



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

**"Paātrināta rūpnieciska metodika sarežģītas formas pultrūdētu kompozītu profilu izturības pret apkārtējās vides agresīviem faktoriem novērtēšanai"**

**Autors: Latvijas Universitātes aģentūra  
"LU Polimēru mehānikas institūts"  
Izstrādāta: 2013.gada decembrī**

Metodika izstrādāta ar ERAF darbības programmas „Uzņēmējdarbība un inovācijas” prioritātes 2.1. „Zinātne un inovācijas” pasākuma .1.prioritātes "Zinātne un inovācijas" 2.1.1.pasākuma "Zinātne, pētniecība un attīstība" 2.1.1.1.aktivitāti "Atbalsts zinātnei un pētniecībai" projekta „Jaunas stiprinājuma sistēmas no pultrūdētiem kompozītmateriāliem izstrāde un pielietošana konstrukcijas elementos ar paaugstinātu nestspēju” finansējuma atbalstu.

## Satura radītājs

Anotācija.....	3
Аннотация .....	4
Арзīmējumi .....	5
Ievads.....	7
1. Literatūras apskats .....	9
1.1. Apkārtējās vides faktoru ietekme uz PKM īpašībām .....	9
1.2. PKM mitruma sorbcija un tās ietekme uz īpašībām.....	11
1.3. Pultrūdētā PKM struktūras īpatnības .....	14
1.4. Pultrūdētā PKM sijas stingums .....	14
2. Metodikas apraksts .....	18
3. Metodikas aprobācija. Dubult-T tipa sija .....	22
3.1. Plakanu paraugu izgriešana izpētei .....	22
3.2. Pultrūdētā PKM mitruma sorbcija .....	22
3.2.1. Pultrūdētā PKM difūzijas koeficientu un uzbriešanas noteikšana.....	22
3.2.2. Mitruma sorbcijas modelēšana profilā.....	26
3.3. Absorbētā mitruma ietekme uz pultrūdētā PKM īpašībām .....	28
3.3.1. Pultrūdētā PKM elastības moduļi un stiprība .....	28
3.3.2. Termiskās izplešanās koeficienti .....	31
3.3.3. Sijas stingums .....	32
3.3.4. Sijas stinguma izpēte ar galīgo elementu metodi.....	34
3.4. Cikliskās sasaldēšanas-atsaldēšanas ietekme .....	36
3.4.1. PKM elastības moduļi un stiprība.....	36
3.4.2. Termiskās izplešanās koeficienti .....	38
3.5. Natūrās ekspozīcijas ietekme .....	40
3.5.1. PKM elastības moduļi un stiprība.....	41
3.5.2. Termiskās izplešanās koeficienti .....	42
4. Metodikas aprobācija. Kārbveida sija .....	44
4.1. Plakanu paraugu izgriešana izpētei .....	44
4.2. Mitruma sorbcija .....	44
4.2.1. Pultrūdētā PKM difūzijas un uzbriešanas koeficientu noteikšana.....	44
4.2.2. Profila mitruma sorbcijas modelēšana.....	46
4.3. Apsorbētā mitruma ietekme uz PKM īpašībām .....	49
4.3.1. Pultrūdētā PKM elastības moduļi un stiprība .....	49
4.3.2. Termiskās izplešanas koeficienti .....	50
4.3.3. Sijas stingums .....	53
4.3.4. Sijas stinguma izpēte ar galīgo elementu metodi.....	55
Kopsavilkums .....	57
Literatūra .....	58
List of figures .....	61
List of tables .....	64

## Anotācija

Pultrūzijas metodes parādīšanās un straujā attīstība pēdējā desmitgadē ļauj iegūt garus profilus ar uzdotu šķērsriezuma formu, ko raksturo augsts īpatnējais stingums un stiprība, ka arī izturība pret koroziju. Pultrūdēto profilu plašs pielietojums būvniecības konstrukciju elementos, it īpaši, zem klajas debess, prasa to ilglaicīgās pielietojamības novērtējumu pie klimatisko faktoru (temperatūra, mitrums) un slodzes iedarbības. Vispirms ir svarīgi novērtēt materiāla mehānisko raksturlielumu izmaiņas laikā agresīvāko faktoru iedarbības rezultātā bez slodzes. Pultrūdēto profilu mehānisko īpašību izmaiņas pamatā ir fizikāli-ķīmiskie procesi komponentēs un to robežslāņos. Lai tiktu novērtēta to intensitāte, nepieciešams veikt kompozīta profilu struktūras pētījumus. Darbā ir veikta reālo pultrūdēto profilu stinguma un stiprības izmaiņas eksperimentāli-teorētiskā izpēte Latvijas klimatisko faktoru iedarbībā.

Pamatojoties uz literatūras analīzi ir secināts, ka visagresīvākais faktors kompozītmateriāliem ir apkārtējās vides mitrums. Mitruma (ūdens) ilglaicīga iedarbība uz tiem izraisa mitruma satura palielināšanos, kas savukārt negatīvi ietekme mehānisko īpašību raksturlielumus.

Darba galvenā daļa ir mitruma izraisīto īpašību izmaiņu novērtēšanas metodika pultrūdētā profilā ar sarežģītu šķērsriezumu. Metodika balstīta uz šķērsriezuma virtuālo sadalījumu vienkāršos elementos, kuriem ir zināms difūzijas uzdevuma analītiskais atrisinājums. Metodikas pielietojamība ir apstiprināta ar reāliem piemēriem: dubult-T tipa profils no stikla plastikāta un kārbveida profils no oglekļa plastikāta, veicot galīgo elementu metodes (GEM) modelēšanas un analītiskā atrisinājuma rezultātu salīdzināšanu.

Profilu eksperimentālā izpēte parādīja, ka neskatoties uz to ilglaicīgu (~2 gadu) izturēšanu ūdenī, stinguma samazināšanās netika novērota, bet stiprības liecē samazināšanās nepārsniedz 6%, kas atrodas eksperimentālo datu izkliedes robežās.

Darba rezultāti var būt noderīgi un rekomendēti arhitektiem, inženieriem-projektētājiem, būvinženieriem, konstruktoriem, kas strādā celtnu rekonstrukciju un remonta sfērā.

## Аннотация

Появление и быстрое развитие в последнее десятилетие высокотехнологичного метода пултрузии позволяет получать длинные профили с заданной формой сечения, характеризующиеся высокой удельной жесткостью и прочностью, а также стойкостью к коррозии. Широкое применение пултрузионных профилей (ПП) в качестве конструктивных элементов в строительстве, в частности, на открытых площадках, требует оценки их долговечности в условиях воздействия климатических факторов (температуры, влажности) под нагрузкой. Первоначальным этапом является оценка изменения показателей механических свойств ПП во времени в условиях воздействия наиболее агрессивных факторов окружающей среды без нагрузки. Чтобы оценить интенсивность воздействия факторов необходимы структурные исследования пултрузионных композиционных материалов. В настоящей работе проведено экспериментально-теоретическое исследование изменения жесткости и прочности реальных ПП в условиях воздействия климатических факторов Латвии.

На основе Обзора Литературы выявлено, что наиболее агрессивным фактором для пултрузионных композиционных материалов является влажность окружающей среды. Длительное воздействие влажности (воды) на ПП приводит к увеличению в нем влагосодержания, что в свою очередь, вызывает ухудшение показателей механических свойств.

Основной частью работы является Методика оценки влагосодержания в ПП сложного сечения путем его виртуального разделения на простые элементы, для которых известно аналитическое решение задачи диффузии. Применимость Методики доказана на реальных Примерах: двутавровом профиле из стеклопластика (глава 3) и коробчатом профиле из углестклопластика (глава 4) путем сравнения результатов моделирования МКЭ и аналитического расчета.

Экспериментальные исследования ПП показали, что несмотря на их длительную (~2 лет) выдержку в воде, уменьшения жесткости не выявлено, а уменьшение прочности (на изгиб) не превышает 6%, что находится в пределах разброса экспериментальных данных.

Результаты работы могут быть полезны и рекомендованы для архитекторов инженеров-проектировщиков, инженеров-строителей, конструкторов, работающих в сфере реконструкции и ремонта зданий.

## Apzīmējumi

GE – galīgais elements

LTIK – lineāras termiskās izplešanās koeficients

GEM – galīgo elementu metode

PKM – polimēru kompozītmateriāli

$A$  – parauga šķērsriezuma laukums

$a$  – parauga sijas sienas biezums

$b$  – parauga platumš

$C$  - siltumietilpība

$c$  – mitruma koncentrācija

$D$  – difūzijas koeficients

$E_{app}$  – šķietamais elastības modulis liecē

$E_L$  – garenvirziena elastības modulis stiepiē

$F^r$  - sagraušanas spēks

$G_{LT}$  – bīdes modulis PKM slāņu plaknē

$G_{TH}$  - bīdes modulis PKM plaknē, kas ir perpendikulāra slāņiem

$h$  – parauga biezums

$I$  – inerces moments

$k$  – nobīdes korekcijas faktors

$k_1$  un  $k_2$  – vertikālo un horizontālo elementu daudzums

$L$  – laiduma garums

$l$  – parauga garums

$P$  – pieliktā slodze

RH – relatīvais mitrums

$R_g$  – universālā gāzes konstante

$r$  – rotācijas rādiuss

$s_1$  un  $s_2$  – vertikālo un horizontālo elementu laukumi

$T$  – absolūtā temperatūra

$T_g$  – stiklošanās temperatūra

$t$  – laiks

$U_d$  – aktivācijas enerģija

$v_p$  – poru, piesātinātu ar ūdeni, tilpuma saturs

$w$  – mitruma saturs

$w_\infty$  - robežas mitruma saturs

$w_m$  – mitruma saturs PKM saistvielā

$\alpha$  – lineāras termiskās izplešanās koeficients

$\Delta$  – vidējā mitruma satura aprēķina kļūda

$\delta$  – izliece laiduma vidū

$\delta_{flex}$ ;  $\delta_{shear}$  – izliece lieces un bīdes deformāciju gadījumā

$\varepsilon$  - deformācija

$\varepsilon_f^R$  - fiktīvās deformācijas robežvērtība

$\varepsilon_{vres}^T$  – paliekošā deformācija pēc sildīšanas-dzesēšanas

$\lambda$  - siltumvadāmība

$\mu$  - neorganiskas saistvielas masas saturs

$\rho$  - materiāla blīvums

$\sigma$  - spriegums

$\sigma_f$  – fiktīvais spriegums  
 $\sigma_f^R$  – fiktīvā sprieguma robežvērtība  
 $\tau$  – tangenciāls spriegums  
 $\tau_{LT}^R$  – stiprība starpslāņu bīdē  
 $\varphi$  – difūzijas plūsmas blīvums

## Ievads

Pēdējā laikā mūsdienu būvniecības praksē konstrukcijas elementu veidā izmanto nepieciešamā garuma plānsienas sijas no kompozītmateriāliem ar standarta un sarežģītu šķērsriezuma formu, kas tiek izgatavotas ar augsti tehnoloģisku pultrūzijas metodi. Šādu konstrukcijas elementu pielietošana Latvijā, izmantojot tās brīvā dabā, prasa apkārtējās vides faktoru (mitruma, mainīgas temperatūras, saules radiācijas) ietekmes novērtēšanu, kas ir raksturīgi vietējam klimatam. Ņemot vērā, ka faktoru pastāvīgā vai periodiskā ilgstošā iedarbība var novest pie nepieļaujamas fizikāli-mehānisko īpašību degradācijas, nepieciešamas tādas metodikas, kas ļautu paātrināti novērtēt apkārtējās vides faktoru ietekmi uz pultrūdēto kompozītmateriālu sarežģīta profila deformācijas-stiprības raksturlielumiem. Tas veicinās pultrūdēto kompozīta profilu drošu pielietošanu būvniecībā un Latvijas tautsaimniecības infrastruktūrā. Mērķa grupa, kas ir ieinteresēta minēto problēmu risināšanā, ir arī arhitekti, inženieri-projektētāji, inženieri - būvnieki un konstruktori, kas nodarbojas ar ēku renovāciju un rekonstrukciju.

Augstās īpatnējās elastības un stiprības, izturības pret koroziju, un vienkāršas konstrukciju montāžas dēļ pultrūdētie profili arvien vairāk tiek izmantoti būvniecībā, kur tiek veiksmīgi pielietoti vairāk nekā 20 gadus. Izgatavošanas tehnoloģija tiek uzlabota balstoties uz pielietošanas praksi. Tā kā būvniecības konstrukciju elementu izmantošanas ilgums ir 50-100 gadi, tad uz šo brīdi vēl nav sakrāta pietiekami liela pieredze ilggadējai pultrūdēto profilu izmantošanai būvniecībā. To racionālai pielietošanai nepieciešami zinātniski pamatota prognoze, kas parāda mehānisko īpašību raksturlielumu izmaiņu laikā apkārtējās vides ietekmes apstākļos. Te var izmantot ilggadējo pieredzi, kas tika uzkrāta polimēru kompozītmateriālu (PKM) izmantošanā aeroindustrijas un kosmosa tehnikā. Balstoties uz šo pieredzi, svarīgu PKM īpašību kompleksa izmaiņu analīze tiek veikta uz plakaniem paraugiem, kas tiek izgriezti no gatavā izstrādājuma, un kas tiek pakļauti dažādu apkārtējās vides faktoru iedarbībai. Atšķirībā no aeroindustrijas PKM, kuriem visagresīvākais faktors ir temperatūra (tās augstās vērtības un straujas izmaiņas (termošoks) un saules radiācija, būvkonstrukciju PKM agresīvi ir apkārtējās vides relatīvais mitrums RH, ūdens, ka arī ūdens sāļu un skābju šķīdumi [1-5], kas rodas mijiedarbībā ar cementu un betonu. Uz šo brīdi ir publicēti literatūras pārskati par klimatisko faktoru ietekmi uz armētiem polimēriem, kas izgatavoti ar tinuma un presēšanas paņēmieniem [6, 7], tai skaitā tos pielieto būvniecībā betona konstrukcijās [8]. La Saponara [9] sniedz plašu pārskatu par mitruma ietekmi uz armēto plastikātu īpašībām. Mitruma sorbcijas rezultātā PKM mehānisko īpašību raksturlielumi (elastība, stiprums) pasliktinās laikā. Apkārtējās vides temperatūras un mitruma izmaiņas izraisa mitruma koncentrācijas pārdali konstrukciju elementos, izraisot spriegumu lauka izmaiņas. Temperatūras vērtībām pārejot caur nulles punktu, izmainās ūdens fāzes saturs polimēru kompozītmateriālā, kas var izraisīt spriegumu lauku izmaiņu PKM, un rezultātā nepārtrauktības zaudēšanu, elastības un stinguma raksturlielumu pasliktināšanos.

PKM mehāniskie raksturlielumi ir atkarīgi no to veidojošo komponentu satura un īpašībām. Pultrūdētie profili satur vienvirzienā armētus slāņus ar maksimāli iespējamo stiegrošanas koeficientu un slāņus (kurus varētu saukt par paklājiem), kas satur haotiski sadalītas, sasmalcinātas šķiedras vai auduma slāņus. Šādi slāņi tiek izmantoti kā pamatnes profila izgatavošanā un papildus pastiprina PKM. Transversāli izotropo rovinga slāņu un plaknē izotropo paklāja vai auduma mija padara par nepieciešamu izskatīt PKM profilu kā ortotropu. Tā ir atšķirība starp pultrūdēto profilu mehāniku un metālisku izotropo vai koksnes transversāli izotropo profilu mehāniku.

Pultrūdētā PKM mehānisko īpašību pamatraksturlielumi ir elastības modulis un stiprība stiepē (spiedē) stiegrošanas virzienā. Augstas stiprības šķiedru izmantošana ļauj veidot pultrūdētos PKM ar augstu stiprību un relatīvi zemu elastības moduli, t.i., elastīgāku un ar lielāku deformāciju (izlieci) salīdzinājumā ar tēraudu. Pultrūdētā profila liecē attīstās bīdes

deformācija, kas rodas saistībā ar šķiedru zemu elastības moduli un polimēra saistvielas zemu bīdes moduli. Acīmredzami, polimēra saistvielas bīdes moduļa un stiprības izmaiņa ārējo apkārtējās vides faktoru iedarbībā var izraisīt PKM bīdes moduļa un stiprības izmaiņas, un kā sekas arī pultrūdētā profila stinguma un stiprības izmaiņas.

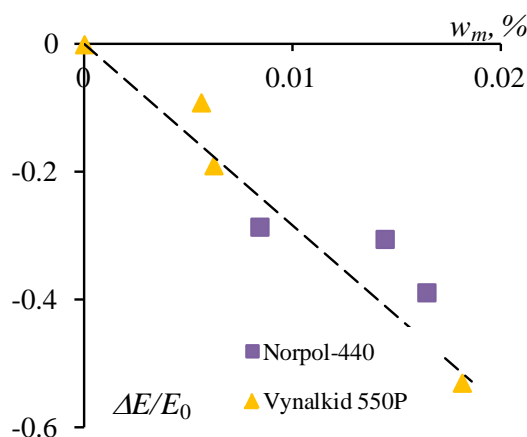
Zinātniskajā literatūrā daudz rakstu veltīts agresīvo vides faktoru ietekmes pētījumiem uz PKM un piedāvāti dažādi paņēmieni to ietekmes prognozēšanai uz izstrādājumu ilglaicīgu ekspluatāciju. Tomēr šie paņēmieni praktiski nav pieejami projektētājiem, tiem bieži ir visai zinātnisks raksturs, tie nav sistematizēti un tajos trūkst praktiskas rekomendācijas inženieriem-projektētājiem un būvētājiem. Metodika, kas tiek izstrādāta, ņemot vērā Baltijas reģiona klimatiskās īpatnības, speciāli tiks paredzēta inženieru-būvētāju un projektētāju lietošanai.



# 1. Literatūras apskats

## 1.1. Apkārtējās vides faktoru ietekme uz PKM īpašībām

Mitrumu galvenokārt absorbē polimēru saistvielas, izraisot fizikāli-ķīmiskās struktūras un īpašību atgriezeniskas (uzbriešana un plastificēšanās) un neatgriezeniskas (hidrolīze) izmaiņas, elastības un bīdes moduļu, stiprības samazināšanos. Mehānisko īpašību pasliktināšanās ir proporcionāla mitruma satura pieaugumam. Piemēram, Att. 1.1 ir parādītas poliesteru saistvielu Norpol-440 [10] un Vinalkid-550 P [11] elastības moduļu izmaiņas atkarībā no mitruma satura  $w_m$ . Palielinoties  $w_m$  par 2%, elastības modulis samazinās par 50%. Polimēra saistvielas uzbriešana, plastificēšanās, kā arī hidrolīze pavājina adhēziju ar armējošām šķiedrām, samazina PKM stiprību [12, 13].



Att. 1.1. Poliestera saistvielu Norpol-440 [10] un Vinalkid-550P [11] elastības moduļu izmaiņa atkarībā no mitruma satura

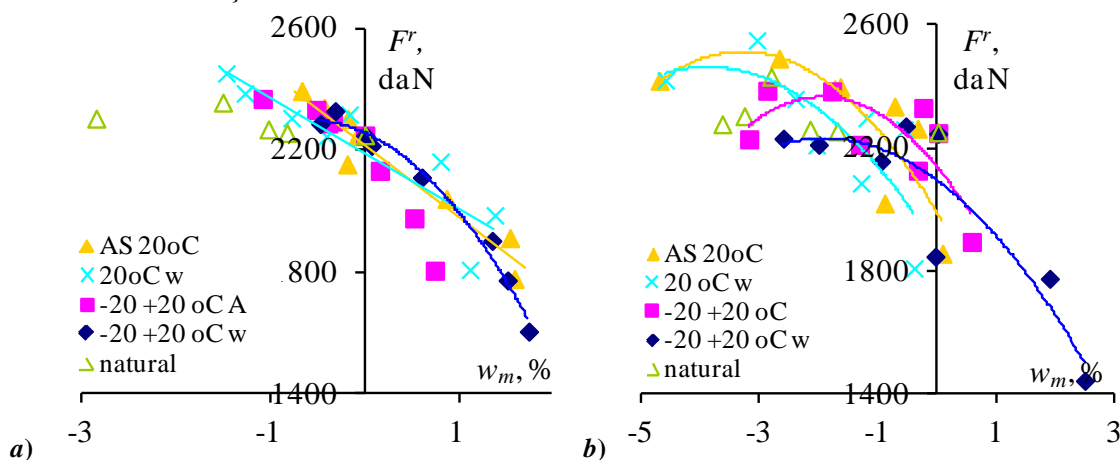
Polimēra saistvielas stāvokļa izmaiņas kompozītā parasti tiek pētītas pēc stiklošanās temperatūras  $T_g$  izmaiņām. Marouani S. u.c. [14] novēroja, ka epoksīda un vinilestera sveķu bāzes ogļplastiem  $T_g$  izmaiņas laikā dažādu apkārtējās vides faktoru iedarbības apstākļos (ilglaicīga atrašanās pie RH=100%, ūdenī un sārmainā vidē pie 20 un 50°C, termociklēšana -20 +20°C diapazonā, u.c.) korelē ar paraugu stiprības izmaiņām stiepē un spiedē. Stiprība tāpat kā  $T_g$  sākumā pieaug, tad samazinās. Autori raksta par divām novecošanās procesa stadijām - pēccietēšanu, kas izraisa  $T_g$  un stiprības vērtību paaugstināšanos, un degradāciju, kas izraisa  $T_g$  un stiprības vērtību samazināšanos. Tomēr ir nepieciešams precizēt, ka fizikāli-ķīmiskie procesi, kas izraisa polimēru saistvielas un attiecīgi arī PKM struktūras un īpašību izmaiņas norit vienlaicīgi un ar dažādiem ātrumiem, kas ir atkarīgi no materiāla sākuma stāvokļa un iedarbības faktora intensitātes. Tāpēc PKM īpašību rādītāji laikā nav monotoni, t.i., tiem piemīt ekstrēmi. Praktiski visi fizikāli-ķīmiskie procesi polimēru saistvielā ir termoaktivēti: paaugstinot temperatūru, to ātrumi palielinās. Kas attiecas uz mitruma ietekmes efektu, tad ir zināma [15] attiecība, kas sasaista polimēra saistvielas  $\Delta T_g$  ar mitruma satura  $w_m$  izmaiņām:

$$w_m = -\frac{1}{BT_g^2} \Delta T_g, \quad (1.1)$$

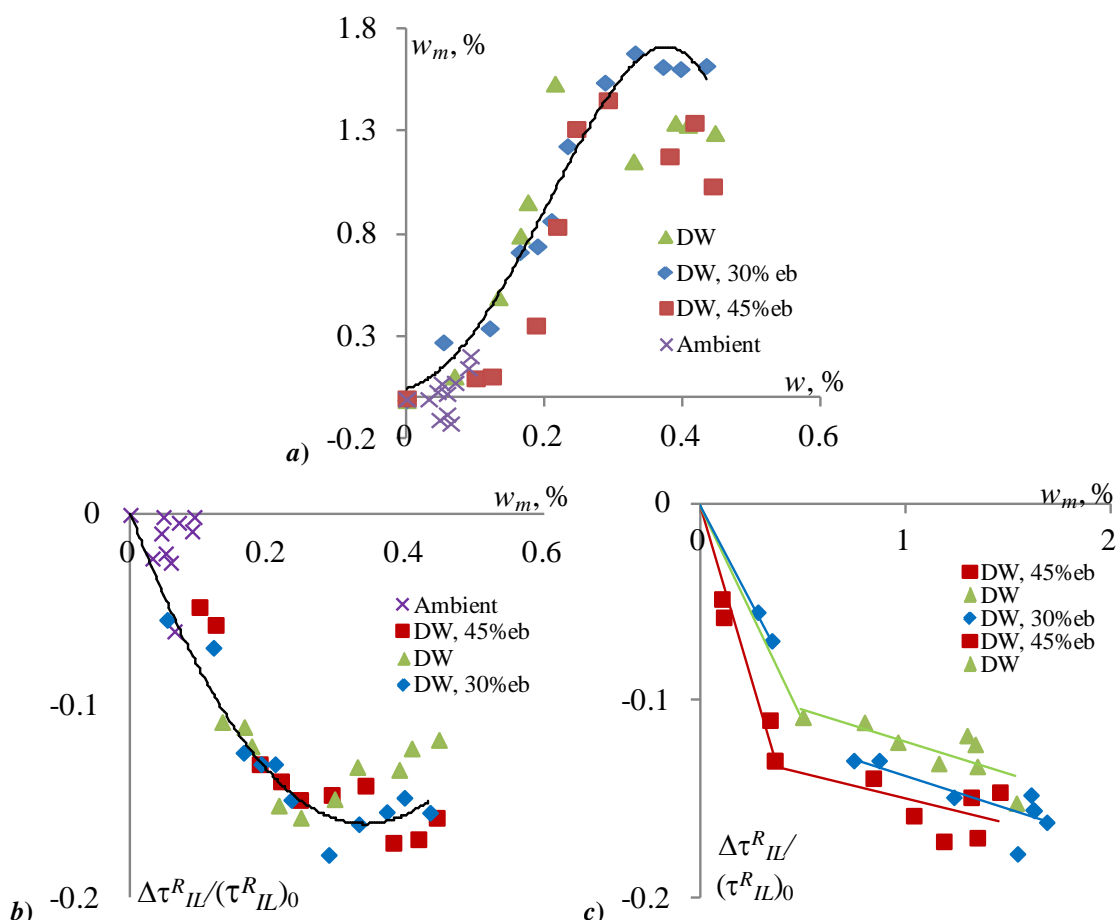
kur konstante  $B \approx (6,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_g^0$  ir polimēra stiklošanās temperatūra relatīvi sākuma stāvoklī.

Izmantojot sakarību (1.1), tiek salīdzināti eksperimentālie rezultāti [14] un atrasta sagraušanas spēka  $F^r$  atkarība no  $w_m$  PKM saistvielā apkārtējās vides faktoru ietekmes rezultātā. Att. 1.2 ir redzams, ka šīs atkarības vairāk (ogļplasta epoksīda saistvielas) vai mazāk (ogļplasta

vinilestera saistvielās) sakrīt. T.i., PKM stiprības izmaiņas laikā apkārtējās vides faktoru iedarbības rezultātā ir sasaistītas vairāk vai mazāk ar mitruma satura izmaiņām saistvielā. Tas ļauj spriest par termociklēšanas ietekmes efektu, ka arī novecošanos dabīgos apstākļos sasaisti ar mitruma satura izmaiņu PKM saistvielā.



Att. 1.2. Sagraušanas spēks epoksīda (a) un vinilestera (b) saistvielās bāzes ogļplastu paraugu stiepē atkarībā no mitruma satura saistvielā, kas aprēķināts pēc stiklošanās temperatūras izmaiņām, izmantojot formulu (1.1) dažādu faktoru iedarbībā [14]



Att. 1.3. Mitruma saturs  $w_m$  saistvielā, kas tika aprēķināts pēc PKM stiklošanās temperatūras izmaiņām, izmantojot formulu (1.1), (a) un PKM stiprības izmaiņa starpslāņu bīdē  $\tau_{LT}$  atkarībā no paraugu masas izmaiņas [16] (b); korelācija starp  $w_m$  un  $\tau_{LT}$  (c)

Izteiksme (1.1) tika izmantota mitruma satura  $w_m$  novērtēšanai pultrūdetā stiklplasta vinilestera saistvielā pēc  $T_g$  izmaiņu rezultātiem PKM paraugu ilglaicīgās noturības ūdenī pie

22 °C [16]. Kā redzams (Att. 1.3),  $w_m$  atkarība no PKM paraugu masas izmaiņas ir lineāra tikai nelielā mitruma izmaiņas diapazonā. Nelinearitāte parādās, kā pie  $w < 0,15\%$ , tā arī pie  $w > 0,35\%$ . Starpslāņu bīdes stiprības  $\tau_{IL}^R$  izmaiņu atkarība no  $w$  (Att. 1.3b) tāpat ir nelineāra šajos  $w$  izmaiņu diapazonos. Grafiku Att. 1.3a,b salīdzināšana ļauj atrast korelāciju starp mitruma saturu PKM saistvielā un tā starpslāņu stiprību bīdē (Att. 1.3c).

Salīdzinot dažāda ķīmiskā sastāva šķidrums iedarbību: kūstošā ledus un sālsūdens, kā arī sārma (pH13), uz pultrūdetām stiklaplasta stieņiem, Al-Salloum u.c. [3] noskaidrojuši, ka kausētais ledus un sārms pie 50°C temperatūras ir visagresīvākie faktori, kas izraisa stiprības izmaiņas stiepē matricas sagrūšanas rezultātā robežslānī ar šķiedrām. Stiprības samazināšanās palielinās laikā un pēc 18 mēnešiem sasniedz 24,5% kausētā ledus un 24,1% sārmā. Elastības modulis izmainās nemonotoni un kritās par 5,1% kausētā ledus un par 4,6% sārmā pēc 6 mēnešiem, pēc tam tas pieaug, t.i., sākuma kritums samazinās līdz 0% kausētā ledus un par 2% sārmā pēc 12 mēnešiem. Tādā veidā elastības moduļa un stiprības izmaiņām laikā piemīt dažāds raksturs. Tas tiek izskaidrots ar faktu, ka elastības moduļa izmaiņas galvenokārt nosaka blīvums, bet stiprība ir atkarīga no nepārtraukuma zušanas PKM struktūrā.

## 1.2. PKM mitruma sorbcija un tās ietekme uz īpašībām

Mitruma satura izmaiņas saistvielā un PKM nenotiek momentāni: sorbcijas procesu ar relatīvi augstu un patstāvīgo ātrumu sākuma etapā un to samazināšanos līdz nullei, sasniedzot piesātinājumu, identificē ar difūziju. Mitruma difūziju izotropā materiālā apraksta ar vienādojumu

$$\varphi = -Dgrad(c), \quad (1.2)$$

kur  $\varphi$  ir difūzijas plūsmas blīvums,  $c$  ir mitruma koncentrācija,  $D$  ir difūzijas koeficients.

Mitruma koncentrācija izstrādājumā (konstrukcijā) atkarība no laika  $t$  un koordinātēm  $x$ ,  $y$ ,  $z$  tiek aprakstīta ar diferenciālo vienādojumu

$$\frac{\partial c}{\partial t} = div(-Dgrad(c)), \quad (1.3)$$

kas ir zināms, kā Fika otrais likums.

Diferenciālvienādojums (1.3) ar uzdotiem sākuma

$$c(t=0) = c_0 \quad (1.4)$$

un pastāvīgiem robežnosacījumiem

$$c(x=0;l) = c(y=0;b) = c(z=0;h) = c_\infty \quad (1.5)$$

sastāda stacionāru difūzijas uzdevumu.

Otrais Fika likums jeb diferenciālais difūzijas vienādojums biežām plāksnēm no ortotropā PKM ar simetrijas asīm  $Ox$ ,  $Oy$  un  $Oz$  [17]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}, \quad (1.6)$$

kur  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  ir ortotropā PKM difūzijas koeficienti gar  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  asīm.

Vienādojuma (1.6) risinājums, ņemot vērā (1.4)-(1.5) ir

$$\frac{c(x, y, z, t) - c_0}{c_\infty - c_0} = 1 - \frac{8}{\pi^3} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k][1 - (-1)^n][1 - (-1)^m]}{knm} \sin\left(\frac{\pi kx}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi ny}{b}\right) \sin\left(\frac{\pi mz}{h}\right) \exp[-\lambda_{k,n,m}^2 t], \quad (1.7)$$

kur  $\lambda_{k,n,m}^2 = \lambda_k^2 + \lambda_n^2 + \lambda_m^2 = \left(\frac{\pi k}{l}\right)^2 D_x + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 D_y + \left(\frac{\pi m}{h}\right)^2 D_z$ .

Vienādojuma (1.7) tilpuma integrālis PKM taisnstūra prizmas veida paraugam ar izmēriem  $l$ ,  $b$ ,  $h$  atrod mitruma saturu paraugā atkarībā no laika

$$w(t) = w_\infty - \frac{8(w_\infty - w_0)}{\pi^6} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k]^2 [1 - (-1)^n]^2 [1 - (-1)^m]^2}{k^2 n^2 m^2} \exp[-\lambda_{k,n,m}^2 t], \quad (1.8)$$

kur  $w_\infty$  ir maksimāls mitruma saturs, kas raksturīgs piesātinājumam.

Vienādojums (1.8) ir pamatā  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  eksperimentālai noteikšanai pēc plakano paraugu izpētes rezultātiem. Mitruma saturs paraugos atkarībā no laika jeb sorbcijas līkne  $w(t)$  tiek noteikta pēc

to masas izmaiņas attiecībā pret sākuma masu  $w(t) = \frac{m(t) - m_0}{m_0}$ .

Vienādojuma (1.8) parametru  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  vērtības var noteikt pēc mērķa funkcijas minimizācijas [18]

$$\sum_i \sum_j (w_i(t_j)_{teor} - w_i(t_j)_{exp})^2, \quad (1.9)$$

kur  $w_i(t_j)_{teor}$  un  $w_i(t_j)_{exp}$  ir mitruma saturs aprēķina un eksperimentālās vērtības laika momentā  $t_j$  mērot  $i$ -tā parauga svāra izmaiņu.

Optimizācijas uzdevuma risinājums ir atkarīgs no  $\frac{D_x}{l^2}$ ,  $\frac{D_y}{b^2}$ ,  $\frac{D_z}{h^2}$  attiecībām, t.i., no izmantoto paraugu izmēriem un izgriešanas virziena. Tā kā PKM  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  vērtības var atšķirties par kārtu un vairāk, tad to novērtēšana pēc vienāda izmēra paraugu izpētes rezultātiem var būt neviennozīmīga.

Shen SH un Springer GS [19] piedāvā izmantot trīs dažādu izmēru paraugus, kur katra parauga veidam tiks eksperimentāli noteikts difūzijas fiktīvais koeficients

$$D^* = R_0^2 \left( \frac{D_x}{l^2} + \frac{D_y}{b^2} + \frac{D_z}{h^2} \right), \quad (1.10)$$

kur  $\frac{1}{R_0^2} = \frac{1}{l^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{h^2}$ .

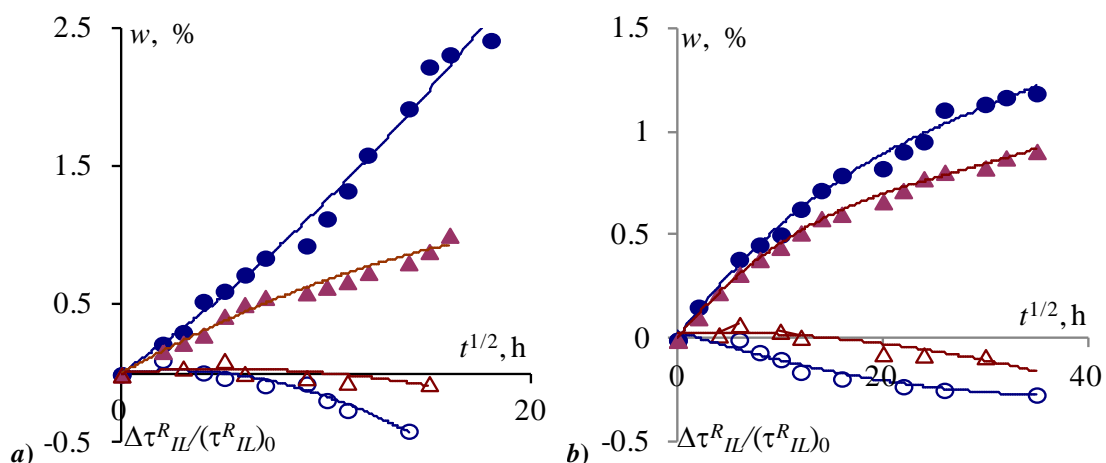
$D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  vērtības ir trīs vienādojumu sistēmas (1.10) atrisinājums pie uzdotiem  $D_i^*$ ,  $l_i$ ,  $b_i$ ,  $h_i$ ,  $i=1, 2, 3$  [20].

Mitruma difūzijas process polimēra saistvielā un PKM ir termoaktivēts, t.i., tā ātrums palielinās, paaugstinot temperatūru. Difūzijas koeficienta atkarība no temperatūras tiek aprakstīta ar Arrēniusa vienādojumu [19-21]

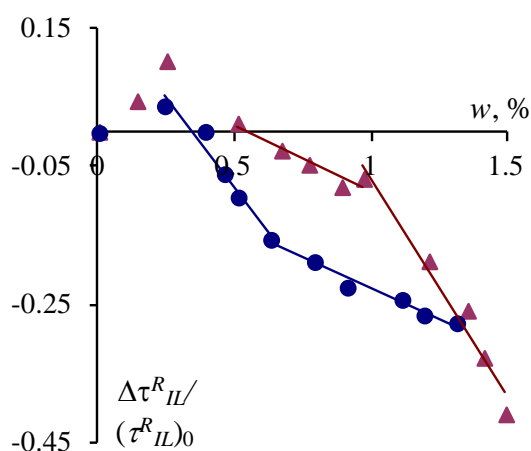
$$D^* = D_0^* \exp\left(-\frac{U_d}{R_g T}\right), \quad (1.11)$$

kur  $D_0^*$  ir konstante, kas tiek noteikta ekstrapolējot  $D^*$  pie  $1/T=0$ ,  $U_d$  ir aktivācijas enerģija,  $R_g=8,31$  J/mol·K ir universālā gāzu konstante,  $T$  ir absolūtā temperatūra.

Eksperimentāli iegūtās PKM sorbcijas līknes raksturs bieži atšķiras no līknes, ko apraksta (1.8) formula, t.i., PKM mitruma sorbciju bieži neapraksta otrs Fika likums. Turklāt mehānisko īpašību raksturlielumu izmaiņas parādās sorbcijas līknes gluduma izmaiņas momentā. Piemēram, vienā un tanī pašā attēlā ir parādītas sorbcijas līknes un stiprības starpslāņu bīdē atkarība no laika stiklaplastam (Att. 1.4a) un ogļplastam (Att. 1.4b). Abu materiālu izgatavošanā izmantota viena un tā pati epoksīda saistviela [22]. Ir redzams, ka paaugstinot temperatūru, Fika difūzijai neraksturīga sorbcija, un stiprības samazināšanās notiek ātrāk. Pētāmā PKM stiprības izmaiņām, atkarībā no mitruma satura  $w$ , ir raksturīgi lineāri apgabali ar vienādu slīpumu, bet dažādos  $w$  diapazonos (Att. 1.4c). Tā kā abi PKM ir izgatavoti no vienādas saistvielas, tad var spriest, ka līkņu identiskais slīpums ir pamatots ar šīs saistvielas īpašību izmaiņu mitruma sorbcijas rezultātā. Stiklaplasta saistvielas degradācija sākas ar šķiedru izskalošanos un adhēzijas pasliktināšanos starp šķiedrām un saistvielu, bet ogļkļa šķiedras pārtrūkst pēc saistvielas degradācijas (Att. 1.5). Sorbcijas līkņu rakstura noteikšana un to salīdzināšana ar mehānisko raksturlielumu izmaiņām laikā sniedz svarīgu informāciju par procesiem, kas notiek materiālā.



Att. 1.4. Mitruma satūra (●,▲) un stiprības pie starpslāņu bīdes (○, Δ) izmaiņas laikā stiklaplastam (a) un ogļplastam (b), izgatavotiem uz epoksīda saistvielas bāzes, pie temperatūras 50 (●,○) un 70 °C (▲,Δ)



Att. 1.5. Stiprība pie starpslāņu bīdes stiklaplastam (▲) un ogļplastam (●) atkarībā no mitruma satūra, kas sasniegts sorbcijas procesā pie RH=95% un 70°C

Destilēta un salsūdens sorbcijas procesa raksturlielumu salīdzināšana epoksīda, vinilestera un poliestera saistvielas gadījumā parādīja, ka pirmās divas ir mazāk pakļautas hidrolizei, t.i., ir vairāk ilgtspējīgas nekā pēdējā [23-25]. Atšķirība starp vinilestera un poliestera saistvielām ir tāda, ka tām ir dažādi cietēšanas reakcijas ātrumi un steriskie faktori: vinilestera saistvielas cietēšanas reakcija notiek lēnāk, kas ļauj iegūt kompaktāku lineāro makromolekulāro ķēžu struktūru ar lielāku konversijas ātrumu [26]. Rezultātā vinilestera saistvielai piemīt mazāks difūzijas koeficients un lielāka ķīmiskā stabilitāte, stingums un stiprība nekā poliestera. Tāpat vinilestera bāzes saistvielas stikla un ogļplastu ķīmiskā stabilitāte ir augstāka. Tomēr, neskatoties uz to, vinilestera saistvielas PKM paraugiem, kas tika iegremdēti ūdenī, mehāniskie raksturlielumi liecē pasliktinās laikā tādā pat mērā kā PKM ar poliestera saistvielu [27].

Lai ierobežotu mitruma iekļūšanu PKM, pultrūdetā profila virsma ir noklāta ar aizsargplēvi - plīvuri. Tomēr plīvurs nespēj pilnībā aizsargāt PKM no mitruma, jo tas nav ūdens necaurlaidīgs. Mitrums diezgan ātri iesūcas PKM profilā caur brīviem (neapstrādātiem) galiem, jo mitruma difūzijas koeficients PKM šķiedru virzienā bieži vien ir par kārtu augstāks nekā to šķērsvirzienā [18, 28]. Mitrums, kas ir iekļuvis PKM profilā, tajā paliek, sakarā ar to, ka plīvurs (mitruma aizsargslānis) ierobežo arī tā desorbciju.

PKM paraugu mitruma sorbcijas (difūzijas) ātrums ir atkarīgs no robežnosacījumiem, t.i., no apkārtējās vides relatīvā mitruma RH [7]. Palielinot RH, palielinās difūzijas koeficienti, sasniedzot vislielākās vērtības pēc paraugu iegremdēšanas ūdenī. Tā kā mitruma difūzijas process ir termoaktīvs, to ir iespējams paātrināt, paaugstinot ūdens temperatūru. Tomēr ir jāatgādina, ka pie paaugstinātās temperatūrās PKM termoreaktīvai saistvielai ir iespējami

papildus cietēšanas, šķiedru atdalīšanas, termo-oksidācijas u.c. procesi. Sakarā ar to, ka dažādu fizikāli-ķīmisko procesu aktivācijas enerģijas ir nevienlīdzīgas, tad liels temperatūras paaugstinājums var izraisīt to procesu dominanci, kuri ir maznozīmīgi lietderīgu PKM īpašību kompleksa izmaiņās konstrukcijas ekspluatācijas apstākļos. Tādēļ temperatūru diapazona izvēli sorbcijas procesu paātrināšanai ir nepieciešams balstīt uz svarīgu PKM ekspluatācijā kompleksu procesu analīzi. Celtniecības pultrūdētiem PKM šādas temperatūras ir  $T = T_g - 10 \div 20$  °C.

### 1.3. Pultrūdētā PKM struktūras īpatnības

Pultrūdēto profilu konstruēšana notiek tā, lai pēc iespējas maksimāli, cik to pieļauj izgatavošanas tehnoloģija, tiktu izmantotas komponentu (augstas stiprības un moduļu šķiedras un saistvielas, kas ir adhezīvs t.i., veido saķeri ar šķiedru un pārdala slodzi) lietderīgās īpatnības. Izstrādājumu pašizmaksu samazināšanai PKM saistvielā iekļauj dažādas pildvielas. Pie tam ir svarīgi, lai netiktu pasliktināti mehāniskie raksturlielumi bīdē, adhēzija, stabilitāte pret paaugstinātām temperatūrām un mitrumu. Praktiski nav iespējams iegūt identisku saistvielu blokā. Tādēļ mikromehānikas jeb struktūras pieejas izmantošana PKM slāņu īpašību un to izmaiņu laikā novērtēšanai nesniegs vēlamu rezultātu. Pultrūdētie profili satur rovingu – vienvirzienā armēto slāni un stikla šķiedru paklāju vai audumu, kas izpilda pamatnes funkciju konstrukcijas formēšanā. Sliktas tehnoloģijas gadījumā stikla šķiedru paklāji var saspīesties, izveidojot viļņveida elementus PKM struktūrā. Tādā gadījumā slāni struktūrā nevar tikt uzskatīti par plakanparalēliem. Stikla šķiedru paklāja saspiešanās var izraisīt bīdes moduļa paaugstināšanos slāņu plaknē un stiprības paaugstināšanos starpslāņu bīdē. Attiecība starp PKM pamatnes slāņu biezumu var mainīties gan profila garuma virzienā, gan to atsevišķos elementos. Tas izraisa lielu fizikāli-ķīmisku raksturlielumu novirzi, pētot PKM paraugus, kā arī konstrukcijas (profila) lokālo nestabilitāti, iedarbojoties slodzei.

PKM profila struktūras modelēšanā parasti tiek uzskatīts, ka tas sastāv no plakaniem slāņiem, t.i., ir ortotrops ar trīs simetrijas plaknēm. Atbilstoši, pultrūdētais PKM tiek raksturots ar 9 stinguma matricas neatkarīgām komponentēm, un profila mehānisko raksturlielumu novērtēšanai ir nepieciešams noteikt visus 9 neatkarīgos PKM elastības moduļus. Tomēr visi stinguma raksturlielumi nav vienādi svarīgi konstrukcijas darbā, piemēram, sijas liecē.

### 1.4. Pultrūdētā PKM sijas stingums

Pultrūdētie profili tiek raksturoti ar augstu stiprību un relatīvi nelielu elastības moduli, t.i., lielu elastīgumu un lielu izlieci salīdzinot ar tēraudu. Kumar P. u.c. [29] ir noteikuši, ka pultrūdētā stiklaplasta profila izlieces gadījumā svarīga loma ir bīdes deformācijai, kas rodas sakarā ar relatīvi nelielām stikla šķiedras elastības moduļa un polimēra saistvielas bīdes moduļa vērtībām. To izpēte ir parādījusi, ka augstu stikla šķiedru un saistvielas sabrukšanas deformācijas vērtības dēļ, PKM uzvedība ir lineāri elastīga pat pie lielām izliecēm. Bīdes deformāciju ietekmes efekts uz pultrūdēta profila izlieci palielinās, palielinoties PKM anizotropijai un samazinoties profila garumam [30].

Nemot vērā bīdes deformāciju, sijas izlieces vērtība tiek aprēķināta pēc Timošenko teorijas [31], kurā tiek uzskatīts, ka sijas plakanie šķērsriezumi paliek plakani, bet vairs nav perpendikulāri tā neitrālajai asij. Saskaņā ar Timošenko teoriju sijas izliece trīs vai četrpunktu liecē ir summa, ko izraisa lieces  $\delta_{flex}$  un bīdes  $\delta_{shear}$  deformācijas. Maksimālā izliece (laiduma vidū) ir izsakāma kā

$$\delta = \delta_{flex} + \delta_{shear} = \frac{C_1 PL^3}{E_L I} + \frac{C_2 PL}{kAG_{LT}}, \quad (1.12)$$

kur  $P$  ir pielikta slodze,  $L$  ir laiduma garums,  $E_L I$  ir sijas lieces stingums,  $k$  ir bīdes korekcijas faktors,  $G_{LT}$  ir vertikāla elementa (sijas sienas) bīdes modulis slāņu plaknē,  $A$  ir šķērsriezuma laukums,  $C_1$  un  $C_2$  ir koeficienti, kas ir atkarīgi no slodzes pielikšanas veida (Tabula 1.1).

Tabula 1.1. Timošenko vienādojumā (1.12) konstantes

Izliece	$C_1$	$C_2$
3-punktu	1/48	1/4
4-punktu	23/1296	1/6

Pultrūdētā PKM elastības modulis rovinga šķiedras virzienā  $E_L$  tiek noteikts eksperimentāli stiepē (spiedē) vai arī tiek aprēķināts pēc struktūras komponentu (šķiedras un saistvielas) īpašībām, zinot armēšanas tilpuma koeficientu. Inerces moments  $I$  ir profila šķērsriezuma ģeometrisks raksturlielums. Tas ir vienāds ar šķērsriezuma elementu inerces momentu summu, kas var būt aprēķināta, ņemot vērā PKM slāņu biezuma atšķirības [32].

Bīdes modulis  $G_{LT}$  ir atkarīgs no armējošas šķiedras un saistvielas elastības moduļu attiecības, kā arī to savstarpējās adhēzijas. „Standarta” pultrūdēto PKM  $G_{LT}$ , kas tiek noteikts paraugiem ar dažādām metodēm, atrodas diapazonā no 1,3 līdz 5,1 GPa [33]. Ņemot vērā [30], bīdes spriegumi darbojas visas sijas šķērsriezumā. No otras puses, slāņainās sijas modelis [34] tika konstruēts bez profila horizontālo elementu stinguma ieguldījuma ievērošanas uz bīdi. Saskaņā ar šo pašu modeli, stingums bīdē  $AG_{LT}$  ir vienāds ar stingumu bīdē profila vertikālo elementu slāņu plaknē summu. Bīdes korekcijas faktors  $k$  tiek noteikts no vertikālo elementu (sienas) bīdes sprieguma darba šķērsriezumā un bīdes sprieguma pēc Timošenko vienādības nosacījumiem.

Vērtība  $kA$  tiek novērtēta pēc tangenciāliem spriegumiem, kuru sadalījums nav homogēns. Slīpuma leņķis attiecībā pret izliekto sijas asi katrā šķērsriezumā ir vienāds ar relatīvo bīdi šī šķērsriezuma smaguma centrā. Šķērsriezuma slīpuma leņķi nosaka [35]

$$\frac{d\delta_{shear}}{dx} = \frac{\tau_{xz}|_{z=0}}{G_{xz}} = \frac{P}{2kAG_{xz}}, \quad (1.13)$$

kur  $\tau_{xz} = P/A$  ir vidējais tangenciāls spriegums  $\tau_{xz}$  šķērsriezumā ar laukumu  $A$ . Tādā veidā bīdes korekcijas koeficients  $k$  ir vērtība, ar kuru ir jāpareizina vidējo tangenciālo spriegumu, lai iegūtu tangenciālo sprieguma vērtību, kas darbojas šķērsriezuma smaguma centrā.

PKM sijas tangenciālie spriegumi tiek aprēķināti pēc formulas

$$\tau_{xz} = -\frac{P}{2E_L I \cdot b(z)} \int_{-z_1}^{-H/2} zb(z) dz, \quad (1.14)$$

kur  $b(z)$  ir šķērsriezuma platums atkarībā no koordinātes  $z$ , bet  $z_1$  ir attālums no sijas neitrālās ass.

Parasti inženieri tiecas apiet grūtības, kas saistītas ar  $kAG_{LT}$  noteikšanu caur fizikāliem mērījumiem un izdara vienkāršu bīdes moduļa  $G_{LT}$  mērīšanu uz plakaniem paraugiem. Tomēr liela mērījumu rezultātu izkliede un  $kA$  vērtības noteikšanas neviennozīmīgums neļauj pietiekami precīzi novērtēt visas sijas stingumu bīdē saskaņā ar Timošenko teoriju. Bank LC [30] piedāvā grafisku metodi, kas ļauj vienlaicīgi novērtēt stingumu bīdē un liecē pēc vienas un tās pašas sijas izpētes rezultātiem dažādos laidumos.

Sadalot abas vienādojuma (1.12) daļas uz  $PL$  iegūst sakarību

$$\frac{\delta}{PL} = \frac{C_1}{E_L I} L^2 + \frac{C_2}{kAG_{LT}}, \quad (1.15)$$

no kura ir redzams, ka  $\frac{\delta}{PL}$  atkarība no  $L^2$  ir lineāra un grafiski attēlojama taisnas līnijas veidā ar

liekumu  $\frac{C_1}{E_L I}$ , kas šķērso ordinātu asi punktā  $\frac{C_2}{kAG_{LT}}$ . Šīs taisnes konstruēšanai un grafiskai

vērtību  $\frac{C_1}{E_L I}$  un  $\frac{C_2}{kAG_{LT}}$  attēlošanai, attiecīgi arī vērtību  $E_L I$  un  $kAG_{LT}$  ar uzdotām  $C_1$  un  $C_2$

(Tabula 1.1) noteikšanai, teorētiski ir nepieciešamas divas vienas un tas pašas sijas izpētes ar

diviem laidumiem  $L_1$  un  $L_2$ . Tomēr apskatītās metodes precizitātes uzlabošanai, labāk iegūt vairāk eksperimentālo punktu.

Grafiskā metode jeb bīdes un lieces stinguma vērtību vienlaicīgās noteikšanas metode tiek pielietota arī plakano, izgrieztu no profila, PKM paraugu izpētē. Liecē slāņu plaknē tiek noteikts lieces modulis  $G_{LT}$ , bet liecē perpendikulāri slāņiem, tiek noteikts lieces modulis  $G_{TH}$ . Šo moduļu vērtības ir dažādas.

Kā seko no formulas (1.12)

$$\frac{\delta_{shear}}{\delta_{flex}} = \frac{1}{L^2} \frac{C_2}{C_1} \frac{E_L I}{k A G_{LT}}, \quad (1.16)$$

t.i., relatīva bīdes deformācijas ietekme uz izlieces lielumu ir lielāka 4-punktu lieces gadījumā un samazinās palielinot  $L$ . Tādēļ stinguma noteikšanas metodēm 3- un 4-punktu liecē (ASTM D 790, ASTM D 6272) nepieciešama attiecība starp laiduma garumu un parauga biezumu  $(L/h)^2 \geq 60$ . Sijai, kuru profils atšķiras no taisnstūra,  $L/h$  vietā apskata elastīgumu  $L/r$ , kur rotācijas rādiuss  $r = \sqrt{I_y/A}$ ,  $I_y$  ir šķērsriezuma inerces moments attiecībā pret  $Oy$  asi.

Formula (1.12) iegūta pamatojoties uz materiālu pretestības metodi un ir tuvinājums. Precīzāks izlieces novērtējums ir iespējams, izmantojot skaitliskās metodes, piemēram, galīgo elementu metodi (GEM). Autori [36] ir veikuši pultrūdetā ogļplasta dubult-T profila izlieces aprēķinu rezultātu analīzi 3-punktu liecē atkarībā no attiecības  $(L/r)^2 = 100, 200, 300, 400$ , izmantojot GEM un formulu (1.12). Aprēķinu rezultātu salīdzināšana ar eksperimentāliem datiem parāda, ka abas metodes ir pietiekami precīzas izlieces novērtēšanā, tomēr GEM ļauj precīzāk aprakstīt eksperimenta rezultātus, kad  $(L/r)^2 \leq 100$ . Autori [32] parāda labu GEM aprēķina atbilstību eksperimentāliem rezultātiem 4-punktu liecē dubult-T profilam no hibrīda ogļstiklaplasta.

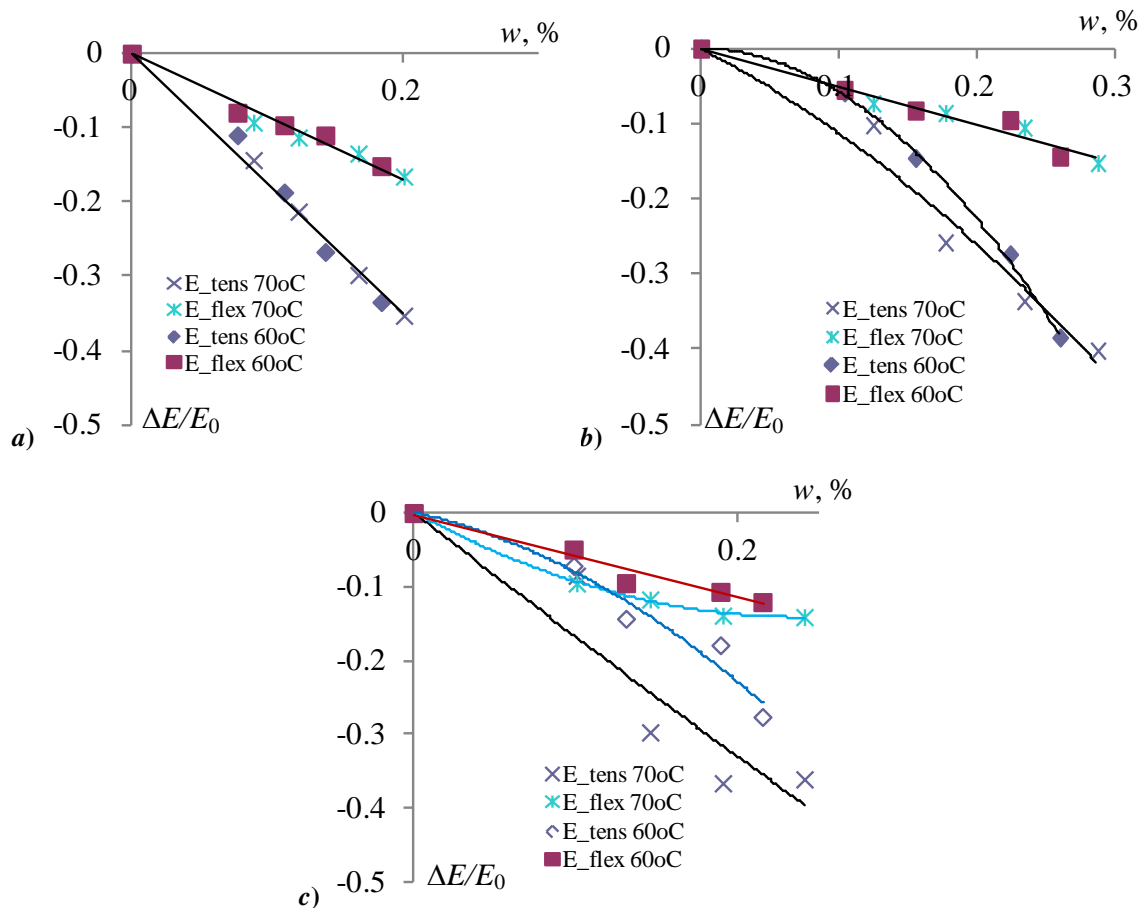
Tā kā sijas izliece  $\delta$  ir atkarīga no bīdes moduļa  $G_{LT}$ , tad šķietamais elastības modulis  $E_{app}$ , kas tika izteikts no pārbaudes liecē, atšķirsies no elastības moduļa  $E_L$ , kas tika izteikts no pārbaudes stiepē

$$\frac{1}{E_{app}} = \frac{1}{E_L} \left( 1 + 12 \frac{E_L / k G_{LT}}{(L/r)^2} \right). \quad (1.17)$$

Vērtība  $E_L$  ir svarīgs PKM raksturlielums un tā izmaiņu izpētei laikā apkārtējās vides apstākļos ir vēltīts diezgan daudz darbu. Publikāciju par bīdes moduļa  $G_{LT}$  un  $G_{TH}$  izmaiņu praktiski nav. Tas ir saistīts ar neviennozīmīgu bīdes moduļa noteikšanu dažādos PKM pētījumos, tāpat arī ar to, ka šie raksturlielumi ir diezgan jutīgi pret mitruma sadalījumu pa parauga šķērsriezumu. Bīdes moduļiem ir jābūt noteiktiem no paraugiem ar homogēnu mitruma sadalījumu šķērsriezumā vai ar līdzsvara mitruma saturu. Sorbcijas procesā ārējie slāņi satur vairāk mitruma nekā iekšējie, savukārt desorbcijas procesā – otrādi. Tā kā  $E_{app}$  tiek noteikts pēc parauga ārējiem slāņiem, tad PKM izmaiņas laikā mitruma sorbcijas procesā, kā arī atkarība no mitruma satura  $w$  būs atšķirīga no moduļa  $E_L$ . Piemēram, Att. 1.6 ir parādītas  $E_L(w)$  un  $E_{app}(w)$  atkarības no  $w$  slāņainiem (0/90) poliestera saistvielas bāzes stikla- un ogļplastiem. Rezultāti iegūti balstoties uz darbu [37]. Mitrināšana notika pie RH = 95% un paaugstinātām temperatūrām 60 un 70 °C. Kā redzams attēlā, katrai  $w$  vērtībai  $E_L$  moduļa izmaiņa ir lielāka nekā  $E_{app}$  moduļa izmaiņa.

Stiklaplastam ar apretētām šķiedrām (Att. 1.6a) abas atkarības  $E_L(w)$  un  $E_{app}(w)$  ir lineāras tāpat kā atkarības  $E(w)$  poliestera saistvielai (Att. 1.1). Stiklaplastam ar neapstrādātām šķiedrām (Att. 1.6b) atkarība  $E_L(w)$  pārstāj būt lineāra. Acīmredzot notiek šķiedru un/vai starpfāžu slāņa īpašību izmaiņas. Temperatūras ietekmes efekts abos gadījumos netiek novērots. Ogļplastam (Att. 1.6c) atkarību  $E_L(w)$  un  $E_{app}(w)$  nelinearitāte un temperatūras ietekmes efekts ir vairāk izteikti.





Att. 1.6. Elastības moduļu  $E_L$  (a) un  $E_{app}$  (b) atkarība no mitruma saturā slāņainos (0/90) stiklaplastu (a,b) un ogļplastu (c) paraugos [37]

Tādā veidā, eksperimentālo datu analīze, kas atspoguļota literatūrā, parāda, ka visagresīvākais faktors, kas izraisa pultrūdēto PKM struktūras un īpašību izmaiņas, ir apkārtējās vides mitrums. Mainīgas zīmes temperatūras, acīmredzami, ietekmē mitruma saturu ūdens sasaldēšanas un kušanas rezultātā. Apgalvojums prasa papildus pārbaudi.

PKM lietderīgo īpašību kompleksa izmaiņa (pasliktināšanās) ir proporcionāla mitruma saturā paaugstināšanai sorbcijas rezultātā no apkārtējās vides. Tādēļ, pultrūdētā PKM mehānisko raksturlielumu izmaiņas ātrākai novērtēšanai ir nepieciešams izvēlēties sorbcijas režīmu, kad mitrināšana notiek ūdenī un/vai paaugstinātās temperatūrās. Tomēr temperatūrai jābūt zemākai nekā materiāla stiklošanās temperatūra  $T < T_g - 20$  °C, lai tiktu izslēgti fizikāli-ķīmiskie procesi, kas ir raksturīgi šīm temperatūras apgabalam.

PKM mehānisko raksturlielumu izmaiņas ir nepieciešams noteikt pēc tā, kad parauga šķērsgriezums (vai konstrukcija) sasniedz vienmērīgu mitruma sadalījumu, t.i., līdzsvara stāvokli. Mitruma līdzsvara stāvokļa sasniegšanas laiks un galējā mitruma saturā vērtība izvēlētajā sorbcijas režīmā tiek noteikti pēc sorbcijas līknes, kuras parametri ir atkarīgi no paraugu izmēriem un to izgriešanas virziena.

## 2. Metodikas apraksts

Pultrūdēto profilu efektīvai izmantošanai nesošo konstrukciju elementos, kas darbojas agresīvo apkārtējās vides faktoru iedarbības apstākļos, projektētāju un konstruktoru rīcībā ir jābūt izstrādātai drošai paātrinātai metodikai, lai novērtētu vides ietekmi uz galvenajām izmantojamā materiāla mehāniskajām īpašībām. Paātrināta metodika tiks izmantota sarežģītas formas pultrūdētu kompozītu profilu izturības novērtēšanai pret Latvijas apkārtējās vides agresīviem faktoriem (mitrums, paaugstinātas un mainīgas zīmes temperatūras). Tā ietvers metodes, kas ļaus paātrināti novērtēt vides agresivitātes un ekspluatācijas faktoru darbības riskus un noskaidrot visbīstamākos no tiem, paātrināti noteikt bīstamo vides faktoru ietekmi uz kompozītu īpašībām un prognozēt to iedarbību uz visu konstrukcijas ekspluatācijas laiku. Metodika ietvers īslaicīgu pārbaužu veikšanu ar standarta paraugiem, izgrieztiem no konstrukciju elementiem, kā arī ar modeļa paraugiem un to prototipiem, turpmāku novecošanas procesu raksturlielumu aprēķināšanu un prognozi.

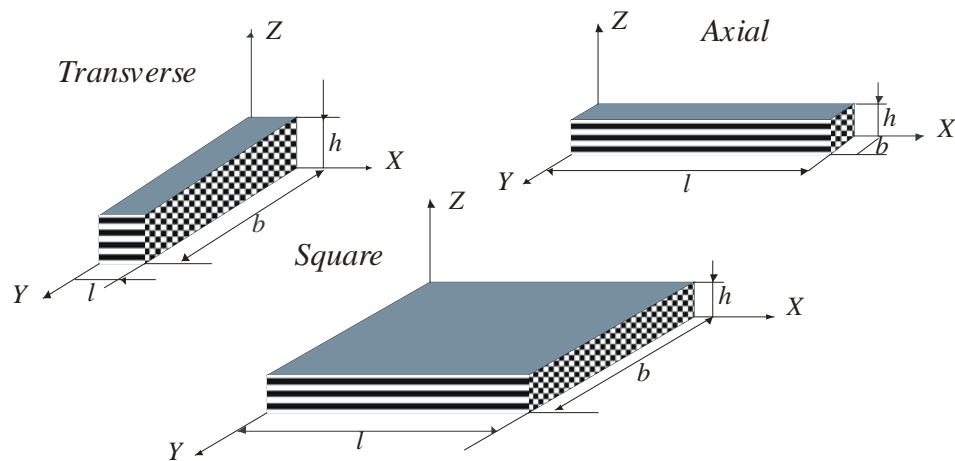
Metodika ietver virkni etapu, kuru izpilde laboratorijas apstākļos ļauj iegūt konkrētus skaitliskus novērtējumus par svarīgākajām pultrūdēto kompozītmateriālu ekspluatācijas īpašībām visā būves vai konstrukcijas garantijas laikā, kas ir nepieciešams konstruktoriem un projektētājiem. Metodika ir balstīta uz konkrētu pultrūdēto kompozītmateriālu profiliem, kā arī uz dažādu formu un izmēru paraugiem, kas ir izgriezti no minētajiem profiliem (Att. 2.1) atbilstoši esošajiem standartiem. Rezultāta sasniegšanai veikti sekojoši darba posmi:

1. Novērtēta vides faktoru salīdzinošā agresivitāte, piemēram, mitruma, paaugstinātas un mainīgas zīmes temperatūras, redzamās un ultravioletās gaismas, nosakot bīstamāko no tiem, ņemot vērā konkrētā produkta specifiskos darbības nosacījumus un tā struktūru. Tādēļ ir veikta kompleksa teorētiskā analīze, izmantojot pieejamo literatūru un izpildot ātri veicamus eksperimentus ar konstrukcijas materiāla paraugiem ar katra vides faktora atsevišķu intensīvu iedarbību. Izmaiņas materiāla īpašībās šo faktoru ietekmē tika paātrināti kontrolēta ar īslaicīgiem eksperimentiem.

2. Pēc viena vai vairāku agresīvāko faktoru noteikšanas, tika definēta to ietekme uz kompozītmateriāla ekspluatācijas īpašībām. Šim nolūkam paraugiem, kas izgriezti no pultrūdētā profila, ir veikti paātrināti novecošanas izmēģinājumi vides faktoru intensīvā ietekmē, kā arī vairākas standarta mehāniskās pārbaudes, lai noteiktu materiālu īpašību izmaiņu dinamiku.

3. Tika analizēti eksperimentu rezultāti un noteiktas iespējas izmantot dažādas metodes, prognozējot bīstamo vides faktoru ietekmi uz materiālu visā tā izmantošanas laikā. Analīzes laikā aprēķinu veidā noteiktas nepieciešamās īpašības materiāla novecošanās procesam, izvēlētas atbilstošākais matemātiskais modelis un izveidota novecošanās prognoze ekspluatācijas periodam reālos apstākļos.

Anizotropo PKM mitruma sorbcijas raksturlielumu noteikšanai ir nepieciešams izmantot maza izmēra paraugus. Lai tiktu ņemti vērā visi PKM saturošie slāņi (rovings, paklājs un plīvurs), tā slāņainai struktūrai ir jābūt veselai: paraugus ir nepieciešams izgriezt no konstrukcijas slāņu plaknē, to biežumam ir jāatbilst konstrukcijas biežumam. Tā kā PKM profila struktūra ir anizotropa sakarā ar rovinga pārākumu saturā, tad sorbcijas raksturlielumu izpētei ir nepieciešams izmantot paraugus ar dažādiem lineāriem izmēriem rovinga šķiedras virzienā: *Axial*, *Transverse*, *Square* (Att. 2.1). Sakarā ar to, ka paraugu sānu virsmas nav aizsargātas ar plīvuru (mitruma aizsargslāni), tad var sagaidīt, ka difūzijas koeficienta vērtības virzienā perpendikulāri šķiedru asij būs atšķirīgi slāņu plaknē un ārpus tās.



Att. 2.1. PKM paraugi mitruma sorbcijas raksturlielumu noteikšanai

PKM paraugi, kas tika izmantoti mitruma sorbcijas raksturlielumu noteikšanai, var tikt izmantoti turpmāk mehānisko raksturlielumu (elastības moduļu un stiprības) izmaiņu, kas notiek mitrināšanas rezultātā, novērtēšanai (ja to pieļauj atbilstošie standarti). Tomēr bieži vien mehānisko īpašību izpētes veikšanai nepieciešami citi paraugu izmēri un izgriezuma veids.

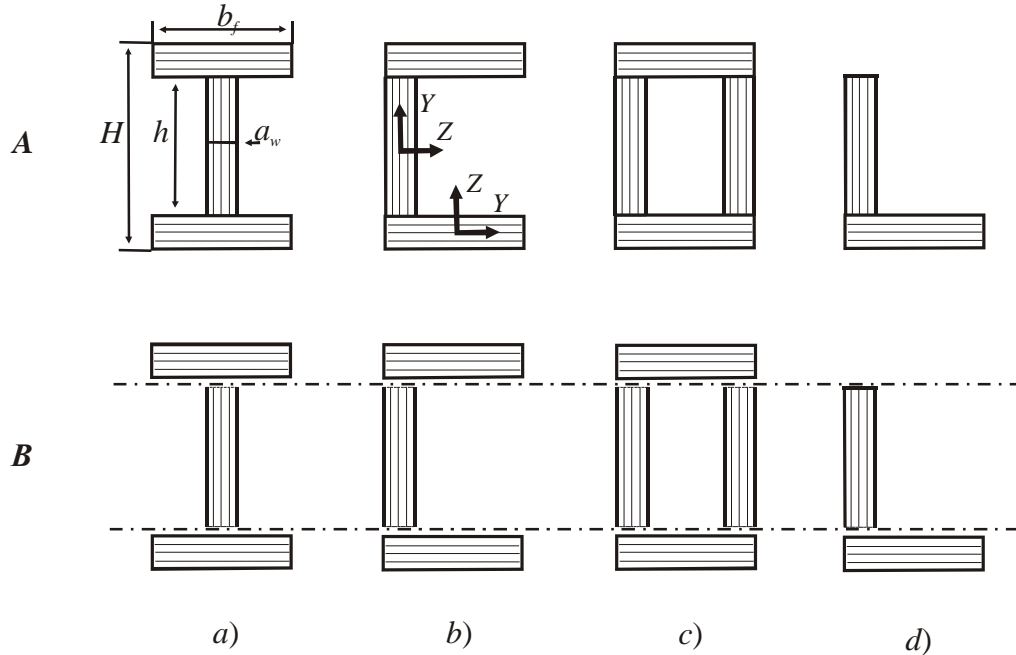
Mitruma izmaiņa PKM izraisa tā elastības un stiprības raksturlielumu izmaiņu. Visvairāk mainīgi ir tie raksturlielumi, kurus nosaka polimēra saistviela: elastības moduļi virzienā, kas ir perpendikulāri rovinga šķiedras asij (slāņu un perpendikulārajā plaknē), bīdes modulis slāņu plaknē un starpslāņu bīdes modulis. Tomēr ne visi elastības raksturlielumi un to izmaiņas ir svarīgi PKM konstrukcijas darbā un ekspluatācijā. Galvenokārt, pultrūdetā profila liecē plaknē, kas ir perpendikulāra slāņiem, svarīgi ir elastības modulis rovinga šķiedrās virzienā un bīdes modulis slāņu plaknē. Informācija par citu īpašību izmaiņu kinētiku ir svarīga fizikāli mehānisko procesu noteikšanā. Šie procesi ir PKM atgriezeniskā vai neatgriezeniskā īpašību izmaiņa un to prognozēšanā. Tā PKM saistvielas īpašību izmaiņa var tikt novērtēta pēc stiklošanās temperatūras  $T_g$  izmaiņas, kas var tikt noteikta pēc, piemēram, dilatometrijas pētījumu rezultātiem. Dilatometrijas metode tāpat sniedz informāciju par lineāro termiskās izplešanās koeficientu (LTIK), kas ir atgriezeniski proporcionāls elastības moduļim. Tādēļ LTIK mērījumi plašā temperatūru diapazonā, iekļaujot arī  $T_g$ , ļauj novērtēt PKM elastības moduļa izmaiņas. LTIK gar galvenajām simetrijas asīm novērtēšana var tikt veikta ar dilatometrijas metodi, izmantojot mazu izmēru paraugus, kas izgriezti no profilu paraugu galiem pēc to testēšanas liecē.

Pultrūdetie profili ir lielas konstrukcijas, kurās mitruma piesātinājums, ko raksturo līdzsvara mitruma saturs šķērsgrīzumā ekspluatācijas temperatūrās ( $-20$   $+20$  °C), var tikt sasniegts tikai pēc ilgāka laika. Mitruma satura izmaiņa profilā un pārejas procesa laiks tiek noteikts, risinot difūzijas uzdevumu ar zināmiem, iepriekš noteiktiem mitruma sorbcijas parametriem. Gariem profiliem (garuma  $L$  attiecība pret šķērsgrīzuma vislielāko izmēru  $l$ ,  $L/l > 10$ ), kas ir pakļauti patstāvīgam, vienmērīgi sadalītam garumā, RH vai iegremdēti ūdenī, ir pietiekami izskatīt divdimensiju uzdevumu. Ietekmi no galu virsas var neņemt vērā.

Profilam no ortotropā PKM, kura šķērsgrīzums ir atšķirīgs no apaļā vai taisnstūra, difūzijas (siltumvadāmības) uzdevums tiek risināts ar galīgo elementu metodi (GEM), izmantojot lietojuma programmrīku pakotnes. Tas pieprasa licenzētās programmatūras instalēšanu, noteiktas zināšanas, kā arī laika un enerģijas patērēšanu. Tādēļ, protams, rodas vēlme vienkāršot aprēķinu, skaitlisko risinājumu aizvietot ar vienkāršām, analītiskām izteiksmēm, kas ir vairāk uzskatāmas un ērtas pielietojumā. Pultrūdetā profila sarežģītais šķērsgrīzums (Att. 2.2) praktiski vienmēr ir virtuāli sadalāms uz vienkāršiem elementiem – taisnstūri ar robežnosacījumiem  $c_\infty$  divās lielākās malās (vertikālie elementi vai sienas) un visā perimetrā (horizontālie elementi vai plaukti). Difūzijas uzdevuma analītiskais risinājums sijas sienai  $w_1(t)$  un plauktam  $w_2(t)$  atbilstoši ir 1D un 2D, kas ir (1.7) īpašs gadījumi. Var uzskatīt, ka šo risinājumu summa ir tuvināts difūzijas uzdevuma atrisinājums visam profilam. Vidējs mitruma saturs profilā

$$w(t) = \frac{k_1 w_1(t) S_1 + k_2 w_2(t) S_2}{k_1 S_1 + k_2 S_2}, \quad (2.1)$$

kur  $k_1$  un  $k_2$  ir vertikālo un horizontālo elementu skaits,  $s_1$  un  $s_2$  ir šo elementu laukumi.



**Att. 2.2. Pilna  $A$  un vienkāršota  $B$  pultrūdēto profilu shēma dubult-T (a), U (b), kārbveida (c), leņķveida (d).  $Y$  un  $Z$  asis sakrīt ar PKM galvenajām simetrijas asīm. Ar biezu līniju shēmā  $B$  ir atzīmēti robežu apgabali, kuros  $c(S) = c_\infty$**

Lai pierādītu piedāvātās pieejas pielietojumu, ir nepieciešams veikt pultrūdētā profila mitruma difūzijas uzdevuma modelēšanu ar GEM un salīdzināt rezultātus ar teorētiski un eksperimentāli iegūtiem rezultātiem. Tas arī ir darba uzdevums, kas tika atrisināts divos etapos.

1. Pirmajā etapā tika veikta difūzijas uzdevuma skaitliskās modelēšanas rezultātu salīdzināšana visā profilā (pilnā  $A$  shēma) un profilā, kas ir salikts no vienkāršiem elementiem (vienkāršota shēma  $B$ ) (Att. 2.2). Atšķirībā no pilnās vienkāršotā shēmā netiek ņemta vērā mitruma pārnese starp sienām un plauktiem. Tādēļ izraisītā kļūda mitruma difūzijas procesa aprakstīšanai ir vidējās mitruma koncentrācijas (vai vidējā mitrumsatura) ātruma izmaiņā pilnā un elementu šķērsgriezumā. Kvantitatīvai kļūdas, kas rodas skaitliskās shēmas vienkāršošanas procesā, novērtēšanai izmantota relatīva mitruma koncentrācijas vidējo vērtību atšķirība šķērsgriezumā un elementos, kuru nosaka vienā un tai pašā laika momentā

$$\Delta = \frac{\bar{c}_B}{\bar{c}_A} - 1, \quad (2.2)$$

kur  $\bar{c}_B$  un  $\bar{c}_A$  ir šķērsgriezuma (vai tā elementa) mitruma koncentrācijas vidējās vērtības, aprēķinātas  $B$  un  $A$  shēmas, atbilstoši.

Mitruma koncentrācijas vidējo vērtību novirzes novērtējums ļauj izslēgt šķērsgriezuma un tā elementu mitruma sadalījuma izskatīšanu. Mitruma difūzijas uzdevums ir analogisks siltumvadāmības uzdevumam [38], kad ir zināma fizikālo vērtību savstarpējā attiecība (Tabula 2.1) [39].

Siltumvadāmības uzdevumu risinājums pultrūdētā profila modelim parādīja, ka vidējās temperatūras noteikšanas kļūda šķērsgriezuma elementos ir mainīga laikā. Tā ir maksimāla pārejas procesa sākuma stadijā (plauktam 6-9%, sienai nepārsniedz 3,5%) un samazinās līdz 0,7% beigu stadijā. Vislielākā aprēķina kļūdas vērtība ir atkarīga no siltumvadāmības koeficientu attiecības, t.i., PKM struktūras anizotropijas un šķērsgriezuma elementu biezuma  $\frac{H-h}{2a_w}$ .

Tabula 2.1. Fizikālo lielumu atbilstība siltumvadāmības un mitruma difūzijas uzdevumos

Raksturlielums	Siltumvadāmība	Mitruma difūzija
Pamatmainīgais	Temperatūra, $T$	Mitruma koncentrācija $c$ , $\text{kg/m}^3$
Blīvums	$\rho$ , $\text{kg/m}^3$	$1 \text{ kg/m}^3$
Vadāmība	$\lambda_y, \lambda_z$ , $\text{W/(m}\times\text{K)}$	$D_y c_\infty, D_z c_\infty$ , $\text{kg/(c}\times\text{m)}$
Siltumietilpība	$C$ , $\text{J/(kg}\times\text{K)}$	$c_\infty$ , $\text{kg/m}^3$

Mitruma difūzijas uzdevuma skaitliska modelēšana, tāpat kā siltumvadāmības uzdevums [38], izpildīta galīgo elementu vidē ANSYS 11.0, izmantojot divdimensiju galīgo elementu *Plane55*. Elements ir uzdots ar četriem mezgliem un vienu brīvības pakāpi – mitruma koncentrācijas vērtība – katrā mezglā [40]. Skaitliskā risinājuma, kas atbilst GE mezgla brīvības pakāpēm, pamatzultāts ir mitruma satura vidējā vērtība mezglos laika momentā  $j$ . Tā  $i$ -tajam mezglam atbilst  $w_i^j$ . Atbilstoši  $k$ -tā GE mitrumsatura vidēja vērtība, ko nosaka  $n$  mezgli laika momentā  $j$  atbilst

$$w_{(k)}^j = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i(k)}^j}{n}. \quad (2.3)$$

Mitruma satura vidējā vērtība, iekļaujot sevī GE  $m$ ,

$$w^j = \frac{\sum_{k=1}^m w_{(k)}^j \cdot S_k}{\sum_{k=1}^m S_k}, \quad (2.4)$$

kur  $S_k$  ir  $k$ -tā GE laukums noteiktā apgabalā.

Mitruma satura šķērsgriezumā vidējās vērtības noteikšanas algoritms tika realizēts ar programmrīku *ANSYS Parametric Design Language (APDL)* [39]. Mitruma sākuma koncentrācija PKM profila šķērsgriezumā tika pieņemta par nulli,  $c_0 = 0$ . Aprēķinām nepieciešamās difūzijas koeficienta  $D_y, D_z$  un beigu koncentrācijas  $c_\infty = \rho w_\infty$  vērtības plakaniem paraugiem tika noteiktas eksperimentāli. Mitruma difūzijas process tika uzskatīts par pabeigtu, kad koncentrācijas vidējā vērtība šķērsgriezumā sasniedza vidējo vērtību  $r=0,9999$ .

2. Otrajā etapā tika veikta skaitliskās modelēšanas un analītiskā atrisinājuma vienkāršotai shēmai rezultātu salīdzināšana.

Piedāvātās metodikas aprobēšana ir veikta uz reāliem dubult-T (izgatavotājs *Rishon Inter, Ltd.*, Latvija) un kārbveida (izgatavotājs *Exel*, Somija) pultrūdētiem profiliem.

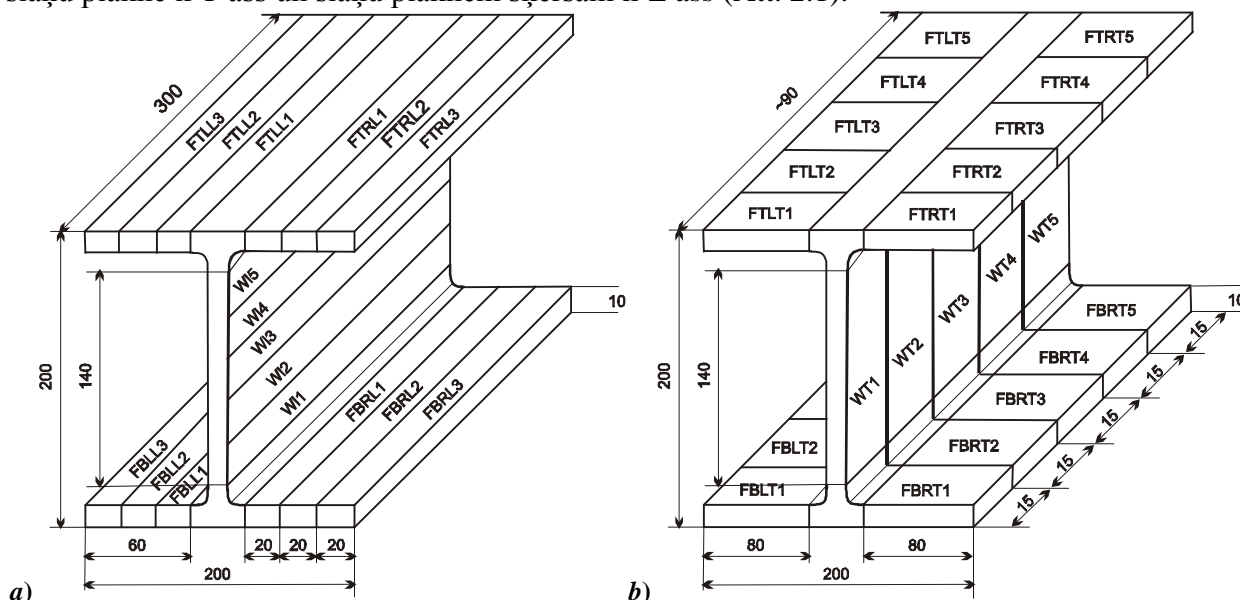
### 3. Metodikas aprobācija. Dubult-T tipa sija.

Izpētei izvēlēts izoftāla poliestera saistvielas bāzes stiklaplasta dubult-T tipa profils ar pārmaiņus iekļautiem rovinga slāņiem (pa vidu un divi malējie), kas ir armēti ar stikla šķiedras saiņiem, ka arī paklāja (divi iekšējie), kas sastāv no relatīvi garām un sava starpā savītām šķiedrām. Izgatavotājs ir Latvijas kompānija Rishon Inter, Ltd.

Neorganiskās saistvielas saturs PKM pēc masas ir  $\mu_f = 0,8$  un tā slāņos – rovingā un paklājā ir  $\mu_f^{RW} = 0,41$  un  $\mu_f^{CSM} = 0,35$ , kas tika noteikts paraugu saistvielas sadegšanas procesā.

#### 3.1. Plakanu paraugu izgriešana izpētei

No profila dažādiem elementiem (sienas un plauktiem) tika izgriezti plakanie paraugi mitruma sorbcijas (Att. 2.1) un mehānisko (Att. 3.1) raksturlielumu noteikšanai. Pirmo paraugu izmēri milimetros:  $155 \times 15 \times 10$  (*Axial*),  $16 \times 157 \times 10$  (*Transverse*) и  $170 \times 178 \times 8$  mm (*Square*). Otro paraugu izmēri mm parādīti Att. 3.1. Trīs galvenās simetrijas ass ortotropam PKM parādītas, izmantojot XYZ koordinātes: gar rovinga šķiedrām ir X ass, perpendikulāri šķiedru asij slāņu plaknē ir Y ass un slāņu plaknēm šķērsām ir Z ass (Att. 2.1).



Att. 3.1. Paraugu izgriešanas shēma mehāniskai izpētei stiepē gar šķiedru asi un liecē (a), kā arī stiepē šķērsām šķiedru asij un spiedē (b); cipari attēlo paraugu izmērus milimetros

#### 3.2. Pultrūdētā PKM mitruma sorbcija

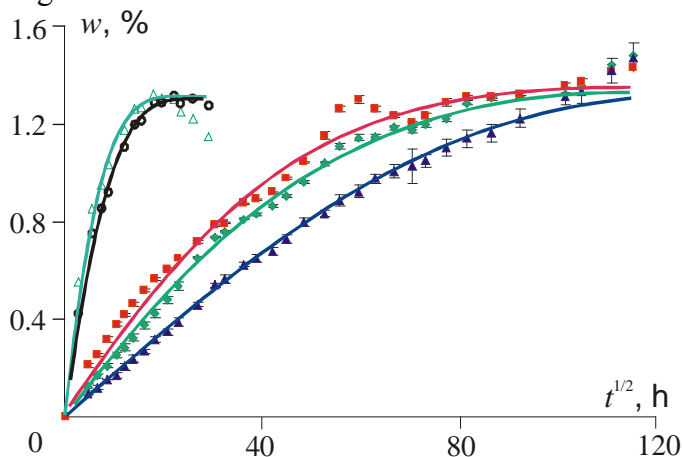
##### 3.2.1. Pultrūdētā PKM difūzijas koeficientu un uzbrišanas noteikšana

Mitruma sorbcijas raksturlielumi noteikti PKM paraugiem, kas iegremdēti ūdenī istabas temperatūrā  $\sim 20^\circ\text{C}$  un  $70^\circ\text{C}$ , lai tiktu novērtēts sorbcijas paātrināšanas efekts. Pēc noteiktiem laika intervāliem paraugi tika izņemti no ūdens, nosvērti un noteikti to lineārie izmēri tilpuma un blīvuma izmaiņu novērtēšanai. Pēc sorbcijas līknēm (Att. 3.2), kur katra līkne attēlo piecu paraugu vidējo rezultātu, noteikts robežmitrums  $w_\infty = 1,35\%$ , kas izrādījās vienāds dažāda izmēra paraugiem abās pētāmās temperatūrās, un fiktīvie difūzijas koeficienti  $D_i^*$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Tad risinot trīs vienādojumu sistēmu ar uzdotiem  $l_i$ ,  $b_i$ ,  $h_i$  tika noteikti PKM difūzijas koeficienti  $D_x = 8,51$ ,  $D_y = 4,53$ ,  $D_z = 1,48 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>/h pie  $20^\circ\text{C}$  un  $D_x = 150,7$ ,  $D_y = 65,5$ ,  $D_z = 52,8 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>/h pie  $70^\circ\text{C}$  temperatūrām. Vislielākā difūzijas koeficienta vērtība ir gar rovinga šķiedru asi X, vismazākā – virzienā perpendikulāri šķiedru asij un slāņu plaknē Z. Nelielā  $D_z$  vērtība

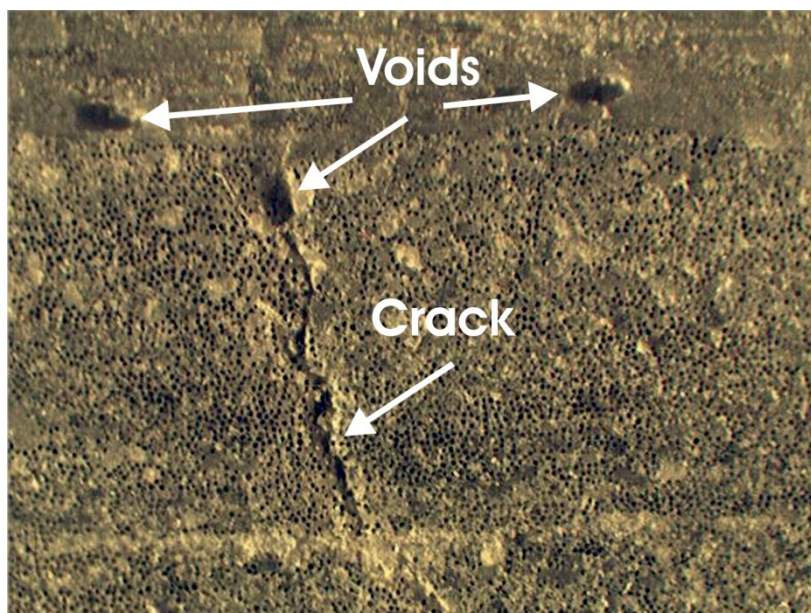


izskaidrojama ar mitrumu aizsargājoša plīvura esamību paraugu virsmās,  $z = 0$  un  $z = h$ . Tādējādi mitrumaizsargājoša plīvura efekts ir netieši raksturojams ar  $D_z$ , tomēr šis efekts netiek ņemts vērā nosakot vērtību  $D_y$ .

Vērtība  $D_x$ , kas ir lielāka nekā zināmie difūzijas koeficienti polietēriskām saistvielām, piemēram, Norpol-440  $D = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{h}$  [10] un anizotropijas indekss  $D_x/D_y \sim 2$  ļauj spriest par to, ka mitruma difūzija gar rovinga šķiedru asi var būt palielināta poru (lokāls saistvielas trūkums, kā rezultātā rodas šķiedru savstarpējs tiešs kontakts) klātbūtnes dēļ. Poras PKM abos slāņos ir redzamas fotoattēlā, kas iegūts ar optisko mikroskopu ar 20x palielinājumu (Att. 3.3). Poru un tukšumu esamība struktūrā un to piesātinājums ar ūdeni netieši apstiprinās ar robežmitruma relatīvi augstām vērtībām.



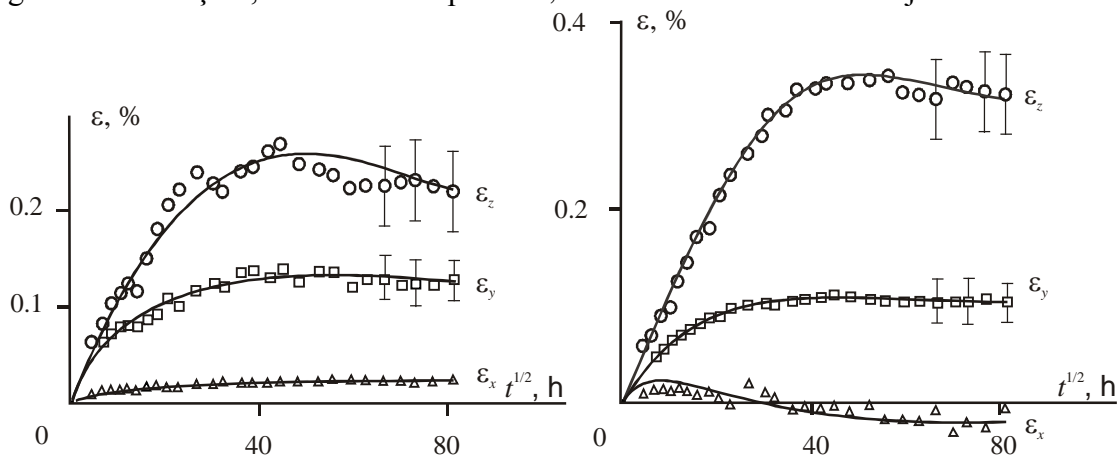
Att. 3.2. Dažāda izmēra pultrūdetā stiklaplasta paraugu sorbcijas līknes: *Transverse* (■,▲), *Axial* (◆,○) un *Square* (▲) pie 20 (■,◆,▲) un 70 °C (▲,○); punkti – eksperimentālie dati, līnijas – to apraksts ar vienādojumu (1.8)



Att. 3.3. PKM parauga noslīpētais griezumš zem mikroskopa 90° leņķī gar rovinga šķiedru asi

Uzbriešanas deformācijas PKM  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  un  $\epsilon_z$  gar simetrijas galvenajam asīm atkarībā no paraugu atrašanās laika ūdenī ir parādītas Att. 3.4. Tās ir atšķirīgas, jo paraugu mitruma sorbcijas kinētika ir dažāda atkarībā no paraugu izmēriem (Att. 3.2). Tomēr no visiem pētāmiem paraugiem vislielākās uzbriešanas deformācijas vērtības ir raksturīgas gar Z asi, t.i., paraugu biezumā (Att. 3.4), bet vismazākās gar rovinga šķiedru asi X. Salīdzinot grafikus Att. 3.4 un Att.

3.2, ir redzams, ka piesātinājuma stāvoklis tiek sasniegts ātrāk uzbriešanas deformācijām nekā paraugu svāra izmaiņām, kas notiek arī pēc tam, kad uzbriešanas deformācijas sasniedz līdzsvaru.

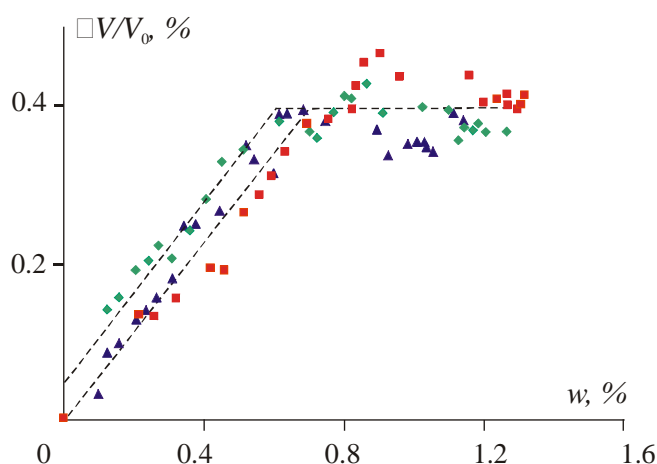


Att. 3.4. Uzbrīšanas deformācijas PKM gar simetrijas galvenajam asīm: X (Δ), Y (□), Z (o) atkarībā no paraugu izturēšanas laika ūdenī Transverse (a) un Axial (b)

Neskatoties uz dažādu  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  un  $\epsilon_z$  izmaiņu kinētiku dažāda izmēra paraugiem (Att. 3.4), to tilpuma uzbriešanas deformāciju izmaiņa  $\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$  laikā ir praktiski vienāda (Att. 3.5). Taču atšķirība sākumpunktā var būt izskaidrojama ar pētāmo paraugu dažādo blīvumu ( $\rho = 1,77; 1,808$  un  $1,842 \text{ g/cm}^3$ ). Grafikos  $\epsilon_v(w)$  ir redzami divi apgabali, kur sākumā tilpuma deformācija pieaug, paaugstinoties mitruma saturam, un tad tā ir pastāvīga. PKM neraksturīgā uzbriešana, paaugstinot mitruma saturu, var tikt izskaidrota ar to, ka poras tika piesātinātas ar ūdeni. Balstoties uz šo pieņēmumu, tika aprēķināts poru, kas piepildītas ar ūdeni, tilpuma saturs  $v_p$  kā starpība starp līdzsvāra uzbriešanu, kad uzņemtais mitrums izraisa uzbriešanu, un pētāmo paraugu eksperimentāli noteikto uzbriešanu

$$v_p = w \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} - \epsilon_v, \quad (3.1)$$

kur  $\rho$  un  $\rho_{H_2O}$  ir PKM un ūdens blīvums.



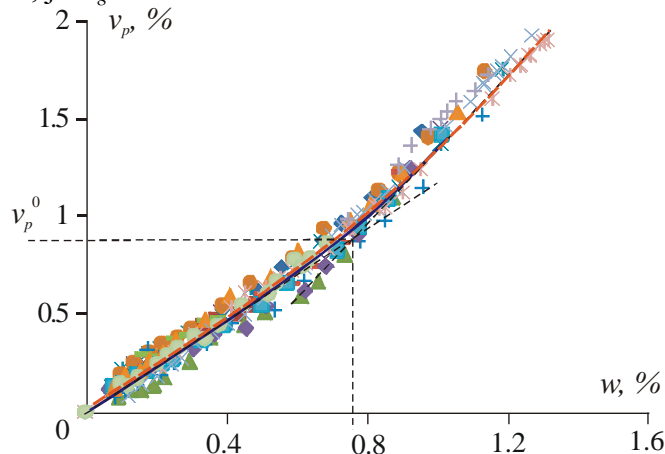
Att. 3.5. Paraugu Transverse L (■), Axial (◆) un Square (▲) tilpuma uzbriešanas deformācijas atkarībā no mitruma satura

Piepildīto ar ūdeni poru tilpuma saturs atkarība no mitruma satura tika aprēķināts visiem pētāmiem paraugiem. Noteikts, ka atkarība  $v_p(w)$  ir kopēja (Att. 3.6) un sastāv no diviem lineāriem apgabaliem, kas šķērso viens otru punktā  $w_p = 0,7\%$ ,  $v_p^0 = 0,8\%$ . Apskatot PKM paraugu tilpuma poru saturu atkarībā no to izturēšanas laika ūdenī  $v_p(t)$  (Att. 3.7), var redzēt, ka

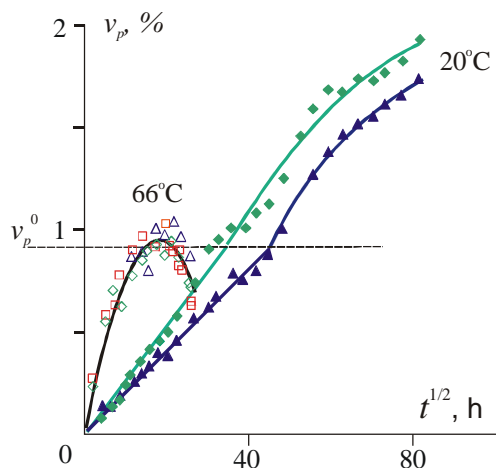


poru piesātināšanās procesam ar ūdeni ir raksturīgas arī dažas stadijas, un ātruma izmaiņa notiek apgabalā  $w_p$  (vai  $v_p^0$ ).

PKM paraugu izturēšana ūdenī paaugstinātā temperatūrā  $70^\circ\text{C}$  dod nemonotonu atkarību  $v_p(t)$  ar maksimumu pie  $v_p^0 = 0,8\%$  (Att. 3.7). Turpmākais  $v_p$  samazinājums laikā var tikt izskaidrots ar PKM struktūras sablīvēšanos fizikālā novecojuma un/vai saistvielas pēcsacietēšanas rezultātā, jo  $T_g \sim 70^\circ\text{C}$ .

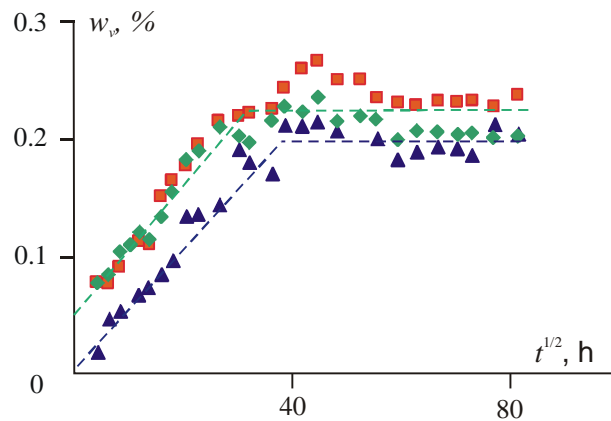


Att. 3.6. Piepildīto ar ūdeni poru tilpuma saturs atkarībā no mitruma satura PKM paraugos, kas izgriezti no sienas (punktētā līnija) un plaukiem (nepārtrauktā līnija) pie  $20^\circ\text{C}$



Att. 3.7. Piepildīto ar ūdeni poru tilpuma saturs atkarībā no PKM paraugu izturēšanas laika ūdenī pie  $20^\circ\text{C}$  ( $\blacklozenge, \blacktriangle$ ) un  $70^\circ\text{C}$  ( $\square, \triangle, \circ$ ) *Transverse* ( $\square$ ), *Axial* ( $\blacklozenge, \circ$ ) un *Square* ( $\blacktriangle, \triangle$ ) paraugiem

Tātad, balstoties uz pieņēmumu, ka ūdens PKM porās (nesaistīts ūdens) neizraisa uzbriecšanu), tika empīriski iegūtas atkarības  $v_p(w)$  (Att. 3.6) un  $v_p(t)$  (Att. 3.7). Cita ūdens daļa PKM struktūrā, kas atrodas polimēra saistvielā (saistīts ūdens) izraisa uzbriecšanu. Saistītā ūdens masas daudzums  $w_v$  PKM paraugos tika novērtēts no  $\varepsilon_v(t)$  (Att. 3.5). No empīriski iegūtiem grafikiem  $w_v(t)$  (Att. 3.8) noteiktas  $w_\infty$  un  $D^*$  vērtības (Tabula 3.1), kuras izrādījās tuvas poliesterā saistvielas Norpol 440 mitruma sorbciju raksturīgām vērtībām [10].



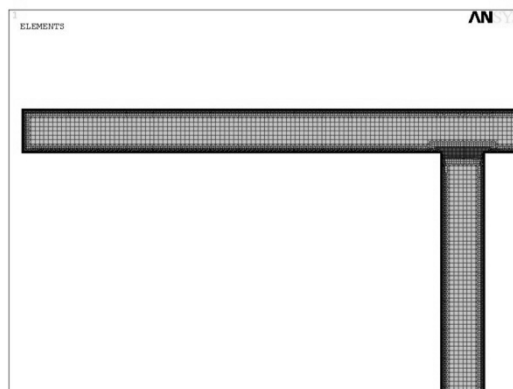
Att. 3.8. Saistošā ūdens masas saturs PKM paraugos atkarībā no to izturēšanās laika ūdenī *Transverse* (■), *Axial* (◆) un *Square* (▲) paraugiem pie 20 °C

### 3.2.2. Mitruma sorbcijas modelēšana profilā

Profila mitruma difūzijas uzdevuma skaitliskais risinājums veikts pilnai *A* un vienkāršotai *B* aprēķinu shēmai (Att. 2.2), izmantojot vienu un to pašu GE tīklu (Tabula 3.1). Mitruma plūsmu precīzākai izskaitļošanai kontakta zonās ar mitru virsmu un sienu un plauktu saskares vietās GE tīkls tika vairāk koncentrēts (Att. 3.9).

Tabula 3.1. Saistošā ūdens sorbcijas raksturlielumi polimēru saistvielā dažāda izmēra paraugiem

Parauga veids	$w_{\infty} - w_0, \%$	$w_{\infty}^m, \%$	$D^* \cdot 10^2 \text{ mm}^2/\text{h}$
<i>Axial</i>	0,17	0,85	1,85
<i>Transverse</i>	0,193	0,97	1,34
<i>Square</i>	0,201	1,05	1,12

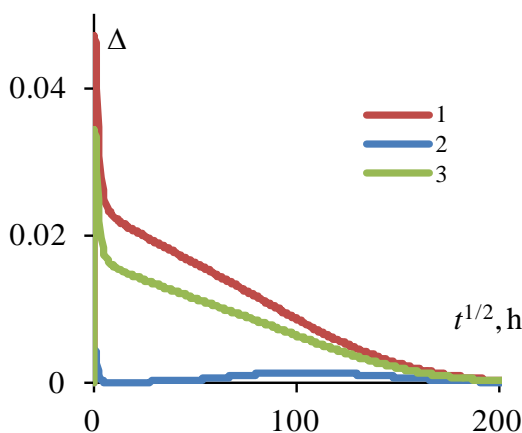


Att. 3.9. Galīgo elementu modeļa fragments

Noteiktas mitruma satura vidējās vērtības laikā visā šķērsgriezumā (*A* shēma) un tā elementos: sienā un plauktos (*B* shēma). Noskaidrots, ka šķērsgriezumu dažādo elementu kļūdai  $\Delta(t)$ , kas izraisīta, aizstājot shēmu *A* ar *B*, piemīt vislielākā vērtība pārejas procesu dažādās stadijās (Att. 3.10). Plauktam un šķērsgriezumam kopumā  $\Delta(t)$  piemīt vislielākās vērtības sākuma stadijā (līknes 1 un 3). Sienai  $\Delta(t)$  ir izteikts maksimums pārejas procesa pirmajā ceturtdaļā (līkne 2). Beigu stadijā  $\Delta < 0,1\%$ . Noteiktas kļūdas absolūtās vērtības var uzskatīt par novērtēšanas ticamības intervālu.

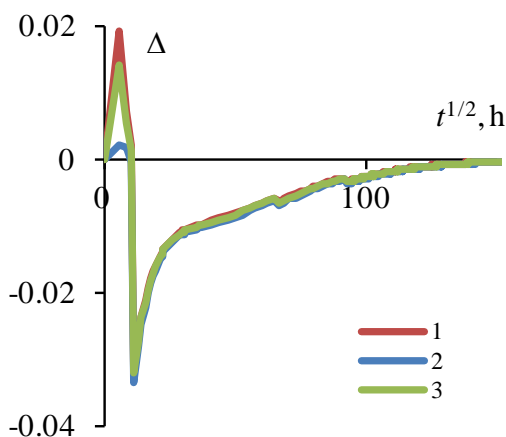
Lielas  $\Delta$  vērtības plauktam un šķērsgriezumam kopumā pārejas procesa sākuma stadijā izskaidrotas ar to, ka šajā etapā ir augsta intensitāte un ir grūti iegūt tikpat labu skaitliskā atrisinājuma sakritību tāpat kā turpmākos etapos. Lielākos laikos  $t > 0,005t_{max}$ , kur  $t_{max}$  – pārejas procesa ilgums, lielākā  $\Delta$  vērtība plauktam nepārsniedz 2,5%. Profilam kopumā  $\Delta < 1,5\%$  (līkne

3, Att. 3.10). Nelielas lieluma  $\Delta$  vērtības ļauj spriest par to, ka skaitliskās shēmas vienkāršošana, t.i., shēmas *A* aizstāšana ar shēmu *B* ir pieļaujama inženieru aprēķinos. Rezultāti, kas iegūti iepriekš, izskatot siltumvadāmības uzdevumu [38], ļauj apgalvot, ka dotā pieeja ir pieļaujama dubult-T profiļiem ar reāli pielietojamām ģeometrisko izmēru attiecībām plašos ortotropijas īpašību diapazonos



**Att. 3.10.** Kļūda, kas izraisīta samainot shēmu *A* uz *B* (Att. 2.2), vidējam mitruma saturam plauktā (līkne 1), sienā (līkne 2) un šķērsgrīzumā kopumā (līkne 3)

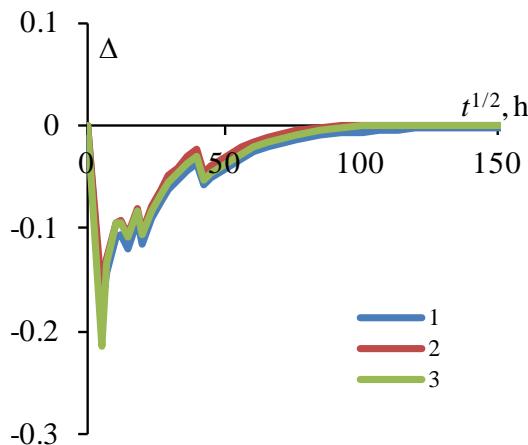
Analītiskā modeļa piemērotības novērtēšanai tika izskaitļotas vidējo mitrumsatura vērtību relatīvās atšķirības, kas iegūtas gan analītiski, gan ar GEM, šķērsgrīzuma elementos un kopumā. Aprēķinu kļūdas atkarība no pārejas procesa laika ir parādīti Att. 3.11. Grafiku salīdzināšana parāda, ka abu aprēķinu kļūdas ir vienādas. Maksimālā vērtība  $\Delta = 3,5\%$  ir novērojama procesa sākuma stadijā pie  $t = 0,006t_{max}$ , tad  $\Delta < 1\%$ , bet ja  $t > 0,5t_{max}$ , tad  $\Delta = 0$ . Ievērojama kļūda pārejas procesa sākuma stadijā izskaidrojama ar skaitlisko rezultātu nestabilitāti šajā laika periodā. Kopumā iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka gan skaitliskais, gan analītiskais modelis, vienkāršojot shēmu *B*, apraksta vienādi (Att. 3.11). Tā kā shēma *B* apraksta vidējo mitruma saturu profilā GEM ar kļūdu, kas nepārsniedz 2,5%, tad analītiskais atrisinājums var tikt izmantots aprēķinu vienkāršošanai.



**Att. 3.11.** Analītiskā aprēķina kļūda salīdzinot ar skaitlisko pēc vienkāršotās shēmas *B* vidējam mitruma saturam šķērsgrīzumā: plaukts (līkne 1), siena (līkne 2), sija kopumā (līkne 3)

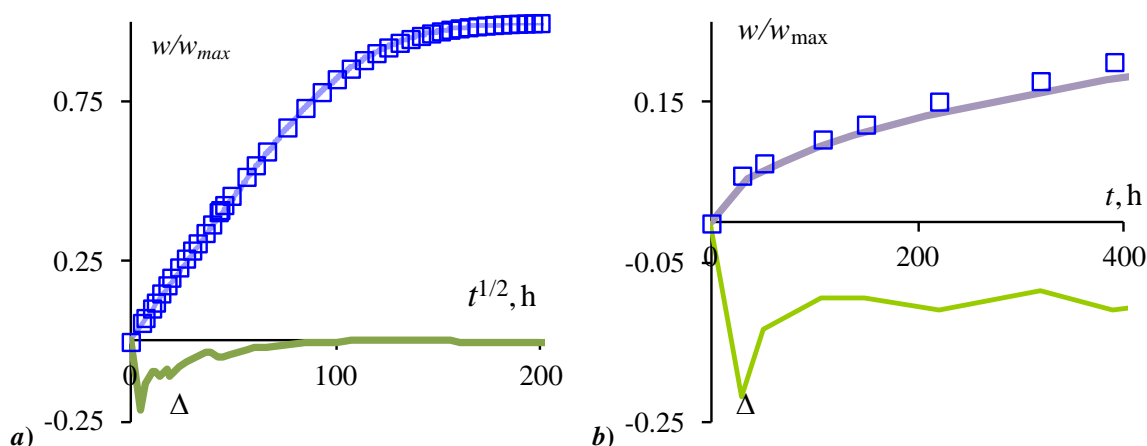
Šķērsgrīzuma vidējā mitruma satura analītiskā aprēķina kļūdas attiecībā pret eksperimentāliem datiem ir parādītas Att. 3.12, kur ir redzams, ka visi trīs aprēķini (skaitliskie pēc *A* un *B* shēmām un analītiskais pēc *B* shēmas) parāda līdzīgus rezultātus. Aprēķinu shēmas izmaiņai ir relatīvi maza ietekme. Maksimālā kļūda  $\sim 20\%$  ir novērojama sākuma stadijā, kad process notiek visintensīvāk, kas padara sarežģītu eksperimentālo un aprēķina mitruma satura

novērtēšanu. Pārejas process turpmākā attīstībā samazinās kļūda, un kad  $t > 0,005t_{max}$  tā faktiski ir vienāda ar nulli.



Att. 3.12. Vidējā mitruma saturs aprēķina kļūda attiecībā pret eksperimentu: pilnam (līkne 1), vienkāršotam (līkne 2) un analītiskam (līkne 3) modelim

Salīdzināšanai Att. 3.13 ir parādīti sorbcijas līknes eksperimentālie un analītiskā aprēķina rezultāti (pēc *B* shēmas), kas ir normēti uz maksimālo mitruma saturu, kā arī aprēķina kļūda attiecībā pret eksperimentu. Ka redzams no grafikiem, profila, kas ir iegremdēts ūdenī istabas temperatūrā, vidējais mitruma saturs sasniedz piesātinājumu pēc 3 gadiem. Aprēķina kļūda pēc 100 stundām ir 10%, bet pēc 200 dienām samazinās līdz nullei.



Att. 3.13. Profila mitruma sorbcijas līkne kopumā (punkti ir eksperiments, līnija ir aprēķins) un analītiskā aprēķina kļūda attiecībā pret eksperimentu (a) un kopējās līknes sākuma apgabals (b)

### 3.3. Absorbētā mitruma ietekme uz pultrūdētā PKM īpašībām

#### 3.3.1. Pultrūdētā PKM elastības moduļi un stiprība

PKM paraugu mehāniskās izpētes programma sevī iekļāva: a) vienas sss stiepi un b) trīspunktu lieci kvazistatiskajā slodzē. Visi pētījumi veikti uz hidrauliskās testēšanas mašīnas MTS. Pētījumi stiepē tika veikti rovinga šķiedru ass virzienā *X* atbilstoši standartam ASTM D 3039 ar tverējspaiļu pārvietošanās ātrumu 2 mm/min, kas atbilst deformācijas ātrumam  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ . Paraugu izmēri 300×15×10 mm.

Pētījums trīspunktu liecē slāņu plaknē (sienas paraugi) un perpendikulārajā plaknē (plaukta paraugi) tika veikti atbilstoši standartam ASTM D 790. Slogošanas ātrums 5 mm/min. Paraugu izmēri 250×20×10 mm. PKM bīdes moduļa noteikšanai katrs paraugs tika testēts uz trīs laidumiem 210, 160, 61 mm, pie tam tikai uz laiduma  $L = 160$  mm paraugi slogoti līdz parauga sagraušanai. Pētījumi uz 210 un 61 mm laidumiem tika veikti elastības moduļa stiepē  $E_L = E_x$  un

bīdes moduļa  $G_{LT}$  (vai  $G_{TH}$ ) aprēķināšanai, izmantojot grafisko metodi. Lai nebojātu paraugus nākamiem pētījumiem, uz 210 mm laiduma izliece nepārsniedza 5 mm, bet 61 mm laidumam – 1,5 mm.

PKM struktūru nevienmērību noskaidrošanai tika pētīti vismaz 4 paraugi, kas izgriezti no augšējā, apakšējā, labā un kreisā plauktiem. Izpētīti 5 sienas paraugi. Absorbētā mitruma ietekmes uz mehāniskām īpašībām novērtēšanai tika veikti pētījumi sākuma stāvoklī un pēc mitrināšanas. Kā tika sagaidīts [41], pultrūdetā stiklaplasta gar rovinga asi sprieguma-deformācijas diagramma ir lineāra līdz parauga sagraušanai. PKM raksturlielumi  $E_x$ ,  $\varepsilon^R$ ,  $\sigma^R$  sienai un plauktam sakrīt statistiskās izkliedes robežās (Tabula 3.2).

No pētījumiem trīspunktu liecē slodze-izliece atkarības ir pārveidotas fiktīvais spriegums-fiktīvā deformācija pēc siju klasiskās teorijas formulām

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2}, \varepsilon_f = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (3.2)$$

Elastības moduļa liecē vai šķietama moduļa noteikšanai  $E_{app} = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f}$ .

Vērtība  $E_{app}$  liecē slāņu plaknē, kas noteikta sienas paraugiem ir par 7,2% mazāks nekā elastības modulis stiepē  $E_x$ . Vērtība  $E_{app}$  liecē perpendikulārajā slāņiem plaknē, kas noteikta plauktu paraugiem, ir mazāka  $E_x$  par 33% (Tabula 3.2). Tik liela atšķirība  $E_{app}$  un  $E_x$  vērtībās ir nosacīta ar bīdes deformāciju ietekmes efektu uz izlieces lielumu. PKM bīdes moduļu vērtības slāņu plaknē  $G_{LT} = 2,22$  GPa un perpendikulāri slāņiem  $G_{TH} = 1,49$  GPa ir noteikti ar grafisko metodi. Vērtības  $G_{LT}$  un  $G_{TH}$  var tikt tāpat aprēķinātas [35] pēc eksperimentāli noteiktām vērtībām  $E_x$  un  $E_{app}$  (Tabula 3.2), izmantojot formulu (1.17)

$$G = \frac{12I_y}{kAL^2} \left( \frac{E_x E_{app}}{E_x - E_{app}} \right), \quad (3.3)$$

kur  $I_y = \frac{bh^3}{12}$ ,  $A = bh$ ,  $k = 2/3$ . Ņemot vērā eksperimentālo datu izkliedes, bīdes moduļu izmaiņas diapazoni ir  $G_{LT} = 1,87 \div 4,55$  GPa,  $G_{TH} = 0,23 \div 0,53$  GPa. Vidējām vērtībām  $E_x$  un  $E_{app}$  atbilst  $G_{LT} = 2,07$  GPa,  $G_{TH} = 0,33$  GPa. Kā bija sagaidāms, starpslāņu bīdes modulis  $G_{TH}$  ir mazāks nekā slāņu plaknē  $G_{LT}$ .

**Tabula 3.2. Pultrūdetā stiklaplasta mehānisko īpašību raksturlielumi un to standartnovirze, kas iegūti 10 mm biezu paraugu, izgrieztu no sienas un plauktiem, izpētē stiepē un liecē**

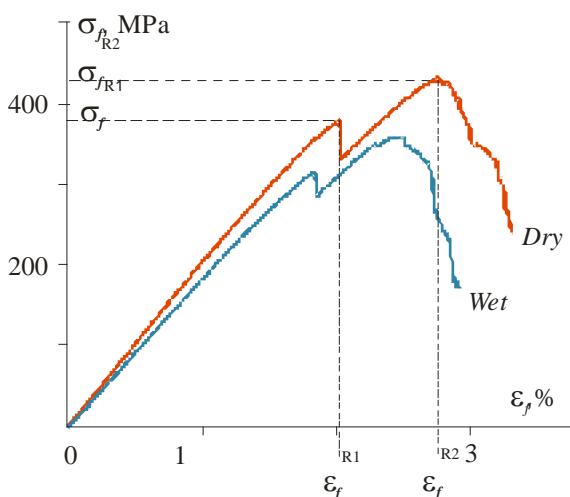
Raksturlielums	Siena	Plaukts	
	Sākuma stāvoklis	Sākuma stāvoklis	Pēc mitrināšanas
Stiepe			
$E_x$ , GPa	27,6±0,7	27,9±2,2	28,4±2,2
$\nu_{xy}$	0,30±0,02	0,31±0,03	-
$\nu_{xz}$	0,29±0,03	0,31±0,03	-
$\sigma_x^R$ , MPa	321,1±10,8	330,5±33,9	321,8±33,9
$\varepsilon_x^R$ , %	1,20±0,13	1,27±0,07	1,21±0,07
Liece			
	Slāņu plaknē	Plaknē, kas perpendikulāra slāņiem	
$E_f$ , GPa	25,6±0,4	18,6±1,4	17,9±1,4
$\sigma_f^{R1}$ , MPa	-	338,8±14,8	334,7±14,8
$\varepsilon_f^{R1}$ , %	-	2,02±0,16	2,01±0,16
$\sigma_f^{R2}$ , MPa	466,3±18,8	389,5±26,0	344,6±26,0
$\varepsilon_f^{R2}$ , %	1,78±0,07	2,90±0,14	2,55±0,14

Diagrammas  $\sigma_f - \varepsilon_f$  sienas paraugu liecē slāņu plaknē ir lineāras līdz to sagraušanai, kas tiek raksturota ar robežvērtībām  $\varepsilon_f^{R2}$ ,  $\sigma_f^{R2}$ . Diagrammas  $\sigma_f - \varepsilon_f$  plauktu paraugu liecē plaknē, kas perpendikulāra slāņiem, ir lineāra līdz virsējā paklāja slāņa sagraušanai, ko raksturo  $\varepsilon_f^{R1}$ ,  $\sigma_f^{R1}$  vērtības. Šajā punktā spriegums  $\sigma_f$  krīt, tad pieaug, palielinoties  $\varepsilon_f$  līdz punktam  $\varepsilon_f^{R2}$ ,  $\sigma_f^{R2}$  (Att. 3.14). Turpmākā  $\sigma_f$  samazināšanās līdz parauga sagraušanai paraugam atslāņojoties (Att. 3.15).

Mehāniskās izpētes rezultātu analīze (Tabula 3.2) parāda, ka vidējo vērtību standartnovirze ir lielāka paraugiem, kas izgriezti no plauktiem. Lielas novirzes iemesls ir paklāja slāņu pārklājums plauktu malu paraugos. Šo paraugu blīvums, kā arī elastības modulis ir mazāki. Piemēram, Att. 3.16 parādītas  $E_{app}$  vērtības plauktu paraugiem, kur katrs trešais ir malu paraugs (sk. Izgriešanas shēmu Att. 3.1a). Vērtības  $E_{app}$  malu paraugiem ir ievērojami mazākas nekā citiem. Turpmāk mitruma ietekmes efekta uz PKM mehāniskām īpašībām atrašanai malu paraugi tika izslēgti no analīzes.

PKM mehānisko īpašību raksturlielumi stiepē mitrinātiem paraugiem nav mazāki kā sākotnējiem, nemitrinātiem paraugiem (sk. Tabula 3.2).

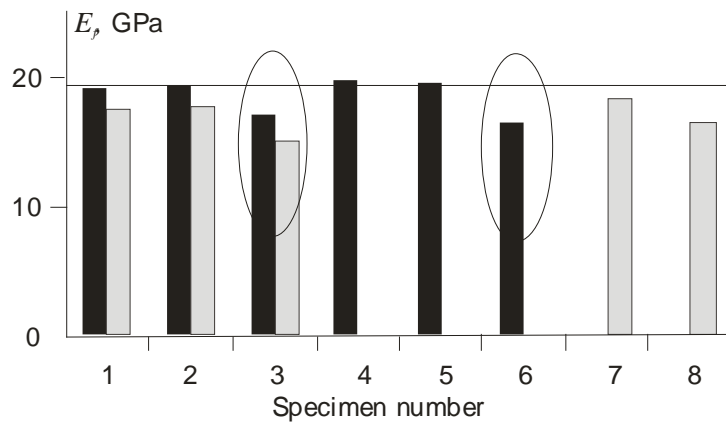
Diagrammas  $\sigma_f - \varepsilon_f$  sākuma stāvokļa un mitrinātiem paraugiem atšķiras: PKM mitrināšana izraisa elastības moduļa liecē  $E_{app}$  samazināšanos par 8%, stiprībai  $\sigma_f^{R2}$  par 16,5%, robeždeformācijai  $\varepsilon_f^{R2}$  par 0,34% salīdzinot ar sausiem PKM (Tabula 3.2, Att. 3.14). Tā kā elastības modulis stiepē  $E_x$  paliek nemainīgs, tad  $E_{app}$  izmaiņa saskaņā ar atkarību (1.17) ir saistīta ar starpslāņu bīdes moduļa  $G_{TH}$  samazināšanos par 13%, kas savulaik ir izskaidrojama ar poliestera saistvielas raksturlielumu izmaiņu mitrināšanas dēļ [10].



Att. 3.14. Fiktīvā sprieguma-fiktīvās deformācijas raksturīgās diagrammas plauktu paraugiem sākuma un mitrinātā stāvokļos



Att. 3.15. Parauga sagraušanas fotoattēls trīspunktu liecē

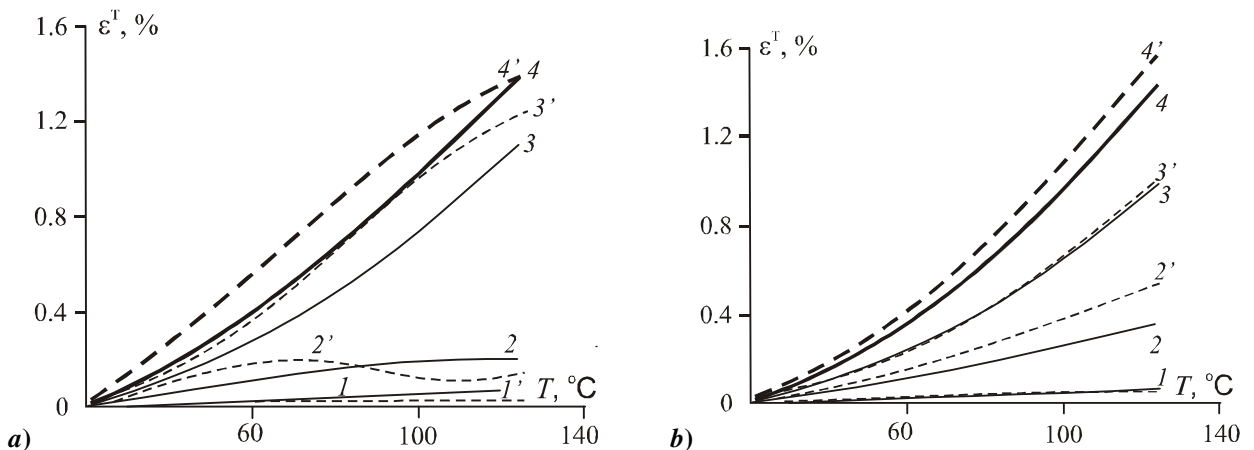


Att. 3.16. Pultrūdētā stiklaplasta elastības moduļi liecē, kas izmērīti dažāda iz griezuma plauktu paraugiem

### 3.3.2. Termiskās izplešanās koeficienti

Paaugstināto temperatūru ietekmes efekts uz PKM uzvedību tika novērtēts pēc dilatometrijas izpētes rezultātiem paraugiem (6×6×6 mm), izgrieztiem no plauktiem ar izmēriem 250×20×10 mm. Izpēte tika veikta uz UIP-70M testēšanas iekārtas, kas tarēta ar epoksīda sveķu un Ni, Cu paraugiem. PKM termiskās deformācijas simetrijas galvenajās asīs  $\epsilon_x^T$ ,  $\epsilon_y^T$  un  $\epsilon_z^T$  tika mērītas uz 3 paraugiem divos sildīšanas-dzesēšanas ciklos temperatūru diapazonos 20÷125 °C. Sildīšanas ātrums 2 °C/min; dzesēšana –patvaļīga. Lineārie termiskās izplešanās koeficienti (LTIK)  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  un  $\alpha_z$  (Tabula 3.3) tika noteikti atkarību  $\epsilon_x^T(T)$ ,  $\epsilon_y^T(T)$  un  $\epsilon_z^T(T)$  (Att. 3.17) lineāros apgabalos, kas atbilst stiklveida un viskoelastīgam PKM stāvokļiem un šķērso viens otru, kad  $T = T_g$ . Stiklošanās temperatūra noteikta pēc  $\epsilon_z^T(T)$ .

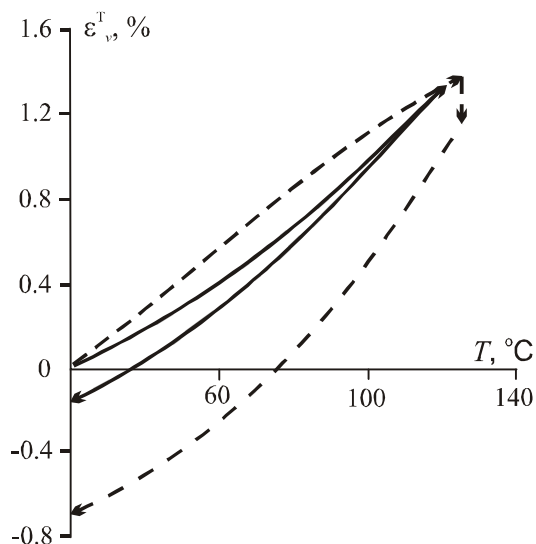
Atkarības  $\epsilon_x^T(T)$ ,  $\epsilon_y^T(T)$  un  $\epsilon_z^T(T)$  PKM sākuma un mitrinātā stāvokļos pirmās uzsildīšanas rezultātā ir parādītas Att. 3.17a. Deformācija  $\epsilon_x^T$  pieaug lineāri, palielinoties  $T$  visā izmaiņu diapazonā;  $\alpha_x = 5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ir tuvs stiklašķiedras LTIK. Vērtība  $\epsilon_y^T$  sasniedz maksimumu sākuma PKM un minimumu mitrinātam PKM, kad  $T \sim 100^\circ\text{C}$ . Vērtība  $\epsilon_z^T$  monotoni pieaug, palielinoties  $T$  līdz 100 °C (līknes 3 un 3’).



Att. 3.17. Termiskās deformācijas  $\epsilon_x^T(1,1')$ ,  $\epsilon_y^T(2,2')$ ,  $\epsilon_z^T(3,3')$  un to summa  $\epsilon_v^T(4,4')$  atkarība no temperatūras pultrūdētām stiklaplastām sākuma (1,2,3,4) un mitrinātā (1',2',3',4') stāvokļos, kur pirmajai (a) un otrajai (b) uzsildīšanai

Kad  $T \geq 100^\circ\text{C}$  deformācijas  $\epsilon_z^T$  palielināšanās ātrums ir pastāvīgs sākuma PKM vai samazinās mitrinātam PKM. Vērtību  $\alpha_y$  un  $\alpha_z$  izmaiņas temperatūru diapazonā 70-100 °C var tikt izskaidroti ar saistvielas pēccietēšanas procesiem un/vai mitruma iztvaikošanos. Tā kā atkarības  $\epsilon_x^T(T)$ ,  $\epsilon_y^T(T)$  un  $\epsilon_z^T(T)$  sākuma un mitrinātiem PKM ir dažādas (Att. 3.17a), tad to summas arī ir dažādas: grafiks  $\epsilon_v^T(T)$  sākuma PKM ir ieliekta līnija (līkne 4), mitrinātam – izliekta (līkne 4’). Laukums, kas ir ierobežots ar līknēm 4 un 4’, ir vienāds ar iztvaikota mitruma no mitrinātiem

paraugiem tilpumu, sildot tos līdz 125 °C. Atkārtojot uzsildīšanu visu atkarību  $\varepsilon_x^T(T)$ ,  $\varepsilon_y^T(T)$  и  $\varepsilon_z^T(T)$  grafiki izskatās kā ieliektas līnijas sākuma un mitrinātiem paraugiem (Att. 3.17b). Pie tam  $\varepsilon_x^T(T)$  un  $\varepsilon_z^T(T)$  sākuma un mitrinātam PKM sakrīt;  $\varepsilon_y^T(T)$  mitrinātam PKM ir lielāks nekā sākuma stāvokļa PKM visām  $T$  vērtībām. Pēc PKM paraugu dzesēšanas novērojamas paliekošas deformācijas. Paliekošu tilpuma deformāciju atšķirība starp sākuma un mitrinātiem paraugiem raksturo iztvaikotā mitruma tilpumu sildīšanas-dzesēšanas ciklā (Att. 3.18). Pēc otrā cikla šī atšķirība ir ievērojami mazāka nekā pēc pirmā.



**Att. 3.18. Tilpuma termiskās deformācijas atkarība no temperatūras pirmajā paraugu sildīšanas-dzesēšanas ciklā sākuma (nepārtraukta līnija) un mitrinātā (pārtraukta līnija) PKM**

Atkarību  $\varepsilon_z^T(T)$  un  $\varepsilon_y^T(T)$  pie  $T > 50$  °C nelinearitāte ir vairāk izteikta mitrinātam PKM, kas savulaik ļauj spriest par to, ka elastības moduļi  $E_y$  un  $E_z$  šajā apgabala ir atkarīgi no temperatūras. Tā kā vērtība  $\varepsilon_x^T(T)$  ir lineāra visā apskatāmajā temperatūru  $20 < T < 125$  °C diapazonā, tad var teikt, ka elastības modulis  $E_x$  nav atkarīgs no  $T$ .

### 3.3.3. Sijas stingums

Dubult-T sijas struktūra un ģeometrija ir simetriskas. Līdz ar to sijas neitrālā ass sakrīt ar šķērsriezuma ģeometrisko simetrijas asi (Att. 2.2a). Lieces stingums  $E_x I_y$  noteikts no PKM elastības moduļa  $E_x$  (Tabula 3.3) un inerces momenta [35]

$$I_y = \frac{1}{12} [a_w h^3 + b_f (H^3 - h^3)], \quad (3.4)$$

kur  $a_w$ ,  $b_f$ ,  $H$ ,  $h$  ir šķērsriezuma lineārie izmēri (Att. 2.2a).

**Tabula 3.3. Pultrūdētā stiklplasta termiskās izplešanās koeficienti sākuma un mitrinātā stāvokļos**

LTIK · 10 <sup>5</sup> , °C <sup>-1</sup>	Sākumā	Pēc mitrināšanas
$\alpha_x$	0,49	0,50
$\alpha_y$	1,85	3,51
$\alpha_z$	3,55	5,25
$\alpha_v$	5,88	7,70

Rindā gadījumu, piemēram, novērtējot  $I_y$  izmaiņas termiskās izplešanās un/vai uzbriešanas dēļ, formulā (3.4) ir ērti pāriet uz plauktu un sienas lineāriem izmēriem, veicot aizstāšanu  $h = b_w$ ,  $H = b_w + 2a_f$ . Apskatāmajai dubult-T sijai  $a_f = a_w = a$ . Tādēļ

$$I_y = \frac{t}{12} (b_w^3 + 6b_w^2 b_f + 12b_w b_f a + 8b_f a^2). \quad (3.5)$$

Šķērsriezuma lineāro izmēru izmaiņa PKM termiskās izplešanās dēļ



$$\begin{aligned}
b_w &= b_{w0}(1 + \alpha_y^T \Delta T), \\
b_f &= b_{f0}(1 + \alpha_y^T \Delta T), \\
a &= a_0(1 + \alpha_z^T \Delta T).
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

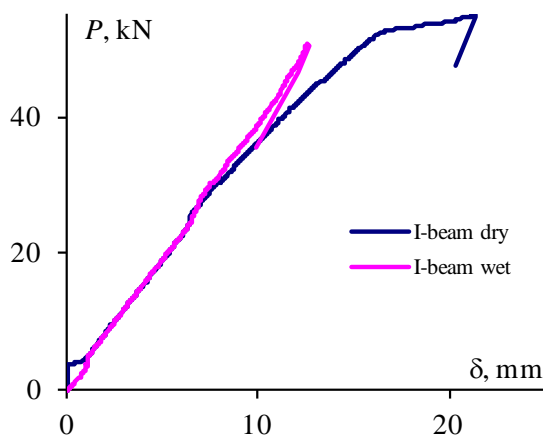
Šķērsriezuma lineāro izmēru izmaiņa PKM uzbriešanas dēļ (lielākām PKM uzbriešanas deformācijām)

$$\begin{aligned}
b_w &= b_{w0}(1 + \varepsilon_{y\max}^w), \\
b_f &= b_{f0}(1 + \varepsilon_{y\max}^w), \\
a &= a_0(1 + \varepsilon_{z\max}^w).
\end{aligned}
\tag{3.7}$$

Pētāmajai dubult-T sijai ar eksperimentāli noteiktām vērtībām  $E_x$  un  $\varepsilon_{y\max}^w, \varepsilon_{z\max}^w$  tika aprēķināti inerces moments un sijas stingums sākuma stāvoklī  $I_y^0 = 4,099 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ ,  $E_x^0 I_y^0 = 1,136 \times 10^{-3} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$  un pēc mitrināšanas  $I_y^w = 4,125 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ ,  $E_x^0 I_y^w = 1,143 \times 10^{-3} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ ;  $E_x^w I_y^w = 1,171 \times 10^{-3} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ . Pieļāvums, ka PKM elastības modulis  $E_x$  pēc mitrināšanas nemainīsies ( $E_x^w = E_x^0$ ) izraisīja sijas lieces stinguma palielināšanos par 0,62%. Saskaņā ar eksperimentāliem datiem (Tabula 3.2)  $E_x^w > E_x^0$ . Ņemot vērā PKM elastības modulis ir palielinājies mitrināšanas dēļ ir sasniegta sijas lieces stinguma palielināšanās par 2,42%.

Siju ar garumu 2,5 m izpēte (sākumā un pēc 183 dienu ilgas mitrināšanas ūdenī) trīspunktu liecē parādīja, ka stingums liecē  $E_x I_y$  izmainījies no  $1,151 \times 10^{-3}$  līdz  $1,183 \times 10^{-3} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ , t.i., palielinājies par 3,3%. Sijas stinguma eksperimentālās vērtības sākuma un mitrinātā stāvoklī saskaņojas ar aprēķinu, kas iegūts no plakano paraugu izpētes rezultātiem.

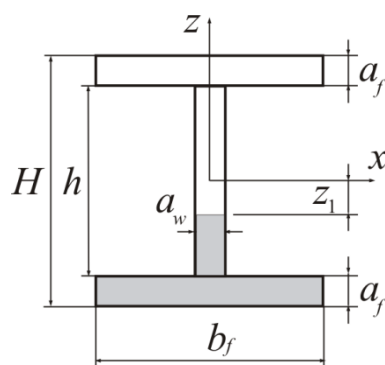
Atbilstoši eksperimentam sijas stiprības izmaiņa liecē, kas izraisīta mitrināšanas dēļ, nepārsniedz 5%, t.i., atrodas eksperimentālo datu izkliedes robežās. Tas atbilst rezultātiem, kas iegūti plakano paraugu izpētē.



Att. 3.19. Atkarība slodze-izliece 2,5 m garas sijas izpētē

Analoģiski mitruma ietekmei, novērtē arī paaugstinātās temperatūras ietekmi uz sijas lieces stingumu. Pētāmai dubult-T sijai ar lineāriem izmēriem, kas norādīti Att. 3.1, eksperimentāli noteiktām LTIK  $\alpha_y, \alpha_z$  vērtībām (Tabula 3.3), aprēķina inerces momentu un sijas stingumu pie  $60^\circ \text{C}$   $I_y^T = 4,137 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ ;  $E_x^0 I_y^T = 1,154 \times 10^{-3} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ . Lieces stinguma palielināšanās sastāda 0,93%.

Eksperimentālo datu aprēķinu rezultātu atbilstība 2,5 m garai sijai apstiprina pieņēmumu, ka šajā gadījumā bīdes deformāciju ietekmes efekts var tikt neņemts vērā. Tomēr tas palielinās, samazinoties laiduma  $L$  garumam un pie uzdotā  $L$  – ar reizinātāja  $1/kAG_{LT}$  palielināšanos atbilstoši vienādojumam (1.16).



Att. 3.20. Tangensiālo spriegumu aprēķinam sijas šķērsgrīzumā

Dubult-T sijas šķērsgrīzumā (Att. 3.20) tangensiālie spriegumi mainās pēc sienas augstuma pēc paraboliska likuma

$$\tau_{xz} = \frac{P}{2a_w I_y} \left[ \frac{a_w}{2} \left( \frac{h^2}{4} - z_1^2 \right) + \frac{b_f}{2} \left( \frac{H^2}{4} - \frac{h^2}{4} \right) \right] \quad (3.8)$$

un sasniedz maksimumu sienas centrā  $z_1 = 0$

$$\tau_{xz}^{\max} \Big|_{z_1=0} = \frac{P}{16t_w I_y} \left[ a_w b_w^2 + 4b_f a_f (b_w + a_f) \right]. \quad (3.9)$$

Apskatāmajai dubult-T sijai  $a_f = a_w = a$ , tāpēc

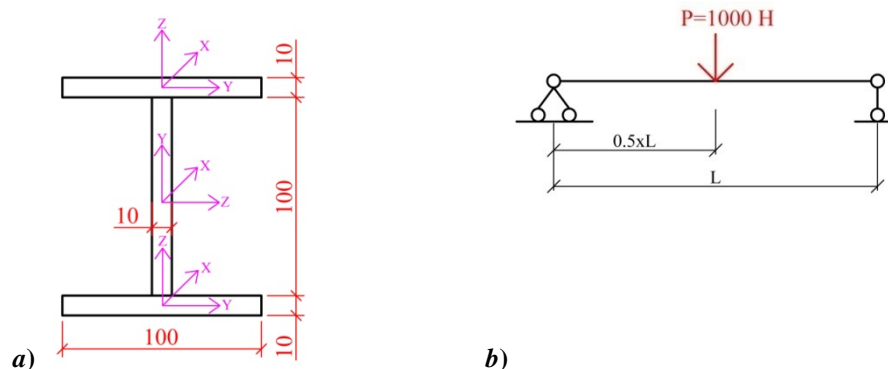
$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{8I_y} (b_w (b_w + 4b_f) + 4b_f a). \quad (3.10)$$

Parastas aprēķinu formulas (1.12) - (1.14), kas iegūtas pamatojoties uz materiālu pretestības metodi, ļauj novērtēt PKM elastības  $E_L$  un lieces  $G_{LT}$  moduļu, kā arī sijas lineāro izmēru izmaiņu ietekmes efektu uz izlieces lielumu. Acīmredzams, ka citu PKM elastības raksturlielumu izmaiņa (apkārtējās vides iedarbības faktoru ietekmē) arī var ietekmēt izlieces lielumu. Lai novērtētu šo efektu, tika veikta skaitliskā modelēšana, izmantojot GEM.

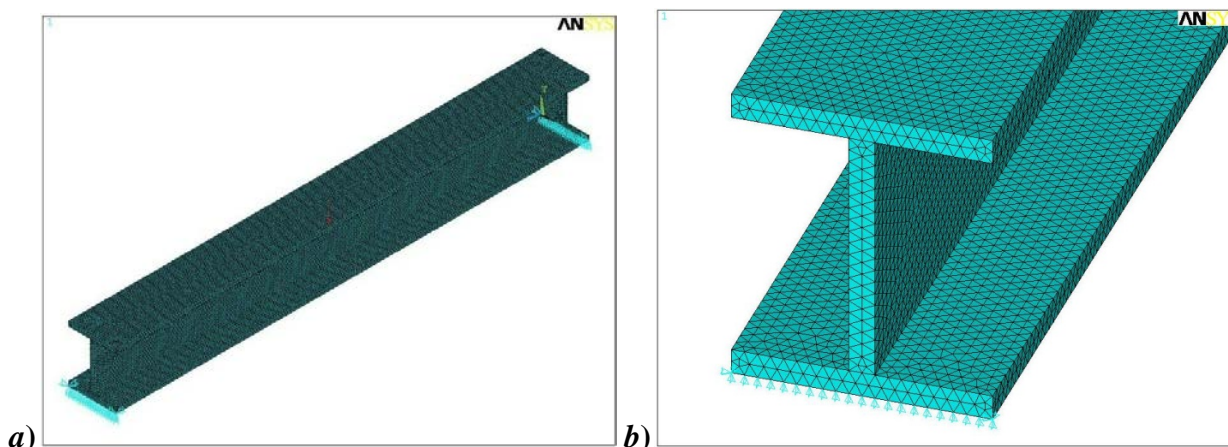
### 3.3.4. Sijas stinguma izpēte ar galīgo elementu metodi

PKM elastības raksturlielumu izmaiņas efekta uz izlieces lielumu trīspunktu liecē novērtēšanai ir veikta skaitliska modelēšana dubult-T veida sijai GEM vidē ANSYS 11.0. Pētījums tika veikts 1 un 3 m garam sijām ar šķērsgrīzuma ģeometriju (Att. 3.21a). X, Y, Z asis katrā sijas elementā sakrīt ar PKM galvenajam simetrijas asīm. Slodzes pielikšanas shēma ir parādīta Att. 3.21b. Aprēķinos izmantots trīsdimensiju galīgais elements *Solid45* ar 8, 6 vai 4 mezgliem un 3 brīvības pakāpēm (pārvietojums attiecībā pret X, Y, Z) katrā mezglā. GE tīkls ir vienmērīgs, GE skaits sijas elementu (plauktu un sienas) biezumā ir vienāds ar divi. GE modelis un tā fragments ar uzdotiem robežnosacījumiem ir parādīti Att. 3.22. Bīdes deformāciju adekvātai novērtēšanai pielietots cieta ķermeņa modelis. Sprieguma-deformācijas stāvokļa aprēķins ir veikts lineāri elastīgā gadījumā.

Sākumā PKM elastības raksturlielumi tika izvēlēti sekojošie:  $E_x = E_y = E_z = 10$  GPa,  $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 1$  GPa,  $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0,3$ , t.i., sākotnēji PKM izskatīts kā izotropš. Turpmāk katras elastības un bīdes moduļa vērtības mainījās (divreiz pieauga vai samazinājās) pie nemainīgiem pārējiem raksturlielumiem.



Att. 3.21. Profila šķērsriezuma izmēri mm un PKM simetrijas asis (a), un pieliktās slodzes shēma (b)

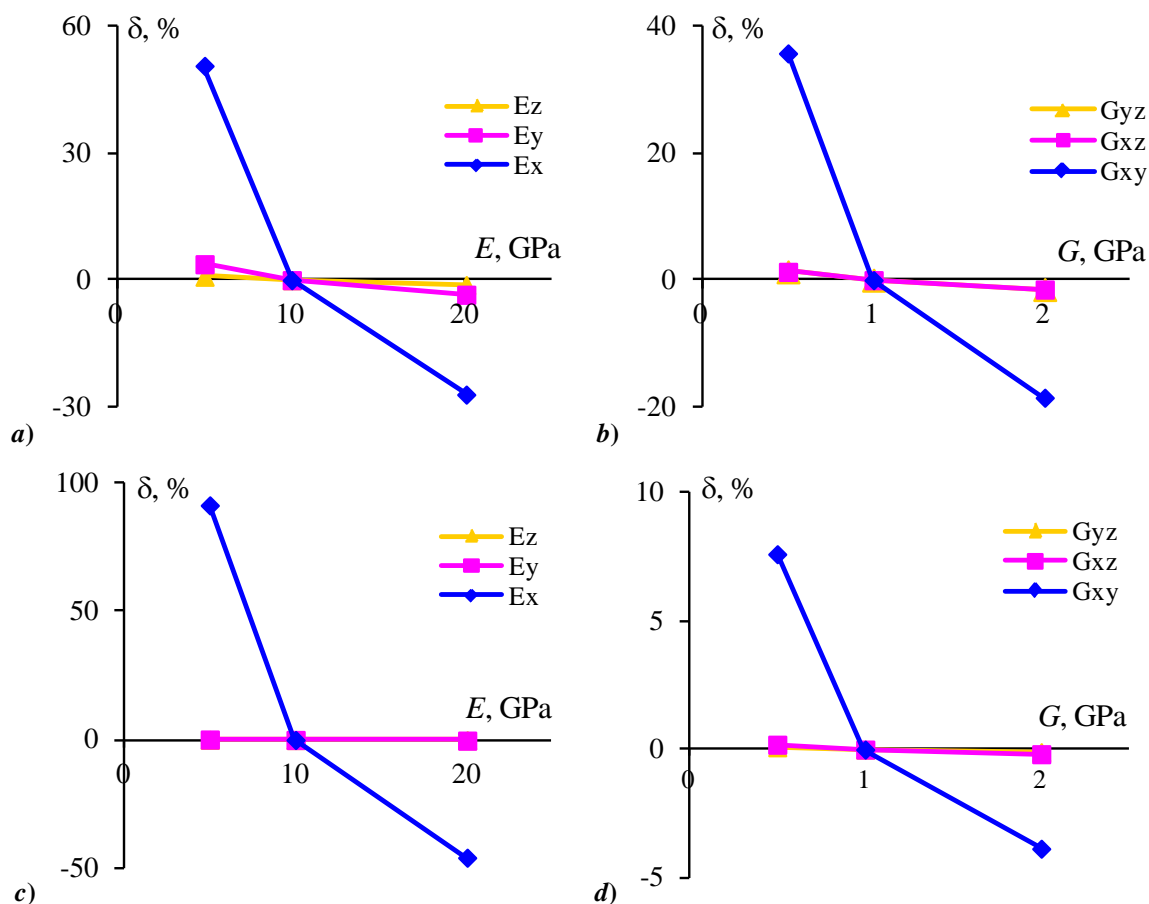


Att. 3.22. GE modelis dubult-T sijai (a) un tā fragments (b)

Salīdzinājumam Att. 3.23a,b ir parādītas mainīgās izlieces vērtības 1 m garai sijai atkarībā no elastības moduļu  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  (Att. 3.23a) un bīdes moduļu  $G_{xy}$ ,  $G_{xz}$ ,  $G_{yz}$  (Att. 3.23b) izmaiņām. Kā ir redzams no attēliem, vislielāko ietekmi uz sijas izlieci izraisa  $E_x$  un  $G_{xy}$  moduļu izmaiņa. Palielinot sijas laiduma garumu ietekme uz garenisko elastības moduļa  $E_x$  samazināšanos palielinās, bet uz bīdes moduli  $G_{xy}$  slāņu plaknē – samazinās.

Sijai ar garumu 1 m  $E_x$  divkārša samazināšanās izraisa izlieces palielināšanos par 50% (Att. 3.23a), tai laikā, kad, samazinot  $E_y$  un  $E_z$  divas reizes, izliece palielinās par 1 un 4%, attiecīgi. Moduļa  $G_{xy}$  divkāršā samazināšanās izraisa izlieces palielināšanos par 36% (Att. 3.23b), bet  $G_{xz}$  un  $G_{yz}$  – mazāk kā par 1,5%. Sijai ar garumu 3 m  $E_x$  divkārša samazināšanās izraisa izlieces palielināšanos par 90% (Att. 3.23c), bet  $E_y$  un  $E_z$  – par mazāk kā 0,3%,  $G_{xy}$  – par 8% (Att. 3.23d),  $G_{xz}$  un  $G_{yz}$  – par mazāk kā 0,2%. Efekts, kas iegūts divkāršojot stiprības raksturlielumus ir nedaudz mazāks. Tā, piemēram, sijai ar garumu 1 m divkārša  $E_x$  un  $G_{xy}$  palielināšanās izraisa izlieces samazināšanos par 30 un 20%, attiecīgi (Att. 3.23a,b). Tādējādi izlieces izmaiņas atkarība no elastības un bīdes moduļu izmaiņas ir nelineāra.

PKM elastības raksturlielumu ietekme uz sijas izlieci ir izskatīta diezgan plašā materiāla stinguma izmaiņas diapazonā. Kā parāda literatūras apskats un eksperimentālo pētījumu rezultātu analīze pultrūdetam stiklaplastam divkārša elastības vai bīdes moduļu samazināšanās vai palielināšanās slāņu plaknē ir maz ticama. Lielāka ir varbūtība PKM elastības raksturlielumu (īpaši bīdes moduļa slāņu plaknē par 20-50%) samazināšanai, kas var izraisīt 1 m garas sijas izlieces palielināšanos par 20-40%. Iespējama arī gareniska elastības moduļa samazināšanās par 10%, kas palielinātu izlieci par 20%.

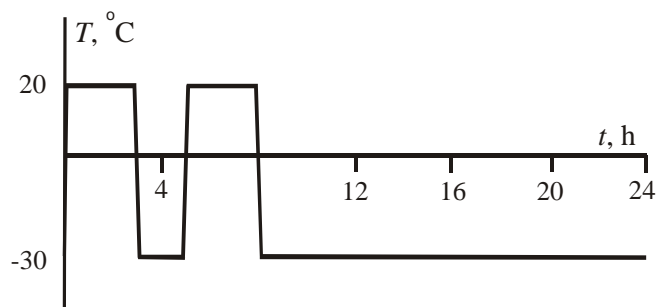


Att. 3.23. Sijas ar garumu 1 m (a, b) un 3 m (c, d) izlieces relatīvās izmaiņas atkarībā no PKM elastības (a, c) un bīdes (b, d) moduļu vērtībām

### 3.4. Cikliskās sasaldēšanas-atsaldēšanas ietekme

#### 3.4.1. PKM elastības moduļi un stiprība

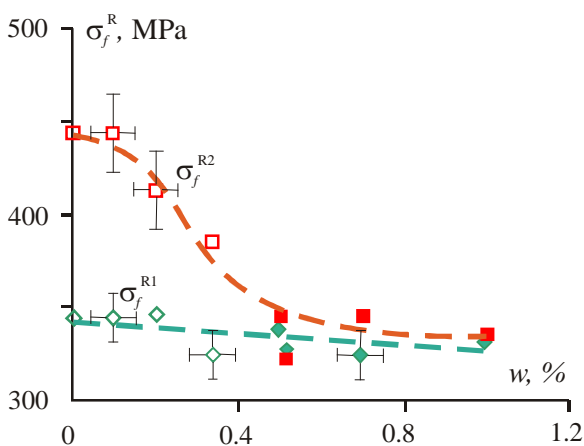
Mainīgās temperatūras ietekme uz pulvrūdētā stiklaplasta mehāniskiem raksturlielumiem ir pētīta uz plakaniem paraugiem, izgrieztiem no plauktiem, ar izmēriem 250×20×10 mm. Divas paraugu sērijas: sākuma stāvoklī un mitrinātie polietilēna plēvē, otrā – ar ūdeni ievietoti saldētavā DKK 110GS -31 °C temperatūrā uz divām stundām, tad izņemti ārā un izturēti istabas temperatūrā 3 stundas. Tika pieņemts, ka praktiski momentāna temperatūras maiņa ir līdzīga termošokam [42] un var izraisīt bojājumus PKM struktūrā. Temperatūras-laika režīma izvēle ir balstīta uz nepieciešamību izmantot negatīvās temperatūras parauga vidū sasaldēšanas stadijā un istabas temperatūrā atsaldēšanas stadijā. Parauga temperatūras izmaiņa kontrolēta ar termopāri. Pēc diviem īsiem sasaldēšanas-atsaldēšanas cikliem paraugu sērijas atstāja saldētavā līdz 24 stundu gara cikla noslēgšanās (Att. 3.24). Divu īsu ciklu izmantošana ļauj saīsināt eksperimenta laiku, bet paraugu izturēšana saldētavā atlikušajā laikā novērš spriegumu relaksāciju PKM struktūrā. Pēc  $N = 0, 15, 54$  un  $125$  katras sērijas pilniem cikliem tika izņemti 5 paraugi, kurus ievietoti termiskajā skapī uz 3 stundām istabas temperatūrā un tad pētīja trīspunktu liecē plaknes, kas perpendikulāra slāņiem, virzienā atbilstoši ASTM D 790 standartam. Slodzes traversas pārvietošanās ātrums 5 mm/min. Laiduma garums  $L = 160$  mm.



Att. 3.24. Sasaldēšanas – atsaldēšanas pilnais cikls

Pultrūdētā stiklaplasta mehānisko īpašību raksturlielumi atkarība no  $N$  ir parādīti Tabula 3.4, kur redzams, ka sasaldēšanas-atsaldēšanas efekts ir vairāk izteikts sākuma stāvokļa PKM. Pēc  $N = 54$  elastības modulis liecē palielinās, robeždeformācijas  $\epsilon_f^{R1}$  un  $\epsilon_f^{R2}$ , kas atbilst paklāja un rovinga slāņu sabrukšanai, samazinājās. Turpmākā  $N$  palielināšanās izraisīja stiprības  $\sigma_f^{R2}$  samazināšanos. Līdzīgi efekti novēroti arī mitrinātam PKM, bet tie ir mazāk izteikti, jo pirmais maksimums ( $\epsilon_f^{R1}, \sigma_f^{R1}$ ) diagrammā  $\sigma_f$ - $\epsilon_f$  (Att. 3.14a), kas raksturo paklāja ārējā slāņa sabrukšanu, ir tuvāks otrajam ( $\epsilon_f^{R2}, \sigma_f^{R2}$ ), kas raksturo rovinga slāņu sabrukšanu. Mitrinātam PKM mehānisko īpašību izmaiņa sasaldēšanas-atsaldēšanas dēļ atrodas eksperimentālo datu izkliedes robežās.

Paraugu svāra salīdzināšana pirms un pēc sasaldēšanas-atsaldēšanas parādīja, ka neskatoties uz polietilēna plēves izmantošanu, mitruma saturs  $w$  paraugos mainās: sākuma stāvokļa PKM – palielinās, bet mitrinātam – samazinās (Tabula 3.4). Mehānisko raksturlielumu un  $w$  izmaiņas salīdzināšana, ļāva noteikt vienotas atkarības  $\sigma_f^{R1}(w)$  un  $\sigma_f^{R2}(w)$  PKM paraugiem abām paraugu sērijām (Att. 3.25). Jāatzīmē, ka sakarā ar nelielām difūzijas koeficientu  $D_y, D_z$  vērtībām, mitruma koncentrācijas sadalījums parauga šķērsgriezumā ir nevienmērīgs. Vislielākā  $w$  izmaiņa: palielināšanās absorbcijas (sākuma stāvokļa paraugiem) un samazināšanas desorbcijas (mitrinātiem PKM) procesā ārējiem paklāja slāņiem. Tā kā lielums  $\sigma_f^{R1}$  raksturo ārējā paklāja slāņa stiprību, tad korelācija  $\sigma_f^{R1} - w$  ir lineāra. Atkarībai  $\sigma_f^{R2}(w)$  piemīt sarežģītāks raksturs.



Att. 3.25. Stiprības un mitruma satura korelācija sākuma (□, ◇) un mitrinātos (■, ◆) PKM paraugos pie cikliskās sasaldēšanas-atsaldēšanas

Pieņēmumu par mitruma satura  $w$  netiešu ietekmi, kas mainās PKM paraugu sasaldēšanas-atsaldēšanas rezultātā, uz mehāniskiem raksturlielumiem pārbaudīja, tos kondicionējot. Tā pēc  $N = 125$  paraugus ievietoja to attiecīgajā vidē: sākuma stāvokļa PKM – eksikatoros ar silikagēlu, mitrinātos – ūdenī. Pēc noteiktiem laika intervāliem paraugus izņēma un nosvēra. Pēc absorbcijas (mitrinātam PKM) un desorbcijas (sākuma stāvokļa PKM) procesa beigām paraugus testēja trīspunktu liecē. Pētījuma rezultāti ir iekļauti Tabula 3.4 sākuma stāvokļa un mitrināto, kā arī pēc sasaldēšanas-atsaldēšanas paraugu salīdzināšanai. No tabulas ir redzams, ka pēc mitruma efekta ietekmes noņemšanas PKM mehānisko īpašību raksturlielumi

pēc sasaldēšanas-atsaldēšanas ir pat lielāki. Elastības moduļa palielināšanās liecē par 13,8% un robeždeformācijas samazināšanās par 8,9% sākuma PKM pēc cikliskas sasaldēšanas-atsaldēšanas liecina par trausluma palielināšanos. Pie tam stiprības izmaiņa par 0,9% atrodas eksperimentālo datu izkliedes robežās. Robeždeformācijas un stiprības palielināšanās par 2,7 un 2,5%, atbilstoši, mitrinātam PKM pēc cikliskas sasaldēšanas-atsaldēšanas liecina par trausluma samazināšanos. Trausluma palielināšanās var būt izskaidrojama ar pēcsacietēšanas procesu un/vai polimēra saistvielas fizikālo novecošanos. Savukārt trausluma samazināšanās – ar materiāla plastificēšanos un/vai spriegumu relaksāciju PKM struktūrā.

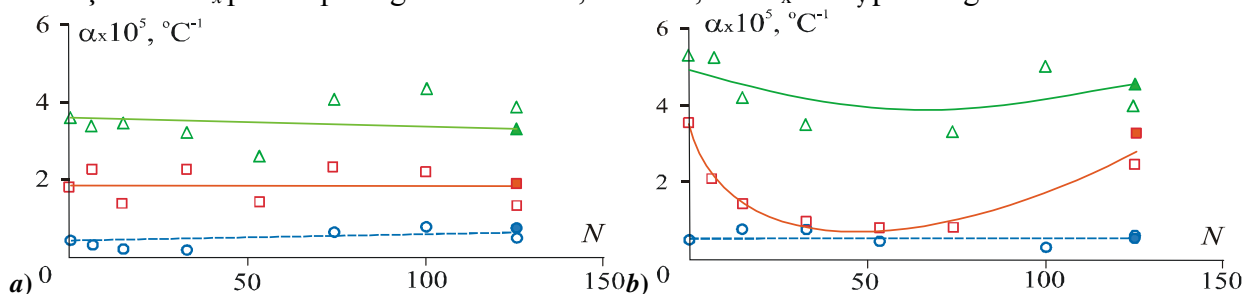
**Tabula 3.4. Pultrūdetā stiklaplasta elastības modulis un stiprība liecē pēc cikliskās sasaldēšanas-atsaldēšanas**

Ciklu skaits, $N$	$E$ , GPa	$\sigma_f^{R1}$ , MPa	$\varepsilon_f^{R1}$ , %	$\sigma_f^{R2}$ , MPa	$\varepsilon_f^{R2}$ , %	$w$ , %
Sākuma materiāls						
0	16,7±0,6	343,5	2,19	442,2±20,6	3,81	0
15	16,7±0,9	343,5	2,19	442,2±19,7	3,81	0,09
54	19,1±0,3	345,4	1,92	411,4±13,0	3,08	0,20
125	19,1±0,0	323,4	1,78	383,3±13,5	2,84	0,34
125+ sausināšana	19,0±0,5	366,0	2,03	446,1±7,0	3,47	0
Mitrināts materiāls						
0	16,9±0,5	333,5	2,15	334,6±3,4	2,57	1
15	18,5±0,4	325,7	1,95	343,5±7,0	2,44	0,70
54	17,2±0,5	327,8	2,11	322,8±5,0	2,45	0,53
125	17,9±0,7	339,7	2,09	343,0±11,8	2,53	0,50
125+ūdens	16,8±0,4	329,9	2,10	342,9±6,9	2,64	1

### 3.4.2. Termiskās izplešanās koeficienti

Pultrūdetā stiklaplasta LTIK pie  $T < T_g$  atkarība no  $N$  ir parādīta Att. 3.26, kur redzams, kas mitrināta PKM LTIK vērtības ir lielākas nekā sākotnējam PKM, un tendence samazināties, palielinot  $N$  līdz 74 ir vairāk izteikta.

Kā ir minēts iepriekš (Att. 3.17a), pie  $T \geq T_g$  termiska deformācija  $\varepsilon_y^T$  un  $\varepsilon_z^T$ , ka arī  $\varepsilon_v^T$  palielinās nevienmērīgi, palielinot  $T$ , kas varētu būt izskaidrojams ar mitruma iztvaikošanos no paraugiem, tos sildot. Šāda atkarību  $\varepsilon_y^T(T)$ ,  $\varepsilon_z^T(T)$  un  $\varepsilon_v^T(T)$  uzvedība iekļauj papildus kļūdu  $T_g$  noteikšanā. Datu izklide  $\alpha_y$  un  $\alpha_z$  (Att. 3.26), ka arī  $\alpha_v$  un  $T_g$  (Tabula 3.5) ir liela. Sākuma stāvokļa PKM  $\alpha_x$  parāda pieauguma tendenci, tai brīdī, kad  $\alpha_x$  un  $\alpha_y$  pastāvīgi lielumi.



**Att. 3.26. LTIK:  $\alpha_x$  (o),  $\alpha_y$  (□) un  $\alpha_z$  (Δ) atkarībā no sasaldēšanas - atsaldēšanas pilno ciklu daudzuma sākuma (a) mitrinātam (b) PKM; pilnie simboli – pēc paraugu kondicionēšanas attiecīgajā vidē**

Kā parādīts Tabula 3.4, cikliskā sasaldēšana-atsaldēšana izraisa mitruma satura izmaiņu paraugos. Pēc PKM paraugu kondicionēšanas to attiecīgajā vidē LTIK,  $\alpha_v$  un  $T_g$  atjaunojas (sk. Att. 3.26 un Tabula 3.5), t.i., nenotiek neatgriezeniskas izmaiņas. Lineārā un tilpuma termiskā izplešanās koeficienta un  $T_g$  izmaiņa ir pamatoti ar mitruma satura izmaiņu PKM struktūrā. Tas

nozīmē, ka pultrūdētais stiklaplasts ir noturīgs pret termociklēšanu apskatāmajā temperatūras-laika diapazonā, tomēr tā īpašības var mainīties mitruma sorbcijas-desorpcijas dēļ.

Vērtības  $w_m$  novērtēšanai pēc  $T_g$  izmaiņas izmantota sakarība (1.1). Ar nosacījumu, ka viss PKM absorbētais mitrums atrodas saistvielā, tad mitruma saturam PKM ir jābūt  $w_c = w_m(1 - \mu)$ , kur  $\mu$  ir neorganiskas saistvielas masas saturs. Aprēķinātās vērtības  $w_c$  tika salīdzinātas ar mitruma satura  $w$  izmaiņu PKM, kas noteikts eksperimentāli (sk. Tabula 3.4). Eksperimentālo datu izklīdes robežās  $w_c \sim 0,3w$ , t.i., tikai 30% no PKM absorbētā mitruma atrodas polimera saistvielā. Pārējais mitrums atrodas porās. Poru, pildītu ar ūdeni, esamība ir apstiprināta salīdzinot sorbcijas līkni un paraugu tilpuma izmaiņu laikā (Att. 3.6).

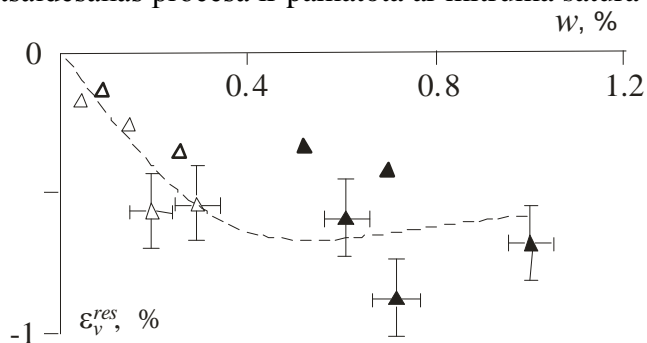
**Tabula 3.5. Pultrūdētā stiklaplasta termiskās izplešanās tilpuma koeficients un stiklošanās temperatūra atkarība no sasaldēšanas-atsaldēšanas ciklu skaita**

Ciklu skaits, $N$	$\alpha_v \cdot 10^5, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$T_g, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha_v \cdot 10^5, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$T_g, \text{ }^\circ\text{C}$
Sākuma materiāls				
	1. uzsildīšana		2. uzsildīšana	
0	7,6	78,2	6,4	73,9
7	7,6	78,1	6,8	78,3
15	5,0	79,5	6,1	74,5
33	5,0	74,6	7,1	77,2
54	6,8	80,5	7,6	77,7
74	3,5	80,0	8,0	62,0
100	10,1	78,9	7,7	70,3
125	8,1	74,1	3,8	74,8
125+sausināšana	6,6	78,0	6,7	74,1
Vidējā vērtība ±standartnovirze	6,7±2,0	78,2±2,4	6,7±1,3	73,6±5,0
Mitrināts materiāls				
	1. uzsildīšana		2. uzsildīšana	
0	10,0	52,8	7,0	-
7	9,0	54,7	7,4	78,2
15	6,9	45,7	6,6	78,1
33	8,3	47,9	8,5	79,5
54	6,9		7,4	74,6
74	4,4	49,7	5,7	80,5
100	-	52,9	7,4	80,0
125	7,3	51,2	6,7	78,9
125+вода	8,2	50,8	7,1	74,1
Vidējā vērtība ±standartnovirze	7,6±1,7	50,7±2,9	7,0±0,8	78,0±2,4

Bez LTİK un  $T_g$  dilatometrijas pētījumi ļauj novērtēt PKM paraugu termiskās deformācijas dzesēšanas procesā un paliekošas deformācijas  $\varepsilon_{vres}^T$  (Att. 3.18). Palielinot  $N$  histerēzes cilpa  $\varepsilon_v^T(T)$  paraugus sildot-dzesējot izmainās: sākuma stāvokļa paraugiem- palielinās, bet mitrinātiem – samazinās. Vērtība  $\varepsilon_{vres}^T$  ir  $N$  funkcija: augoša sākuma stāvokļa paraugiem un dilstoša – mitrinātiem. Tā kā  $\varepsilon_{vres}^T$  izmaiņas var būt izskaidrotas ar mitruma saturu izmaiņu paraugos, izskatīsim sakarību  $\varepsilon_{vres}^T(w)$  (Att. 3.27). No attēla ir redzams, ka vērtība  $\varepsilon_{vres}^T$  palielinās līdz ar  $w$  palielināšanos sākuma stāvokļa PKM un samazinās līdz ar  $w$  samazināšanos mitrinātam,



kas veido vienotu atkarību  $\varepsilon_{vres}^T(w)$ . Tādā veidā paliekošās termiskās deformācijas izmaiņa cikliskā sasaldēšanas-atsaldēšanas procesā ir pamatota ar mitruma saturu izmaiņu PKM paraugos.



**Att. 3.27. Paliekošā (pēc pirmās sasaldēšanas-atsaldēšanas cikla) tilpuma deformācija atkarībā no mitruma satura sakuma (Δ) un mitrinātos (▲) paraugos pēc to sasaldēšanas-atsaldēšanas**

Dilatometrijas izpētes rezultātu analīze parādīja, ka pultrūdetā stiklaplasta LTIK izmaiņa pēc cikliskās sasaldēšanas-atsaldēšanas sniedz svarīgu informāciju par mitruma saturu PKM struktūrā. Vērtību  $\alpha_v$  un  $T_g$  izmaiņu novērtēšana papildina mehānisko raksturlielumu datus un var tikt veiksmīgi izmantota PKM struktūras un īpašību novērtēšanā pēc sasaldēšanas-atsaldēšanas.

Pultrūdetā stiklaplasta plakano paraugu, izgrieztu no dubult-T sijas plauktiem, eksperimentālā izpēte parādīja, ka:

- Sākuma stāvokļa un mitrināto līdz piesātinājumam paraugu cikliskā sasaldēšana-atsaldēšana izraisa elastības moduļa un stiprības liecē palielināšanos un robeždeformācijas samazināšanos. Efekts ir vairāk izteikts sākuma stāvokļa PKM. Elastības moduļa palielināšanās ir atbilstoša LTIK samazināšanai gar šķiedru asi.

- LTIK pultrūdetā stiklaplasta 3 galveno ašu virzienā ir dažādi: vislielākā vērtība piemīt LTIK virzienā, kas ir perpendikulārs asij un slāņu plaknei. Abu LTIK vērtības virzienā, kas ir perpendikulārs šķiedru asij ir augstākas nekā mitrinātam PKM.

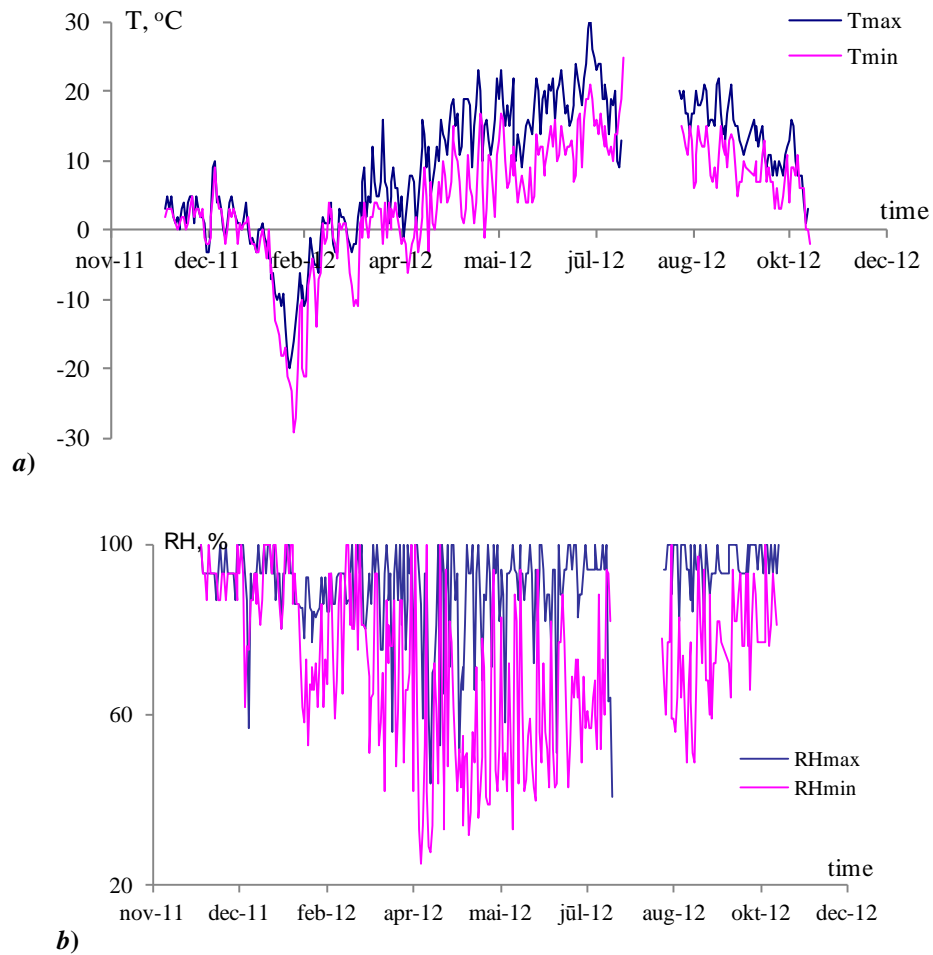
- PKM paraugu uzsildīšana līdz 125 °C un to dzesēšana izraisa paliekošas deformācijas (rukumu).

- Mehānisko īpašību liecē, LTIK un paliekošas termiskās deformācijas cikliskā sasaldēšanas-atsaldēšanas procesā izmaiņas ir pamatotas ar mitruma saturu izmaiņu PKM paraugos.

### 3.5. Natūrās ekspozīcijas ietekme

Mainīgo temperatūru  $T$  un apkārtējās vides mitruma kopējā iedarbības ietekme tika pētīta paraugu natūrās ekspozīcijas apstākļos speciāli ierīkotā laukumā uz Polimēru mehānikas institūta jumta (Rīgā) no 2011. gada 20. decembra līdz 2012. gada 19. decembrim. Vērtību  $T$  un RH izmaiņas laikā (pēc MeteoProg.lv) ir parādītas Att. 3.28. Pultrūdeto stiklaplastu paraugu sērija (50 gab.), izgrieztiem no dubult-T veida sijas (shēma Att. 3.1a) ar izmēriem 250×20×10 mm, tika ievietota kasetē, kurā tikai viena paraugu virsma bija brīva, t.i., tika pakļauta lietus un gaismas iedarbībai. Paraugi iepriekš netika kondicionēti. Pēc noteiktiem laika intervāliem (~2 mēneši) 5 paraugi tika izņemti no kasetes, un tiem tika nomērīti lineārie izmēri, dielektriskā caurlaidība, kā arī tika veikti trīspunktu lieces un dilatometriskie pētījumi.

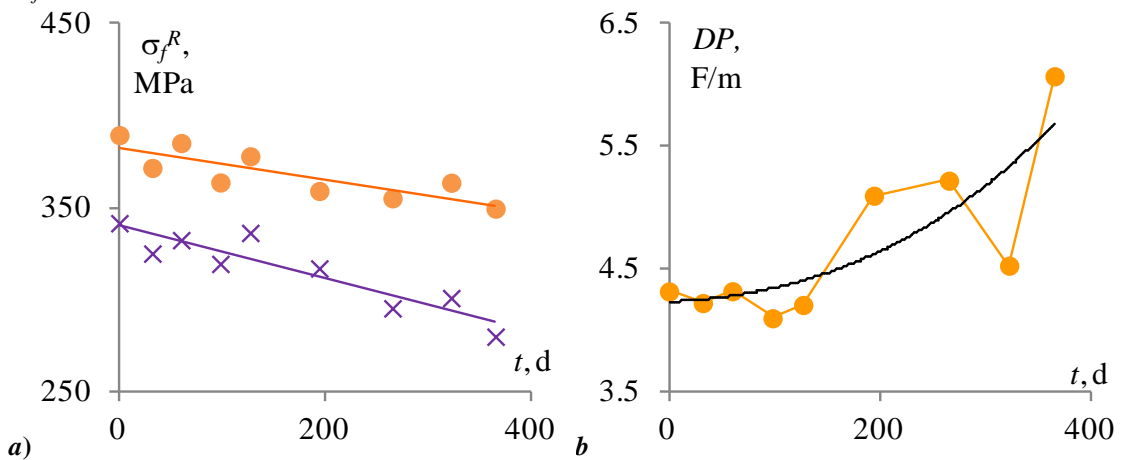




Att. 3.28. Temperatūras (a) un apkārtējās vides mitruma (b) izmaiņas pultrūdētā stiklaplasta paraugu natūrās eksponēcijas laikā

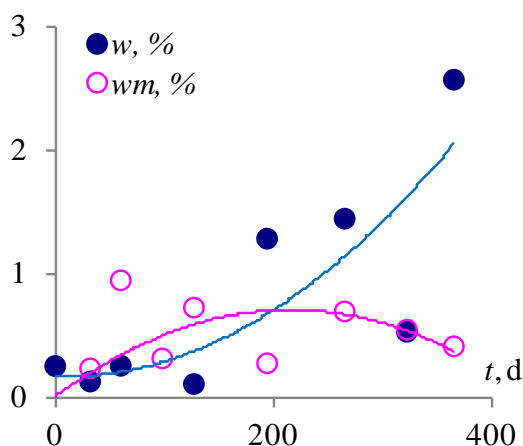
### 3.5.1. PKM elastības moduļi un stiprība

PKM mehānisko īpašību raksturlielumu, kas noteikti uz paraugiem līdz un pēc natūras eksponēcijas, salīdzināšana parādīja, ka elastības modulis liecē paliek nemainīgs, bet stiprība samazinās. Stiprības samazināšanās ir lineāra laikā (Att. 3.29), pie tam  $\sigma_f^{R1}$  izmaiņa notiek ātrāk nekā  $\sigma_f^{R2}$ .

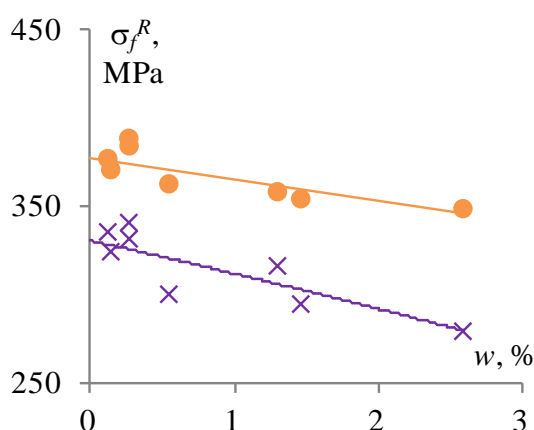


Att. 3.29. Pultrūdētā stiklaplasta stiprības liecē  $\sigma_f^{R1}$  (x) un  $\sigma_f^{R2}$  (o) (Att. 3.14) (a) un dielektriskās caurlaidības DP (b) atkarība no natūras eksponēcijas laikā

Šī izmaiņa var būt izraisīta ar mitruma satura izmaiņām paraugos, ko apstiprina dielektriskās caurlaidības  $DP$  palielināšanās (Att. 3.29b). Tās normēšana uz PKM vērtībām sākuma un mitrinātā stāvoklī ļauj novērtēt mitruma satura  $w$  izmaiņu PKM paraugos natūras ekspozīcijas apstākļos (Att. 3.30) un atrast  $w$  korelāciju ar  $\sigma_f^{R1}$  un  $\sigma_f^{R2}$  (Att. 3.31).



Att. 3.30. Mitruma saturs PKM (●), kas noteikts pēc dielektriskās caurlaidības izmaiņām, un PKM saistvielā (○), kas noteikts pēc stiklošanās temperatūras izmaiņām

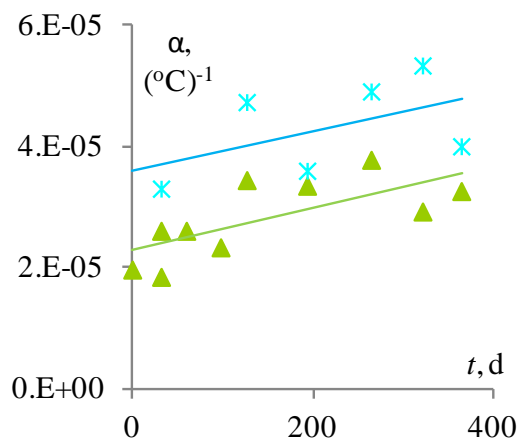


Att. 3.31. Stiklaplasta stiprības liecē  $\sigma_f^{R1}$  (x) un  $\sigma_f^{R2}$  (●) atkarība no mitruma satura

### 3.5.2. Termiskās izplešanās koeficienti

Pultrūdētā stiklaplasta LTIK  $\alpha_y$  pie  $T < T_g$  un  $T \geq T_g$  atkarībā no eksponēšanās laika ir parādīti Att. 3.32, kur ir redzams, ka abas  $\alpha_y$  vērtības, kas raksturo stiklveida un viskoelastīgu PKM stāvokli, palielinās laikā. Vērtības  $\alpha_x$  un  $\alpha_z$  paliek nemainīgas.

Ir noteikts, ka pultrūdētā stiklaplasta  $T_g$  palielinās laikā, kas arī apstiprina paraugu mitruma sorbciju to natūras ekspozīcijas laikā. Mitruma satura izmaiņas kinētika saistvielā  $w_m(t)$ , kas noteikta pēc  $T_g$  izmaiņas, izmantojot formulu (1.1), atšķiras no PKM paraugu mitruma satura izmaiņas kinētikas  $w(t)$ , kas noteikta pēc dielektriskās caurlaidības izmaiņām (Att. 3.30). Tas nozīmē, ka mitruma sadalījums starp saistvielu un porām PKM struktūrā izmainās laikā.



**Att. 3.32. Pultrūdēta stiklplastā LTIK  $\alpha_y$  pie  $T < T_g$  ( $\blacktriangle$ ) un  $T \geq T_g$  ( $*$ ) atkarība no eksponēšanas laika**

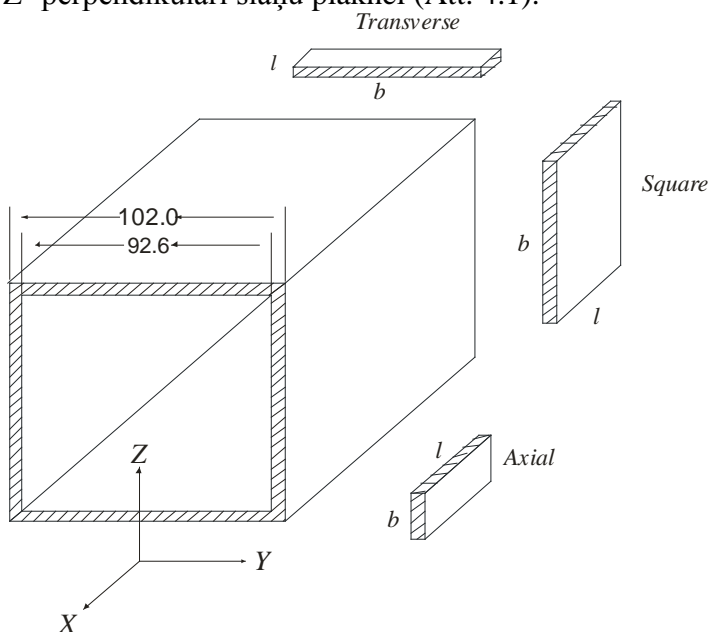
Vērtības  $w_m(t)$  izmaiņa korelē ar PKM paraugu uzbriešanu. Tāda veidā eksperimentālā izpētes rezultātu analīze ļauj apgalvot, ka PKM stiprības izmaiņu laikā izraisa mitruma satura izmaiņas porās. Taču PKM uzbriešanu izraisa mitrums polimēra saistvielā.

## 4. Metodikas aprobācija. Kārbveida sija

Pētījumam izvēlēts kārbveida profils no oglekļa un stikla šķiedru plastikāta (ražotājs EXEL, Somija), epoksīdsveķu bāzes saistvielas Novolac Dow DEN 431 ar iekšējo rovinga slāni no oglekļa šķiedrām SGL Sigrafil C30, un ārējiem stikla auduma slāņiem ( $600 \pm 45 \text{ g/m}^2$ ). Pēc ražotāja datiem armējuma šķiedras masas saturs PKM  $\mu_f = 0,70$ , no kuriem 0,65 ir oglekļa un 0,35 ir stikla šķiedras.

### 4.1. Plakanu paraugu izgriešana izpētei

No dažādiem profila elementiem: sienām un plauktiem, kuri šajā gadījumā ir identiski, bija izgriezti plakani paraugi, lai noteiktu mehāniskās un mitruma sorbcijas īpašības (Att. 4.1). Profila izmēri milimetros norādīti attēlā. Paraugu izmēri rovinga šķiedras ass virzienā  $l$ , šķērsvirzienā slāņu plaknē  $b$  un biezuma virzienā  $h$ , ir attiecīgi:  $120 \times 15 \times 4,4$  (*Axial*),  $15 \times 85 \times 4,6$  (*Transverse*),  $85 \times 85 \times 4,5$  mm (*Square*). Lai norādītu ortotropā PKM trīs galvenās simetrijas asis, izmantota koordinātu sistēma XYZ: X- rovinga šķiedras ass virzienā, Y- perpendikulāri šķiedras asij slāņu plaknē, un Z- perpendikulāri slāņu plaknei (Att. 4.1).



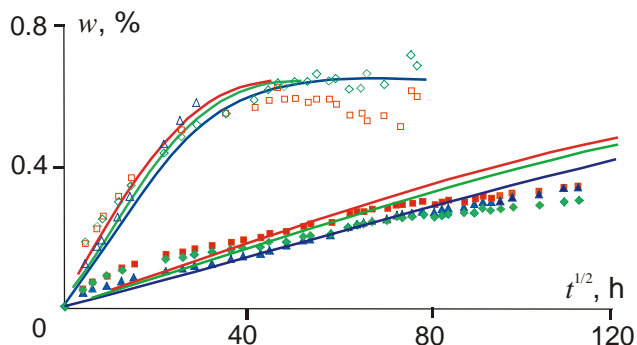
Att. 4.1. Shēma paraugu izgriešanai no profila

### 4.2. Mitruma sorbcija

#### 4.2.1. Pultrūdētā PKM difūzijas un uzbriešanas koeficientu noteikšana

PKM mitruma sorbcijas īpašības bija noteiktas dažādi izgrieztos paraugos, kas bija iegremdēti ūdenī istabas  $\sim 20, 50$  un  $70^\circ\text{C}$  temperatūrā, lai novērtētu sorbcijas paātrināšanās efektu. Pēc noteiktiem laika intervāliem paraugi tika izņemti no ūdens, nosvērti un izmērīti viņu lineārie izmēri, lai novērtētu tilpuma un blīvuma izmaiņas. No sorbcijas līknēm (Att. 4.2), katra no kurām pārstāv piecu paraugu vidējo rezultātu, bija noteikts maksimālais mitruma saturs  $w_\infty = 0,65\%$  (kas izrādījās vienāds dažāda lieluma paraugiem un visās testa temperatūrās) un fiktīvie difūzijas koeficienti  $D^*$ . Tālāk, risinot 3-vienādojumu sistēmu (1.10) ar uzdotiem  $l_i, b_i, h_i$  lielumiem, bija noteikti PKM  $D_x, D_y, D_z$  (Tabula 4.1), kur lielākā nozīme ir difūzijas koeficientam gar rovinga šķiedru asi X, bet vismazākā – virzienā perpendikulārajā slāņu plaknē Z. Izmantojot PKM  $D_x, D_y, D_z$  vērtības pie dažādam temperatūrām, tika noteiktas ekstrapolācijas

konstantes  $D_0^*$  un aktivācijas enerģijas  $U_d = 57,9; 55,2; 53,2$  kJ/mol ( atbilstoši  $D_x, D_y, D_z$ ) Arrēniusa formulā (1.11). Lielākā aktivācijas enerģijas vērtība ir difūzijas koeficientam rovinga šķiedras ass virzienā, mazākā vērtība ir difūzijas koeficientam slāņiem perpendikulārā virzienā. Tas nozīmē, ka difūzijas procesa aktivācijai gar rovinga šķiedras asi ir nepieciešama lielākā temperatūras izmaiņa nekā difūzijas procesa aktivācijai slāņiem perpendikulārā virzienā. Anizotropijas indekss  $D_x/D_z$  palielinās nedaudz palielinoties temperatūrai.



**Att. 4.2. Pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta dažādu izmēru paraugu sorbcijas līknes: Axial ( $\diamond, \blacklozenge$ ), Transverse ( $\square, \blacksquare$ ) un Square ( $\Delta, \blacktriangle$ ) pie 20°C ( $\diamond, \square, \Delta$ ) un 70°C ( $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle$ ); punkti atbilst eksperimentālajiem datiem, līnijas atbilst to aprakstam ar vienādojumu (1.8)**

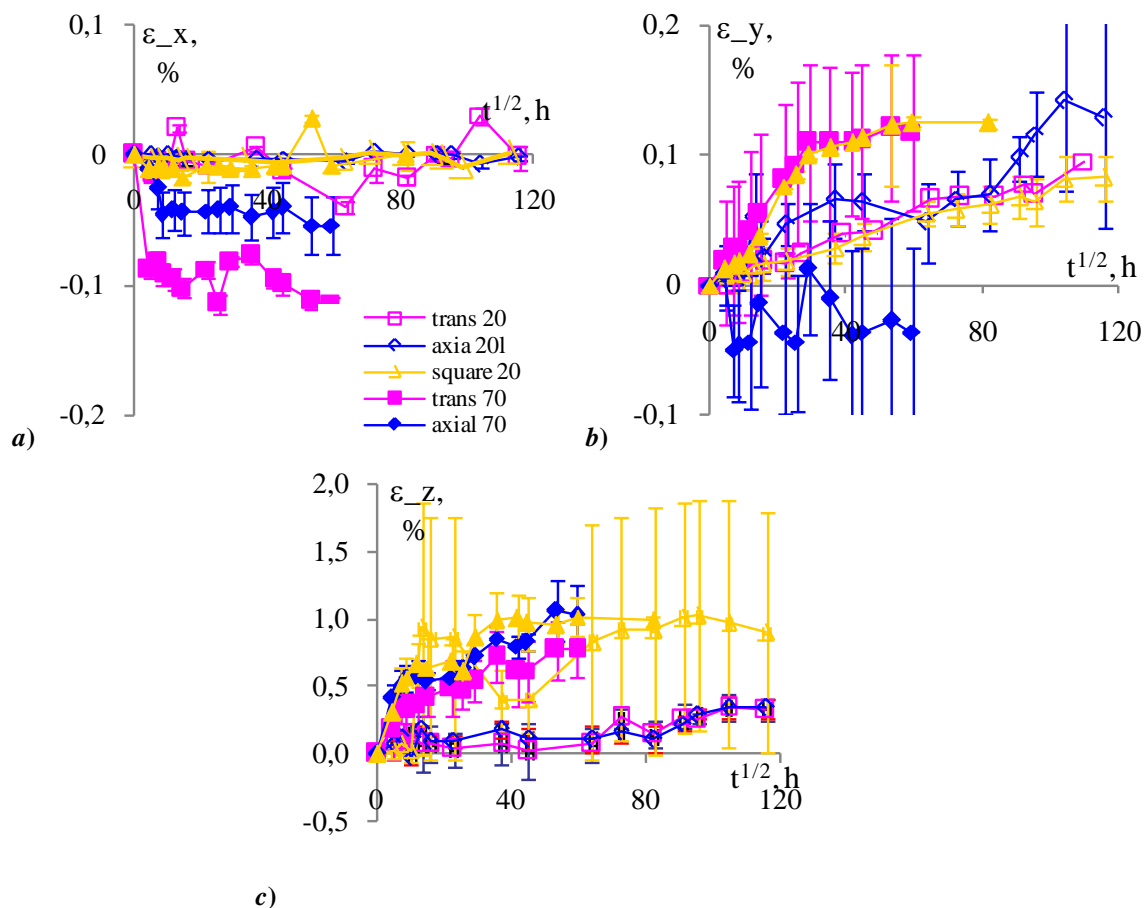
**Tabula 4.1. Pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta difūzijas koeficienti dažādās temperatūrās**

Difūzijas koeficienti	$T, ^\circ\text{C}$		
	20	50	70
$D_x \cdot 10^5, \text{mm}^2/\text{h}$	27	200	900
$D_y \cdot 10^5, \text{mm}^2/\text{h}$	14	90	400
$D_z \cdot 10^5, \text{mm}^2/\text{h}$	10,5	50	280
$D_x/D_y$	1,93	2,22	2,25
$D_y/D_z$	1,33	1,8	1,43

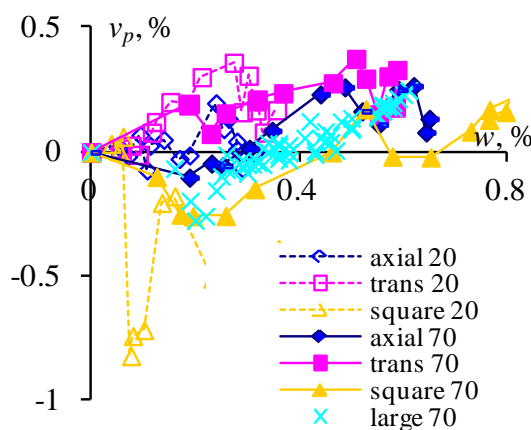
*Piezīme:* salīdzinājumam epoksīda saistvielai EDT-10 pie 20°C  $D = 140 \cdot 10^{-5}$  mm<sup>2</sup>/h,  $w_\infty = 5\%$  [20].

PKM uzbriešanas deformācijas gar galvenajām simetrijas asīm:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  un  $\varepsilon_z$  atkarībā no parauga izturēšanas laika ūdenī pie 20 un 70°C parādīti Att. 4.3. Dažādi izgrieztiem paraugiem tie ir nedaudz atšķirīgi, jo ir dažāda mitruma sorbcijas kinētika (Att. 4.2). Tomēr uzbriešanas deformācijas lielākās vērtības visiem paraugiem ir gar Z asi, t.i. biezuma virzienā (Att. 4.3c), mazākās - rovinga šķiedras ass virzienā X (Att. 4.3a). Izturētos ūdenī pie 70°C līdz piesātinājumam paraugos uzbriešanas deformācija  $\varepsilon_z$  sasniedz 1%,  $\varepsilon_y - 0,12\%$ . Uzbriešanas deformācija  $\varepsilon_x$  ir negatīva, kas acīmredzot ir saistīts ar negatīvu oglekļa šķiedras LTIK.

Salīdzinot grafikus Att. 4.3 ar atbilstošajiem grafikiem Att. 4.2, var redzēt, ka lielumiem  $w$  un  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  piesātinājums tiek sasniegts gandrīz vienlaicīgi. Tas nozīmē, ka gandrīz viss absorbētais PKM mitrums atrodas polimēru saistvielā, izraisot tās uzbriešanu. Piepildītu ar ūdeni poru tilpuma saturs  $v_p$ , ko definē kā starpību starp līdzsvara un eksperimentāli noteiktu uzbriešanu (3.1), apskatāmajam oglekļa un stikla šķiedru plastikātam nepārsniedz 0,4% (Att. 4.4). Atgādināsim, ka šāda izmēra stikla šķiedru plastikātam šis lielums sasniedza 2% (Att. 3.6).



Att. 4.3. PKM uzbriešanas deformācijas gar galvenajām simetrijas asīm:  $\epsilon_x$  (a),  $\epsilon_y$  (b),  $\epsilon_z$  (c) atkarībā no Axial ( $\diamond, \blacklozenge$ ), Transverse ( $\square, \blacksquare$ ) un Square ( $\Delta, \blacktriangle$ ) paraugu izturēšanas laika ūdenī pie 20°C ( $\diamond, \square, \Delta$ ) un 70°C ( $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle$ )

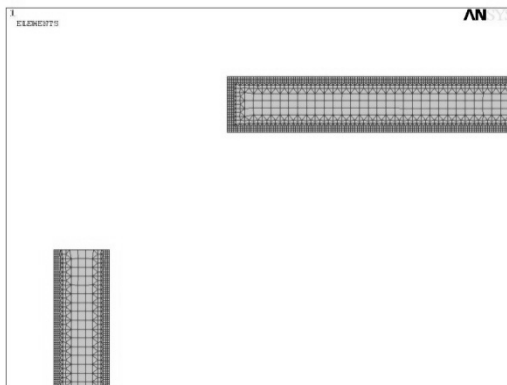


Att. 4.4. Piepildītu ar ūdeni poru tilpuma saturs atkarībā no mitruma satura dažādi izgrieztiem PKM paraugiem: Axial ( $\diamond, \blacklozenge$ ), Transverse ( $\square, \blacksquare$ ) un Square ( $\Delta, \blacktriangle$ ), iegremdētiem ūdenī pie 20°C ( $\diamond, \square, \Delta$ ) un 70°C ( $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \times$ )

#### 4.2.2. Profila mitruma sorbcijas modelēšana

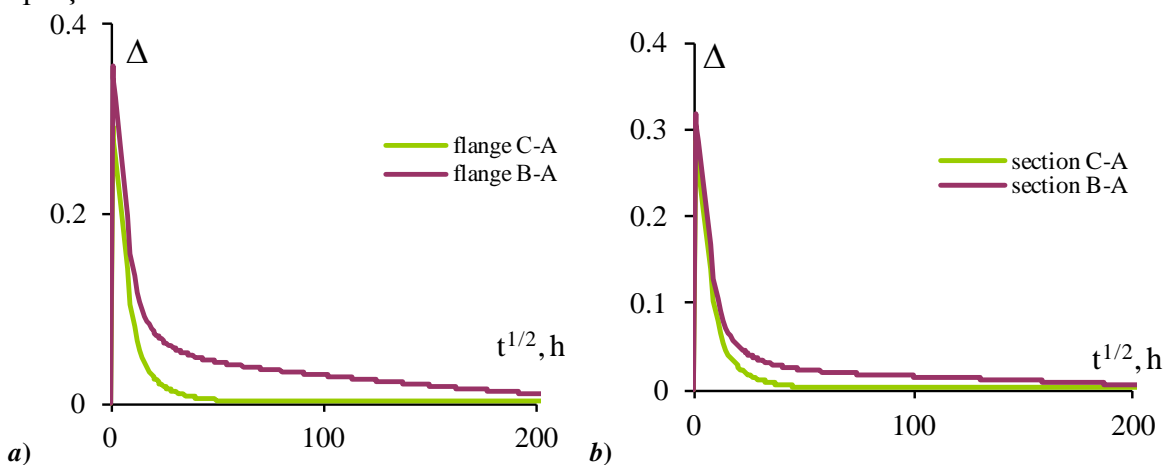
Profila mitruma difūzijas problēmas skaitliskā modelēšana bija izpildīta pilnai A un vienkāršotai B aprēķina shēmai (Att. 3.1), izmantojot vienu un to pašu GE tīklu (Att. 4.5). Lai uzlabotu precizitāti, aprēķinot mitruma plūsmas, GE tīkls bija sabiezināts saskares zonās ar mitru vidi. Turklāt tika apskatīts kārbveida profila virtuālā sadalījuma variants četros vienādos taisnstūros ar konstantiem nosacījumiem  $c_\infty$  uz to garākām malām (shēma C). Pilnās shēmas A aprēķins tika veikts ar GEM un turpmāko rezultātu salīdzināšanu ar eksperimentu. Vienkāršoto

shēmu *B* un *C* aprēķini tika veikti ar GEM un turpmāko rezultātu salīdzināšanu ar shēmas *A* GEM rezultātiem. Kļūdas, kas rodas dēļ shēmas *A* aizstāšanas ar *B* vai *C*, bija noteiktas, salīdzinot attiecīgus GEM aprēķinu rezultātus. Ar shēmu, kas deva mazāku kļūdu, tika veikts analītiskais aprēķins.



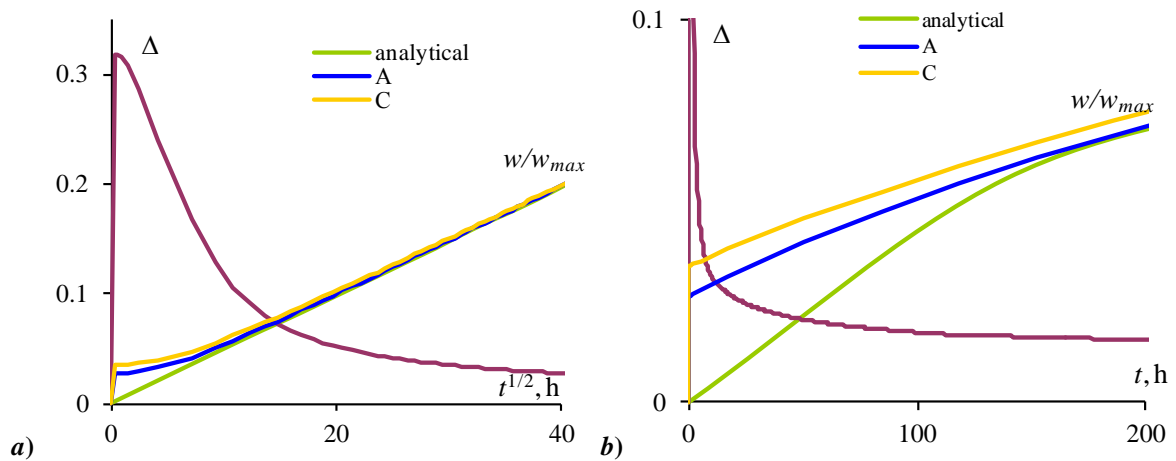
Att. 4.5. Galīgo elementu modeļa fragmenti

Mitruma satura vidējās vērtības visā šķērsgriezumā (shēma *A*), un tā sastāvdaļās: plauktos un sienās (shēmas *B* un *C*), ir aprēķinātas atkarībā no laika. Tā kā sienām aprēķinu shēmas *B* un *C* ir vienādas, optimālo virtuāla profila sadalījumu elementos var izvēlēties, salīdzinot rezultātus iegūtos plauktiem un šķērsgriezumam kopumā (Att. 4.6). Kā ir redzams attēlā, aprēķina shēmas *C* izmantošana dod mazāku kļūdu, salīdzinājumā ar shēmu *B*, aizstājot *A* shēmas izmantošanu. Tāpēc shēma *C* bija izvēlēta par pamata skaitliskajam un analītiskajam aprēķinam.



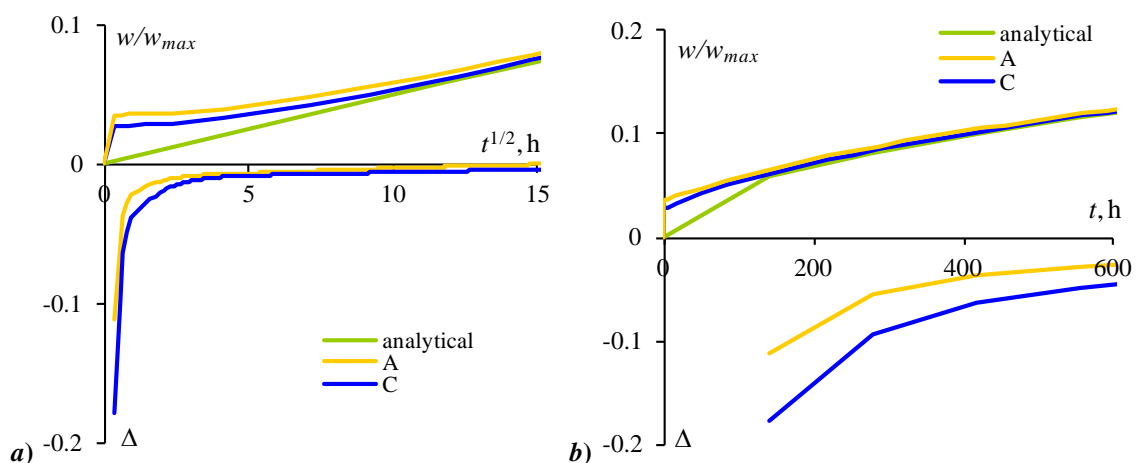
Att. 4.6. Kļūda, ko izraisa vidēja mitruma satura aprēķina shēmas *A* aizstāšana ar *B*, un *C* plauktiem (a) un šķērsgriezumam kopumā (b)

Kļūda  $\Delta(t)$ , kas attiecībā uz shēmu *C* ir vienāda plauktam, sienai un šķērsgriezumam kopumā ir parādīta Att. 4.8. Difūzijas procesa noslēguma posmā  $\Delta < 0,1\%$ . Stacionāras kļūdas absolūto vērtību var uzskatīt par ticamības intervālu aplēšamai kļūdai. Lielas  $\Delta$  vērtības difūzijas procesa sākotnējā posmā, ir nosakāmas ar tā augsto intensitāti, kas padara skaitliskā risinājuma konverģenci grūti sasniedzamu, salīdzināmā ar konverģenci nākamajos posmos. Kad  $t > 0,18t_{max}$ , kur  $t_{max}$  ir pārejas procesa ilgums,  $\Delta$  vērtība nepārsniedz 10%. Tādējādi aprēķina shēmas vienkāršošana, aizstājot shēmu *A* ar *C*, ir pieņemama profilā mitruma satura inženieru aprēķinos difūzijas procesa stacionārā posmā.



**Att. 4.7. Sorbcijas liknes aprēķināšanas rezultāti plauktam (sienai) (a) un šķērsgriezumam kopumā (b): ar GEM shēmu A un C, analītiski ar shēmu C un kļūda (sarkana līkne), ko izraisa shēmas A aizstāšana ar C**

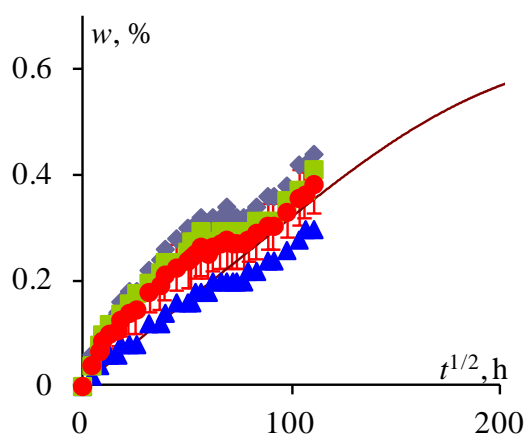
Difūzijas problēmas GEM skaitliskās modelēšanas rezultāti kārbveida profila sastāvdaļām (shēma C) bija salīdzināti ar izteiksmes (1.8) analītiskā risinājuma rezultātiem partikulārajam gadījumam - viendimensijas difūzijas problēmai. Att. 4.8 ir parādītas sorbcijas līkņu sākotnējās daļas aprēķinātās ar GEM (līknes A, C) un analītiski (līkne *Analytical*). Grafiku salīdzinājums liecina, ka analītiskais risinājums rāda labāku konvergenci nulles apkārtnē nekā skaitliskais risinājums. Tādēļ analītiskā modeļa atbilstības novērtēšanu skaitliskajam difūzijas procesa sākumposmā, kur skaitliskais aprēķins nav stabils, veikt nav jēgas. Turpmākajos difūzijas procesa posmos  $\Delta < 2.5\%$ , un pie  $t > 0,8t_{max}$   $\Delta = 0$  (Att. 4.8). Iegūtie rezultāti liecina, ka gan skaitliskais, gan analītiskais modelis vienādi apraksta vienkāršotu shēmu C. Ciktāl shēma C sniedz profila mitruma vidējo saturu ar GEM aprakstu un kļūdu, kas nepārsniedz 5%, analītisko risinājumu var izmantot, lai vienkāršotu aprēķinu.



**Att. 4.8. Profila mitruma vidējā satura analītiskā aprēķina kļūda salīdzinājumā ar skaitliskā aprēķina kļūdu pēc shēmas A un C un analītiski aprēķinātās sorbcijas līknes plauktiem (a) un šķērsgriezumam kopumā (b)**

Aprēķina shēmas un/vai aprēķināšanas metodes piemērotības kritērijs ir iegūto rezultātu atbilstība eksperimentālajiem datiem. Minētie aprēķinu rezultāti ir gandrīz identiski savā starpā, salīdzinot ar eksperimentālo datu izkliedi (Att. 4.9). Vislielākā aprēķinu kļūda, salīdzinājumā ar eksperimentu, ir raksturīga sorbcijas procesa sākuma posmam. Tas it īpaši var būt nosacīts ar paraugu sorbcijas līkņu nepietiekami labu aproksimāciju (sk. Att. 4.2), izmantojot difūzijas vai Fika modeļus. Ir svarīgi atzīmēt, ka piedāvātā profila virtuālā sadalījuma metodika vienkāršajos elementos neaprobežojas ar Fika modeļa izmantošanu mitruma sorbcijas procesa aprakstā PKM. Taču tāds pētījums nebija paredzēts šī darba ietvaros.





Att. 4.9. Vidējais mitruma saturs šķērsriezumā atkarība no laika: līnija – aprēķins, punkti - eksperiments

### 4.3. Apsorbētā mitruma ietekme uz PKM īpašībām

#### 4.3.1. Pultrūdētā PKM elastības moduļi un stiprība

PKM paraugu mehāniskās testēšanas programmā bija iekļautas: a) viens stiepe un spiede, un b) trīspunktu liece kvazistatiskajā slodzē. Visi testi tika veikti uz hidrauliskās mašīnas MTS. Stiepes un spiedes testi veikti rovinga šķiedras ass virzienā X, saskaņā ar standartu ASTM D 3039. Slogošanas traversas pārvietojuma ātrums bija 1 mm/min, kas atbilst deformācijas ātrumam  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Paraugu izmēri bija 85×15×4,5 mm.

Trīspunktu lieces tests slāņu salikšanas plaknē un perpendikulārajā plaknē bija veikts saskaņā ar ASTM D 790. Slogošanas traversas pārvietojuma ātrums bija 2 mm/min, kas atbilst deformācijas ātrumam  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Paraugu izmēri bija 85×15×4,5 mm. PKM bīdes moduļa noteikšanai, katrs paraugs tika testēts divos 70 un 32 mm laidumos, un tikai laidumā  $L = 70$  mm paraugi tika slogoti līdz sabrukšanai. Testi 32 mm laidumā tika veikti, lai aprēķinātu stiepes elastības moduli  $E_L = E_x$  un bīdes moduli  $G_{LT}$  (vai  $G_{TH}$ ), izmantojot grafisko metodi (sk. 1.4. nodaļu). Lai nesabojātu paraugus priekš turpmākajiem testiem, izliece 32 mm laidumā nepārsniedza 0,5 mm. Bīdes modulis  $G_{LT}$  slāņu plaknē bija noteikts arī, izmantojot sliežu metodi.

Paraugu skaits katrā testu sērijā bija vienāds pieciem. Lai novērtētu absorbētā mitruma ietekmi uz mehāniskajām īpašībām PKM, tika veikti paraugu testi, nosacīti sākotnējā stāvoklī (sākotnējie) un pēc samitrināšanas ūdenī pie temperatūras 20, 50 un 70°C līdz piesātinājumam (samitrinātie).

Stiepjot oglekļa un stikla šķiedru plastikāta paraugus rovinga šķiedras ass virzienā, sprieguma-deformācijas diagrammā ir lineāra līdz pat sabrukumam. Elastības moduļi  $E_x$  un robežu īpašības  $\epsilon_x^R$ ,  $\sigma_x^R$  uzrādītas Tabula 4.2. *Axial* paraugu lieces gadījumā slāņiem perpendikulārajā plaknē  $E_{app}$  vērtība ir mazāka  $E_x$  par 57,8% (Tabula 4.2). Pieņemot, ka  $E_{app}$  atšķirība no  $E_x$  ir saistīta ar bīdes deformācijas ietekmes efektu uz izlieces lielumu, no formulas tika noteikts starpslāņu bīdes modulis  $G_{TH} = 0,55$  GPa. Bīdes modulis slāņu plaknē  $G_{LT} = 7,99$  GPa bija noteikts no *Transverse* paraugu stiepes un lieces testu rezultātiem. Bīdes modulis slāņu plaknē  $G_{LT}$  ir pa kārtu lielāks par starpslāņu bīdes moduli  $G_{TH}$ . Diagrammas  $\sigma_f - \epsilon_f$  lieces gadījumā plaknē kas ir perpendikulāra slāņiem, ir lineāras līdz pat sabrukšanai, kuru raksturo robežlielumi  $\epsilon_f^R$ ,  $\sigma_f^R$ . Diagrammas  $\sigma_f - \epsilon_f$  lieces gadījumā slāņu plaknē ir nelineāras.

PKM mehānisku īpašību rādītāji, kas iegūti no samitrinātajiem pie 70°C paraugiem, ir ievērojami zemāki nekā sākotnējiem (sk. Tabula 4.2). Samitrinātajiem pie 50 un 20°C paraugiem rādītāju izmaiņa nav viennozīmīga. Tā pēc ilgstošas paraugu izturēšanas ūdenī 20°C temperatūrā novērota  $E_x$  samazināšanās par 12% un  $E_y$  pieaugums par 3%. Pēc ilgstošas paraugu izturēšanas ūdenī pie 50°C, tika novērota bīdes moduļa  $G_{LT}$  palielināšanās par 7%. Izmaiņas ir nelielas, un var būt saistītas ar eksperimentālo datu izkliedi.

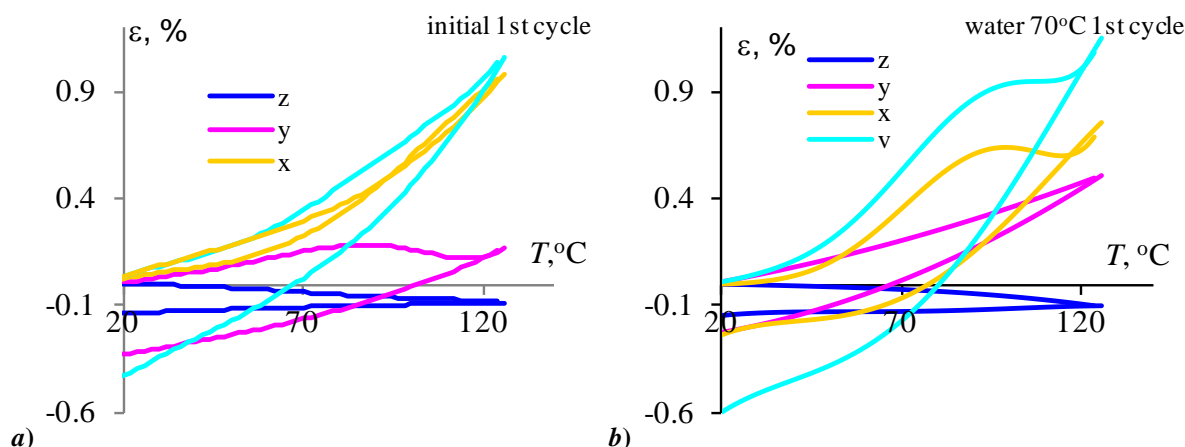
**Tabula 4.2. Pultrūdētā oglekļa un stikla šķiedru plastikāta mehānisko īpašību rādītāji ar standarta novirzi iegūtie testējot 4,5 mm biezus paraugus**

Mehānisko īpašību rādītāji	PKM stāvoklis		
	Sākotnējais	Samitrinātais pie 70°C	Samitrinātais pie 20°C
<b>Stiepe</b>			
$E_x$ , GPa	118,7±12,8		104,4±3,9
$\nu_{xy}$	0,44±0,07		
$\sigma_x^R$ , MPa	1336,1±33,9		
$E_y$ , GPa	12,8±1,1		13,2±1,6
$\sigma_y^R$ , MPa	62,3±3,5		
<b>Spiede</b>			
$E_{-x}$ , GPa	93,7±8,1		
$\sigma_{-x}^R$ , MPa	845,0±88,8		
$E_{-y}$ , GPa	14,0±1,3		
$\sigma_{-y}^R$ , MPa	173,5±24,5		
<b>Liece</b>			
$E_{xz}^R$ , GPa	50,1±2,4	44,2±5,3	50,9±3,1
$\sigma_f^R$ , MPa	958,9±118,4	813,0±80,3	900,09±93,6
$\epsilon_f^R$ , %	2,05±0,17	1,96±0,18	1,86±0,21
$E_{yz}^R$ , GPa	12,7±0,9	8,9±0,2	13,1±0,7
$\sigma_f^R$ , MPa	159,2±24,5	88,5±15,0	165,9±12,9
$\epsilon_f^R$ , %	1,75±0,48	1,57±0,31	1,86±0,43
<b>Bīde</b>			
$G_{LT}$ , GPa	6,84±1,19	7,32±0,68 (pie 50°C)	

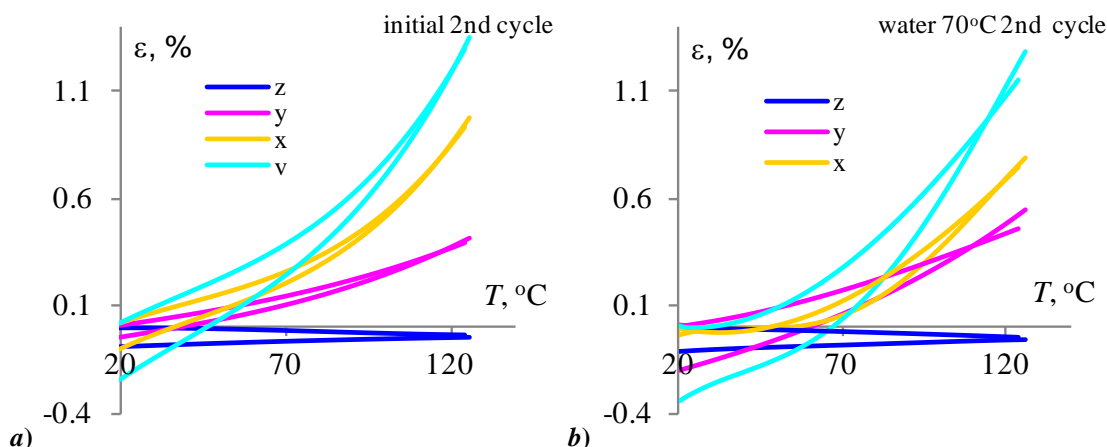
### 4.3.2. Termiskās izplēšanas koeficienti

Paaugstinātas temperatūras ietekme uz PKM uzvedību bija vērtēta pēc dilatometrisko testu rezultātiem uz paraugiem ar izmēriem 6×6×4,5 mm, kuri bija izgriezti no sākotnējiem un samitrinātajiem paraugiem ar izmēriem 85×15×4,5 mm. Atkarības  $\epsilon_x^T(T)$ ,  $\epsilon_y^T(T)$ ,  $\epsilon_z^T(T)$  un  $\epsilon_v^T(T)$  paraugu pirmajā sasildīšanā-atdzesēšanā ir parādītas Att. 4.10. Ekstrēmā  $\epsilon_y^T(T)$  daba sākotnējā PKM sasildīšanas laikā un  $\epsilon_z^T(T)$  samitrinātajā PKM sasildīšanas laikā temperatūras intervālā 80-120°C ir, acīmredzami, izraisīta ar mitruma iztvaikošanu, kuras rezultātā veidojās paliekošās saraušanas deformācijās  $\epsilon_{res}^T$ . Atkārtotās sasildīšanas laikā, visās atkarības  $\epsilon_x^T(T)$ ,  $\epsilon_y^T(T)$ ,  $\epsilon_z^T(T)$  un  $\epsilon_v^T(T)$  ir monotoni augošas (Att. 4.11)  $\epsilon_{res}^T$  lielumi samazinās. Atkarību  $\epsilon_y^T(T)$  un  $\epsilon_z^T(T)$  nelinearitāte pie  $T > 75^\circ\text{C}$  ir izteiktāka samitrinātajam PKM un liecina, ka elastības moduļi  $E_y$  un  $E_z$  šajā apgabalā ir atkarīgi no temperatūras. Tā kā  $\epsilon_x^T(T)$  ir lineāra visu apskatāmo temperatūru robežās  $20 < T < 75^\circ\text{C}$ , var apgalvot, ka elastības modulis  $E_x$  nav atkarīgs no  $T$ .

PKM LTIK pie  $T < T_g$  ir apkopoti Tabula 4.3, kas liecina, ka ilgtermiņa paraugu izturēšana ūdenī, gan istabas gan paaugstinātajā temperatūrā izraisa lielumu  $\alpha_x$  un  $\alpha_z$  pieaugšanu.  $\alpha_y$  lielums pieaug tikai pēc izturēšanas pie 70°C. LTIK izmaiņa korelē ar mitruma satura  $w$  izmaiņu paraugos (Att. 4.12). Pieaugot  $w$  lielumam  $T_g$  vērtība, kas ir noteikta no  $\epsilon_y^T(T)$  pieaug atšķirībā no  $T_g$  vērtības, kas ir noteikta no  $\epsilon_z^T(T)$ . Tas, ir nepārprotami saistīts ar dažādiem polimēra saistvielas galīgās sacietēšanas procesiem PKM divos dažādos virzienos.



Att. 4.10. Oglekļa un stikla šķiedru plastikāta paraugu termiskās deformācijas  $\varepsilon_x^T, \varepsilon_y^T, \varepsilon_z^T$  un to summas  $\varepsilon_v^T$ , atkarībā no temperatūras pirmajā sasildīšanā – atdzesēšanā: sākotnējie (a) un samitrinātie līdz piesātinājumam pie 70 °C (b)

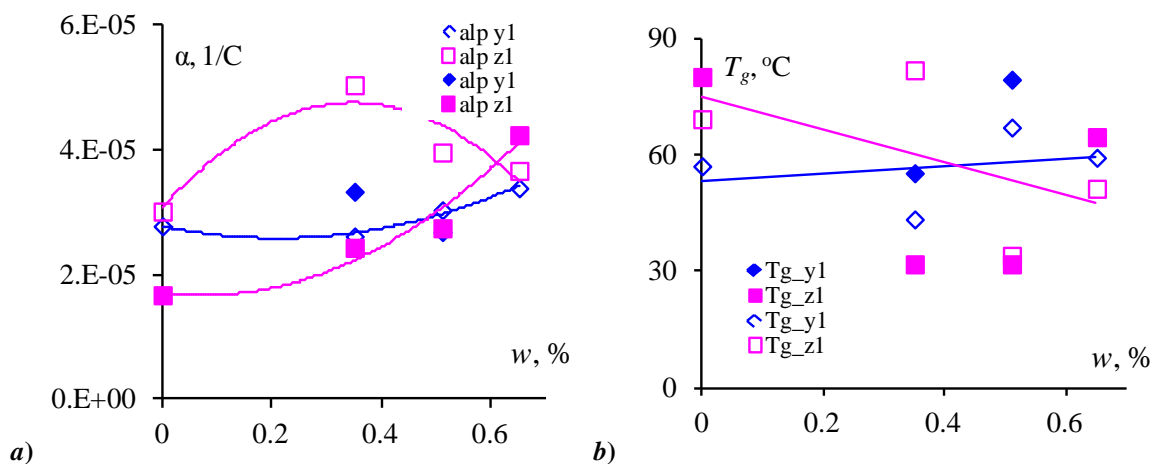


Att. 4.11. Oglekļa un stikla šķiedru plastikāta paraugu termiskās deformācijas  $\varepsilon_x^T, \varepsilon_y^T, \varepsilon_z^T$  un to summas  $\varepsilon_v^T$ , atkarībā no temperatūras otrajā sasildīšanā – atdzesēšanā: sākotnējie (a) un samitrinātie līdz piesātinājumam pie 70 °C (b)

Tabula 4.3. Pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta lineārais termiskās izplešanas koeficienti pie  $T < T_g$  sākotnējā un samitrinātajā stāvoklī.

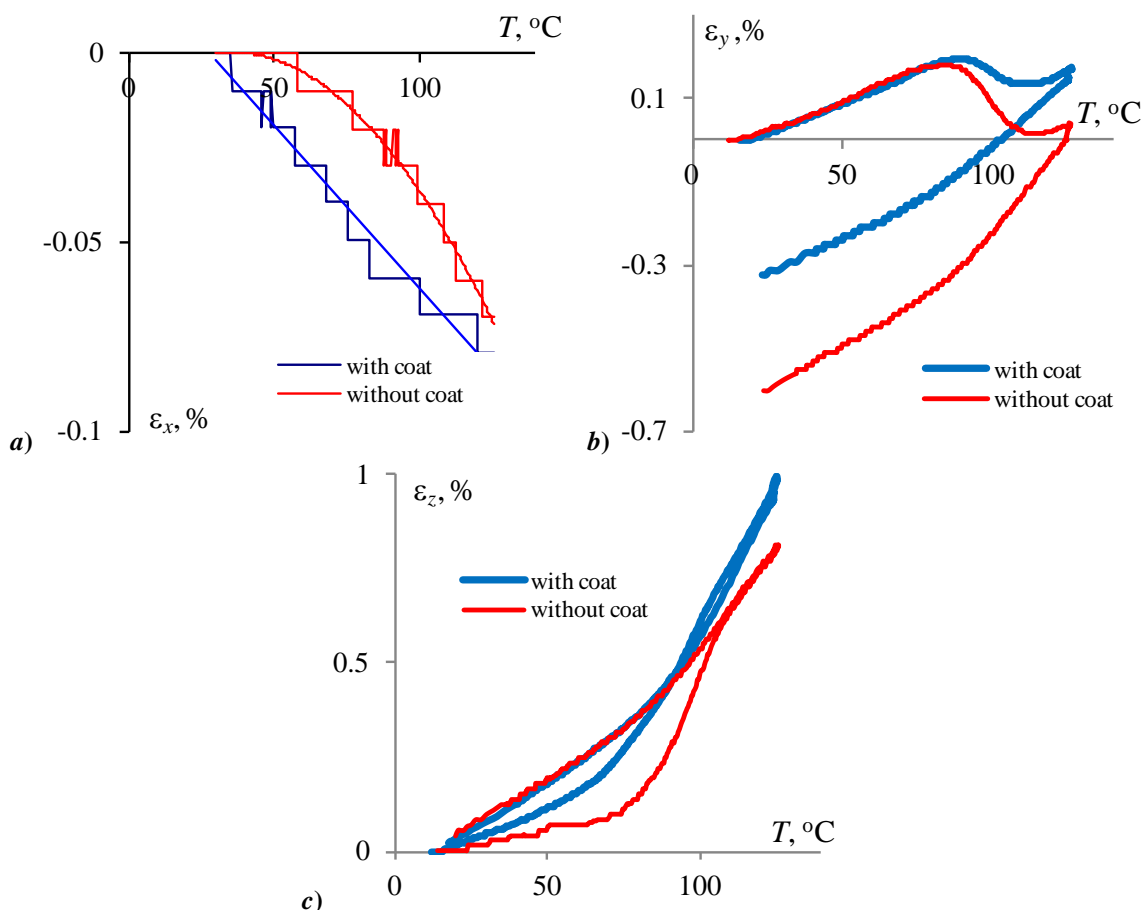
LTIK	Sākotnējais	Samitrinātais pie 70 °C	Samitrinātais pie 50 °C	Samitrinātais pie 20 °C
$\alpha_x \times 10^5, ^\circ\text{C}^{-1}$	-0,833	-0,364	-	-0,340
$\alpha_y \times 10^5, ^\circ\text{C}^{-1}$	2,143	2,612	2,341	2,018
$\alpha_z \times 10^5, ^\circ\text{C}^{-1}$	2,325	2,827	3,054	3,885
w, %	0	0,65	0,51	0,35

Tā kā stikla auduma slāņi pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta struktūrā kalpo arī kā mitruma barjera pārklājums, bija interesanti novērtēt šādas aizsardzības efektivitāti. Šim nolūkam dilatometriskam testam tika pakļauti paraugi, no kuriem iepriekš tika atdalīts stikla auduma slānis. Faktiski tie bija rovinga paraugi. Salīdzinājumam, Att. 4.13 ir norādītas, atkarības  $\varepsilon_x^T(T), \varepsilon_y^T(T), \varepsilon_z^T(T)$  pultrūdētam oglekļa un stikla šķiedru plastikātam un izdalītam no viņa rovingam pirmajā sasildīšanā – atdzesēšanā.



Att. 4.12. LTIK (a) un  $T_g$  (b) pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta izmaiņu korelācija ar mitruma saturu izmaiņām paraugos, kas ilgstoši atradās ūdenī pie dažādām temperatūrām (paraugiem, ar pārklājumu un bez pārklājuma)

Temperatūras diapazonā 80-120°C rovinga paraugi uzrāda lielāku saraušanos nekā pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta paraugi, jo mitruma iztvaikošana no pirmajiem ir intensīvāka ūdensnecaurlaidīgas plēves trūkuma dēļ. Tas apstiprina pieņēmumu, ka atkarību  $\varepsilon_y^T(T)$  un  $\varepsilon_z^T(T)$  temperatūrās 80-120°C nevienmērīguma cēlonis ir mitruma iztvaikošana no paraugiem.



Att. 4.13. Termiskās deformācijas  $\varepsilon_x^T$  (a),  $\varepsilon_y^T$  (b), un  $\varepsilon_z^T$  (c) atkarībā no temperatūras pirmajā sasildīšanā – atdzesēšanā: pultrūdēts oglekļa un stikla šķiedru plastikāts (zilā krāsā) un izdalītais no viņa rovings (sarkans)

### 4.3.3. Sijas stingums

Tā kā ar PKM struktūras un īpašību simetriju un kārbas ģeometriju sijas neitrālā ass sakrīt ar šķērsriezuma ģeometrisko simetrijas asi, lieces stingumu  $E_x I_y$  nosaka PKM elastības modulis  $E_x$  (Tabula 4.2) un inerces moments [35]

$$I_y = \frac{1}{12} [2a_w h^3 + b(H^3 - h^3)], \quad (4.1)$$

kur  $H$ ,  $h$ ,  $a_w$ ,  $a_f$ ,  $b_f$  ir šķērsriezuma lineārie izmēri.

Dažos gadījumos, it īpaši, izvērtējot  $I_y$  izmaiņu, kuru izsauc termiskā izplešanās un/vai uzbriešana, formulā (4.1) ir ērti pāriet uz sienas un plaukta lineārajiem izmēriem, aizstājot  $h = b_w$ ,  $H = b_w + 2a_f$

$$I_y = \frac{1}{6} [a_w b_w^3 + a_f b_f (3b_w^2 + 6b_w a_f + 4a_f^2)] \quad (4.2)$$

Apskatāmai kārbai  $a_f = a_w = a$ ,  $b_w + 2a_f = b_f = b$ , tādēļ

$$I_y = \frac{2a}{3} (b^3 - 3b^2 a + 6ba^2 - 2a^3).$$

Lineāro izmēru izmaiņa PKM termiskās izplešanas rezultātā

$$\begin{aligned} b &= b_0 (1 + \alpha_y^T \Delta T), \\ a &= a_0 (1 + \alpha_z^T \Delta T), \end{aligned} \quad (4.3)$$

PKM uzbriešanas rezultātā (maksimālām uzbriešanas deformācijām)

$$\begin{aligned} b &= b_0 (1 + \varepsilon_{y \max}^w), \\ a &= a_0 (1 + \varepsilon_{z \max}^w), \end{aligned} \quad (4.4)$$

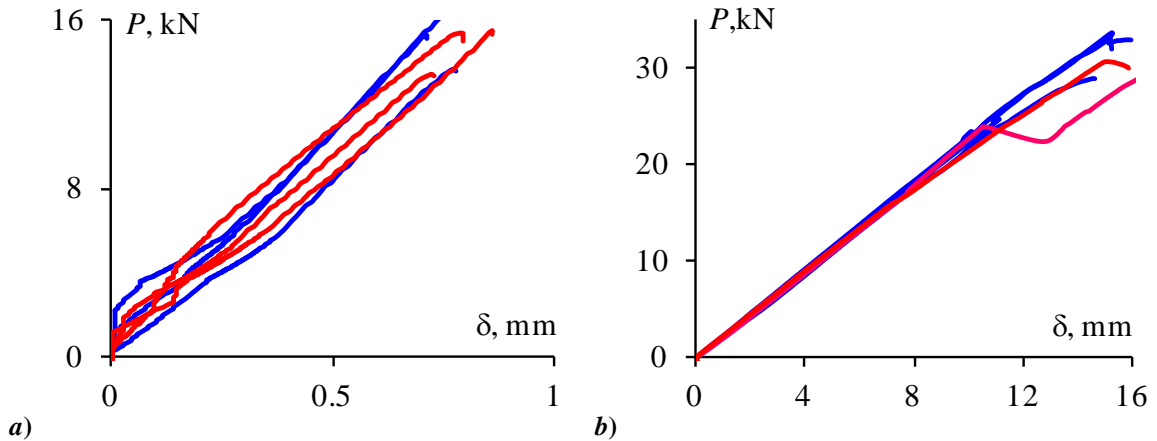
kur  $b_0$  un  $t_0$  ir sākotnējā profila lineārie izmēri istabas temperatūrā.



Att. 4.14. Sijas izpētes fotoattēls

Attiecībā uz kārbas (Att. 4.1) dotiem lineārajiem izmēriem un eksperimentāli noteiktajām  $E_x$  (Tabula 4.2),  $\varepsilon_{y \max}^w$ ,  $\varepsilon_{z \max}^w$  (Att. 4.3) vērtībām, ir aprēķināti inerces moments un sijas stingums sākotnējā stāvoklī  $I_y^0 = 2,799 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ ,  $E_x^0 I_y^0 = 3,322 \times 10^{-4} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$  un mitrinātā stāvoklī  $I_y^w$

$= 2,819 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ ,  $E_x^0 I_y^w = 3,346 \times 10^{-4} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ ;  $E_x^w I_y^w = 2,943 \times 10^{-4} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ . Pieņemums, ka PKM elastības modulis  $E_x$  pēc mitrināšanas nav mainījies ( $E_x^w = E_x^0$ ), dod sijas lieces stinguma pieaugumu par 0,73%. Saskaņā ar eksperimentālajiem datiem  $E_x^w < E_x^0$ . Ņemot vērā PKM elastības moduļa samazinājumu mitrināšanā, iegūts sijas lieces stinguma samazinājums par 11,4 %. Siju trīspunktu lieces testi (Att. 4.14), sākotnējā stāvoklī un izturētajās 2 gadus ūdenī istabas temperatūrā parādīja, ka slodzes  $P$  - izlieces  $\delta$  diagrammas garām ( $L = 1,7 \text{ m}$ ) sijām sakrīt (Att. 4.15b), bet īsām ( $L = 0,6 \text{ m}$ ) ir atšķirīgas (Att. 4.15a).



Att. 4.15. Slodzes - izlieces diagrammas iegūtās īsu (a) un garu (b) siju trīspunktu lieces testos: sākotnējās (zilas), un mērcētajās 2 gadus ūdenī istabas temperatūrā (sarkanās)

Pamatojoties uz grafisko metodi, ir noteiktas lieces un bīdes stinguma vērtības sākotnējām sijām  $E_x^0 I_y^0 = 2,788 \times 10^{-4} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ ,  $(kAG_{LT})^0 = 0,42 \times 10^{-2} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ , un mitrinātajām  $E_x^w I_y^w = 2,943 \times 10^{-4} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ ,  $(kAG_{LT})^w = 0,36 \times 10^{-2} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ . Lieces stinguma palielināšanās par 5,6% atbilst moduļa  $E_x^0$  pieaugumam par 4,8%, kas atrodas eksperimentālo datu izkliedes robežās, kas iegūti uz paraugiem (Tabula 4.2). Sijas bīdes stingums samazinās par 15,2%, ko var būt izraisījis ar lielumu  $kA$  un  $G_{LT}$  izmaiņām. Saskaņā ar formulu (1.13) bīdes stinguma aprēķins notiek pa tangenciālajiem spriegumiem (1.14). Kārbveida sijai tas ir

$$\tau_{xz} = \frac{Q}{2t_w I_y} \int_{-z_1}^{-H/2} E_x b(z) \bar{z} dz + \int_{-h/2}^{-H/2} E_x b(z) \bar{z} dz = \frac{Q}{16a_w I_y} \left[ 2a_w (h^2 - z_1^2) + b_f (H^2 - h^2) \right], \quad (4.5)$$

kas nozīme, ka bīdes spriegumi sienā mainās ar augstumu pēc paraboliskā likuma un ir maksimāli sienas centrā (pie  $z_1 = 0$ )

$$\tau_{xz}^{\max} \Big|_{z_1=0} = \frac{Q}{16a_w I_y} \left[ b_f H^2 + h^2 (2a_w - b_f) \right]. \quad (4.6)$$

Apskatāmai kārbai  $a_f = a_w = a$ , tad

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{8I_y} (b_w (b_w + 2b_f) + 2b_f a). \quad (4.7)$$

Ņemot vērā uzbriešanu mitrināšanas rezultātā,  $kA$  lielums ir izmainījies no  $7,89 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  līdz  $7,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ , vienlaikus bīdes modulis  $G_{LT}$  samazinājās no  $5,35 \pm 0,66 \text{ GPa}$  līdz  $4,51 \pm 0,28 \text{ GPa}$ . Pirmais lielums ir salīdzināms ar  $6,84 \pm 1,19 \text{ GPa}$ , kas bija iegūts bīdes testā ar sliežu metodi uz sākotnējiem paraugiem izgrieztiem gareniski un transversāli armējuma virzienam.  $G_{LT} = 7,32 \pm 0,68 \text{ GPa}$  vērtība iegūta testējot paraugus, kuri ir izturēti ilgu laiku ūdenī pie  $50^\circ\text{C}$ , liecina par tālāku epoksīda saistvielas strukturēšanu (galīgo sacietēšanu, fizikālo novecošanos) savā  $T_g$  apkārtnē. Uz to norāda arī stiklošanās temperatūras pieaugums kas ir noteikts no LTIK  $\alpha_y$  izmaiņām slāņu plaknē.



Līdzīgi mitruma ietekmei novērtēta paaugstinātas temperatūras ietekme uz sijas lieces stingumu. Dotajiem kārbas (Att. 4.1) lineārajiem izmēriem, eksperimentāli noteiktiem LTIK  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$  lielumiem (Tabula 4.3) tika aprēķināti inerces moments un sijas stingums pie 60°C  $I_y^T = 2,809 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ ;  $E_x^0 I_y^T = 3,334 \times 10^{-4} \text{ GPa} \cdot \text{m}^4$ . Stinguma izmaiņas (pieaugums) ir 0,3 %.

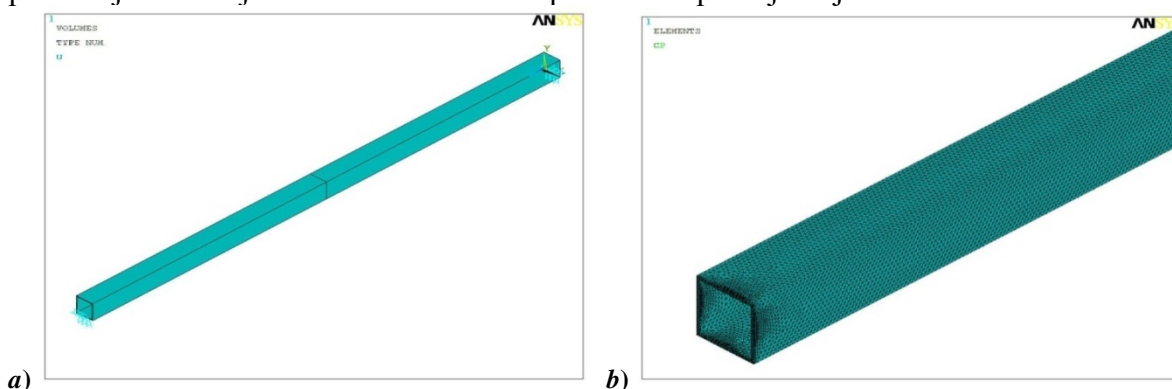
Tādējādi, eksperimentālā sijas stinguma vērtība sākotnējā stāvoklī un tās vērtības izmaiņas sakarā ar mitrināšanu saskan ar aprēķinu, kas ir iegūts no plakano paraugu testiem. Saskaņā ar eksperimentu (Att. 3.15b) 1,7 m garas sijas stinguma izmaiņas ir vienādas ar apmēram -5,3%, t.i., atrodas eksperimentālo datu izkliedes robežās. Tas atbilst arī iegūtajiem rezultātiem testējot plakanus paraugus (Tabula 4.2).

Ilgtermiņā (aptuveni 2 gadus) izturot ūdenī pultrūdētus profilus, nebija novērotas būtiskas mehānisko īpašību izmaiņas, kas liecina par PKM augstu kvalitāti.

Vienkāršas aprēķina formulas, kas iegūtas, pamatojoties uz materiālu izturības metodi, ļauj novērtēt PKM slāņu plaknes bīdes moduļa izmaiņas efekta ietekmi uz sijas izlieces lielumu. Acīmredzot citu PKM stinguma raksturlielumu maiņa (saskaņā ar vides faktoru ietekmi), ietekmēs izlieces lielumu. Lai novērtētu šo efektu, veikts sijas stinguma GEM pētījums.

#### 4.3.4. Sijas stinguma izpēte ar galīgo elementu metodi

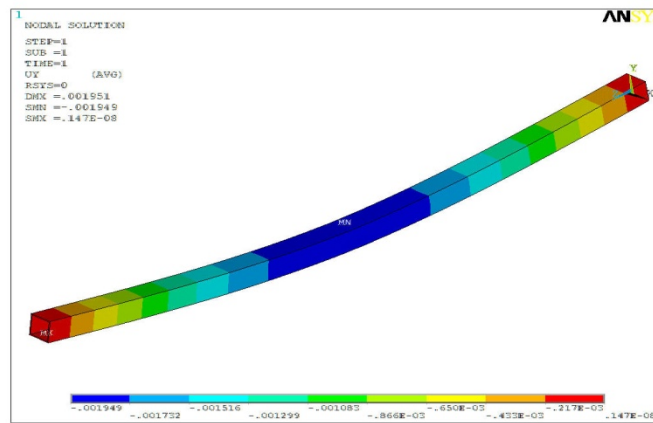
Lai novērtētu PKM elastības īpašību izmaiņu efekta ietekmi uz izlieces lielumu trīspunktu liecē (apkārtējās vides faktoru iedarbībā) ir veikta kārbveida sijas skaitliskā modelēšana galīgo elementu vidē ANSYS 11.0. Tika veikts 1 un 3 m garu siju pētījums, kuru šķērsriezuma ģeometrija norādīta Att. 3.8. Slodzes shēma parādīta Att. 3.21b. Aprēķinā bija izmantots trīsdimensiju galīgais elements *Solid45* ar 8, 6 vai 4 mezgliem un 3 brīvības pakāpēm (pārvietojumiem relatīvi asīm *X*, *Y* un *Z*) katrā mezglā. GE tīkls bija vienmērīgs, GE skaits sijas elementu (plauktu un sienas) biezumā bija vienāds ar divi. GE modelis un tā fragments ar uzdotiem robežas nosacījumiem ir parādīti Att. 4.16. Bīdes deformācijas adekvātai novērtēšanai bija izmantots cieta ķermeņa modelis. Sprieguma-deformācijas stāvokļa aprēķins tika veikts lineāri elastīgajā formulējumā. Lai simulētu slodzes ietekmi visā sijas šķērsriezuma platumā tika ieviests brīvības pakāpes – vertikālā pārvietojuma – apvienojums mezgliem laiduma viduspunktā, kuri piederēja sijas augšējai skaldnei. Izliece tika noteikta kā mezglu vertikālā pārvietojuma vidējā vērtība laiduma viduspunktā uz apakšējās sijas skaldnes.



Att. 4.16. Kārbveida sijas matemātiskais modelis, ar GE pārklājumu (a), un tā fragments (b)

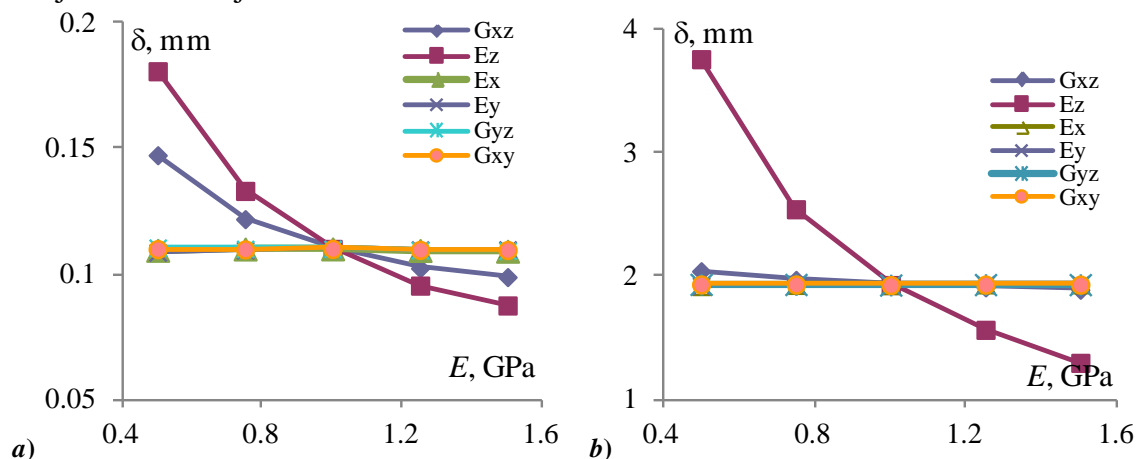
Sākotnējās PKM elastīgo īpašību vērtības bija izvēlētas sekojošas:  $E_x = 106,2 \text{ GPa}$ ,  $E_y = E_z = 13,4 \text{ GPa}$ ,  $G_{xy} = G_{xz} = 8,1 \text{ GPa}$ ,  $G_{yz} = 5,6 \text{ GPa}$ ,  $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0,18$ , kas atbilst pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta elastības īpašību vērtībām (Tabula 3.2). Aprēķina rezultāts ir parādīts Att. 4.17.

Tika pētīts katra elastības  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  un bīdes  $G_{xy}$ ,  $G_{xz}$ ,  $G_{yz}$  moduļa 50% izmaiņas (pieauguma un samazinājuma) efekts pie citām nemainīgām elastības īpašību vērtībām. Att. 4.18 norādīti 1 un 3 m garu siju maksimālās izlieces vērtības atkarībā no moduļu relatīvās izmaiņas.



Att. 4.17. Sijas deformētais stāvoklis ar vertikālo pārvietojumu diagrammas pārklājumu

Kā redzams no attēliem, vislielākā ietekme uz sijas izlieci ir elastības  $E_x$  un bīdes  $G_{xy}$  moduļu izmaiņai.  $E_x$  samazināšanās par 50% 1 m garā sijā noved pie 64% izlieces pieauguma, bet  $G_{xy}$  – par 34%. Pieaugot sijas garumam garenvirzienā elastības moduļa  $E_x$  samazināšanās efekts palielinās, sasniedzot 95%, un bīdes moduļa slāņu salikšanas plaknē  $G_{xy}$  – samazinās. Elastības īpašību pieaugums par 50% izraisa salīdzinoši mazāku efektu: izlieces samazināšanos par 20% ( $E_x$ ) un 10% ( $G_{xy}$ ) 1 m garai sijai, kā arī 33% ( $E_x$ ) un 2% ( $G_{xy}$ ) 3 m garai sijai. Tas nozīmē, ka maksimālās izlieces atkarība no elastības  $E_x$  un bīdes  $G_{xy}$  moduļu relatīvām izmaiņām ir nelineāras. Šīs atkarības var kalpot par pamatu optimālai PKM projektēšanai konstrukcijām, kā arī pašas sijas konstrukcijai.



Att. 4.18. Kārbveida 1 (a) un 3 m (b) garas sijas izliece atkarībā no oglekļa un stikla šķiedru plastikāta elastības un bīdes moduļu relatīvām izmaiņām

Elastības moduļa  $E_x$  pieaugumu var panākt, izmantojot šķiedras ar augstu moduli un paaugstinot armēšanas koeficientu. Protams, šajā PKM (pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta) ir šķiedras ar augstu moduli un optimāls armēšanas koeficients. Turpmāka armēšanas koeficienta palielināšanās novedīs pie salīmēšanas defektiem, tiešā kontakta šķiedra-šķiedra, un tādējādi samazinās bīdes moduli  $G_{xy}$ . Tas savukārt novedīs pie sijas izlieces samazināšanās.

Literatūras pārskats un pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta eksperimentālā pētījuma rezultātu analīze liecina, ka, PKM garenvirzienā elastības moduļa vai bīdes moduļa slāņu salikšanas plaknē samazināšanās par 50% apkārtējās vides faktoru ietekmes rezultātā ir maz ticama. Tomēr PKM  $E_x$  un  $G_{xy}$  moduļu izmaiņas ir savstarpēji saistītas: izmaiņas vienā no tiem ir apstiprinājums tam, ka ir mainījies arī otrais. Šo lielumu relatīvās izmaiņas ir atšķirīgas. Vienlaicīga  $E_x$  un  $G_{xy}$  moduļu izmaiņa var izraisīt sinerģisku efektu uz izlieces lielumu.



## Kopsavilkums

Projekta rezultātā izstrādāta metodika paātrinātai deformācijas-stiprības raksturlielumu novērtēšanai pultrūdēto kompozītmateriālu sarežģītas formas profila apkārtējās vides faktoru ietekmes izpētei. Tas ir jauns, inovatīvs produkts, kurš ļaus projektētājiem prognozēt konstrukciju raksturlielumu izmaiņas to ekspluatācijas laikā, drošāk noteikt ekspluatācijas garantijas termiņus, samazināt stiprības un stinguma rezerves, kas tiek pieņemtas konstrukciju projektēšanas gaitā.

Ekspluatācijas īpašību izmaiņu paātrinātas prognozēšanas metodika sarežģītas formas pultrūdētiem profiliem agresīvo vides faktoru ietekmē ir inovatīvs produkts, jo pieejamajā līdz šim zinātniskajā literatūrā tika apskatīti atsevišķi teorētiskie un pētnieciskie aspekti, savukārt izstrādātā metodika piedāvā kompleksus risinājumus būves projektēšanas stadijā.

Izstrādātā metodika, kas paredz izturības paātrinātu novērtēšanu apkārtējās vides agresīvo faktoru ietekmē, var tikt pilnībā pārnesta uz vēja ģeneratoru rotoru un torņu elementiem, kas ir izgatavoti no polimēru kompozītmateriāliem.

## Literatūra

1. Abbasi A., Hogg P.J. Temperature and environmental effects on glass fibre rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete. *Composites Part B* **36** (2005), 394–404.
2. Chen Y., Davalos J.F., Ray I., Kim H.Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures// *Composite Structures* **78** (2007), 101–111.
3. Al-Salloum Y.A., El-Gamal S., Almusallam T.H., Alsayed S.H., Aqel M. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP// *Composites: Part B* **45** (2013), 835–844.
4. Correia J.R., Cabral-Fonseca S., Branco F.A., Ferreira J.G., Eusebio M.I., Rodrigues M.P. Durability of pultruded glass–fiber-reinforced polyester profiles for structural applications// *Mech Compos Mater* **42** (2006), No 6, 325–338. Rus
5. Sawpan M.A., Mamunb A.A., Holdsworth P.G., Renshaw P. Quasi-static and dynamic mechanical elastic moduli of alkaline aged pultruded fibre reinforced polymer composite rebar// *Materials and Design* **46** (2013) 277–284.
6. Старцев О.В., Вапиров Ю.М. и др. Влияние длительного атмосферного старения на свойства и структуру углепластика// *Механика композитных материалов* (1986), N4, 637-642.
7. Aniskevich K., Starkova O., Jansons J., Aniskevich A. Long-term deformability and ageing of polymer matrix composites. Nova Science Publishers; 2011.
8. Boer P., Holliday L., Kang T. H.-K. Independent environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: A review// *Construction and Building Materials* **48** (2013), 360-370.
9. La Saponara V. Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy and structural adhesive for aerospace applications: Fickian and anomalous diffusion, Arrhenius kinetics// *Composite Structures* **93** (2011), No. 9, 2180–2195.
10. Плющик О. А., Анискевич А. Н. Сорбция влаги и набухание полиэфирной // *Материалы. Технологии. Инструменты.* **6** (2001), N1, 49-53.
11. Анискевич К., Христова Ю., Янсонс Ю. Деформационные свойства полимербетона в условиях длительной выдержки в воде// *Механика композитных материалов* **39** (2003), N2, 165-176.
12. Kim H.-Y., Park Y.-H., You Y.-J., Moon C.-K. Short-term durability test for GFRP under various environmental conditions// *Composite Structures* **83** (2008), 37-47.
13. Helbling C., Karbhari V.M. Durability Assessment of Combined Environmental Exposure and Bending// *Proceedings of 7th Int. Symp. "Fiber Rein ...*, 2005 - quakewrap.com
14. Marouani S., Curtil L., Hamelin P. Ageing of carbon/epoxy and carbon/vinylester composites used in the reinforcement and/or the repair of civil engineering structures// *Composites: Part B* **43** (2012), 2020-2030.
15. Merdas I., ThomINETTE F., Tcharkhtchi A., and Verdu J. Factors governing water absorption by composite matrices// *Compos. Sci. Technol.*, **62** (2002), 487–492.
16. Helbling C.S., Karbhari V.M. Investigation of the sorption and tensile response of pultruded E-glass/vinylester composites subjected to hygrothermal exposure and sustained strain// *J. Reinf. Plast. & Compos.* **27** (2008), No. 6, 613-638.
17. Crank J. *The mathematics of diffusion*. Oxford, 1956.
18. Post N. L., Riebel F., Zhou A., Keller T., Case S. W., Lesko J. J. Investigation of 3D moisture diffusion coefficients and damage in a pultruded E-glass/polyester structural composite// *J. Compos. Mater.*, **43** (2009), No 1, 75-96.
19. Shen S.H., Springer G.S. Moisture absorption and desorption of composite materials// *J. Compos. Mater.* **10** (1976), 2-20.

20. Анискевич А.Н. Сорбция влаги однонаправленным органопластиком в стационарных температурно-влажностных условиях// *Механика композитных материалов* (1986), N3, 524-530.
21. Xiao G.Z., Shanahan M.E.R. Swelling of DGBA/DDA epoxy resins during hydrothermal ageing// *Polymer* **39** (1998), No. 14, 3253-3260.
22. Ray B.C. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites// *J. Colloid and Interface Sci.* **298** (2006), 111–117
23. Chin J.W., Nguen T., Aquadi K. Sorption and diffusion of water, salt water, and concrete pore solution in composite matrices// *J. Appl. Pol. Sci.* **71** (1999), 483-492.
24. Gellert E.P., Turley D.M. Seawater immersion ageing of glass–fibre reinforced polymer laminates for marine applications. *Composites: Part A* **30** (1999), 1259–1265.
25. Mouritz AP, Kootsookos A, Mathys G. Stability of polyester- and vinyl ester based composites in seawater. *J. Mater. Sci.* **39** (2004), 6073–6077.
26. Visco A.M., Campo N., Cianciafara P. Comparison of seawater absorption properties of thermoset resins based composites// *Composites: Part A* **42** (2011), 123–130.
27. Kootsookos A., Mouritz A.P. Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites // *Composite Sci. and Techology*, **64** (2004), 1503-1511.
28. Karbhari V.M., Xian G. Hygrothermal effects on high VF pultruded unidirectional carbon/epoxy composites: Moisture uptake// *Composites: Part B* **40** (2009), 41–49.
29. Kumar P., Chandrashekhara K., Nanni A. Testing and evaluation of components for composite bridge deck// *J. Reinf. Plast. Compos.* **22** (2003), No 5, 28-34.
30. Bank LC. Shear properties of pultruded glass FRP materials// *J. Mater. Civil. Eng.* **2** (1990), 118–22.
31. Timoshenko S.P. *Strength of Materials*. D. Van Nostrand Company, Inc. 1940.
32. Hai N.D, Mutsuyoshi H., Asamoto S., Matsui T. Structural behavior of hybrid FRP composite I-beam// *Construction and Building Materials* **24** (2010), 956–969.
33. Mottram J. T. Shear modulus of standard pultruded fiber reinforced plastic material// *J. Compos. Constr.* **8** (2004), 141-147.
34. Barbero E. J., Lopez-Anido R., Davalos, J. F. On the mechanics of thin-walled laminated composite beams// *J. Compos. Mater.* **27**(1993), No.8, 806–829.
35. Васильев В. В. *Механика конструкций из композиционных материалов*, Москва: Машиностроение, 1988.
36. Neto A.B.S.S., Rovere H.L.L. Flexural stiffness characterization of fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams// *Composite Structures* **81** (2007), 274–282.
37. Santhosh K., Muniraju M., Shivakumar N.D., Raguraman M. Hygrothermal durability and failure modes of FRP for marine applications// *J. Compos. Mater.* **46** (2012), No 15, 1889–1896.
38. Акишин П., Анискевич А., Анискевич К., Кулаков В. Численное моделирование процесса теплопереноса в ортотропной двутавровой балке// *Механика композитных материалов*, **49** (2013), No 3, 389-402.
39. Madenci E., Guven I. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*, New York: Springer Science, 2006.
40. Басов К. А. *ANSYS: справочник пользователя*, Москва: ДМК Пресс, 2005.
41. Sa M.F., Gomes A.M., Correia J.R., and Silvestre N. Creep behavior of pultruded GFRP elements – Part 1: Literature review and experimental study// *Composite Structures* **93** (2011), 2450–2459.
42. Papanicolaou G.C., Xerapadaki A.G., Tagaris G.D. Effect of thermal shock cycling on the creep behavior of glass-epoxy composites// *Composite Structures* **88** (2009), 436–442.
43. Тарнополький Ю.М., Кинцис Т.Я. *Методы статических испытаний армированных пластиков*, Москва, Химия, 1981.

44. Boer P., Holliday L., Kang T. H.-K. Interaction of environmental factors on fiber-reinforced polymer composites and their inspection and maintenance: A review// *Construction and Building Materials* 50 (2014), 209-218.
45. H.-C. Wu, Yan A. Durability simulation of FRP bridge decks subject to weathering// *Composites: Part B* 51 (2013), 162-168.
46. Rowland S. P. *Water in polymers*, Washington, D.C., 1980.
47. Степанов Р.Д., Шленский О.Ф. *Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах*, Москва, Машиностроение, 1981.
48. Aniskevich K., Aniskevich A., Arnautov A., Jansons J. Mechanical properties of pultruded glass fiber-reinforced plastic after moistening// *Composite Structures*, **94** (2012), No 9, 2914-2919.
49. Aniskevich K., Korkhov V., Faitelone J., Jansons J. Mechanical properties of pultruded glass fiber-reinforced plastic after freeze-thaw cycling// *J. Reinf. Plast.* 2012, 1554-1563.

## List of figures

### No table of figures entries found.

Att. 1.1. Poliestera saistvielu Norpol-440 [10] un Vinalkid-550P [11] elastības moduļu izmaiņa atkarībā no mitruma satura.....	9
Att. 1.2. Sagraušanas spēks epoksīda (a) un vinilestera (b) saistvielas bāzes ogļplastu paraugu stiepē atkarībā no mitruma satura saistvielā, kas aprēķināts pēc stiklošanās temperatūras izmaiņām, izmantojot formulu (1.1) dažādu faktoru iedarbībā [14] .....	10
Att. 1.3. Mitruma saturs $w_m$ saistvielā, kas tika aprēķināts pēc PKM stiklošanās temperatūras izmaiņām, izmantojot formulu (1.1), (a) un PKM stiprības izmaiņa starpslāņu bīdē $\tau_{LT}$ atkarībā no paraugu masas izmaiņas [16] (b); korelācija starp $w_m$ un $\tau_{LT}$ (c) .....	10
Att. 1.4. Mitruma satura (●,▲) un stiprības pie starpslāņu bīdes (o, Δ) izmaiņas laikā stiklaplastam (a) un ogļplastam (b), izgatavotiem uz epoksīda saistvielas bāzes, pie temperatūras 50 (●,o) un 70 °C (▲,Δ).....	13
Att. 1.5. Stiprība pie starpslāņu bīdes stiklaplastam (▲) un ogļplastam (●) atkarībā no mitruma satura, kas sasniegts sorbcijas procesā pie RH=95% un 70°C.....	13
Att. 1.6. Elastības moduļu $E_L$ (a) un $E_{app}$ (b) atkarība no mitruma satura slāņainos (0/90) stiklaplastu (a,b) un ogļplastu (c) paraugos [37] .....	17
Att. 2.1. PKM paraugi mitruma sorbcijas raksturlielumu noteikšanai .....	19
Att. 2.2. Pilna $A$ un vienkāršota $B$ pultrūdēto profilu shēma dubult-T (a), U (b), kārbveida (c), leņķveida (d). $Y$ un $Z$ asis sakrīt ar PKM galvenajām simetrijas asīm. Ar biezu līniju shēmā $B$ ir atzīmēti robežu apgabali, kuros $c(S) = c_\infty$ .....	20
Att. 3.1. Paraugu izgriešanas shēma mehāniskai izpētei stiepē gar šķiedru asi un liecē (a), kā arī stiepē šķērsām šķiedru asij un spiedē (b); cipari attēlo paraugu izmērus milimetros.....	22
Att. 3.2. Dažāda izmēra pultrūdetā stiklaplasta paraugu sorbcijas līknes: <i>Transverse</i> (■,Δ), <i>Axial</i> (◆,o) un <i>Square</i> (▲) pie 20 (■,◆,▲) un 70 °C (Δ,o); punkti – eksperimentālie dati, līnijas – to apraksts ar vienādojumu (1.8) .....	23
Att. 3.3. PKM parauga noslīpētais griezumums zem mikroskopa 90° leņķī gar rovinga šķiedru asi.....	23
Att. 3.4. Uzbriešanas deformācijas PKM gar simetrijas galvenajam asīm: $X$ (Δ), $Y$ (□), $Z$ (o) atkarībā no paraugu izturēšanas laika ūdenī <i>Transverse</i> (a) un <i>Axial</i> (b).....	24
Att. 3.5. Paraugu <i>Transverse</i> L (■), <i>Axial</i> (◆) un <i>Square</i> (▲) tilpuma uzbriešanas deformācijas atkarībā no mitruma satura.....	24
Att. 3.6. Piepildīto ar ūdeni poru tilpuma saturs atkarībā no mitruma satura PKM paraugos, kas izgriezti no sienas (punktētā līnija) un plauktiem (nepārtrauktā līnija) pie 20 °C..	25
Att. 3.7. Piepildīto ar ūdeni poru tilpuma saturs atkarībā no PKM paraugu izturēšanas laika ūdenī pie 20 (◆,▲) un 70 °C (□,Δ,o) <i>Transverse</i> (□), <i>Axial</i> (◆,o) un <i>Square</i> (▲,Δ) paraugiem .....	25
Att. 3.8. Saistošā ūdens masas saturs PKM paraugos atkarībā no to izturēšanās laika ūdenī <i>Transverse</i> (■), <i>Axial</i> (◆) un <i>Square</i> (▲) paraugiem pie 20 °C .....	26
Att. 3.9. Galīgo elementu modeļa fragments.....	26
Att. 3.10. Kļūda, kas izraisīta samainot shēmu $A$ uz $B$ (Att. 2.2), vidējam mitruma saturam plauktā (līkne 1), sienā (līkne 2) un šķērsgrīzumā kopumā (līkne 3).....	27
Att. 3.11. Analītiskā aprēķina kļūda salīdzinot ar skaitlisko pēc vienkāršotās shēmas $B$ vidējam mitruma saturam šķērsgrīzumā: plaukts (līkne 1), siena (līkne 2), sija kopumā (līkne 3) .....	27
Att. 3.12. Vidējā mitruma satura aprēķina kļūda attiecībā pret eksperimentu: pilnam (līkne 1), vienkāršotam (līkne 2) un analītiskam (līkne 3) modelim .....	28

Att. 3.13. Profila mitruma sorbcijas līkne kopumā (punkti ir eksperiments, līnija ir aprēķins) un analītiskā aprēķina kļūda attiecībā pret eksperimentu (a) un kopējās līknes sākuma apgabals (b) .....	28
Att. 3.14. Fiktīvā sprieguma-fiktīvās deformācijas raksturīgās diagrammas plauktu paraugiem sākuma un mitrinātā stāvokļos .....	30
Att. 3.15. Parauga sagraušanas fotoattēls trīspunktu liecē .....	30
Att. 3.16. Pultrūdētā stiklaplasta elastības moduļi liecē, kas izmērīti dažāda izgriezuma plauktu paraugiem .....	31
Att. 3.17. Termiskās deformācijas $\epsilon_x^T(1,1')$ , $\epsilon_y^T(2,2')$ , $\epsilon_z^T(3,3')$ un to summa $\epsilon_v^T(4,4')$ atkarība no temperatūras pultrūdētam stiklaplastam sākuma (1,2,3,4) un mitrināta (1',2',3',4') stāvokļos, kur pirmajai (a) un otrajai (b) uzsildīšanai .....	31
Att. 3.18. Tilpuma termiskās deformācijas atkarība no temperatūras pirmajā paraugu sildīšanas-dzesēšanas ciklā sākuma (nepārtraukta līnija) un mitrinātā (pārtraukta līnija) PKM...32	32
Att. 3.19. Atkarība slodze-izliece 2,5 m garas sijas izpētē.....	33
Att. 3.20. Tangensiālo spriegumu aprēķinam sijas šķērsgrīzumā.....	34
Att. 3.21. Profila šķērsgrīzuma izmēri mm un PKM simetrijas asis (a), un pieliktās slodzes shēma (b) .....	35
Att. 3.22. GE modelis dubult-T sijai (a) un tā fragments (b) .....	35
Att. 3.23. Sijas ar garumu 1 m (a, b) un 3 m (c, d) izlieces relatīvās izmaiņas atkarībā no PKM elastības (a, c) un bīdes (b, d) moduļu vērtībām .....	36
Att. 3.24. Sasaldēšanas – atsaldēšanas pilnais cikls .....	37
Att. 3.25. Stiprības un mitruma satura korelācija sākuma ( $\square, \diamond$ ) un mitrinātos ( $\blacksquare, \blacklozenge$ ) PKM paraugos pie cikliskās sasaldēšanas-atsaldēšanas.....	37
Att. 3.26. LTIK: $\alpha_x(o)$ , $\alpha_y(\square)$ un $\alpha_z(\Delta)$ atkarībā no sasaldēšanas - atsaldēšanas pilno ciklu daudzuma sākuma (a) mitrinātam (b) PKM; pilnie simboli – pēc paraugu kondicionēšanas attiecīgajā vidē.....	38
Att. 3.27. Paliekošā (pēc pirmās sasaldēšanas-atsaldēšanas cikla) tilpuma deformācija atkarībā no mitruma satura sākuma ( $\Delta$ ) un mitrinātos ( $\blacktriangle$ ) paraugos pēc to sasaldēšanas-atsaldēšanas .....	40
Att. 3.28. Temperatūras (a) un apkārtējās vides mitruma (b) izmaiņas pultrūdētā stiklaplasta paraugu natūrās ekspozīcijas laikā .....	41
Att. 3.29. Pultrūdētā stiklaplasta stiprības liecē $\sigma_f^{R1}(x)$ un $\sigma_f^{R2}(\bullet)$ (Att. 3.14) (a) un dielektriskās caurlaidības $DP$ (b) atkarība no natūrās ekspozīcijas laika.....	41
Att. 3.30. Mitruma saturs PKM ( $\bullet$ ), kas noteikts pēc dielektriskās caurlaidības izmaiņām, un PKM saistvielā(o), kas noteikts pēc stiklošanās temperatūras izmaiņām .....	42
Att. 3.31. Stiklaplasta stiprības liecē $\sigma_f^{R1}(x)$ un $\sigma_f^{R2}(\bullet)$ atkarība no mitruma satura .....	42
Att. 3.32. Pultrūdētā stiklaplasta LTIK $\alpha_y$ pie $T < T_g$ ( $\blacktriangle$ ) un $T \geq T_g$ (*) atkarība no eksponēšanas laika.....	43
Att. 4.1. Shēma paraugu izgriešanai no profila .....	44
Att. 4.2. Pultrūdētā oglekļa un stikla šķiedru plastikāta dažādu izmēru paraugu sorbcijas līknes: <i>Axial</i> ( $\diamond, \blacklozenge$ ), <i>Transverse</i> ( $\square, \blacksquare$ ) un <i>Square</i> ( $\Delta, \blacktriangle$ ) pie 20°C ( $\diamond, \square, \Delta$ ) un 70°C ( $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle$ ); punkti atbilst eksperimentālajiem datiem, līnijas atbilst to aprakstam ar vienādojumu (1.8) .....	45
Att. 4.3. PKM uzbriešanas deformācijas gar galvenajām simetrijas asīm: $\epsilon_x(a)$ , $\epsilon_y(b)$ , $\epsilon_z(c)$ atkarībā no <i>Axial</i> ( $\diamond, \blacklozenge$ ), <i>Transverse</i> ( $\square, \blacksquare$ ) un <i>Square</i> ( $\Delta, \blacktriangle$ ) paraugu izturēšanas laika ūdenī pie 20°C ( $\diamond, \square, \Delta$ ) un 70°C ( $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle$ ) .....	46
Att. 4.4. Piepildītu ar ūdeni poru tilpuma saturs atkarībā no mitruma satura dažādi izgrieztiem PKM paraugiem: <i>Axial</i> ( $\diamond, \blacklozenge$ ), <i>Transverse</i> ( $\square, \blacksquare$ ) un <i>Square</i> ( $\Delta, \blacktriangle$ ), iegremdētiem ūdenī pie 20°C ( $\diamond, \square, \Delta$ ) un 70°C ( $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle$ , x) .....	46
Att. 4.5. Galīgo elementu modeļa fragmenti .....	47
Att. 4.6. Kļūda, ko izraisa vidēja mitruma satura aprēķina shēmas A aizstāšana ar B, un C plauktiem (a) un šķērsgrīzumam kopumā (b).....	47

Att. 4.7. Sorbcijas līknes aprēķināšanas rezultāti plauktam (sienai) (a) un šķērsgriezumam kopumā (b): ar GEM shēmu A un C, analītiski ar shēmu C un kļūda (sarkana līkne), ko izraisa shēmas A aizstāšana ar C .....	48
Att. 4.8. Profila mitruma vidējā satura analītiskā aprēķina kļūda salīdzinājumā ar skaitliskā aprēķina kļūdu pēc shēmas A un C un analītiski aprēķinātās sorbcijas līknes plauktiem (a) un šķērsgriezumam kopumā (b) .....	48
Att. 4.9. Vidējais mitruma saturs šķērsgriezumā atkarība no laika: līnija – aprēķins, punkti - eksperiments .....	49
Att. 4.10. Oglekļa un stikla šķiedru plastikāta paraugu termiskās deformācijas $\varepsilon_x^T$ , $\varepsilon_y^T$ , $\varepsilon_z^T$ un to summas $\varepsilon_v^T$ , atkarībā no temperatūras pirmajā sasildīšanā –atdzesēšanā: sākotnējie (a) un samitrinātie līdz piesātinājumam pie 70 °C (b) .....	51
Att. 4.11. Oglekļa un stikla šķiedru plastikāta paraugu termiskās deformācijas $\varepsilon_x^T$ , $\varepsilon_y^T$ , $\varepsilon_z^T$ un to summas $\varepsilon_v^T$ , atkarībā no temperatūras otrajā sasildīšanā -atdzesēšanā: sākotnējie (a) un samitrinātie līdz piesātinājumam pie 70 °C (b) .....	51
Att. 4.12. LTIK (a) un $T_g$ (b) pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta izmaiņu korelācija ar mitruma satura izmaiņām paraugos, kas ilgstoši atradās ūdenī pie dažādām temperatūrām (paraugiem, ar pārklājumu un bez pārklājuma).....	52
Att. 4.13. Termiskās deformācijas $\varepsilon_x^T$ (a), b) $\varepsilon_y^T$ (b), un $\varepsilon_z^T$ (c) atkarībā no temperatūras pirmajā sasildīšanā –atdzesēšanā: pultrūdēts oglekļa un stikla šķiedru plastikāts (zilā krāsā) un izdalītais no viņa rovings (sarkans) .....	52
Att. 4.14. Sijas izpētes fotoattēls .....	53
Att. 4.15. Slodzes - izlieces diagrammas iegūtās īsu (a) un garu (b) siju trīspunktu lieces testos: sākotnējās (zilas), un mērcētajās 2 gadus ūdenī istabas temperatūrā (sarkanas).....	54
Att. 4.16. Kārbveida sijas matemātiskais modelis, ar GE pārklājumu (a), un tā fragments (b) .....	55
Att. 4.17. Sijas deformētais stāvoklis ar vertikālo pārvietojumu diagrammas pārklājumu .....	56
Att. 4.18. Kārbveida 1 (a) un 3 m (b) garas sijas izliece atkarībā no oglekļa un stikla šķiedru plastikāta elastības un bīdes moduļu relatīvām izmaiņām.....	56

## List of tables

Tabula 1.1. Timošenko vienādojumā (1.12) konstantes .....	15
Tabula 2.1. Fizikālo lielumu atbilstība siltumvadāmības un mitruma difūzijas uzdevumos .....	21
Tabula 3.1. Saistošā ūdens sorbcijas raksturlielumi polimēru saistvielā dažāda izmēra paraugiem .....	26
Tabula 3.2. Pultrūdētā stiklaplasta mehānisko īpašību raksturlielumi un to standartnovirze, kas iegūti 10 mm biezu paraugu, izgrieztu no sienas un plauktiem, izpētē stiepē un liecē.....	29
Tabula 3.3. Pultrūdētā stiklaplasta termiskās izplešanās koeficienti sākuma un mitrinātā stāvokļos .....	32
Tabula 3.4. Pultrūdētā stiklaplasta elastības modulis un stiprība liecē pēc cikliskās sasaldēšanas-atsaldēšanas .....	38
Tabula 3.5. Pultrūdētā stiklaplasta termiskās izplešanās tilpuma koeficients un stiklošanās temperatūra atkarība no sasaldēšanas-atsaldēšanas ciklu skaita.....	39
Tabula 4.1. Pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta difūzijas koeficienti dažādās temperatūrās .....	45
Tabula 4.2. Pultrūdētā oglekļa un stikla šķiedru plastikāta mehānisko īpašību rādītāji ar standarta novirzi iegūtie testējot 4,5 mm biezus paraugus .....	50
Tabula 4.3. Pultrūdēta oglekļa un stikla šķiedru plastikāta lineārais termiskās izplešanas koeficienti pie $T < T_g$ sākotnējā un samitrinātajā stāvoklī.....	51