraugu ģeometriskās formas izgatavošanas tehnoloģiju (malu apstrādes precizitāte un apstrādes veids).



3.10.att. Pārbaudīts sarežģīti armēts ogleņšķiedras paraugs

Lamināta kompozītmateriālam izturība un ilgizturība ir atkarīga no diegu izvietojuma leņķa attiecībā pret slojumu. Paraugi tika izmēģināti uz stiepes izturību, un pie šāda slojuma galvenie materiāla sabrukšanas iemesli ir diegu un matricas delaminācija, kā arī delaminācija starp materiāla slāņiem. Slojuma 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.

Testēto ogļšķiedras kompozītmateriālu īpašības

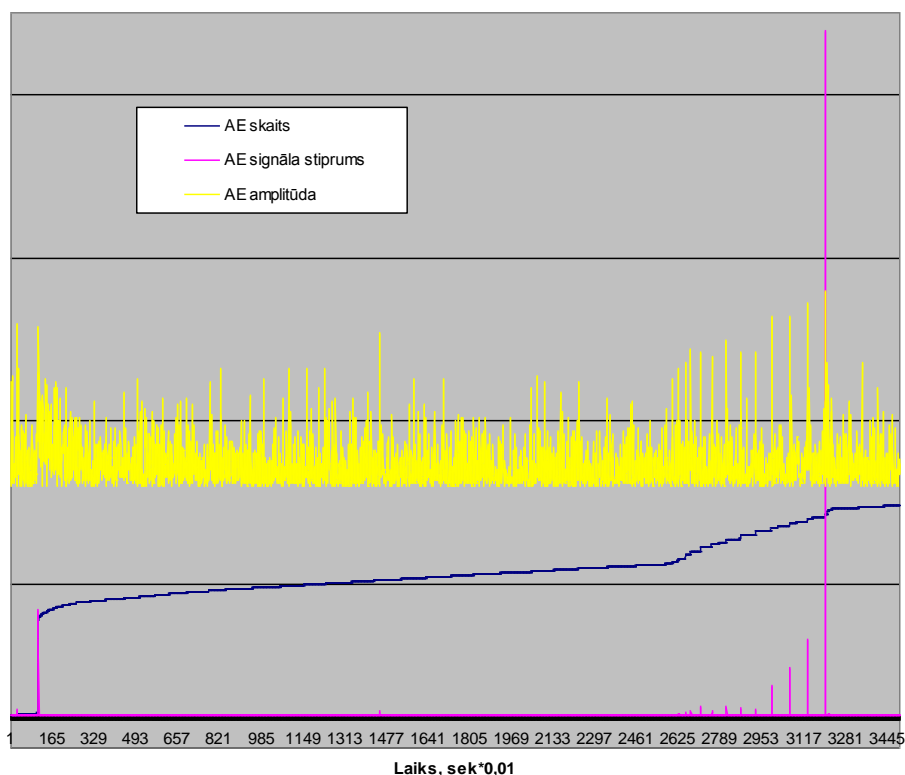
Parauga nummurs	Kritiskais slogojuma spēks $F_{max}$ , N	Kritiskais spriegums, $\sigma_{max}$ , MPa	Elastības modulis, G, GPa
1	7790,50	286,64	14,33
2	7643,85	277,95	13,85
3	7338,20	266,84	12,70
4	6832,34	248,44	12,42
5	7963,73	288,86	13,12
6	8712,61	316,82	15,08
<b>Sagaidāmā vērtība</b>	<b>7713,55</b>	<b>275,925</b>	<b>13,58</b>

Eksperimenta laikā tika mērīts stiepes spēks, stiprinājumu (skavu) pārvietojums un 15 akustiskās emisijas dati. Akustiskās emisijas signālu uztvērējs tika uzstādīts sagaidāmajā lūzuma vietā, lai labāk (spēcīgāk) uztvertu materiāla sabrukšanas laikā radītos signālus (sk. 3.11.att.).



3.11.att. Paraugs sagatavots uzstādīšanai testēšanas iekārtā

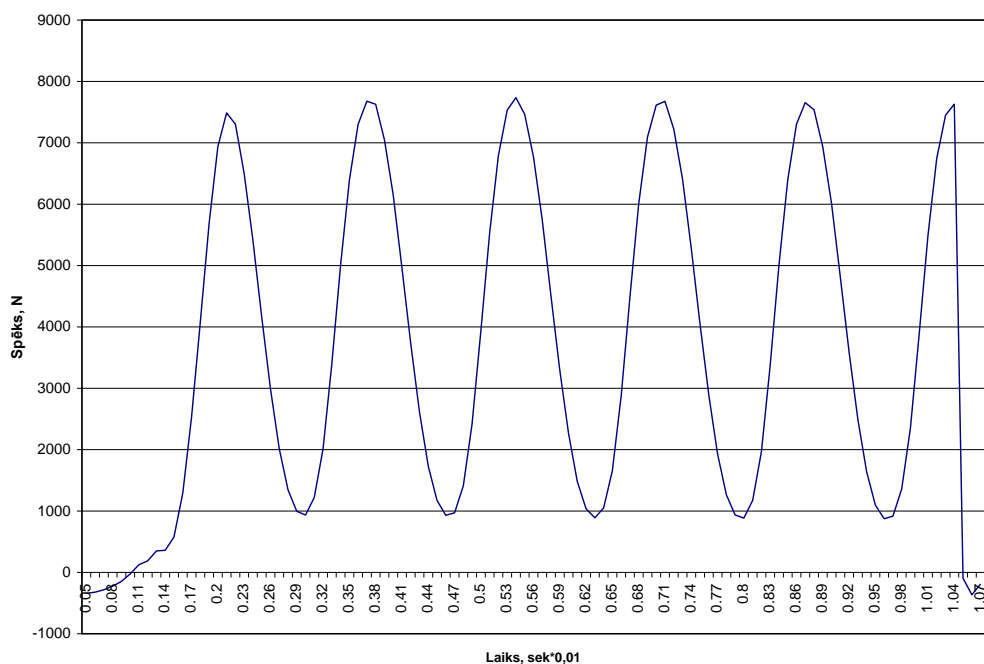
Attēlā 3.12. redzami trīs viena parauga testēšanas uzņemtie laikā akustiskā signāla parametri, kuriem izmainīts mērogs lai vienā laika skalā lai vieglāk varētu redzēt šo signālu kopsakarības. Tā attēlā labi redzams ka AE signāla amplitūda visa slogojuma laikā mainās minimāli ar izņēmumu sākuma daļā un beigu daļā. Pirmajā slogojuma fāzes daļā ir neliels amplitūdas pieaugums daudzo nelielo notikumu dēļ, kuri saistīti ar pirmā slogojuma efektu. Otrs sistemātisks signāla pieaugums ir vērojams slogojuma beigu daļā un tas ir saistīts ar stiprāko šķiedru sagrūšanas procesu.



3.12. att. Akustiskās emisijas signāli statistika slogojuma laikā

### 3.2. Akustiskās emisijas datu eksperimenti dinamiskam slogojumam

Slogojums 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. Viens slogojuma paraugs dinamiskam slogojumam parādīts 3.13.attēlā. Slogojuma laikā tika pierakstīti 16 parauga stāvokli raksturojoši akustiskās emisijas signālu parametri



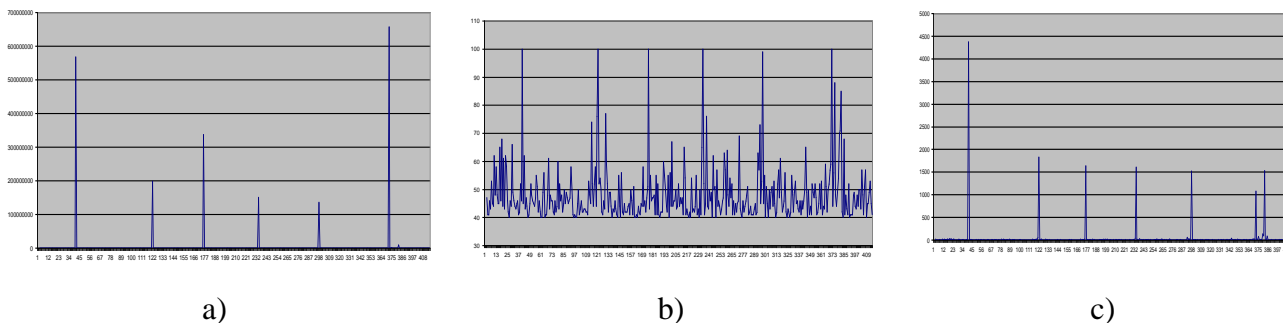
3.13.att. Slogojuma spēks atkarībā no laika

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 (sk. 3.14.att.). Šāda paraugu sagatavošana ļauj uzlabot saķeri starp skavām un paraugu, nepalielinot saspiešanas spēku, kurš savukārt var ietekmēt parauga izturību, kā arī pie ilglaicīga cikliska slogojuma parauga stiprinājumi var sākt izdilt un izslīdēt no skavām.



3.14.att. Dinamiskiem testiem sagatavoti paraugi

Attēlos 10 a, b un c parādīts akustiskais signāls paraugam kurš izturēja 6 slogojuma ciklus. Katram ciklam ir augsta akustiskā emisijas enerģija (3.15 a), kā arī ir augsts notikumu skaits (3.15 c), bez tam katru ciklu ļoti labi var izdalīt pēc AE signāla amplitūdas (3.15 b). Slogojuma sākumā pie pirmā cikla redzama tā pati aina, kā pie statiskā slogojuma, un tas būtu pirmā slogojuma efekts. 3.15 c attēlā ir redzams, ka notiek liels skaits nelielu notikumu.



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

Šajā gadījumā sākotnēji atbrīvotā AE enerģija ir relatīvi lielāka nekā pie statiskā slogojuma, bet ir jāņem vērā tas, ka šoreiz slogojums 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 slogojumiem ļauj viegli apskatīt vairākas sabrukšanas mehānisma fāzes. Katra cikla maksimālie signālu lielumi katram ciklam ir parādīti 3.3.tabulā.

3.3.tabula

Akustisko signālu vērtības katrā slogojuma ciklā

Cikli	AE signāla enerģija Max, eV	AE signālu skaits Max
1.	550 x10*6	4400
2.	200 x10*6	1900
3.	350 x10*6	1700
4.	150 x10*6	1600
5.	150 x10*6	1500
6.	750 x10*6	1000+1500

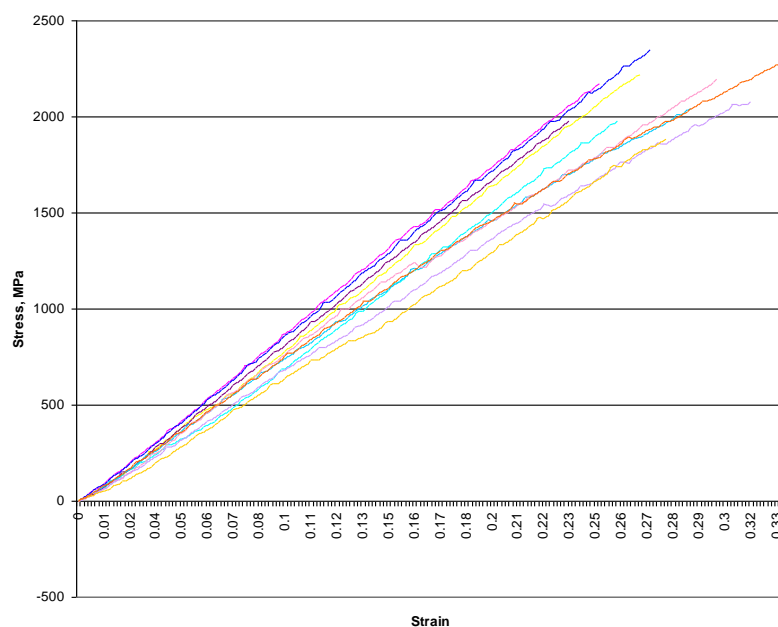


## 4. Iegūto eksperimentālo datu analīze

### 4.1 Ogļšķiedras mikroparaugu eksperimentu analīze

Pēc dažādu eksperimentu vērtību iegūšanas bija nepieciešams veikt iegūto rezultātu daudzpusīgu analīzi. Šī analīze vērsta uz to lai izprastu 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.

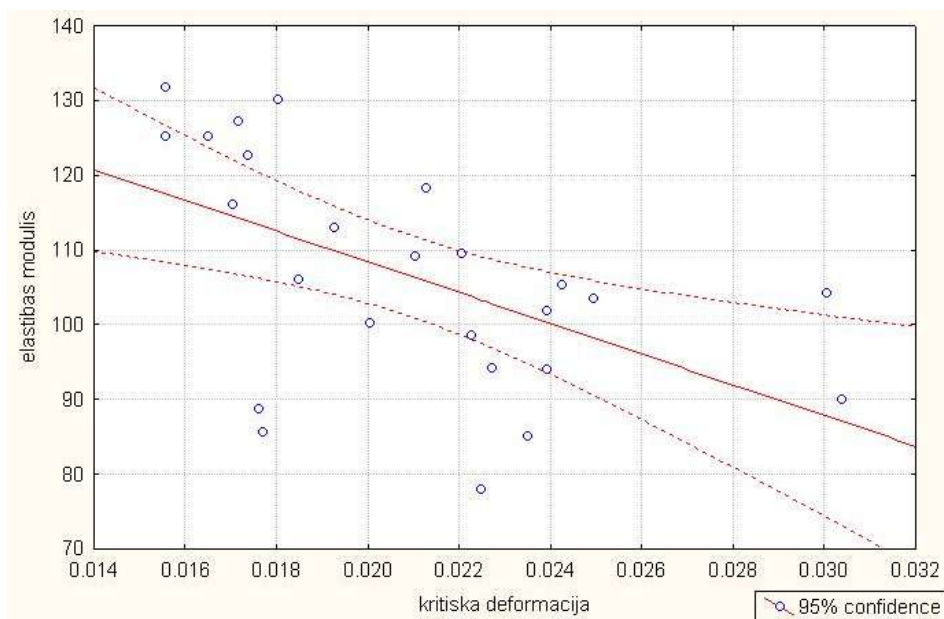
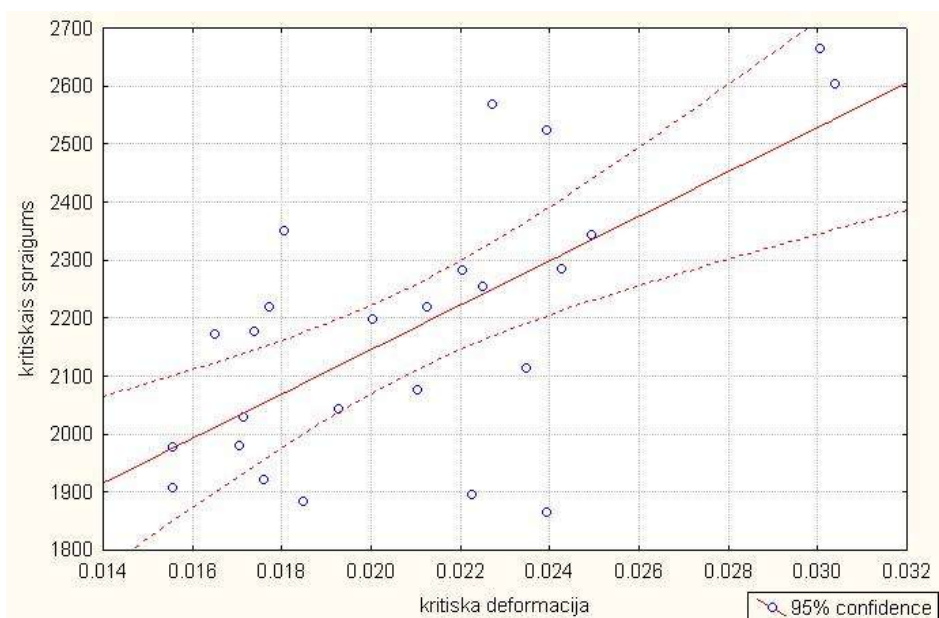
Attēlā 4.1 ir redzami iegūto slogojuma līkņu paraugi 15 mm gariem mikroparaugiem. No līknēm redzams, ka elastības modulis, kas atainojās kā līnijas linearitāte, ir pieņemams kā nemainīga vērtība katram atsevišķam mikroparaugam, bet mainīgs savstarpēji salīdzinot paraugus, kas atainojās kā līniju slīpums attiecībā pret koordinātu asīm.



4.1.att. Statisks slogojums 15 mm gariem ogļšķiedras mikroparaugiem

Apskatāmo paraugu izturībai un elastības moduļiem ir visai liela izkliede, kas uzskatāmi redzams 4.2.attēlā, turklāt ir arī redzama kopējā tendence – paraugi ar lielākām kritiskām deformācijām ir izturīgāki, kā arī elastības koeficients, palielinoties kritiskai deformācijai, samazinās. Šādas kopsakarības ir novērojamas visu trīs dažādo garumu mikroparaugu izmēģinājumu sērijām. Tas nozīmē, ka pētāmajiem paraugiem sprieguma pieaugums pie lielāka pārvietojuma bija mazāks nekā pārvietojuma pieaugums. Vai lielā

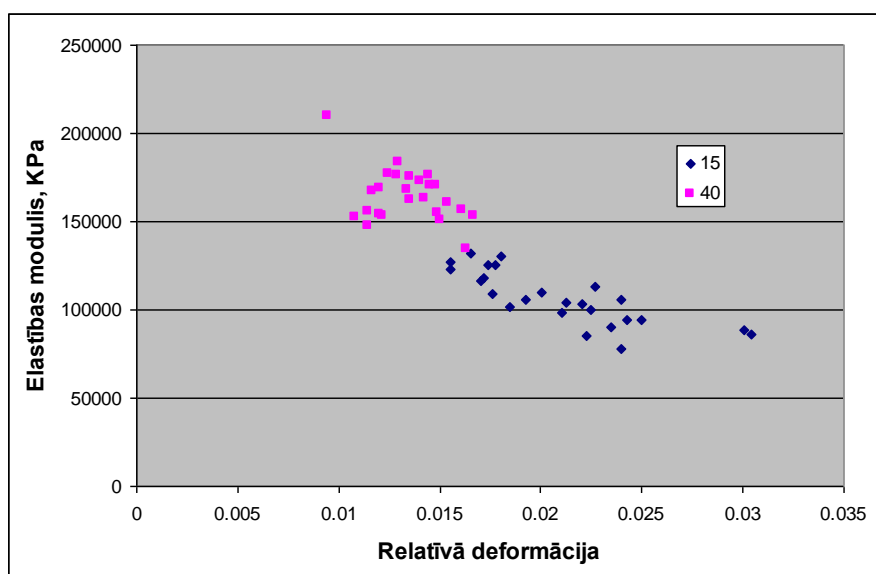
parametru izkliede nozīmē, ka ir iegūti slikti rezultāti? Nē, jo reālajos materiālos eksistē šādas pat problēmas – audumi tiek ražoti no diegiem ar mainīgiem diametriem un šķiedru un matricas tilpumu attiecība arī nav konstanta. Bez tam šī pētījuma mērķis nav atrast maksimāli precīzu šķiedru vai matricas izturību un elastības moduli, bet gan atrast kopsakarības un novērtēt ietekmi uz kopējo materiāla izturību.

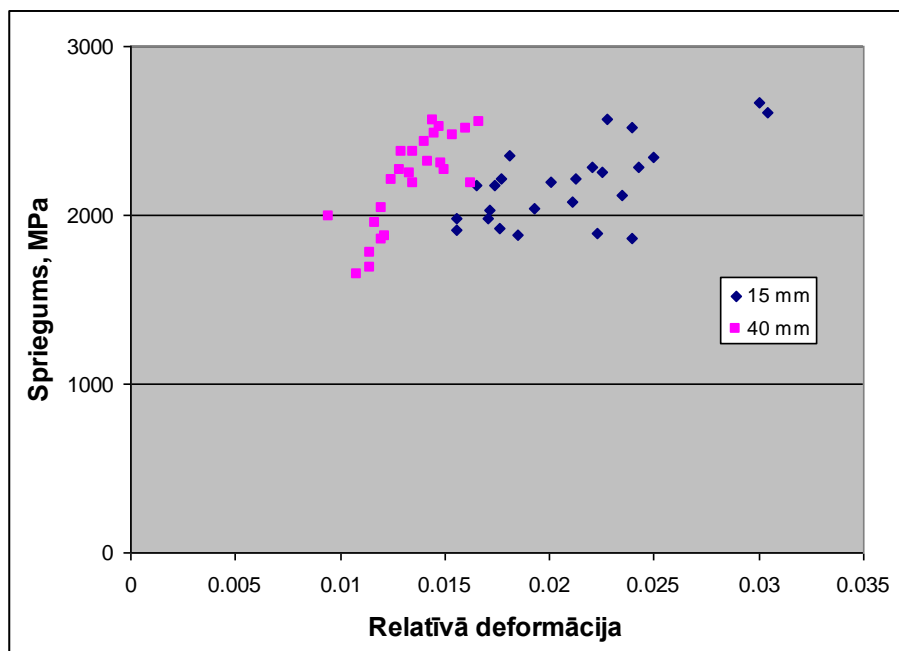


4.2.att. Stiprības un elastības moduļu eksperimentālās vērtības 15 mm gariem ogļšķiedras diegu mikroparaugiem (sakārtoti augošā kritiskās deformācijas secībā)

Kopumā, veicot un sagatavojot eksperimentus, tika izdalītas šādas problēmas – pirmkārt, ir grūti nodrošināt paraugu linearitāti vai taisnumu to izgatavošanas laikā. Diegi pirms impregnēšanas ir ļoti trausli un lokani, tāpēc tos ir grūti pārklāt ar epoksīda matricu. Tikko kā diegam pieskaras ar uzklājamo epoksīdu, tā diegs pielīp epoksīdam un raujas līdz uzklāšanas instrumentam. Tāpēc ir nepieciešams diegu galus nostiprināt un piedevām, lai nodrošinātu diegu taisnumu, diegiem ir jāpieliek neliels noslogojums. Šāds noslogojums un pati epoksīda uzklāšanas procedūra, protams, nedaudz samazina diega izturību, kā arī palielina izturības izkliedi. Impregnējot audumu, vidējais bojājums, kāds tiek izdarīts šķiedrām, ir mazāks, tāpēc arī audumos ir sagaidāma nedaudz mazāka parametru izkliede.

Vēl viena problēma, ar kuru nācās sastapties veicot eksperimentus, ir tā saucamā cilvēka faktora ietekme. Tā kā nebija speciālas palīgierīces, ar ko nodrošināt paraugu iestādīšanas spailēs vertikālītāti, tad zināma daļa paraugu noteikti, vairāk vai mazāk, tika nostiprināti ar kādu nobīdi no vertikālītātes. Katra nobīde no vertikālītātes nozīmē zemāku uzrādīto paraugu izturību. Kopumā vertikālītāte tika nodrošināta ar vizuālo metodi, panākot, lai paraugs sakrīt ar zināmu vertikālu atskaites līniju. Šāda metode ir pietiekami precīza garākiem paraugiem, bet īsiem paraugiem sakrišanas pilnību noteikt ir grūtāk. Šo nostiprināšanas ietekmi labi var redzēt 4.3.attēlā, kur ir salīdzinātas divu garumu paraugu izturības. 4.3.attēlā ir redzams, ka 15 mm gariem paraugiem parametru izkliede ir lielāka nekā 40 mm paraugiem.

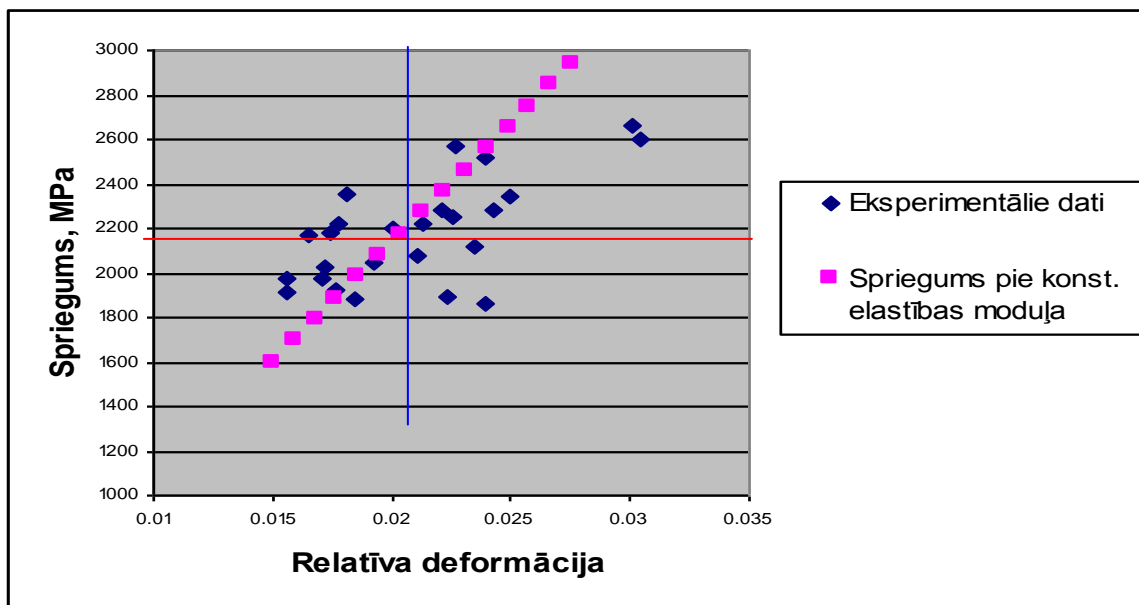




4.3.att. Mikroparaugu garuma ietekme uz to izturību

Lai samazinātu iepriekš minēto faktoru ietekmi, kā arī dziļāk izanalizētu sakarības starp diegu īpašībām līdz pat sarežģīti armētam kompozītmateriālam, ir plānots veikt papildus ekpserimentu sērijas, kurās tiks maksimāli automatizēts paraugu izgatavošanas darbs un paraugu nostiprināšanai skavās tiks izgatavota palīgierīce. Katram paraugu garuma izmēram tiks veikts arī lielāks daudzums pārbaudījumu, lai iegūtu labāku statistiku parametru sadalījuma funkcijas aprakstam.

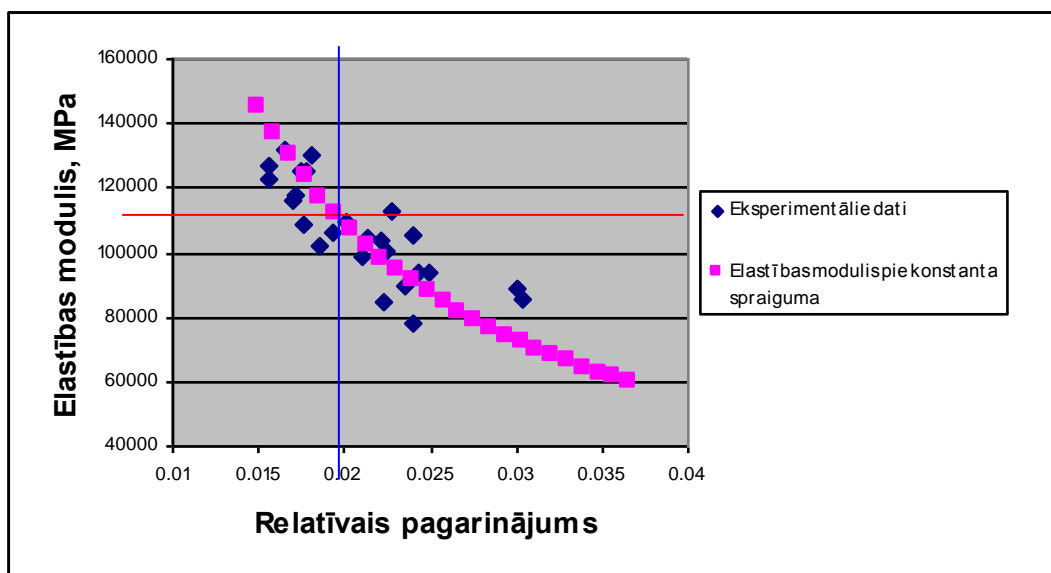
4.4.attēlā ir redzams sprieguma-deformācijas grafiks, kurā ar ziliem punktiem ir apzīmēti eksperimentālie dati, bet ar rozā krāsas punktiem – spriegums, kādam tam būtu jābūt pie konstanta elastības moduļa, pieņemot, ka šī konstantā vērtība ir sagaidāmā elastības koeficienta vērtība. Ar sarkano līniju ir parādīta sagaidāmā sprieguma vērtība. Ar zilo līniju ir apzīmēta robeža, kura atdala paraugus, kuri saplīsīs pirms aprēķinātās sagaidāmās deformācijas sasniegšanas (pa kreisi no līnijas), un paraugus, kuri saplīsīs pēc sagaidāmās kritiskās deformācijas (attiecīgi pa labi no līnijas).



4.4.att. Eksperimentālo un sagaidāmo sprieguma-deformācijas vērtību grafiks 15mm gariem mikroparaugiem

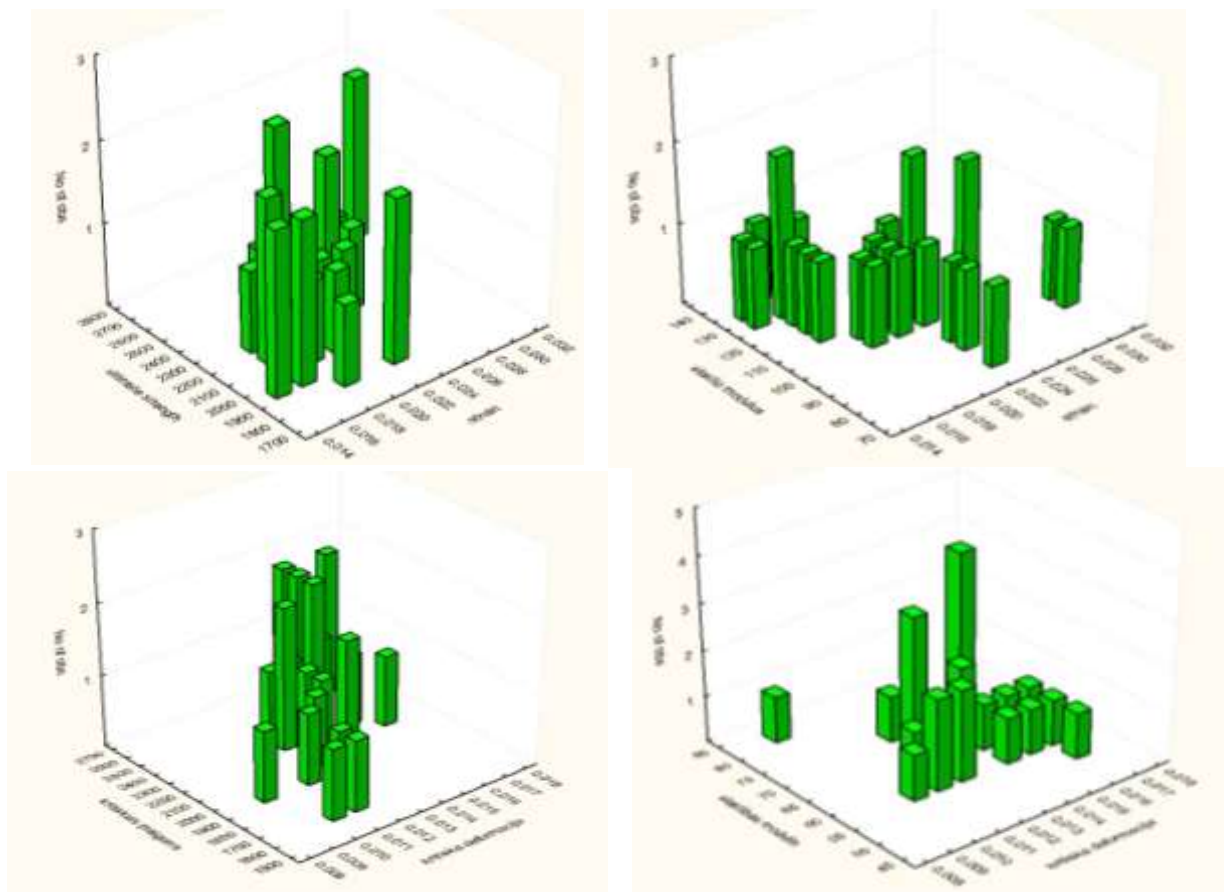
Ja eksperimentālie punkti atrodas virs rozā punktu iezīmētās līnijas, tad tas nozīmē, ka šie paraugi ir stīvāki par prognozēto, un tāpēc, ja būtu izgatavots paraugs no visiem 25 diegiem, tad šie diegi uzņemtu slodzi un saplīstu pirms maksimālās izturības sasniegšanas. Savukārt paraugi, kuri atrodas zem sarkanās līnijas, saplīsīs pirms sagaidāmās izturības vērtības tādēļ, ka būs jau sasnieguši savu maksimālo izturību.

4.5.attēlā redzamas eksperimentālo un sagaidāmo elastības moduļa-deformācijas vērtības 15mm gariem mikroparaugiem, kur ar rozā punktiem apzīmētas elastības moduļa vērtības, pie kurām tiks nodrošināta vēlamā parauga izturība. Ja eksperimentālās vērtības, kuras apzīmētas ar ziliem punktiem, atrodas zem rozā punktu līnijas, tas nozīmē, ka šie paraugi ir vājāki nekā nepieciešams un nenodrošinās nepieciešamo paraugu izturību. Ar sarkano līniju ir parādīta sagaidāmā elastības moduļa vērtība. Ja eksperimentālās vērtības atrodas virs šīs līnijas, tad paraugi ir stīvāki nekā sagaidāms un tāpēc saplīsīs pirmie. Ar zilo līniju ir apzīmēta robeža un tā atdala paraugus kuri saplīsīs pirms aprēķinātās sagaidāmās deformācijas sasniegšanas (pa kreisi no līnijas), un paraugus, kuri saplīsīs pēc sagaidāmās kritiskās deformācijas (pa labi no līnijas).



4.5.att. Eksperimentālo un sagaidāmo elastības moduļa-deformācijas vērtību grafiks 15mm gariem mikroparaugiem

Atšķirība starp grafikiem attēlos 4.4 un 4.5 ir tāda, ka 4.4.attēlā ir izmantotas izturības eksperimentālās vērtības, bet 4.5.attēlā elastības moduļa vērtības. Šie grafiki mums parāda cik diegu saplīstu dēļ kritiskā pagarinājuma sasniegšanas cik dēļ spraiguma un cik dēļ abu parametru sasniegšanas pirms sagaidāmo parametru sasniegšanas. Tā, ja mēs vēlamies nodrošināt vidējo elastības moduli, tad apskatot 4.4 attēla apakšējā kreisajā kvadrātā, kuru grafika laukumā veido sarkanā un zilā līnija, eksperimentālās vērtības, kuras atrodas virs rozā punktētās līnijas, piedalīsies slodzes uzņemšanā tikai pie relatīvi nelielām slodzēm. Konkrētajā gadījumā tie ir 5 punkti no 25 un tas nozīmē ka šādā veidā visuāli novērtējot var secināt ka apmēram 20% no šķiedrām saplīst pirms vidējās izturības sasniegšanas jo tieks sasniegta gan kritiskā izturība gan pagarinājums. Savukārt ja mēs vēlamies nodrošināt vidējo izturību tad vērtības kuras piedalīsies slodzes uzņemšanā tikai pie relatīvi nelielām slodzēm redzamas attēlā 4.5 augšējā kreisajā kvadrātā, kuru grafika laukumā veido sarkanā un zilā līnija, eksperimentālās vērtības, kuras atrodas zem rozā punktētās līnijas. Konkrētajā gadījumā tās ir 4 no 25 vērtībām.



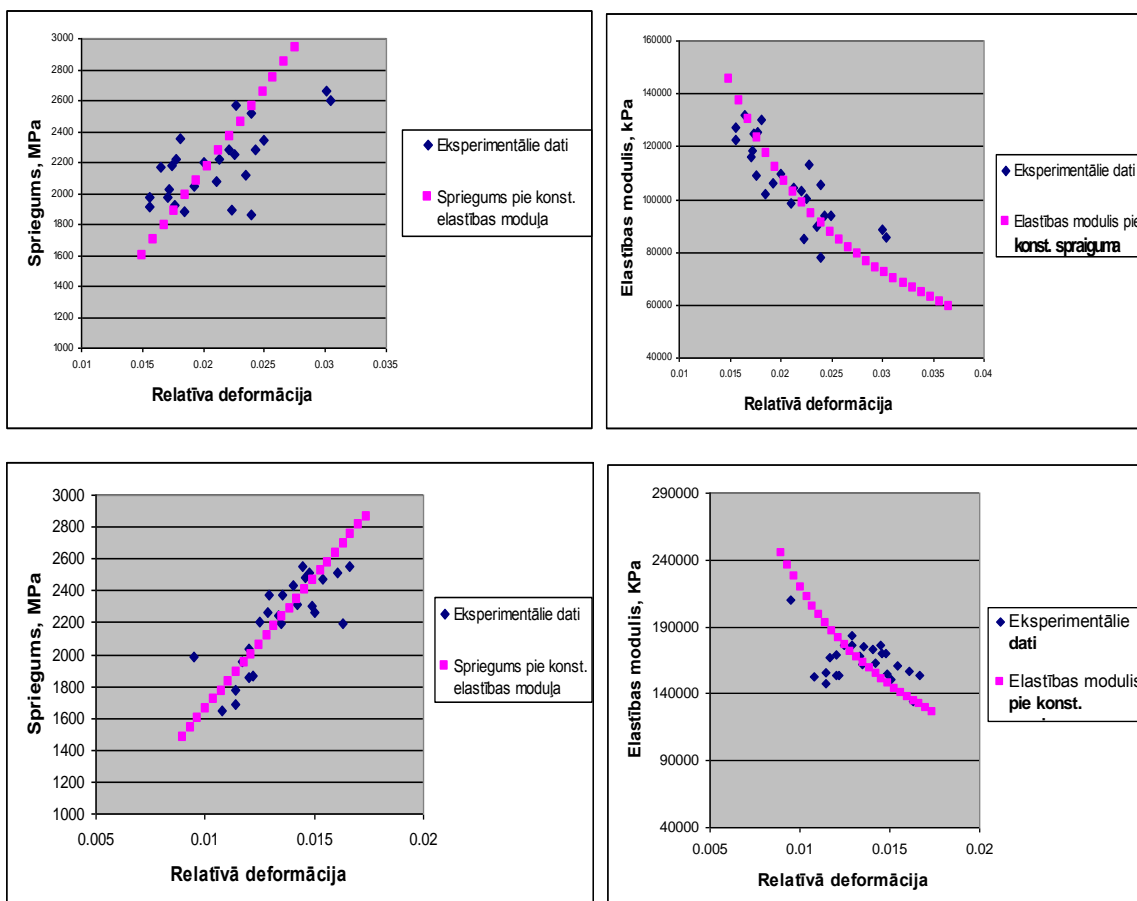
4.6.att. Deformācijas, elastības moduļa un pagarinājuma sadalījums 15mm gariem paraugiem augšējos attēlos un 40 mm gariem paraugiem apakšējos attēlos

Kā redzams 4.6.attēlos, elastības moduļa vērtību izkliede ir pavisam atšķirīga no maksimālās stiprības vērtību izkliedes. Tas nozīmē, ka, aprēķinot slāņu stiprību un tālāk arī sarežģīti armētu kompozītmateriālu izturību, būtu jāņem vērā abu šo izkriežu ietekme. Svarīgi izturības aprēķinos ņemt vērā elastības moduļa sadalījumu ne tikai tāpēc, ka elastīgākie diegi uzņem tikai daļu slodzes, bet, kas ir pat svarīgāk, šādā veidā tiek saplēsti noteikts procents no izturīgākajiem diegiem pirms maksimālās slodzes sasniegšanas to lielāka stīvuma dēļ. Tātad, aprēķinot kopējo slāņa izturību, ir jāsamazina tā prognozētā izturība atkarībā no atsevišķo diegu elastības koeficienta sadalījuma.

Veicot eksperimentus, viens no pieņēmumiem bija, ka pie paraugu īpašību atšķirīgām izkriedēm būtu vainojama grūtība nodrošināt paraugu nostiprināšanu ideāli paralēli pieliktajam spēkam un līdz ar to dažu paraugu vērtības šādā veidā tiek pasliktinātas. Lai noskaidrotu, vai ir vērojama šāda ietekme, sākotnēji jāapskata 4.6.attēli. Attēlos ir redzama deformācijas, elastības moduļa un pagarinājuma izkriede 15 mm un 40 mm gariem paraugiem. No paraugu nostiprināšanas metodes izriet pieņēmums, ka garākus paraugus

precīzi paralēli pieliktajam spēkam nostiprināt ir vieglāk nekā īsos. Šo pieņēmumu vizuāli apstiprina 4 attēlos redzamās diagrammas, kurās redzami maksimālo spriegumu sadalījumi saistībā ar maksimālajiem pagarinājumiem. Ja apskata attēlus kreisajā pusē, tad redzams, ka, pieaugot paraugu garumam, sprieguma vērtības kļūst koncentrētākas un tas varētu nozīmēt, ka mazinās kļūda pie paraugu nostiprināšanas (koncentrētākas vērtības raksturo tuvāka maksimālā stabiņu atrašanās, kā arī lielāks to garums vidusdaļā). Stiprības un elastības vērtību izvietojumu no augšpusē, kā arī sagaidāmo vērtību izvietojumā līkni var redzēt 4.7.attēlā.

4.7.attēla kreisajā pusē redzami grafiki, kuri raksturo, kā būtu jānostājas eksperimentālajiem datu punktiem, ja visiem paraugiem būtu viena sagaidāmā elastības moduļa vērtība. 4.7.attēla labajā pusē redzami grafiki, kuri raksturo, kā būtu jānostājas eksperimentālajiem datu punktiem, lai visi paraugi nodrošinātu vienu sagaidāmo sprieguma vērtību. Šādu atbilstību var novērtēt ne tikai vizuāli, bet arī skaitliski. Lai to izdarītu, tiek atrasti eksperimentālo paraugu pārvietojumiem  $\epsilon_i$  atbilstošie teorētiskie (sagaidāmie) spriegumi un elastības moduļi  $\sigma_{ti}$  un  $E_{ti}$ . Tālāk tiek noteikts, cik liela ir vidējā summārā nobīde starp i-tajām eksperimentālajām vērtībām un sagaidāmām i-tajām vērtībām.



4.7.att. Eksperimentālo vērtību izkliede ap sagaidāmo vērtību līknēm attiecīgi 15 mm un 40 mm gariem mikroparaugiem



Visbeidzot, lai nobīdi izteiktu procentuāli un izkliedes varētu savstarpēji salīdzināt, izdala šo iegūto vērtību ar sagaidāmo vērtību. Matemātiski nobīdes rādītāju var aprakstīt ar formulu:

$$k = \left( 1/n \sum_{i=1}^n \sqrt{(a_i - a_{ii})^2} \right) / b \quad (4.1)$$

- kur n – eksperimentu skaits;  
 i - rindas kārtas skaitlis;  
 $a_i$  – i-tā eksperimentālā vērtība;  
 $a_{ii}$  – sagaidāmā i-tā vērtība;  
 b – sagaidāmā vidējā vērtība.

Rezultātā 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.

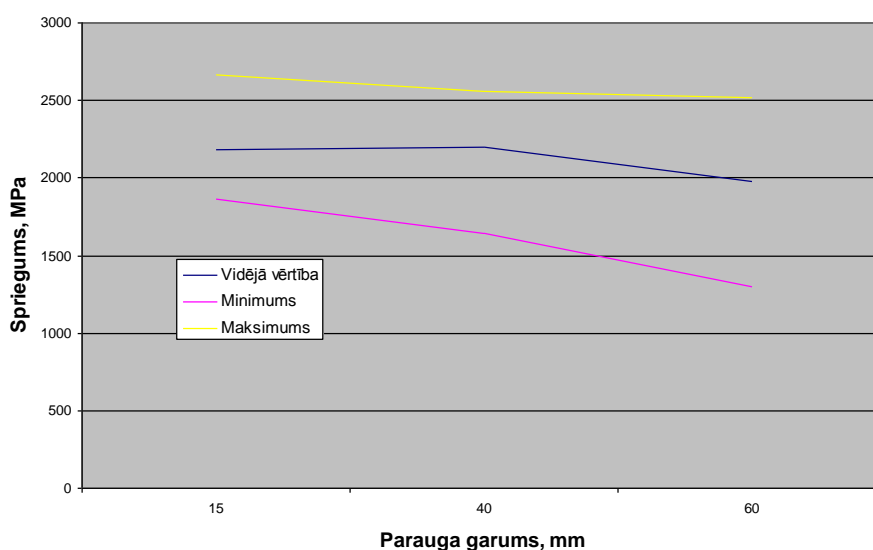
Savukārt (sk. 4.1.tabulu), apskatot skaitliski izkliedes procentu, kādu sastāda izkliede pret vidējo sprieguma vērtību, iegūst pretēju sakarību – 15 mm gariem paraugiem izkliede sastāda 10%, 40 mm - 12% savukārt 60 mm - 13%. Tas nozīmē, ka, apskatot tikai spriegumu sadalījumu, to maksimālās un minimālās vērtības garākiem paraugiem atšķiras vairāk nekā īsākiem. Tātad ir nepieciešama plašāka analīze, lai noteiktu ārējo faktoru ietekmi uz paraugu uzrādītajām īpašībām. Šim nolūkam tiks apskatīta elastības moduļa izkliede šiem pašiem mērījumiem. Apskatot 4.7 attēlu, 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.

Par ko liecina šāda parametru izkliede? Izkliedi stiprībā pamatā var radīt defekti šķiedrās, diegos (ieskaitot diametra variācijas), parauga traumēšana izgatavojot, transportējot vai uzstādot, neprecīza uzstādīšana. Savukārt izkliedi elastības modulī var radīt matricas materiāla nevienmērīgas ķīmiskās īpašības (nevienmērīgi sajaukts epoksīds ar cietinātāju), nevienmērīgs matricas uzklājums, stiprinājuma vietu atšķirīgie elastības moduļi (netiešā pārvietošanas mērīšanas metodē, ja paraugi tiek stiprināti caur atbalsta virsmām - arī pašām šīm virsmām ir savi elastības koeficienti).

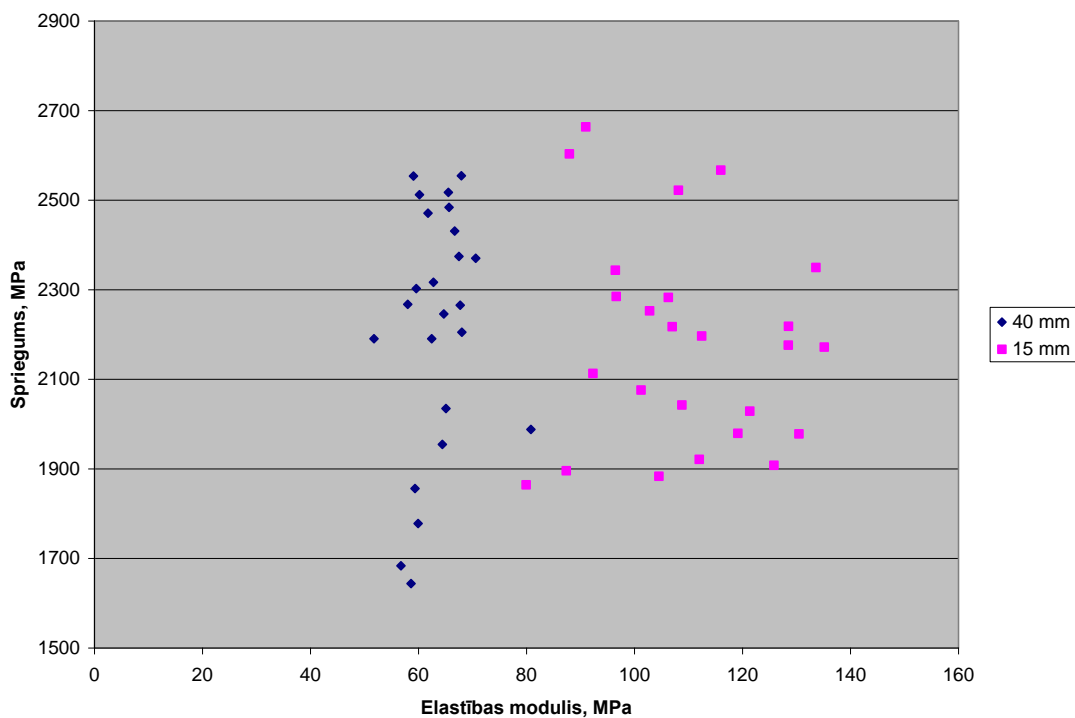
## Eksperimentālo datu izkliede

	Derīgie mērijumi	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

Savukārt, lai apstiprinātu iepriekš izvirzīto pieņēmumu par nostiprināšanas ietekmi uz parauga maksimālo izturību jāapskata 4.8.attēls. Attēlā redzams, ka maksimālie spriegumi, samazinoties parauga garumam, palielinās, kas sakrīt ar citu zinātnieku veiktajiem pētījumiem, un šī sakarība ir analizēta iepriekš šajā darbā. Atbildi uz interesējošo pieņēmumu sniedz vidējās spriegumu vērtības kritums 15 mm paraugiem, turklāt maksimālā spriegumu vērtība turpināja pieaugt. Šāda sakarība apstiprina pieņēmumu par to, ka šiem paraugiem ir novērojama kāda ārējā faktora ietekme, kura ir samazinājusi to izturības vērtības. Pēc izslēgšanas metodes, ņemot vērā to, ka pārējie izturību samazinošie faktori uz paraugiem darbojas vienādi, var secināt, ka paraugu iestatīšanas kļūdas radītā ietekme uz parauga maksimālo izturību ir aptuveni 13%.



4.8.att. Spriegumu izmaiņa atkarībā no paraugu garuma



4.9.att. Dažādu garumu mikroparaugu īpašību izkliede

4.9.attēlā redzamas 40 mm un 15 mm garu paraugu maksimālo spriegumu vērtības, no kurām var konstatēt, cik liela ir kļūda, nosakot relatīvo pārvietojumu ar netiešo mērīšanas metodi. Tā kā mikroparaugi tika pielīmēti pie papīra atbalsta virsmām, lai tie netiktu traumēti tos nostiprinot mērierīces skavās, tad sloģojuma jeb spēka ceļš uz paraugu ir – hidrocilindrs - skavas - kartona stiprinājums - epoksīda līme – paraugs. Pārvietojums veiktajiem eksperimentiem tika mērīts pēc cilindra pārvietojuma un tas nozīmē, ka visos mērījumos ir aptuveni konstanta pārvietojuma kļūda, kura sevī ietver skavu, kartona un līmes elastību summu. Tā kā relatīvo pārvietojumu nosaka kā:

$$\varepsilon = (b - b_0) / b_0 \quad (4,2)$$

kur  $b$ - parauga izmērs pie pieliktās slodzes;

$b_0$ - parauga sākotnējais izmērs,

tad garākos paraugos šī kļūda kļūs arvien mazāka, bet īsākos arvien nozīmīgāka. Līdz ar to elastības modulis garākos paraugos ir mazāks nekā īsākos un ietekme uz sadalījumu ir mazāka. Darba mērķis nebija noteikt precīzu elastības moduli vai pārvietojumus, bet gan to

sadalījumus, un šāda veida kļūdas minimāli ietekmē pašu sadalījumu, tāpēc šāda veida neprecizitātes tiek pieņemtas par nenozīmīgām.

Augstāk tika apskatīta vizuālā parametru novērtēšanas metode un tika apskatīts, kādu informāciju spēj sniegt izkliedes statistikas dati. Tagad jānovērtē pašu datu sadalījuma atbilstība normālam sadalījumam. Kā atbilstības kritērijs tiks izmantots Kologorova-Smirnova kritērijs. Šī kritērija vienkāršota galvenā ideja balstās uz maksimālās atšķirības jeb nobīdes noteikšanu starp parauga kumulatīvo sadalījumu un iedomāto hipotētisko kumulatīvo sadalījumu. Ja atšķirība ir pārāk liela, tad hipotēze par sadalījuma atbilstību iedomātajam sadalījumam ir jānoraida.

Savukārt nedaudz izvērstākā veidā atbilstības kritēriju var aprakstīt šādi - ja ir  $x_1 \dots x_n$  novērojumi grupai  $X$ , tad kumulatīvu histogrammu var izveidot, sakārtojot tos augošā secībā. Izmēģinājumu statistika šādā gadījumā būs:

$$D_2 = \max_{i=1}^n \left\{ \left| \frac{i}{n} - F_x[X_i] \right| \right\} \quad (4.3)$$

kur  $X_i$ - i-tais statistikas novērojums.

Statistika  $D_2$  mēra maksimālās atšķirības  $n$  mērījumiem starp novērojumu varbūtību sadalījuma funkciju un hipotētisko sadalījuma funkciju. Tā kā sadalījumu  $D_2$  ir grūti noteikt analītiski, tad sadalījuma funkcija dažādām vērtībām ir noteikta skaitliski un vērtības sarakstītas speciālās tabulās. Līdz ar to hipotēze par sadalījuma funkciju  $H$  pie noteikta svarīguma līmeņa  $\alpha$  tiek noliegta, ja:

$$d_2 > c_{n,\alpha} \quad (4.4)$$

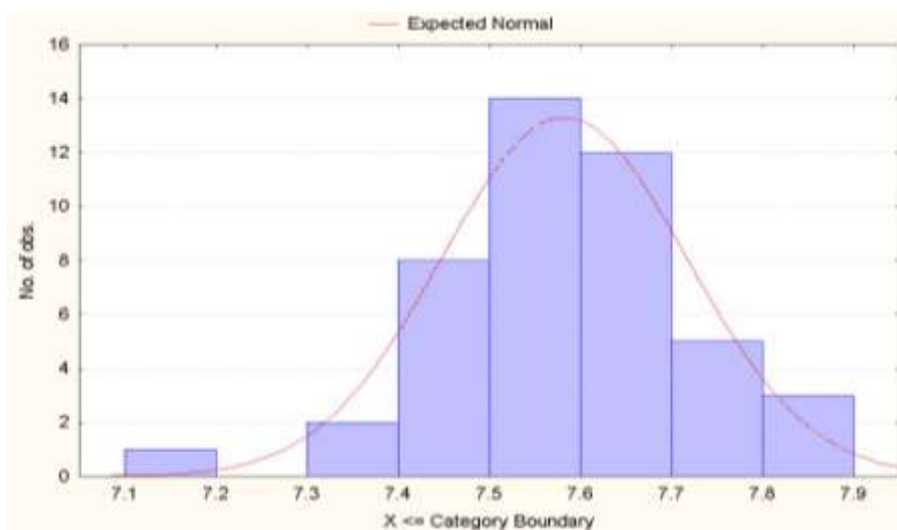
kur  $d_2$  ir kāda no  $D_2$  vērtībām;

$c_{n,\alpha}$  tiek definēta kā  $P(D_2 > c_{n,\alpha}) = \alpha$

un savukārt pieņemts pretējā gadījumā. Vērtības  $c_{n,\alpha}$  priekš  $\alpha=0,01; 0,02$  utt. ir dotas tabulās kā funkcijas no novērojuma kopējā skaita  $n$ .

Apskatot veikto eksperimentu datus, tika noteikta to logaritmisko vērtību atbilstība normālam sadalījumam. Pēc daudzu zinātnieku teorijām mikroparaugu vērtībām ir jāatbilst tieši šādam sadalījumam. Spriegumu logaritmu sadalījuma atbilstība normālam sadalījumam 15 mm, 40 mm un 60 mm gariem mikroparaugiem redzama 4.10.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.



4.10.att. Spriegumu sadalījums 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 iegūto 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 konstatēts ka elastības moduļu sadalījuma parametri ir atšķirīgi no izturības sadalījuma parametriem, 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 datu kvalitātes novērtēšanai. Tā, piemēram, sraigumu vērtības 15 mm gariem paraugiem tika novērtētas ar 0,71, bet 40 mm paraugiem – ar 1,18. 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.

#### **4.2. Akustiskās emisijas datu apstrāde, lai noteiktu kompozītmateriāla sabrukuma stāvokli**

Pētījuma uzdevums bija izanalizēt eksperimentos iegūtos akustiskās emisijas signālus lai izprastu sarežģīti armēta oglekļa šķiedru kompozītmateriāla sabrukšanas gaitu. Tātad uzmanība tiek pievērsta parametriem, kas principiāli raksturo sabrukšanas gaitu. Pētījums nav vērsts uz mēģinājumu skaitliski novērtēt materiāla īpašības izmantojot akustiskos signālus. Eksperimentiem 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 izmantots epoksīds Polimal 109–32K ar cietinātāju Peroxam M50L. Kompozītmateriāla paraugam ir 11 slāņu ar dažādos virzienos ( $0^0_4 / -+45^0_8 / 90^0_3$ ) orientētiem diegiem.

Veicot eksperimentus, tika pētītas materiāla īpašības kā pie statiskām slodzēm, tā pie dinamiskām 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 statisku. Eksperimenti tika veikti pie normālas temperatūras, mitruma un spiediena. Paraugu sagrūšana notika paredzētajā vietā (aptuveni vidusdaļā), kā tas redzams 4.11.attēlā, un tas raksturo pareizus slogojuma apstākļus paraugā. Parauga šķērsriezuma parametri ir  $2.5*11.0$  mm, slāņu salikums  $0^0_4 / -+45^0_8 / 90^0_3$ , vidējā izturība 6 paraugiem ir 279 MPa.



4.11.att. Pārbaudīts sarežģīti armēts ogleņķiedras paraugs

Izmēģinot paraugus uz stiepes izturību galvenie materiāla sabrukšanas iemesli slogojuma sākumā ir diegu un matricas delaminācija, kā arī delaminācija starp materiāla slāņiem. Slogojuma 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 slogojuma beigu posmā sabrukšana notiek sabrūkot matereāla šķiedrām. Iegūtās kritiskās vērtības statistiski testētiem paraugiem redzamas tabulā 4.2.

4.2.tabula

Testēto ogleņķiedras kompozītmateriālu īpašības

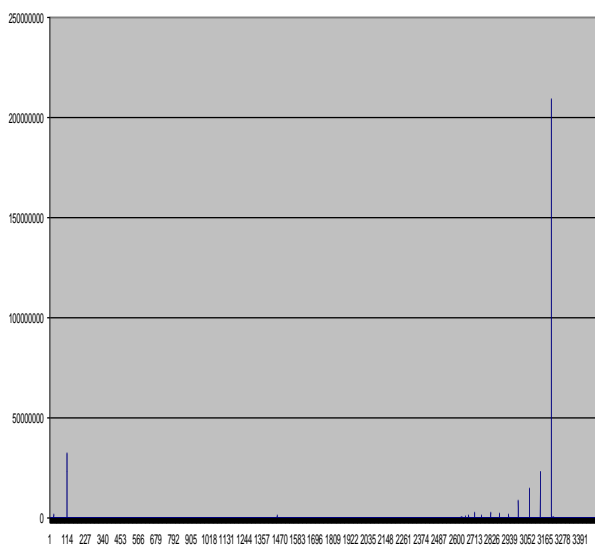
Parauga nummurs	Kritiskais slogojuma spēks $F_{max.}$ , N	Kritiskais spriegums, $\sigma_{max}$ , MPa	Elastības modulis, G, MPa
1	7790,50	286,64	14,33
2	7643,85	277,95	13,85
3	7338,20	266,84	12,70
4	6832,34	248,44	12,42
5	7963,73	288,86	13,12
6	8712,61	316,82	15,08
<b>Sagaidāmā vērtība</b>	<b>7713,55</b>	<b>275,925</b>	<b>13,58</b>

Ekspperimentu gaitā stiepes slogojumam iegūto signālu grafiki vienam paraugam attēloti 4.12.attēlā un 4.13.attēlā.

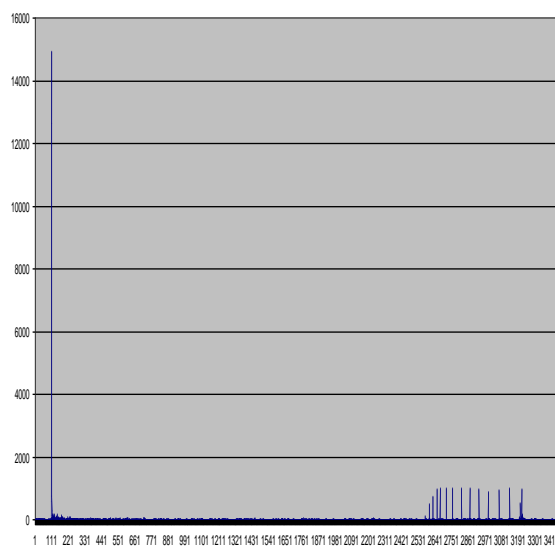
4.12.attēlā redzams, ka sabrukšanas process pie lineāra stiepes slogojuma pieauguma ir iedalāms trijās fāzēs:

- 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 ( $[E] = \text{of } 2,09[e]8 \text{ of } [e]V$ ).

4.13.attēlā redzams, ka AE signālu daudzums sabrukšanas procesā pie lineāra stiepes slogojuma pieauguma sākumā uzrāda lielu skaitu notikumu, bet šiem daudzajiem notikumiem atbilst maza atbrīvotā enerģija (sk. 4.12.att.), un tas nozīmē, ka materiālā notiek tā sauktie pirmā slogojuma procesi. Šajos procesos notiek materiāla iekšējo spriegumu izlīdzināšanās procesi. Atkārtoti veicot slogojumu ar tādu pašu slogojumu, šie signāli būs minimāli, tāpēc arī tos sauc par pirmā slogojuma procesiem.



4.12.att. Akustiskās emisijas signāla enerģijas atkarība no laika pie lineāra stiepes slogojuma pieauguma



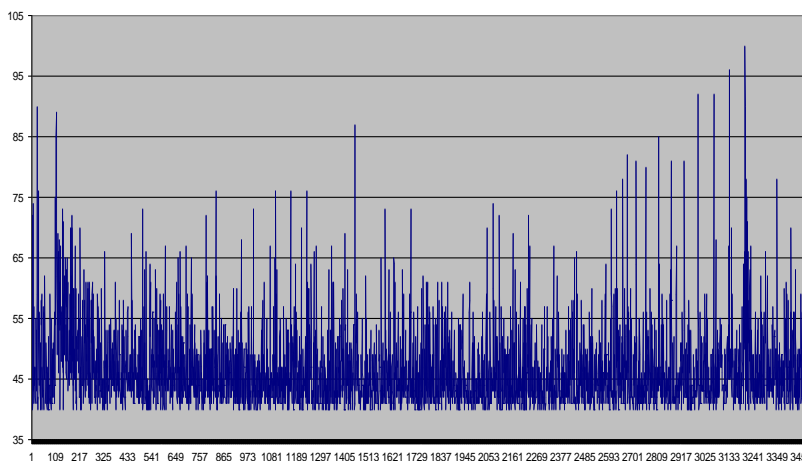
4.13.att. Akustiskās emisijas signālu daudzuma atkarība no laika pie lineāra stiepes slogojuma pieauguma



Slojuma beigu daļā redzams regulāru vidēji lielu notikumu skaits, kas raksturo paša materiāla sabrukšanu. Šo notikumu skaits ir aptuveni vienāds tāpēc, ka pieliktais slojums pieauga lineāri.

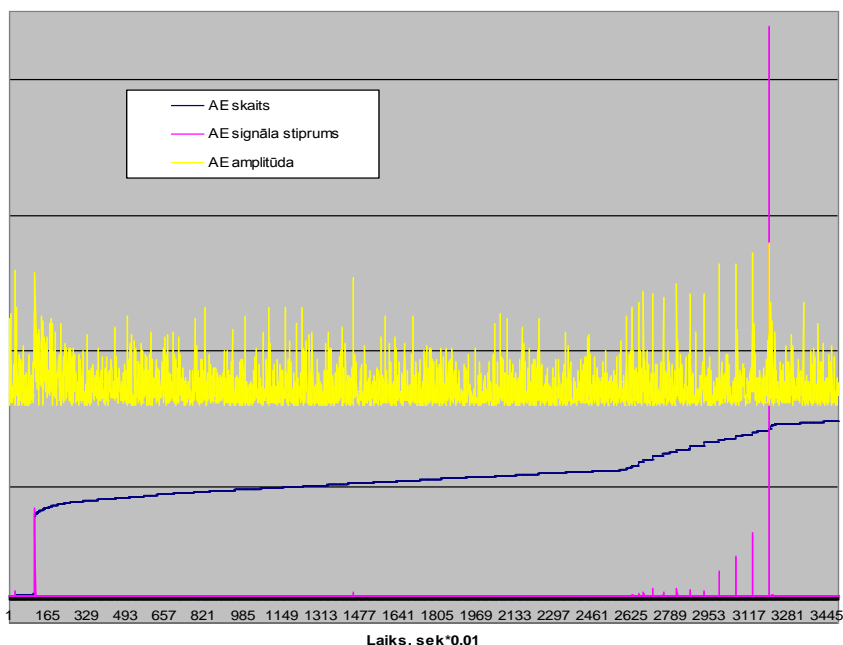
Abu šo attēlu analīze ļauj secināt, ka sabrūkošo šķiedru skaits pie lineāra slojuma tā maksimuma tuvumā ir aptuveni līdzīgs, bet saplīst arvien stiprākas (izturīgākas) šķiedras, ko apliecina arī 4.14.attēlā redzamais AE signāla amplitūdas lieluma pieaugums.

Kā redzams 4.14.attēlā, signāla amplitūda eksperimenta laikā ir līdzīga un tikai beigu daļā tā palielinās. Šāda signāla uzvedība apstiprina pieņēmumu, ka kompozītmateriāla sabrukšana notiek pakāpeniski un pēdējā fāzē (šķiedru sabrukšana).



4.14.att. Akustiskās emisijas signālu amplitūdas atkarība no laika pie lineāra stiepes slojuma pieauguma

Attēlā 4.15. redzami trīs akustiskā signāla parametri salikti 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. Signāla raksturs apstiprina pieņēmumu, ka sagrūšanas procesi kompozītmateriāla struktūrā notiek pakāpeniski un beidzas ar lavīnveida šķiedru sabrukumu.



4.15.att. Akustiskās emisijas signāli statista slogojuma laikā

No signālu rakstura var noteikt, kādi no sagraušanas procesiem konkrētajā laikā notiek paraugā. Tā lielais gadījumu skaita pieaugums ar relatīvi mazu signāla stipruma pieaugumu slogojuma sākuma daļā raksturo mazus, bet daudzus nenozīmīgus procesus, savukārt relatīvi mazais notikumu pieaugums ar lielu signāla stiprumu raksturo spēcīgāko šķiedru sagraušanas procesu.

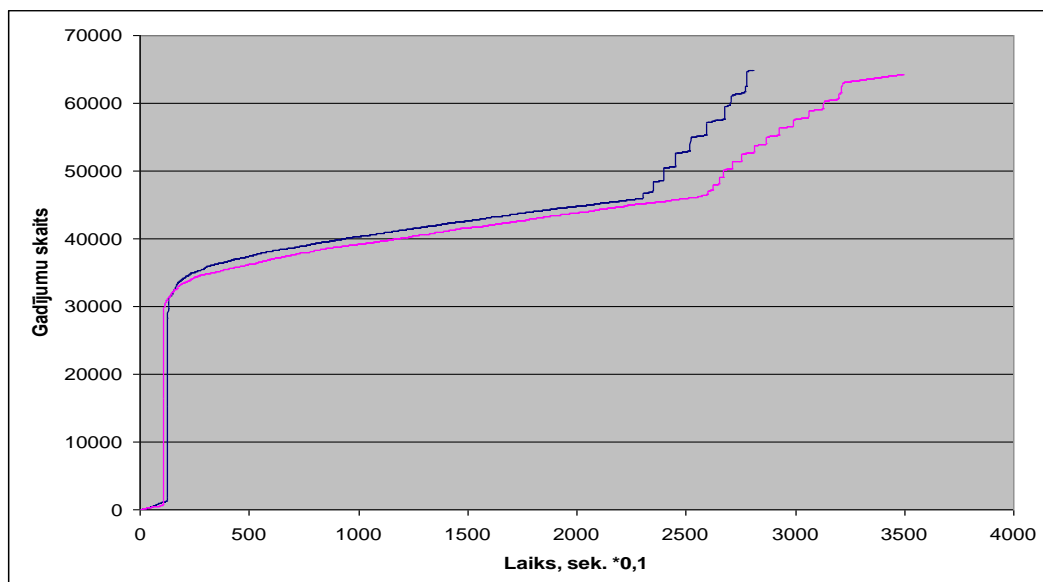
Pieņēmums attiecībā uz AE signāla uzvedību saistībā ar individuālo diegu pētījumu ir, ka elastības moduļa dispersija ietekmē kopējo sagraušanas procesu, palielinot signāla amplitūdu slogojuma zonā, kas tuva kritiskai, jo, kā liecina pētījums, vairākas izturīgākās šķiedras saplīsīs pirms kritiskā slogojuma 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.

Vēl viens veids akustiskās emisijas signāla analīzē ir pielietot akustiskās emisijas gadījumu skaita summu. AE summas grafiks diviem no paraugiem pie statistā slogojuma parādīts 4,16.attēlā. No grafika redzams, ka tāpat kā jau augstāk aprakstītā gadījumā var izšķirt tās pašas trīs sabrukuma fāzes. No AE signālu skaita summas var redzēt, cik daudz notikumu kopumā uz doto brīdi ir noticis paraugā. Tātad sākotnēji signāls ar mazu enerģiju ( $E = 3.31e^1V \div 3,52e^3 eV$ ) parādās, bet tajā pašā laikā liels skaits mazu notikumu notiek materiālā. Tas atbilst troksnim, ko rada pirmreizējais slogojums, kad materiāls „sakārtojas”.

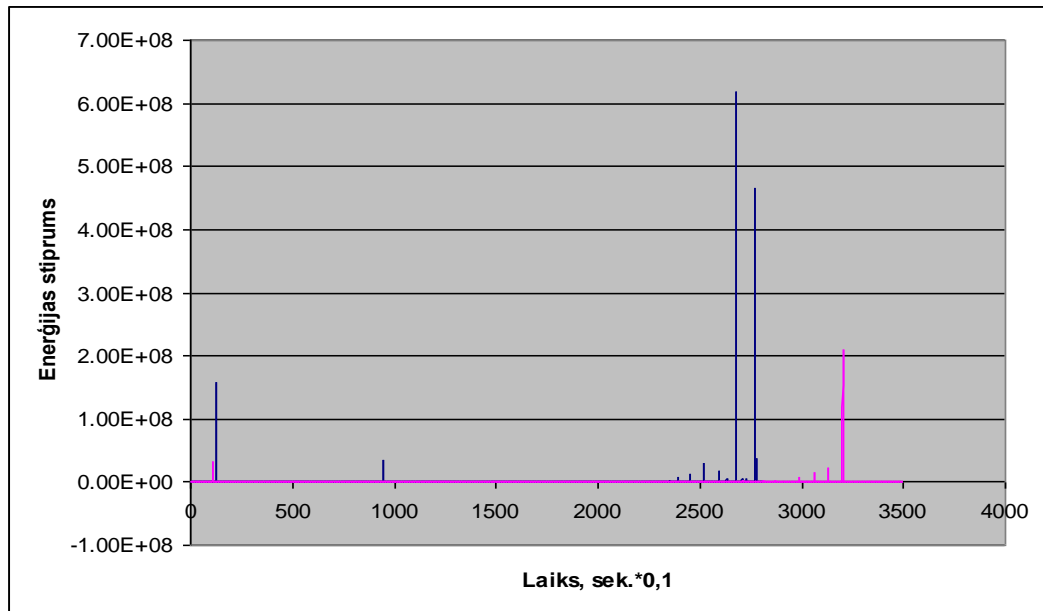
Šos „sakārtošanās” procesus var redzēt attēlā kā strauju līknes kāpumu. Ja paraugu līdz šādam pašam slogojuma līmenim slogotu atkārtoti, tad trokšņu līmenis būtu minimāls.

Tālāk seko periods ar aptuveni lineāru signālu skaita pieaugumu. Šis periods atbilst materiāla elastības iespējām, neradot plīsumus šķiedrās vai matricā. Pēc šī perioda seko intervāls, kuru raksturo liels enerģijas daudzums, kā arī notikumu skaita pieaugums. Šie notikumi atbilst sagrūšanas procesiem materiālā. Noslēdzošajā fāzē slodzes ir sasniegušas šķiedru un matricas izturības robežas un notiek sagrūšanas procesi sākotnēji slāņos, kuri atrodas zem leņķa pret slogojumu, un visbeidzot paralēli orientētās šķiedrās. Šos procesus raksturo arī liela signāla enerģija  $[E] = 2,09e^8V$ . Sagrūšanas process nobeidzas ar izturīgāko šķiedru lavīnveida sabrukumu.

Attēlos 4.16 un 4.17 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 attēla 4.5 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 attēlā 4.17 mēs redzam kā uz grafiku ir atsaucies lielāks elastības modulis un lielāka parauga izturība. Tā no attēla 4.16 mēs redzam ka paraugs kurš attēlots ar silo krāsu un ir mazāk elastīgs, bet toties izturīgāks salīdzinoši rada krietni lielāku akustiskās emisijas signāla stiprumu.



4.16 att. Akustiskā signāla skaita summa diviem paraugiem

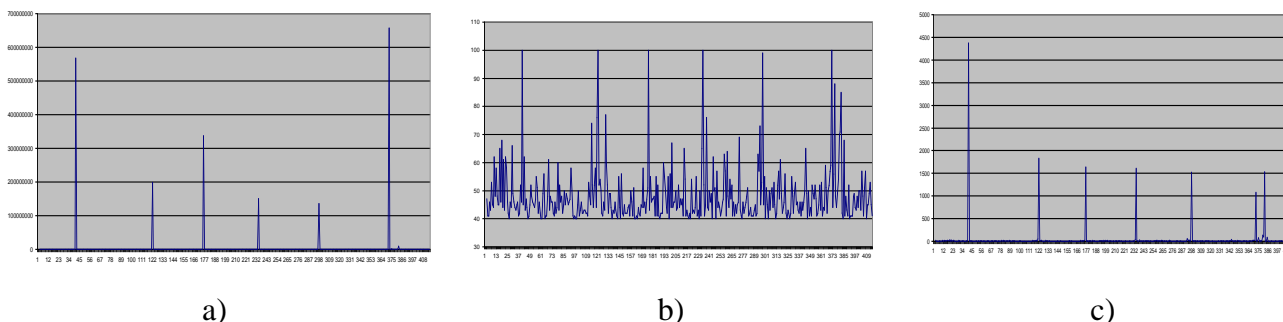


4.17 att. Akustiskā signāla stiprums diviem paraugiem

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 saplīsīs 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.

Apskatot dinamiskajā slogojumā iegūtos datus vislabāt tos ilustrēs 4.18 a, b un c attēlos parādīts akustiskais signāls paraugam, kurš izturēja 6 slogojuma ciklus. Katram ciklam ir augsta akustiskā emisijas enerģija (4.18 a), kā arī ir augsts notikumu skaits (4.18 c), bez tam katru ciklu ļoti labi var izdalīt pēc AE signāla amplitūdas 4.18 b. AE signāla amplitūdas maksimums pie cikliskā stiepes slogojuma katrā ciklā ir aptuveni vienāds, kas apstiprina pieņēmumu par to, ka katrā ciklā tiek saplēsta daļa šķiedru. Jāņem gan vērā apstāklis, ka testētais paraugs tiek slogots ļoti tuvu maksimālai izturībai un izmēģinājumos ar zemāku slogojuma līmeni AE signālu aina būs nedaudz savādāka. Slogojuma sākumā pie pirmā cikla redzama tā pati aina, kā pie statiskā slogojuma, un tas būtu pirmā slogojuma efekts. 4.18 c attēlā ir redzams, ka notiek liels skaits nelielu notikumu. Šajā gadījumā sākotnēji atbrīvotā AE enerģija ir relatīvi lielāka nekā pie statiskā slogojuma, bet vēlreiz ir jāņem vērā tas, ka šoreiz slogojums 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.



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

Šāds eksperiments ar lieliem slogojumiem ļauj izdalīt un viegli apskatīt vairākas sabrukšanas mehānisma fāzes.

Pirmajā ciklā AE uzrāda 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 pētījums par sabrukšanas procesu, sarežģīti armētā paraugā, sākotnēji notiek kompozīta matricā un beidzas ar lavīnveida materiāla sabrukumu, kuru daļēji veicina elastības moduļa un izturības īpašību sajaukums.

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 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.

### **4.3. Ogļšķiedras mikroparaugu eksperimentu elastības un izturības parametru statistiskā 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 ogļšķiedras diegiem ar diametru 150  $\mu\text{m}$  (neregularitāte 20  $\mu\text{m}$ ), impregnētiem arepoksīda sveķiem ED-20, cietinātāju Politelēn poliamin un plastifikatoru Dibutilftolat. 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.

Rezultātā 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 -  $0,10$ .

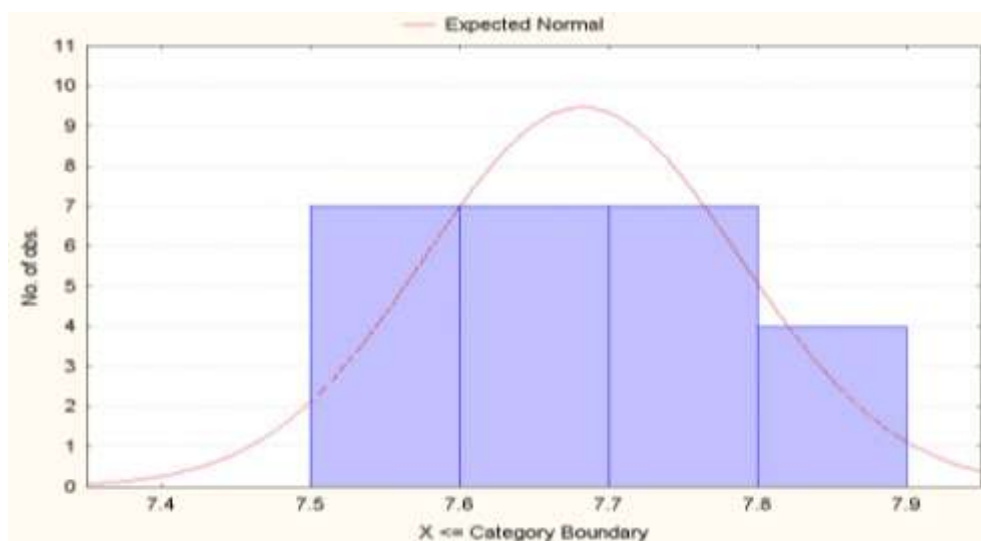
Savukārt (sk. 4.3.tabulu), apskatot skaitliski izkliedes procentu, kādu sastāda izklīde pret vidējo sprieguma vērtību, iegūst pretēju sakarību – 15 mm gariem paraugiem izklīde sastāda 10%, 40 mm - 12% savukārt 60 mm - 13%. Tas nozīmē, ka, apskatot tikai spriegumu sadalījumu, to maksimālās un minimālās vērtības garākiem paraugiem atšķiras vairāk nekā īsākiem. Tātad ir nepieciešama plašāka analīze, lai noteiktu ārējo faktoru ietekmi uz paraugu uzrādītajām īpašībām. Šim nolūkam tiks apskatīta elastības moduļa izklīde šiem pašiem mērījumiem. 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 izklīde.

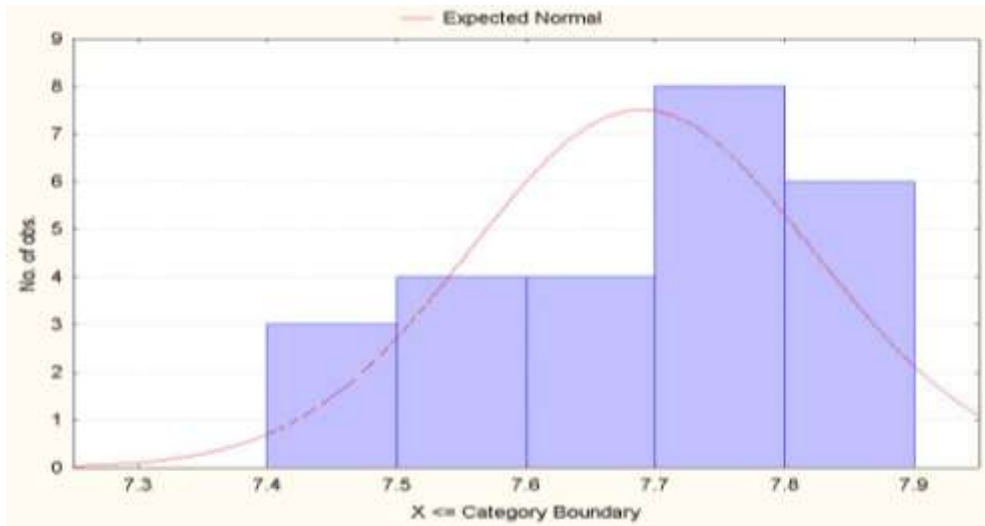
## Eksperimentālo datu izklike

	Derīgie mērijumi	Sagaidāmā vērtība	Minimums	Maksimums	Standarta nobīde
kritiskā 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
kritiskā 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

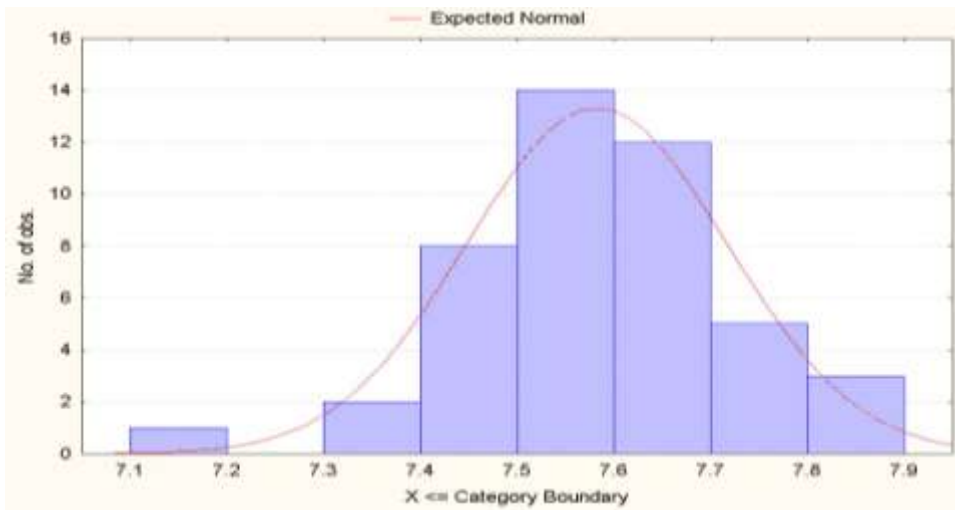
Apskatot veikto eksperimentu datus, tika noteikta to logaritmisko vērtību atbilstība normālam sadalījumam. Spriegumu logaritmu sadalījuma atbilstība normālam sadalījumam 15 mm, 40 mm un 60 mm gariem mikroparaugiem redzama 4.19 a, b un c.attēlā. Pirmajā gadījumā  $d_2 = 0,088$  un  $c_{n,\alpha} = 0,20$ , 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.



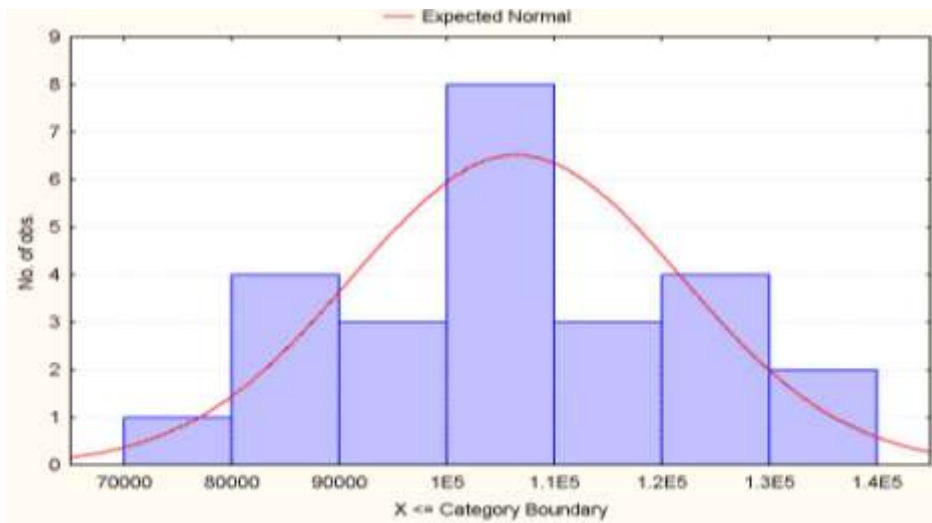
a)



b)

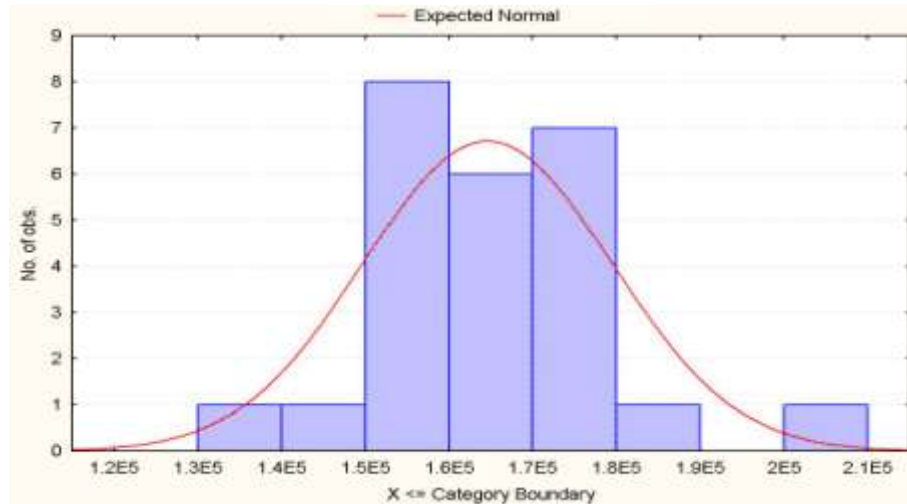


c)



d)





e)

4.19.att. Spriegumu sadalījums a – 15 mm, b – 40 mm, c - 60 mm gariem mikroparaugiem, elastības moduļu sadalījums d- 15mm, e- 40mm

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.

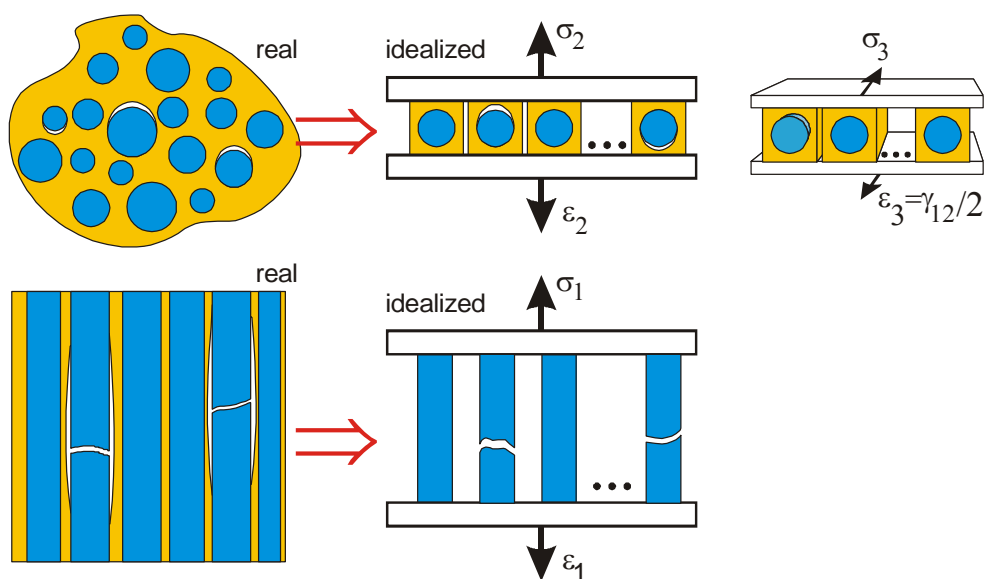
## 5 Parauga sagrūšanas prognoze, ņemot vērā diegu individuālās īpašības

Galvenā ideja veicot šo pētījumu bija izprast atsevišķo 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 tiks 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. Kopumā aprēķinu modelis balstās uz Danielsa matemātisko modeli, kurš darbā papildināts un koriģēts. Galvenais papildinājums ir atšķirīgo individuālo elastības moduļu un kritisko pagarinājumu ņemšana vērā pie aprēķiniem.

Lai prognozētu matereāla 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  $\epsilon_{i \max} < \epsilon$  vai  $\sigma_{i \max} < E\epsilon$ , kur  $\epsilon_{i \max}$  ir i-tā diega maksimālais relatīvais pagarinājums, savukārt  $\epsilon$  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. Vizuāli pieņemtais modelis redzams 5.1.attēlā. 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 (sk. 2.1.att.), 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 (sk. 5.1.att.), kā arī bīdes procesi pie stiepes.



5.1.att. Veikto pieņēmumu vai idealizācijas vizualizācija

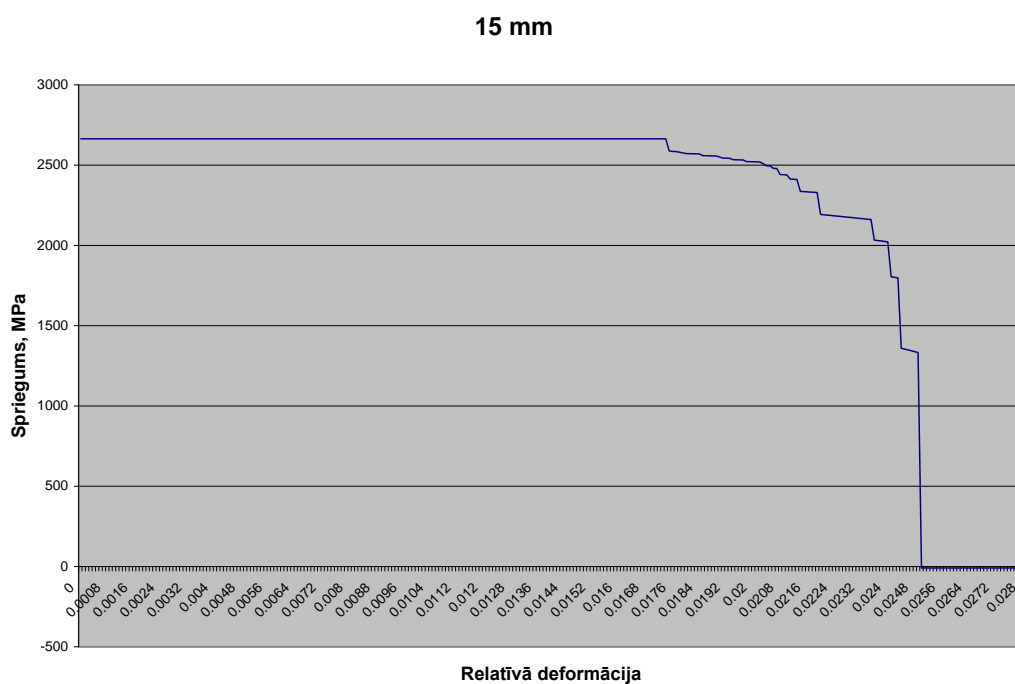
### 5.1. Ogļšķiedras lamināta sagrūšana pēc spriegumu kritērija vienmērīgam pārvietojumam

Šī modeļa 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  $\sigma_n = \sigma$ , kur  $i$  ir veselo šķiedru vai diegu skaits. Matemātiski izteikt diegu saplīšanas nosacījumu var  $\sigma_{i \min} \geq \sigma_n$ , kur  $\sigma_{i \min}$  ir vājākās šķiedras kritiskais spriegums. Savukārt lamināta spriegumu nosaka pēc formulas  $\sigma = E\varepsilon$ , kur  $E$  ir šķiedru sagaidāmais elastības modulis un  $\varepsilon$  - lamināta relatīvais pagarinājums. Aprēķiniem tiek izmantots Danielsa modelis un formulas 2.37 un 3.38. Citiem vārdiem to var izteikt, ka, 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.

Lai labāk varētu simulēt 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. Pēc būtības situācija, kad materiāls sabrūk pie vienmērīga pārvietojuma nosacījuma, nozīmē, ka ārējais pieliktais spēks ir mainīgs un tas mainās ar tādu funkciju, kas nodrošina vienmērīgu pārvietojumu. Šāds nosacījums sniedz vienmērīgu sprieguma pieaugumu katrā no elementiem visā parauga sabrukšanas gaitā. Tas ļauj ģenerēt paredzamo spriegumu rindu pie noteiktiem pārvietojumiem. Šīs vērtības katrā aprēķinu solī tiek salīdzinātas ar visu paraugu kritiskajām izturības vērtībām. Ja n-tā aprēķinātā spriegumu 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 saplēšanas punkti.

Aprēķinos netika ņemti vērā diegu kritiskie relatīvie pagarinājumi. Aprēķinu programma pievienota pielikumā. Aprēķinātais parauga izturības potenciāla izmaiņas grafiks ir redzams 5.2.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.

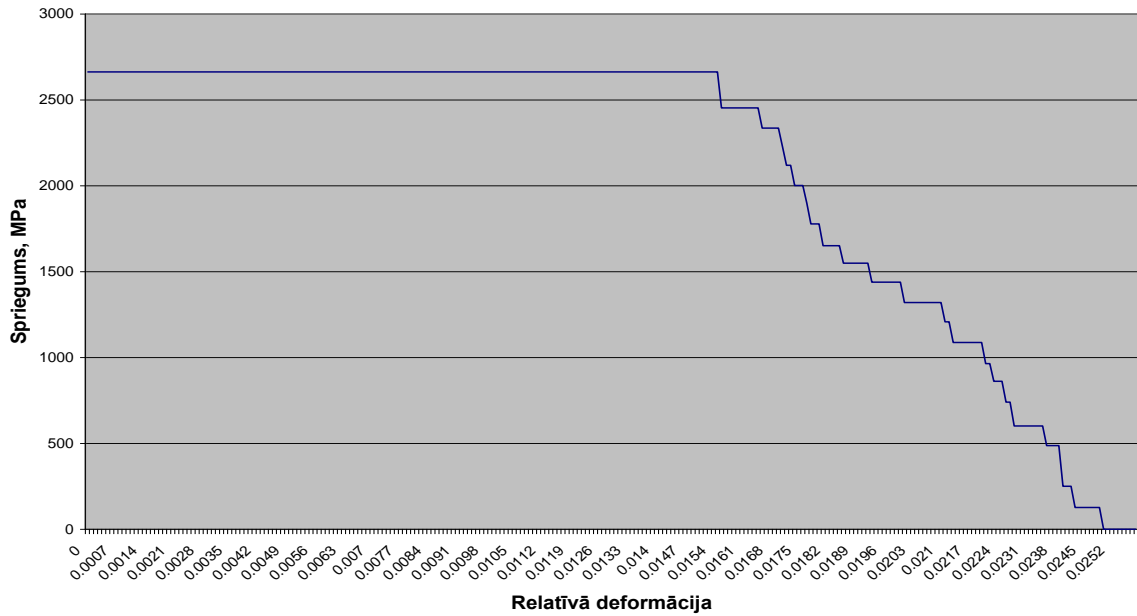




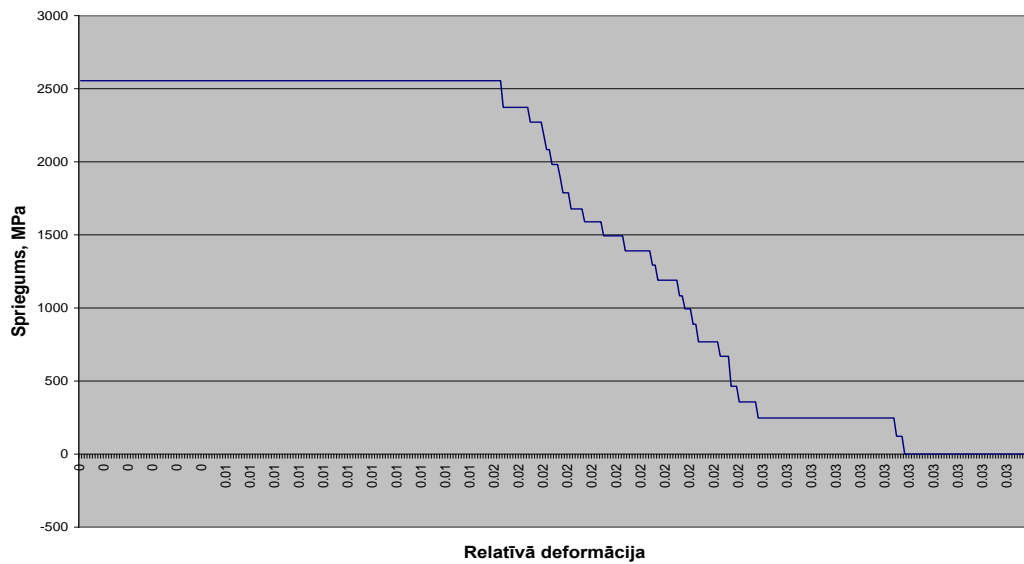
Lai simulētu šāda veida lamināta sabrukšanu, tika uzrakstīta neliela programma, izmantojot datorprogrammu Matlab. Aprēķinātajā variantā tika izmantoti 25 mikroparaugu dati no zināmajiem eksperimentālajiem datiem. Līdz ar to var pieņemt, ka tika radīts virtuāls paraugs, kas sastāv no 25 diegiem. Situācija, kad materiāls sabrūk pie vienmērīga pārvietojuma nosacījuma, nozīmē, ka ārējais pieliktais spēks ir mainīgs un tas mainās ar tādu funkciju, kas nodrošina vienmērīgu pārvietojumu. Lai simulētu sagrūšanu pie šādiem nosacījumiem, ģenerē paredzamo pārvietojumu rindu. 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 saplēšanas punkti. Aprēķinu programma pievienota 1 pielikumā. Aprēķinātais parauga izturības potenciāla izmaiņas grafiks ir redzams 5.3.attēlā. Šajā attēlā ar zilo līniju ir redzams, kā samazinās parauga izturības potenciāls pie vienmērīgi pieaugoša pārvietojuma.

Ogļšķiedras lamināta sabrukšanas pēc kritisko pagarinājumu un pēc kritisko spriegumu nosacījumu sasniegšanas grafikos, kas attēloti 5.2 un 5.3 attēlos uzskatāmi var redzēt atšķirīgo matereāla sagrūšanas dabu pie dažādiem nosacījumiem. Gadījumā, ja tiek pieņemti tikai diegu izturības nosacījumi, tad izturības potenciāla samazināšanās raksturs ir aptuveni aprakstāms kā apgrieztas parabollas puse, bet pagarinājumu kritērija gadījumā potenciāla samazināšanos aptuveni raksturo taisne. Krietni atšķirīgs ir arī matereāla sabrukšanas diapazons kurš pagarinājumu kritērija gadījumā ir ievērojami lielāks.

### 15 mm



### 40 mm



5.3.att. Izturības potenciāla samazināšanās pēc kritisko pagarinājumu sasniegšanas kritērija 15mm gariem paraugiem augšējā attēlā un 40mm gariem paraugiem apakšējā attēlā

### 5.3 Oglšķiedras lamināta sagrūšana pēc pagarinājumu un spriegumu kritērija

Iepriekšējās divās nodaļās tika apskatīts kā izmainīsies parauga izturības potenciāls atkarībā no relatīvās deformācijas bet šajā nodaļā tiks apskatīts, kā noteikt spriegumu paraugu kritiskajā šķēsgriezumā un kā parauga izturību ietekmē viens vai otrs faktors. Paraugu



sabrukšanas analīze tiks veikta ņemot vērā akustiskās emisijas signālu rādījumus. Tas ļaus ne tikai labāk saprast akustiskās emisijas signālu dabu, bet arī prognozēt materiāla maksimālo izturību kopumā un novērtēt potenciālā materiāla sagrūšanas ātrumu. Lai analizētu paraugu sabrukšanas raksturu tika izstrādāts modelis sagrūšanas apstākļu simulēšanai. Papildus iepriekš 5.1 nodaļā minētajiem pieņēmumiem un nosacījumiem 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 slogojums 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 sagrautās šķiedras daļu; spriegumi sadalās pa visiem diegiem vienmērīgi.

Modelējot virtuālā paraugā notiekošo sagrūšanas procesu raksturus, apskatīsim trīs sagrūšanas nosacījumus un no tā izrietošās sabrukšanas rakstura izmaiņas, kā arī kritiskās vērtības. Tātad mūsu paraugs var saplīst saplīstot visiem tā diegiem sasniedzot katra diega kritiskos pagarinājumus, paraugs var saplīst saplīstot visiem tā diegiem sasniedzot katra diega kritiskos spriegumus un paraugs var saplīst ņemot vērā abus iepriekš minētos nosacījumus. Sagrūšanas nosacījumi ir pamatā saglabājās tādi pat kā 5.1 un 5.2 nodaļās aprakstītiem izturības potenciālu modeļiem tomēr tajos ir dažas būtiskas atšķirības tāpēc vēlreiz aprakstīšu sagrūšanas nosacījumus konkrēti spriegumu pieauguma aprakstīšanas parauga kritiskajā šķēlumā modeļiem.

Kā pirmo apskatīsim gadījumu ar kritisko pagarinājumu nosacījumu sasniegšanu. Šī modeļa pamatā ir pieņēmums, ka katra šķiedra vai diegs saplīst, sasniedzot tā kritisko pagarinājumu  $\varepsilon_{i \max}$ . Savukārt spriegumi, kādi rodas pie stiepes, netiek ņemti vērā. Diegu saplīšanas nosacījums ir- ja  $\varepsilon_{i \min} \geq \varepsilon_n$  tad diegs saplīst, kur  $\varepsilon_{i \min}$  ir mazākais šķiedras kritiskais pagarinājums, bet  $\varepsilon_n$  diegu pagarinājums pie ārējā slogojuma. Tiek pieņemts, ka slogojuma laikā visu šķiedru pagarinājumi paraugā 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 vērtību. Sasniedzot šķiedras vai diega kritisko pagarinājuma robežu, tas saplīst un līdz ar to virtuālajā paraugā kļūst par vienu šķērsriezuma laukuma vienību mazāks un tas nozīmē ka tagad parauga kritiskajā šķēlumā spriegumi pieaug par  $1/i$ -to daļu, kur  $i$ - palikušo nesagrauto diegu skaits  $+1$ . Spriegumi, šajā momentā, materiālā pieaug, nepieaugot lamināta relatīvai deformācijai. Tādā veidā stiepes slogojums tiek pielikts līdz brīdim kad tiek sasniegts

pēdēdējā diega kritiskais pagarinājums. Protams apskatot tikai kritiskos pagarinājumus mēs iegūstam spriegumus kas daudzkārt pārsniedz diegu kritiskos spriegumus un tāpēc šāds modelis mums nedod atbildi par mūsu virtuālā parauga kopējo kritisko spriegumu vai pagarinājumu, bet kā mēs redzēsīm vēlāk tas labi raksturo paraugu sabrukšanas sākuma daļu. Matemātiski modelis aprakstāms kā:

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon \sum_{i=1}^{n_c} 1(\bar{\sigma}_i < X_i) E_i \varepsilon_i f_i \quad (5.1)$$

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

Kā otro apskatīsim gadījumu ar kritisko spriegumu nosacījumu sasniegšanu. Šī modeļa pamatā ir pieņēmums, ka katra šķiedra vai diegs saplīst, sasniedzot tā kritisko spriegumu. Spriegumi, kādi rodas pie ārējās stiepes slodzes, sadalās pa visiem diegiem vienādi  $\sigma_n = \sigma / i$ , kur  $i$  ir veselo šķiedru vai diegu skaits. Diegu saplīšanas nosacījums ir ja  $\sigma_{i_{\min}} \geq \sigma_n$ , kur  $\sigma_{i_{\min}}$  ir vājākās šķiedras kritiskais spriegums tad diegs saplīst. Savukārt kopējo spriegumu laminātā nosaka pēc formulas  $\sigma = E\varepsilon$ , kur  $E$  ir šķiedru sagaidāmais elastības modulis un  $\varepsilon$  - lamināta relatīvais pagarinājums. 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 šķērsriezuma laukuma vienību mazāks un spriegums paraugā palielinās par  $1/i$ -to daļu, kur  $i$ - palikušo nesagrauto diegu skaits  $+1$ . Spriegumi, šajā momentā, materiālā pieaug, nepieaugot lamināta relatīvai deformācijai. Tālāk seko divi iespējamie varianti – pirmais, ja pieaugušais spriegums tomēr ir mazāks par nākamā vājākā diega kritisko spriegumu, tad turpinās slogojums, bet, ja šis pieaugušais spriegums ir lielāks par nākamā vājākā elementa spriegumu, tad notiek šī nākamā elementa saplīšana. Līdz ar to var iestāties lavīnveida sabrukums, kad spriegumi pieaug pietiekami strauji, lai visi atlikušie lamināta elementi saplīstu bez papildus slogojuma pielikšanas (bez parauga pagarinājuma pieauguma). Šādā lavīnveida sabrukšanas sākšanās mums labi iezīmē parauga maksimālā pagarinājuma sasniegšanu kā arī maksimālo kritisko spriegumu kādu paraugs var izturēt tam nesabrūkot. Matemātiski tas izsakāms kā :

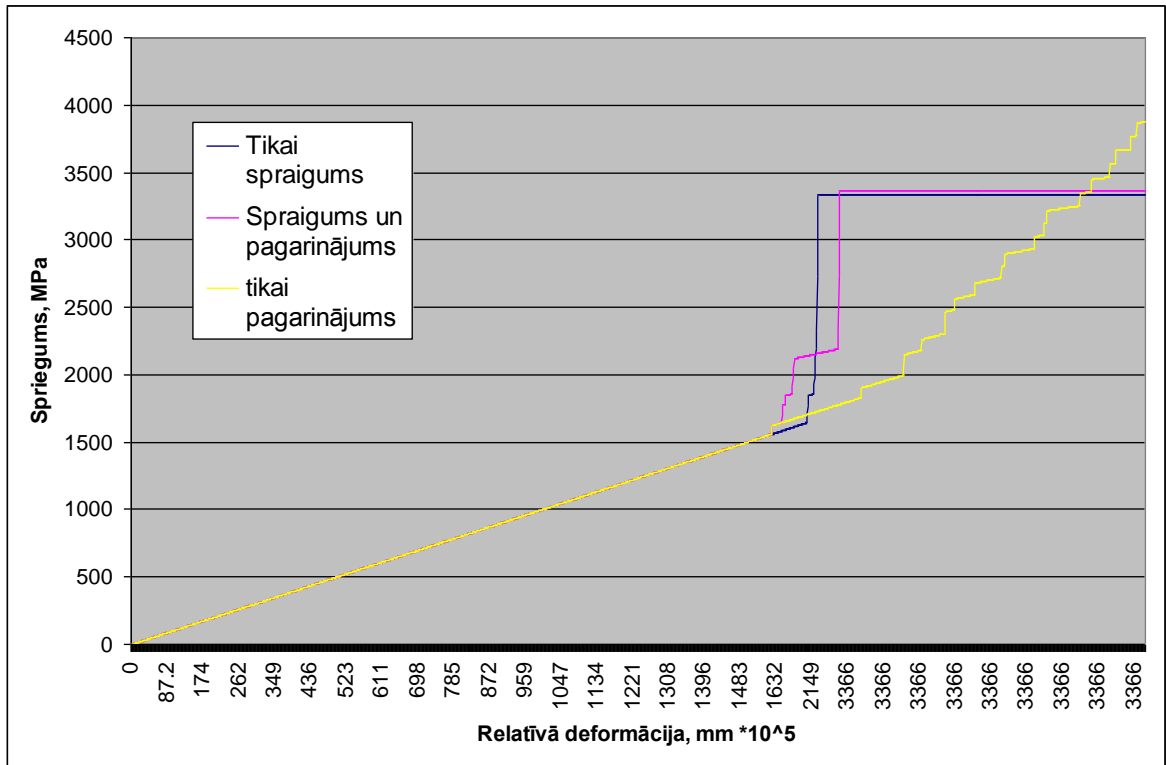
$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon \sum_{i=1}^{n_C} 1(\varepsilon \bar{\varepsilon}_i E_i < X_i) E_i \bar{\varepsilon}_i f_i \quad (5.2)$$

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

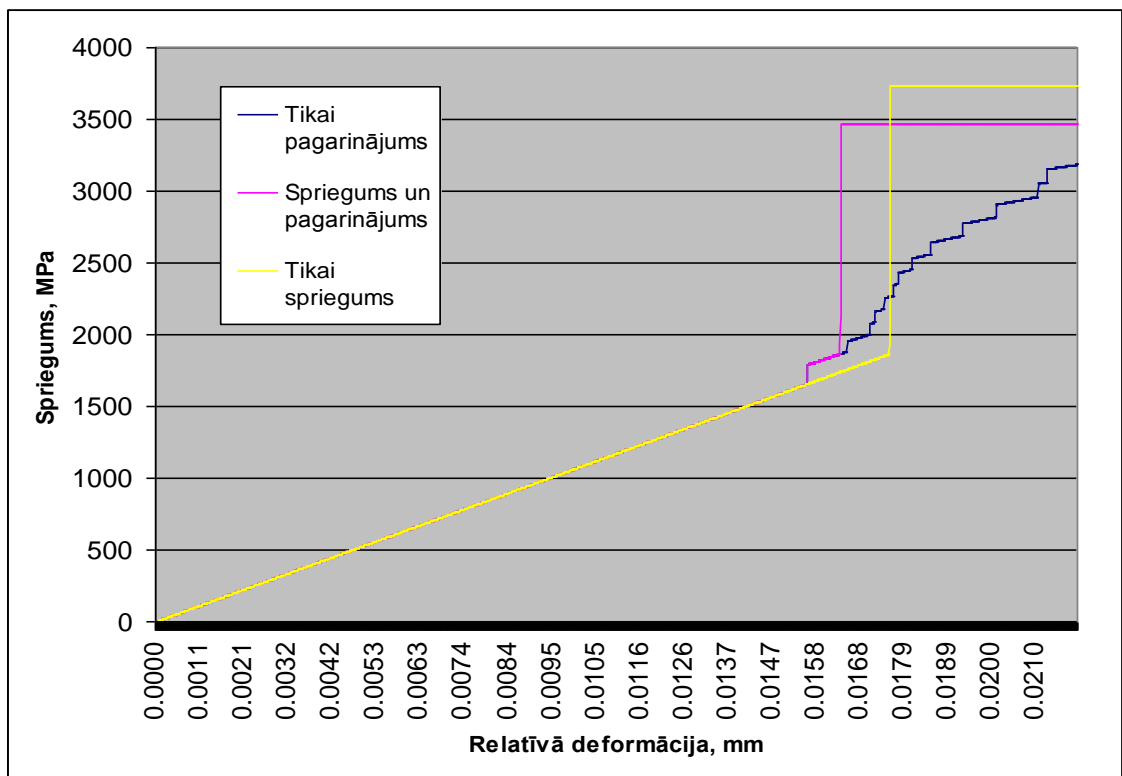
Kā trešo apskatīsim gadījumu ar kritisko pagarinājumu un spriegumu nosacījumu sasniegšanu. Šī modeļa pamatā ir pieņēmums, ka katra šķiedra vai diegs saplīst, sasniedzot tā kritisko pagarinājumu vai kritisko spriegumu. Katrs diegs var saplīst tikai vienu reizi pēc viena no nosacījumiem atkarībā no tā kurš no nosacījumiem tiek sasniegts pirmais un izpildās. Rezultātā mēs iegūstam parauga sagrūšanas ainu, kas sniedz mums informāciju gan par sabrukšanas raksturu, gan par tā kritiskajām vērtībām.

Spriegumu-pārvietojuma diagrammās, kuras attēlotas attēlā 5.4 un 5.5 ir redzams kā pieaug spriegumi parauga plīsuma vietā jeb kritiskajā šķērsgriezumā. Kā redzams attēlu 5.4 un 3.5.5 diagrammu sākumdaļā, spriegumi vienmērīgi pieaug vienmērīgi pieaugot ārējam slogojumam. Neatkarīgi no sabrukšanas nosacījuma sākotnēji spriegumi, pieaug vienādi. Atšķirības parādās sasniedzot kādu no sabrukšanas nosacījumiem. 5.4 attēlā parādīta ar dzelteni krāsu, bet attēlā. 5.5 ar zilo krāsu spriegumu diagramma kritiskajā šķēlumā gadījumā ja izpildās tikai pagarinājumu nosacījums. Attēlā 5.4 parādīta ar zilo krāsu, bet 5.5 attēlā. ar dzelteni krāsu spriegum5.5 parādīta ar lillā krāsu kritisko spriegumu diagramma gadījumā ja piepildās abi nosacījumi.

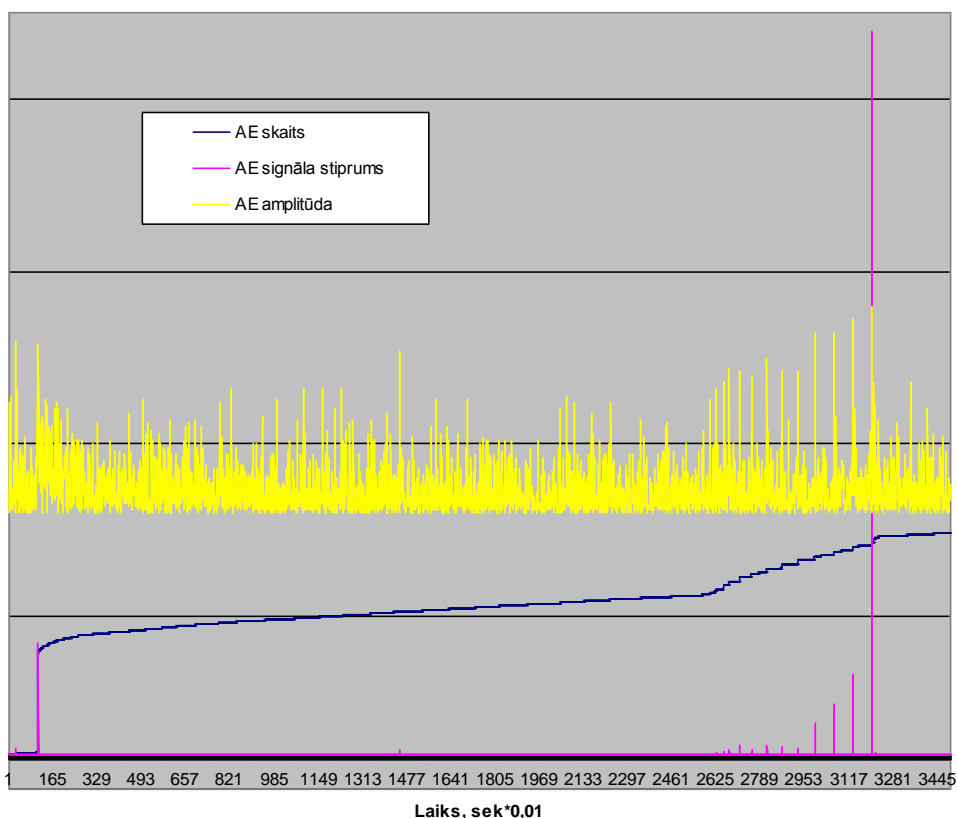
Salīdzinot iegūtās sabrukšanas diagrammas ar sarežģīti armēta kompozītmateriāla ar tādām pat oglekļa šķiedrām sagrūšanas laikā uzņemtiem akustiskās emisijas signāliem (Att.5.6) varam novērot ļoti līdzīgu ainu, kas jo sevišķi labi atspoguļojās akustiskā signāla spēka grafikā. Šāda sagrūšanas dabas analogija ļauj secināt, ka izstrādātais modelis, neskatoties uz virkni pieņēmumiem, visai precīzi ataino sagrūšanas procesus.



5.4.att. Spriegumu pieauguma prognozes grafiks 40 mm gariem paraugiem pēc eksperimentāliem datiem



5.5 att. Spriegumu pieauguma prognozes grafiks 15mm gariem paraugiem pēc eksperimentāliem datiem

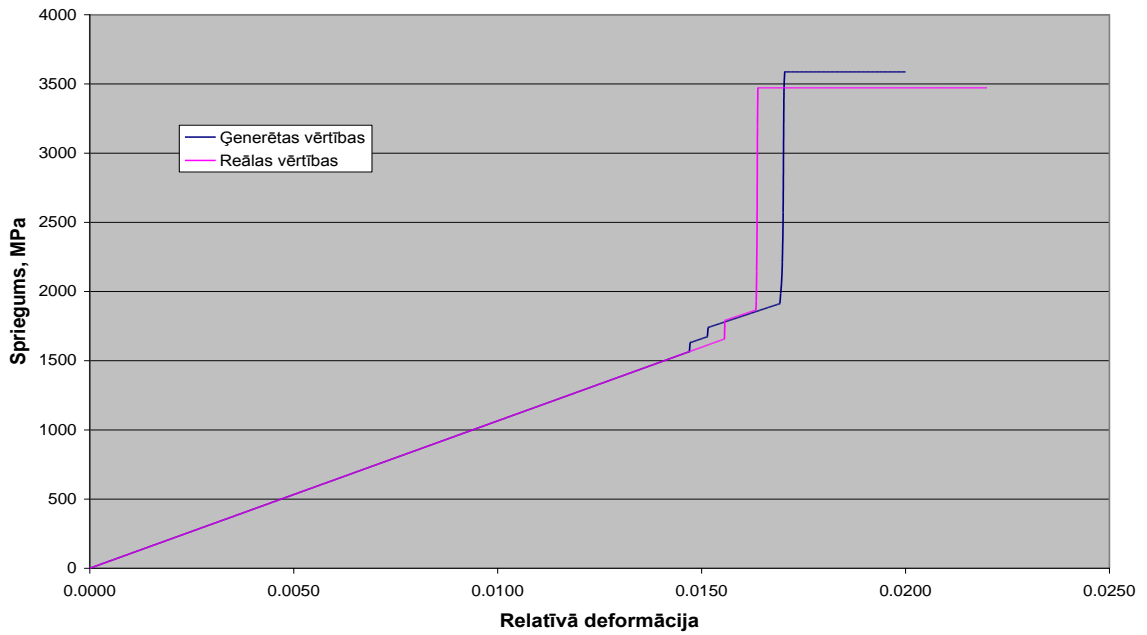


5.6.att. Akustiskās emisijas signāli statistiska slogojuma laikā

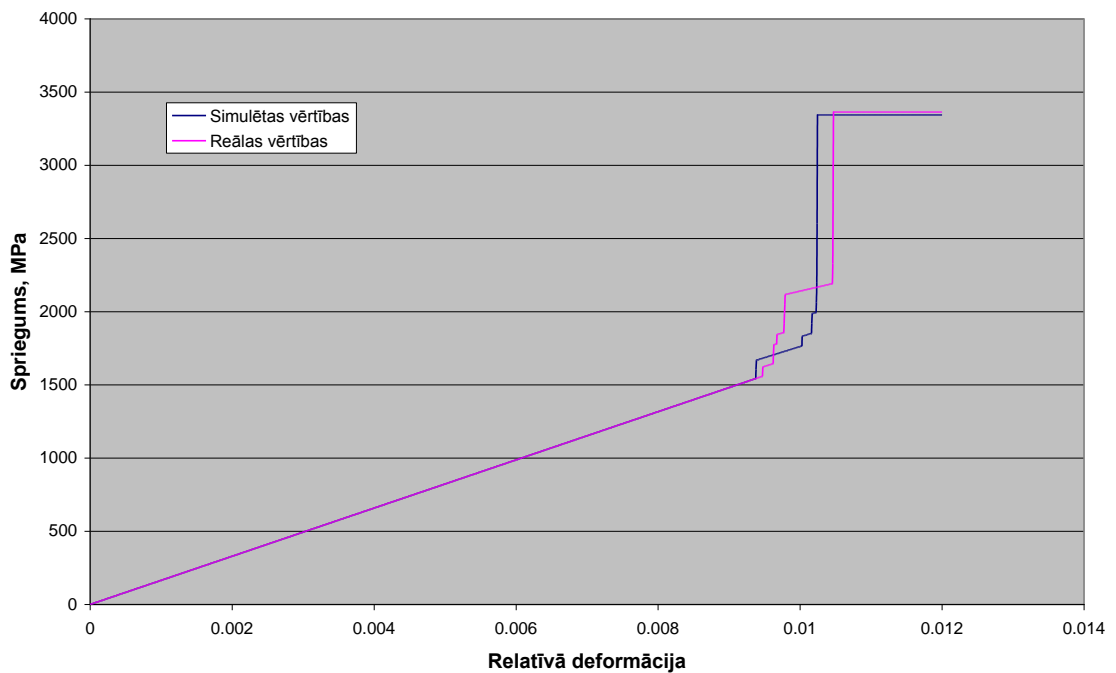
Ja salīdzinām iegūtās matereāla kritiskās vērtības ar vidējām vērtībām tad piemēram 15 mm gariem paraugiem kritiskā deformācija ir 0,021 un kritiskais spriegums 2181,7 MPa, bet aprēķinu vērtības attiecīgi ir 0,01633 un 1870 MPa. Savukārt 40 mm gariem paraugiem kritiskā deformācija ir 0,013 un kritiskais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

Attēlā 5.7 tiek attēlots gadījums ar kritisko pagarinājumu un spriegumu nosacījumu sasniegšanu uzģenerētām un reālām vērtībām. Lai simulētu matereālā notiekošos procesus 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. Attēlā 5.7 ir attēlots spriegumu pieaugums matereālā 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. Simulācijai tika pieņemta vērtību atbilstība normālajam sadalījumam ar vidējo vērtību un standarta nobīdi ņemtu no eksperimentālajiem datiem. Tabulas veidā iegūtos rezultātus var salīdzināt tabulā.5.1

### 15 mm



### 40mm



5.7 att. Ogļšķiedras paraugu sagrūšanas simulācija

5.1 Tabula

Paraugus raksturojošās vērtības

Parauga

Vidējā

No izmēģinājumu

No uzģenerētām

garums, mm	mikroparaugu vērtība, MPa	vērtībām simulēta izturība, MPa	vērtībām simulēta izturība, MPa
15	2181.7	1870	1986
40	2202.4	2190	2061
60	1980.904	1674	1800

Tātad ja mums ir nepieciešams novērtēt lamināta kompozītmateriāla izturību vai piemeklēt tādas šķiedru īpašības, kuras apmierinātu mūsu izvirzītās prasības ir jāzin diegu mikroparaugu kritisko pagarinājumu vērtības vai to sadalījuma parametri, kā arī kritiskie spriegumi vai to sadalījuma parametri. Vērtību sadalījumi pietiekami lielumam diegu tiecās uz normālu sadalījuma likumu. Galvenā priekšrocība šādai matereāla 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 matereāla 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 matereāls 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

Saskaņā ar izvirzīto darba mērķi, kurš bija - kompozītmateriāla izturības modelēšana pie stiepes slodzes tika izstrādāta darba shēma. Lai sasniegtu izvirzīto darba mērķi un sasniegtu minētos rezultātus darbs tika iedalīts trijās daļās no kurām pirmajā daļā tika aprakstīta vispārēja informācija par kompozītmateriāliem un to pielietojuma priekšrocībām. Otrajā daļā tika veikta dažādu aspektu analīze. Šī analīze bija nepieciešama lai vadoties no tās rezultātiem varētu veikt praktisko pētījumu saistībā ar nosprausto mērķi. Trešā darba sadaļa tika veltīta praktiskiem pētījumiem. Kopumā darbā, balstoties uz eksperimentāliem rezultātiem, tika izstrādāts matemātisks modelis materiāla sabrukšanas dinamikas atainošanai un izturības novērtēšanai, piedevām sabrukšanas gaitu sasaistot ar akustiskās emisijas signālu rādījumiem, kā materiāla iekšējo sagraušanas procesu atainotājiem.

Kopumā darba gaitā tika izgatavoti un notestēti aptuveni 500 paraugu. Par pētāmo materiālu tika izraudzīts oglekļa šķiedru kompozītmateriāls ar epoksīda matricu. Sarežģīti armētie oglekļa šķiedras-epoksīda paraugi tika izgatavoti rūpnieciski savukārt viena oglekļa šķiedru diega paraugu izgatavošana tika veikta Aviācijas institūta darbnīcā. Sarežģīti armētie paraugi tika pārbaudīti uz stiepi ar statisku un dinamisku sloojumu, piedevām tika uzņemti akustiskās emisijas signāli.

Darba otrā daļa bija materiāla apkojojošā daļa un sagatavošanās trešai daļai. Trešā nodaļā katra no četrām apakšnodaļām ir veltīta savam pētījumam, savukārt katrs pētījums pats par sevi ir neatkarīgs pētījums, taņī pat laikā visi papildinot viens otru ir vērsti uz kopējā rezultāta sasniegšanu. Darbs tika vērst uz vienvirziena šķiedrota kompozītmateriāla komponentu īpašību izpēti, vienlaicīgi pielietojot materiāla īpašību diagnostiku ar akustiskās emisijas metodi un sabrukšanas dinamikas matemātiskā modeļa izstrādi, lai no vienotas pozīcijas attēlotu sagraušanas procesus. Atšķirībā no citu autoru darbiem sabrukuma rezultāti tika saistīti ar akustiskās emisijas signālu uzvedību materiāla sagraušanas laikā. Šāda salīdzināšana ļauj savstarpēji pārliicināties par akustiskā signāla pareizu sapratni un izstrādātā sabrukšanas modeļa atbilstību reāliem sabrukšanas procesiem paraugos. Mērķa sasniegšanai tika veikts vispārējs kompozītmateriālu raksturojošo īpašību pētījums un vēlāk sīkāk apskatīti jautājumi saistīti ar šķiedrota kompozītmateriālu izturības noteikšanu, kā arī to ietekmējošie faktori. Lai iegūtu nepieciešamos datus, darba veikšanai, tika nolemts pašiem veikt nepieciešamos eksperimentus. Savukārt lai veiktu praktiskos pētījumus tika izgatavoti un veikti eksperimenti ar oglekļa šķiedru diegu mikroparaugiem un tika izgatavoti sarežģīti



armēti paraugi un veikti eksperimenti ar akustiskās emisijas signāla pierakstīšanu. Tad kad dati bija iegūti tika veikta to analīze, kas izpaudās kompozītmateriāla diegu mikroparaugu statistiskās izturības un elastības moduļu izkliedes pētījumos un akustiskās emisijas signālu analīzes kontekstā ar dažādiem mehāniskiem procesiem, kas noris matereālā analīzes. Tika izstrādāta arī vienkārša metode kā novērtēt eksperimentos iegūto rezultātu kopuma kvalitāti lai zinātu vai dati ir pielietojami tālākajos pētījumos vai tie nav pētījumiem derīgi. Visbeidzot tika izstrādāts modelis, kas ļauj modulēt paraugu sagrūšanas dinamiku gadījumos, ja tiek ņemta vērā diegu kritisko pagarinājumu izkliede un ja tiek ņemta vērā kritisko spriegumu izkliede. Balstoties uz izstrādāto modeli, tiek iegūtas kompozītmateriāla spriegumu pieauguma pie stiepes līknes apraksts kritiskajā šķērsgrīzumā. Iegūtie rezultāti salīdzināti ar akustiskās emisijas signālu uzvedību un iegūta rezultātu sakritība. Līdz ar to izstrādātais modelis ļauj aprakstīt ne tikai prognozējamo izturību vienvirziena kompozītmateriāliem, bet arī sabrukšanas raksturu ņemot vērā šķiedru spriegumu un/vai relatīvo pagarinājumu sadalījumu. Pareizi izvēlētas matereālu īpašības 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. Izmantojot šo metodi tika pārbaudīti darba gaitā iegūtie eksperimentālie dati un iegūts pozitīvs vērtējums datu izmantošanai.

#### **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 statiskās 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.

## 7. Literatūra

1. Valery V. Vasiliev & Evgeny V. Morozov, *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, Elsevier, 2001.
2. M. Kleinhofs, „Investigation of Static Strength and Fatigue of Composite Material Used in Aircraft Structure”, PhD thesis, Riga. 1983
3. F L Matthews, G A O Davies, D Hitchings, C Soutis, *Finite Element Modeling of Composite Materials and Structures*, Woodhead Publishing Limited, 2000
4. Yu. Paramonov, „Extended weakest link distribution family and analysis of fiber strength dependence on length”, *Composites, Pt. A*, 39, 2008., 950-955 p.
5. T. Okabe, N. Takeda, “Size effect on tensile strength of unidirectional CFRP composites – experiment and simulation”, *Compos. Sci. Technol.*, 62, 2002., 2053-2064 p.
6. Т Я Кинцис., *Методы статических испытаний армированных пластиков* - Рига, 1972.
7. Andersons J., M. Konig. Dependence of fracture toughness of composite laminates on interface ply orientations and delamination growth direction. To appear in *Composites Science and Technology*.
8. Andersons, J., Limonov V., Mikelsons M., Tamuzs V., Strength and durability of mixed glass-fiber reinforced laminates. *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 30, N 1, - p. 22-29., 1994.
9. Andersons, J., M. Hojo, S. Ochiai, Empirical model for stress ratio effect on fatigue delamination growth rate in composite laminates. *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, - p. 597-604., 2004.
10. Andersons, J., R. Joffe, M. Hojo, S. Ochiai, Fiber fragment distribution in a single-fiber composite tension test. *Composites B*, Vol. 32, No. 4, - p. 323-332., 2001.
11. Andersons, J., R. Joffe, M Hojo, S. Ochiai, Glass fiber strength distribution determined by common experimental methods. *Composites Science and Technology*, Vol. 62, - p. 131-145., 2002.
12. Andersons, J., V. Tamuzh, Fiber and interface strength distribution studies with the single fiber composite test. *Composites Science and Technology*, 48, - p. 57-63, 1993.

13. Daniels, H.E., The distribution of bundle strength under general assumptions. Paper presented at the First World Congress of the Bernoulli Society, Tashkent, USSR, September 1986, - p. 3.
14. Gucer, D., J. Gurland., Comparison of the statistics of two fracture modes. - J. Mech. Phys. Solids, vol. 10, - p. 365-373., 1962
15. Kroll L., W. Hufenbach., A physically based failure criterion for laminated composites. Riga, MCM, - - Vol. 3 5, N 4. - p. 413-422., 1999.
16. Fukuda, H., Miyazawa, T. and Tomatsu, H.. Strength distribution of monofilaments used for advanced composites. In Proc. 9th Int. Conf. on Composite Materials (ICCM/9), Madrid, 12-16 July 1993 Vol. 6, Composite Properties and Applications. University of Zaragoza, Woodhead Publishing Ltd., pp. 687-694., 1993
17. Tarnopol'skii, Yu.M. and Kincis, T.Ya.. Static Test Methods for Composites. Van Nostrand Reinhold, New York., 1985
18. Tikhomirov, P.V. and Yushanov, S.P.. Stress distribution after the fracture of fibers in a unidirectional composite. In Mech. Composite Mater., Riga, pp. 28-43 (in Russian), 1980
19. Lilholt H., Andersen S.I. Multiple cracking in carbon-fiber/epoxy laminates and prestressing of the fibers. MCM Oct – 95. 1995.
20. Phoenix, S.L., H.M. Taylor. The asymptotic strength of a general fiber bundle. -,4dv. Appl. Prob. vol. 22, - p. 200-216., 1973.
21. Pitt, R.E., S.L.Phoenix.. Probability distributions for the strength of composite materials, III and N. Int. J. Fracture, v. 20, 291-311 and v.22, - p. 243-276., 1982
22. Клейнхоф М., Применение полимерных и композитных материалов в конструкциях транспортных средств - Рига, РАУ, 1997.
23. Клейнхоф М. А. Особенности повреждений и ремонта авиационных конструкций с использованием композитных материалов./ В сб. Ученые записки механического факультета Рижского Авиационного университета. – Рига: РАУ, 1996.
24. H. Akaike, A New look at the statistical model identification, IEEE Trans. Auto. Cont., AC-19 (6),- 1974.
25. Agarwal B D& Brotman L J, Alalysis and Performance of Fiber Composites (2<sup>nd</sup> Edition), New York, Wiley, 1990.
26. Vinson J R&Sierakowski R L, The Behaviour of Structures Composed of composite Materials, Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1986

27. Matthews F L& Rawlings R D, Composite Materials: Engenieering and Science, Cambridge, Woodhead, 1990
28. Andersen, S.L, Grusheckis I, Korsgaard J., The effect of overloads on the residual strength and life of laminated GRP. Riga, MCM, - Vol. 35, N 6. - p. 701-706. 1999.
29. В.В Васильев, В.Д. Протасов и др., Композиционные материалы. Справочник./ – М.: Машиностроение, 1990.
30. Agarwal, B.D. ; Broutman, L.J., Analysis and performance of fiber composites., L.J. Broutman and Associates, Ltd., Chicago, IL, 1990
31. D Hull, T.W Clyne., An Introduction to Composite Materials., 2 edition , Cambridge Solid State Science Series., 1996
32. A.J. Kinlocha, Y. Wanga, J.G. Williamsa and P. Yaylaa., The mixed-mode delamination of fibre composite materials., Imperial College of Science, Technology and Medicine, Department of Mechanical Engineering., 1992
33. Chung., Deboarah D.L., Carbon fiber composites., Butterworth-Heinemann., 1994

## 8. Pielikums

Aprēķinu programma 1

```
clear
load D:\aa.txt
a=aa(:,1);% parvietojuums
b=aa(:,3);% elastibas modulis
c=aa(:,2);% krit spriegums 1 diegam
d=0:0.00001:0.028;
f=length(d);
c1=sort(c,'descend');
%aprekina spriegumu pieaugumu pec kritiskas sprieguma sasniešanas
e1=d*106.493*10^3;% aprekinatais kopejais spriegums parauga ar 25 elementiem
k=25;
for n=1:f
    for i=k:-1:1
        if (e1(n))>c1(i);
            e2(1,n:f)=(e1(n))/i;
            c1(i)=0;
            % e1=e1+e2;
            if sum(c1)==0
                e1(n:f)=0;
            end
        else e1(n)=e1(n);
        end
    end
end
end

e3=e2+e1;
figure
grid on
hold on
```

```

l=max(c);% skiedras izturibas maksimums
m(1:f)=l(1,1);
e4=m-e2;
plot (e4)
d1=d';
e44=e4';
e33=e3';
%dlmwrite('saglabajami.txt', d1)
%dlmwrite('saglabajami1.txt', e33)
%dlmwrite('saglabajami2.txt', e44)

```

## Aprēķinu programma 2

```

clear
load F:\aa.txt
a=aa(:,1);% parvietojuums
b=aa(:,3);% elastibas modulis
c=aa(:,2);% krit spriegums 1 diegam
d=0:0.0001:0.035;
f=length(d);
e=d*106.493*10^3;% aprekinatais kopejais spriegums parauga ar 25 elementiem
%aprekina spriegumu pieaugumu pec kritiskas deformacijas sasniegšanas
c;
g=c;
k1=length(c)
l=sum(c,1);% summarais izturibas potencials (resurs)
m(1:f)=l;
hold on
grid on
f1=length(m);
for n1=1:f1
    for i1=1:25
        if d(n1)>a(i1);

```

```

        m(1,n1:f1)=m(1,n1:f1)-g(i1);
        g(i1)=0;
        else m(n1)=m(n1);
    end
end
end
end
for n=1:f
    for i=1:25
        if d(n)>a(i);
            e(1,n:f)=e(1,n:f)+c(i);
            c(i)=0;
        else e(n)=e(n);
        end
    end
end
end
hold on
plot (e)
e33=e';
e44=m';

dlmwrite('saglabajamipagar1.txt', e33)
dlmwrite('saglabajamipagar2.txt', e44)

```

### Aprēķinu programma 3

```

clear
clc
load D:\bb.txt
a(:,1)=bb(:,1);% parvietojuums
a(:,2)=bb(:,2);% elastibas modulis
a(:,3)=bb(:,3);% kritiskais spriegums 1 diegam
d=0:0.00001:0.015; %relatavais parvietojuums
j= 164576.7; %sagaidamais elastabas modulis
f=length(d);
format short

```



```

hold on
for i=1:25
    for n=1:f
        b(i,n)=j*d(n);% parvietojumu matrica
    end
end

grid on
for n=2:f
    for i=1:25
        if d(n)>=a(i,1);% nosacijums ja sasniegts kritiskais pagarinajums
            b(i,n:f)=j*d(n)+j*d(n);
            a(i,1)=1000000000;
            a(i,3)=1000000000;
        end
        c=sum(b,1)/25;
        m=n-1;
        if c(m)>=a(i,3);% nosacijums ja sasniegts kritiskais spriegums
            b(i,n:f)=j*d(n)+j*d(n);
            a(i,3)=1000000000;
            a(i,1)=1000000000;
        end
    end
end
c=sum(b,1)/25;
plot (c)%ja pieliek noteiktu stiepes speku tad skiedra rodas sadi spriegumi

d1=d';
c1=c';
%dlmwrite('c:\rezultati\viskopabbezpag3.txt', c1)
dlmwrite('c:\rezultati\viskopa3.txt', c1)

```

## Ekspierimentālo datu statistika 15mm

	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All
.0140000<x<=.0160000	2	2	8.00000	8.0000	8.00000	8.0000
.0160000<x<=.0180000	6	8	24.00000	32.0000	24.00000	32.0000
.0180000<x<=.0200000	3	11	12.00000	44.0000	12.00000	44.0000
.0200000<x<=.0220000	3	14	12.00000	56.0000	12.00000	56.0000
.0220000<x<=.0240000	7	21	28.00000	84.0000	28.00000	84.0000
.0240000<x<=.0260000	2	23	8.00000	92.0000	8.00000	92.0000
.0260000<x<=.0280000	0	23	0.00000	92.0000	0.00000	92.0000
.0280000<x<=.0300000	0	23	0.00000	92.0000	0.00000	92.0000
.0300000<x<=.0320000	2	25	8.00000	100.0000	8.00000	100.0000
Missing	0	25	0.00000		0.00000	100.0000

Frequency table: **kritiska deformacija** K-S d=.12681, p> .20; Lilliefors p> .20

	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All
1700.000<x<=1800.000	0	0	0.00000	0.0000	0.00000	0.0000
1800.000<x<=1900.000	3	3	12.00000	12.0000	12.00000	12.0000
1900.000<x<=2000.000	4	7	16.00000	28.0000	16.00000	28.0000
2000.000<x<=2100.000	3	10	12.00000	40.0000	12.00000	40.0000
2100.000<x<=2200.000	4	14	16.00000	56.0000	16.00000	56.0000
2200.000<x<=2300.000	5	19	20.00000	76.0000	20.00000	76.0000
2300.000<x<=2400.000	2	21	8.00000	84.0000	8.00000	84.0000
2400.000<x<=2500.000	0	21	0.00000	84.0000	0.00000	84.0000
2500.000<x<=2600.000	2	23	8.00000	92.0000	8.00000	92.0000
2600.000<x<=2700.000	2	25	8.00000	100.0000	8.00000	100.0000
Missing	0	25	0.00000		0.00000	100.0000

Frequency table: **kritiskais spriegums** K-S d=.08940, p> .20; Lilliefors p> .20

## 40 mm

	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All
.0080000<x<=.0090000	0	0	0.00000	0.0000	0.00000	0.0000
.0090000<x<=.0100000	1	1	4.00000	4.0000	4.00000	4.0000
.0100000<x<=.0110000	1	2	4.00000	8.0000	4.00000	8.0000
.0110000<x<=.0120000	3	5	12.00000	20.0000	12.00000	20.0000
.0120000<x<=.0130000	6	11	24.00000	44.0000	24.00000	44.0000
.0130000<x<=.0140000	3	14	12.00000	56.0000	12.00000	56.0000
.0140000<x<=.0150000	6	20	24.00000	80.0000	24.00000	80.0000
.0150000<x<=.0160000	2	22	8.00000	88.0000	8.00000	88.0000
.0160000<x<=.0170000	3	25	12.00000	100.0000	12.00000	100.0000
Missing	0	25	0.00000		0.00000	100.0000

Frequency table: **kritiska deformacija** K-S d=.07684, p> .20; Lilliefors p> .20

	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All
1400.000<x<=1600.000	0	0	0.00000	0.0000	0.00000	0.0000
1600.000<x<=1800.000	3	3	12.00000	12.0000	12.00000	12.0000
1800.000<x<=2000.000	4	7	16.00000	28.0000	16.00000	28.0000
2000.000<x<=2200.000	3	10	12.00000	40.0000	12.00000	40.0000
2200.000<x<=2400.000	8	18	32.00000	72.0000	32.00000	72.0000
2400.000<x<=2600.000	7	25	28.00000	100.0000	28.00000	100.0000
Missing	0	25	0.00000		0.00000	100.0000

Frequency table: **kritiskais spriegums** K-S d=.16305, p> .20; Lilliefors p<.15

## Akustiskās emisijas signāla pieraksta piemērs

"(FILE: I:p1.dta)"

"(TEST START DATE & TIME)"

"(Fri Feb 2 10:12:20 2008)"

"(COMMENTS)"

"(MISTRAS-2001 DATA ACQUISITION TEST)"

"(ACTIVE AE DATA SET PARAMETERS)"

"(DDD""HH""MM""SS.mmmuuun)"	"(CH)"	"(RISE)"	""(COUNTS)"	""(ENERGY)"
0 00:00:00.7071700	1	78	21	39
0 00:00:00.7094355	1	1	1	0
0 00:00:00.7098960	1	1	1	0
0 00:00:00.7133570	1	10	23	47
0 00:00:00.7164583	1	8	2	0
0 00:00:00.7428985	1	18	4	1
0 00:00:00.7621287	1	32	18	9
0 00:00:00.7684607	1	1	1	0
0 00:00:00.7723467	1	17	2	0
0 00:00:00.7738497	1	13	4	1
0 00:00:00.7750327	1	60	1	0
0 00:00:00.7763390	1	1	5	1
0 00:00:00.7784277	1	22	3	0
0 00:00:00.7825013	1	6	2	0
0 00:00:00.7837197	1	1	1	0
0 00:00:00.7855160	1	28	4	1
0 00:00:00.7872150	1	19	15	7
0 00:00:00.7886960	1	8	1	0
0 00:00:00.7928313	1	12	7	3
0 00:00:00.7939830	1	1	6	2
0 00:00:00.7954523	1	66	18	8
0 00:00:00.7972010	1	112	44	257
0 00:00:00.7984795	1	1	1	0
0 00:00:00.7989523	1	1	2	0
0 00:00:00.7996685	1	7	1	0
0 00:00:00.8001667	1	11	1	0
0 00:00:00.8013105	1	75	19	7
0 00:00:00.8026635	1	88	34	51
0 00:00:00.8038473	1	22	4	1
0 00:00:00.8043877	1	18	3	0
0 00:00:00.8064877	1	17	3	0
0 00:00:00.8089153	1	27	14	6
0 00:00:00.8098605	1	50	4	1
0 00:00:00.8110327	1	19	2	0
0 00:00:00.8118880	1	17	2	0
0 00:00:00.8133867	1	1	1	0
0 00:00:00.8143897	1	86	17	3
0 00:00:00.8166767	1	1	1	0
0 00:00:00.8173195	1	39	6	1

""(DURATION)""	""(AMP)""	""(AVG FREQ)""	""(ASL)""	""(PCNTS)""	""(THRESHOLD)""	""(RMS)""	""(R-FRQ)""
522	72	40	17	5	40	0.0004	36
1	40	1000	17	1	40	0.0004	0
15	43	67	33	1	40	0.003	0
917	74	25	33	1	40	0.003	24
27	43	74	33	1	40	0.003	53
68	45	59	36	1	40	0.0044	60
493	57	37	36	2	40	0.0044	35
8	41	125	36	1	40	0.0044	0
38	46	53	36	1	40	0.0044	48
81	47	49	36	1	40	0.0044	44
70	44	14	36	1	40	0.0044	0
204	47	25	36	1	40	0.0044	20
78	45	38	36	1	40	0.0044	36
41	42	49	36	1	40	0.0044	29
1	41	1000	36	1	40	0.0044	0
51	51	78	36	2	40	0.0044	87
355	55	42	36	1	40	0.0044	42
20	43	50	36	1	40	0.0044	0
159	53	44	36	1	40	0.0044	41
247	46	24	36	1	40	0.0044	20
417	59	43	36	5	40	0.0044	37
814	90	54	36	7	40	0.0044	53
2	41	500	36	1	40	0.0044	0
38	42	53	36	1	40	0.0044	27
8	40	125	36	1	40	0.0044	0
20	42	50	49	1	40	0.0192	0
230	61	83	49	7	40	0.0192	77
535	76	64	49	7	40	0.0192	60
59	51	68	49	2	40	0.0192	54
49	44	61	49	1	40	0.0192	65
80	45	38	49	1	40	0.0192	32
324	56	43	49	2	40	0.0192	40
168	48	24	49	2	40	0.0196	17
40	45	50	49	1	40	0.0196	48
42	43	48	49	1	40	0.0196	40
31	41	32	49	1	40	0.0196	0
249	51	68	49	8	40	0.0196	55
1	40	1000	49	1	40	0.0196	0
102	50	59	49	3	40	0.0196	48

""(I-FRQ)""	""(SIG- STRNGTH)""	""(ABS-ENERGY)""
64	2.48E+05	4.67E+04
1000	1.49E+02	1.55E+00
1000	1.21E+03	1.28E+01
100	3.00E+05	4.51E+04
125	2.02E+03	1.88E+01
56	6.27E+03	7.22E+01

63	5.95E+04	1.52E+03
1000	5.55E+02	4.74E+00
59	4.01E+03	5.32E+01
77	7.00E+03	7.94E+01
17	3.86E+03	3.19E+01
1000	9.66E+03	8.77E+01
45	6.17E+03	6.66E+01
167	2.50E+03	2.03E+01
1000	1.53E+02	1.70E+00
71	6.84E+03	1.32E+02
53	4.99E+04	1.20E+03
125	1.66E+03	1.64E+01
83	2.04E+04	4.49E+02
1000	1.30E+04	1.21E+02
76	5.08E+04	1.36E+03
63	1.61E+06	1.75E+06
1000	2.01E+02	2.12E+00
1000	2.61E+03	2.17E+01
143	5.55E+02	4.48E+00
91	1.56E+03	1.48E+01
93	4.91E+04	2.04E+03
80	3.24E+05	7.27E+04
91	7.41E+03	1.26E+02
56	4.35E+03	4.83E+01
59	5.04E+03	4.51E+01
74	4.28E+04	1.29E+03
40	1.14E+04	1.39E+02
53	3.56E+03	3.95E+01
59	2.08E+03	1.74E+01
1000	1.67E+03	1.20E+01
93	2.39E+04	3.37E+02
1000	1.22E+02	1.28E+00
77	8.67E+03	1.21E+02

## Mikroparaugu stiprības izmēģinājumu pieraksta paraugs

Date	27.11.2009				
Clock time	15:06:37				
Specimen number	588				
Pre-load	0 N				
Test speed	1 mm/min				
Work at break	Unknown				
Work at force maximum.	7.10883 Nmm				
Force at break	Unknown				
Force maximum.	90985.4 MPa				
max. extension	10 mm				
Test time	Abs. crossh.	Nominal	strain	strain	Standard force
s	mm	mm	mm	%	N
0.0196484	309.466	-5.16E-06	-0.0001	-0.192294	
0.0396484	309.466	-5.16E-06	-0.0001	-0.1921	
0.0996484	309.466	-5.16E-06	-0.0001	-0.192108	
0.199648	309.466	-5.16E-06	-0.0001	-0.192488	
0.309648	309.466	-5.16E-06	-0.0001	-0.192085	
0.409648	309.466	9.45E-05	0.001889	-0.192744	
0.519648	309.467	0.00079194	0.015839	-0.190967	
0.629648	309.471	0.00507637	0.101527	-0.191123	
0.739648	309.472	0.00637167	0.127433	-0.189641	
0.839648	309.474	0.00766696	0.153339	-0.188554	
0.949648	309.476	0.0102575	0.205151	-0.189121	
1.04965	309.479	0.0128481	0.256963	-0.188756	
1.15965	309.48	0.0136452	0.272905	-0.18767	
1.25965	309.481	0.0150402	0.300803	-0.188143	
1.36965	309.483	0.0165347	0.330695	-0.187158	
1.46965	309.485	0.0186271	0.372543	-0.187856	
1.57965	309.487	0.0207195	0.414391	-0.186374	
1.67965	309.488	0.0220148	0.440297	-0.186226	
1.78965	309.49	0.0240076	0.480152	-0.18625	
1.88965	309.492	0.0259007	0.518014	-0.185295	
1.99965	309.493	0.0270964	0.541927	-0.183976	
2.09965	309.496	0.0297866	0.595732	-0.183472	
2.20965	309.499	0.0325765	0.651529	-0.183643	
2.30965	309.5	0.0335728	0.671457	-0.182067	
2.41965	309.5	0.0338718	0.677435	-0.182618	
2.51965	309.502	0.0355656	0.711312	-0.181408	
2.62965	309.504	0.0379569	0.759138	-0.180896	
2.72965	309.506	0.0396508	0.793015	-0.181167	
2.83965	309.507	0.0414442	0.828885	-0.179522	
2.93965	309.509	0.0431381	0.862762	-0.178894	
3.04965	309.511	0.0451308	0.902617	-0.178428	
3.14965	309.513	0.0466254	0.932508	-0.177893	
3.25965	309.516	0.0501128	1.00226	-0.17697	

## Sarežģīti armēto paraugu sloojumu mērijumu pieraksts

MTS793|MPT|ENU|1|2|.|/:|1|0|0|A

Data Acquisition			Time:	10.30371	Sec
322 Displacement	322 Force	Time			
mm	N	Sec			
0.000626168	-98.4771	0.057373			
0.000538001	-97.2237	0.067383			
0.00127852	-98.4369	0.077393			
0.001767426	-97.5309	0.087402			
0.000706766	-99.6363	0.097412			
0.000768339	-98.4336	0.107422			
0.001026907	-99.1913	0.117432			
0.001623209	-96.4011	0.127441			
0.000148513	-98.156	0.137451			
0.000361668	-96.3736	0.147461			
-0.000340119	-98.1998	0.157471			
0.001699511	-97.7919	0.16748			
0.000944264	-97.5038	0.17749			
0.001158032	-96.983	0.1875			
-0.000162274	-97.1627	0.19751			
0.002150163	-96.9113	0.20752			
0.000909692	-95.4822	0.217529			
0.001219606	-95.2236	0.227539			
-0.000189319	-94.9323	0.237549			
0.000520409	-93.7814	0.247559			
0.001168874	-94.3965	0.257568			
0.001552839	-92.6314	0.267578			
0.001809361	-93.9869	0.277588			
0.002402799	-91.0277	0.287598			
0.00084055	-91.4381	0.297607			
0.000905192	-90.3471	0.307617			
0.000101668	-89.5136	0.317627			
0.000830936	-91.1291	0.327637			
0.001199149	-88.8274	0.337646			
0.002773058	-86.7316	0.347656			
0.001927394	-85.9457	0.357666			
0.002110683	-84.9692	0.367676			
0.001701147	-84.4817	0.377686			
0.002938754	-84.3145	0.387695			
0.001993263	-82.9422	0.397705			
0.001019543	-81.3367	0.407715			
0.00258486	-80.7802	0.417725			
0.001020566	-79.4689	0.427734			
0.002813153	-76.0651	0.437744			
0.001385915	-77.3352	0.447754			
0.001670258	-76.6236	0.457764			
0.002302154	-73.9734	0.467773			
0.00230154	-73.5486	0.477783			
0.003187912	-70.7077	0.487793			
0.003721157	-70.3608	0.497803			
0.003916106	-67.5213	0.507813			