

Darba rezultāti 2011. gadā

Latvijas Universitātes aģentūra
„Latvijas Universitātes Polimēru mehānikas institūts”
Eiropas Sociālā fonda projekts

„Cilvēkresursu piesaiste moderno kompozītmateriālu kompleksiem pētījumiem”

Īstenošanas laiks 2009. gada decembris – 2012. gada novembris

Darbības programma „Cilvēkresursi un nodarbinātība”. Atbilstošā aktivitāte
1.1.1.2. „Cilvēkresursu piesaiste zinātnei”. Vienošanās
Nr.2009/0209/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/114



I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē



Projekts veiksmīgi ir noslēdzis otro darba gadu. Tas ir bijis iespējams pateicoties tam, ka projektu īsteno patiesi profesionāla komanda, kuras mērķis ir veikt pētījumus, kuriem būtu paliekoša nozīme gan zinātnē, gan tālākā rūpnieciskajā ražošanā. Projekts piesaista cilvēkresursus Polimēru mehānikas institūta moderno kompozītmateriālu kompleksu pētījumu veikšanai, radot moderno kompozītmateriālu projektēšanas, izgatavošanas un pielietošanas zinātnisko pamatu, kas savukārt sekmē uz inovācijām balstītu Latvijas tautsaimniecības attīstību.

2011. gads bijis pētījumiem un secinājumiem bagāts gads, kas dod pārliecību, ka projekta rezultāti būs patiesi kvalitatīvi.”

Projekta vadītājs

*Latvijas Universitātes Polimēru mehānikas institūta direktors
Dr.habil.sc.ing. **Juris Jansons***

Eiropas Sociālā fonda projekts „Cilvēkresursu piesaiste moderno kompozītmateriālu pētījumiem”

Projekta mērķis

Piesaistīt cilvēkresursus “Latvijas Universitātes Polimēru mehānikas institūta” moderno kompozītmateriālu kompleksu pētījumu veikšanai, radot moderno kompozītmateriālu projektēšanas, izgatavošanas un pielietošanas zinātnisko pamatu, kas ilgtspējīgi sekmēs uz inovācijām balstītu Latvijas tautsaimniecības attīstību.

Projekta aktivitātes

- Ar kompozītmateriāliem pastiprinātu celtniecības konstrukciju izpēte:
- Celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu izpēte:
- Dispersi pildīto polimēru kompozītmateriālu īpašību izpēte.

Projekta rezultāti

- Izstrādāta laboratorijas metodika ar kompozītmateriāliem pastiprinātu būvkonstrukciju monitoringam.
- Izstrādāts ar kompozītmateriāliem pastiprināto būvkonstrukciju plaisu rašanās un attīstības modelis.
- Izveidots ar kompozītmateriāliem pastiprinātā betona modelis.
- Sistematizēta datu kopa par celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu mehāniskajām īpašībām.
- Izstrādāti modeļi celulozes šķiedru un to kompozītu mehānisko īpašību aprakstam, prognozēšanai un optimizēšanai.
- Sistematizēta datu kopa par dispersi pildīto polimēru kompozītmateriālu mehāniskajam un fizikālajām īpašībām.

1. projekta aktivitāte.

A kompozītmateriāliem pastiprinātu celtniecības konstrukciju izpēte

Projekta 1. aktivitāte ir ar kompozītmateriāliem pastiprinātu celtniecības konstrukciju izpēte. Aktivitātes vadītājs ir profesors, Dr. Hab. Ing. Vitauts Tamužs. Aktivitātes mērķis ir pētīt ar kompozītmateriāliem pastiprinātu celtniecības konstrukciju deformējamību, to sabrukšanas makro – un mikromehāniku.

Otrajā projekta darbības gadījumā aktivitātes ietvaros veikti vairāki nozīmīgi pētījumi.

Bazalta šķiedras kompozīta aptinums

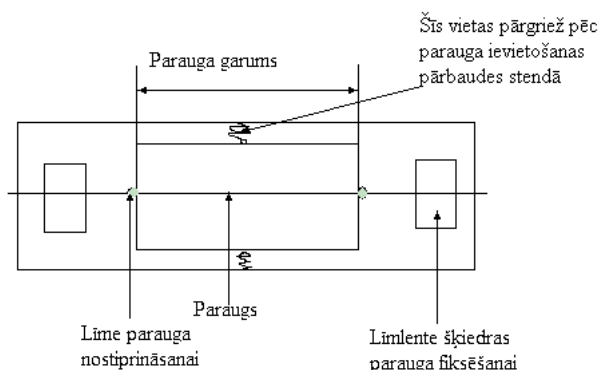
Līdz šim kompozītmateriālu aptinuma izgatavošanai pamatā izmantotas oglekļa šķiedras. Lai gan oglekļa šķiedru kompozītam ir izcilas mehāniskās īpašības, tas ir samērā dārgs materiāls. Bazalta šķiedras ir laba alternatīva oglekļa šķiedrām. Bazalta šķiedras tiek iegūtas no vulkāniskā ieža. Tām piemīt liela ugunsizturība, kas padara to īpaši piemērotu betona konstrukciju pastiprināšanai. Lai gan bazalta kompozīta mehāniskās īpašības ir zemākas par oglekļa šķiedru mehāniskajām īpašībām, bazalta šķiedras ir daudz lētākas par oglekļa šķiedrām un ir videi draudzīgas. Lai noteiktu bazalta šķiedru piemērotību betona konstrukciju pastiprinājumam, 2011. gadā projekta aktivitātes ietvarā veikti bazalta šķiedru īpašību pētījumi.

Tika veiktas trīs veidu pārbaudes šķiedru mehānisko īpašību noteikšanai:

- vienas šķiedras pārbaudes;
- mikroplastikas pārbaudes;
- gredzenu pārbaudes.

Vienas šķiedras pārbaudes

Tika izgatavoti paraugi no dažādiem bazalta materiāliem, no katra ar diviem dažādiem garumiem (10 un 30mm). Paraugu izgatavošana veikta, pamatojoties uz ASTM D 4018-99 (2004) standartu. Parauga shematiskais attēlojums redzams 1. attēlā.



1. attēls. Paraugs vienas šķiedras pārbaudei.

Noteikta šķiedru stiprība σ_{max} , maksimālā deformācija ϵ_{max} un elastības modulis E . Iegūtie rezultāti apkopoti 1. tabulā.

L=30mm	ϵ_{max} [%]	σ_{max} [MPa]	E [GPa]
Audums	2.6	1650	66
1200tex	3.3	1846	66
4800tex	3.0	1948	70
L=10mm			
Audums	4.0	2266	63
1200tex	4.4	2564	65
4800tex	4.2	2595	69

1. tabula. Vienas šķiedras pārbaudes rezultāti.

Mikroplastikas pārbaudes

Mikroplastikas pārbažu (ASTM D 4018-99) pamatā ir tādu paraugu izgatavošana, lai veidojas izteikts kompozīts: šķiedras sveķu matricā. Svarīgi, lai sveķi impregnējas šķiedru kūļos. Vēlamais sveķu daudzums paraugos ir 35-60% no kopējās parauga masas. Gatavo paraugu galus nostiprina ar speciālām uzlīmēm (2. attēls).

Paraugi izgatavoti no visiem pieejamiem bazalta materiālu veidiem (ar D.E.R.353 sveķiem) (2. tabula), kā arī no bazalta auduma, izmantojot divu veidu sveķus: Sika Dur 330 un epoksīdsveķi D.E.R.353, cietinātājs D.E.H. 24 (3. tabula).



2. attēls. Mikroplastikas paraugi pēc pārbaudēm.

Izejmateriāls	ϵ_{\max} [%] kompozīts	σ_{\max} [MPa] kompozīts	E [GPa] kompozīts	σ_{\max} [MPa] šķiedra	E [GPa] šķiedra	Sveķu daudzums [%]
auduma šķiedru kūļi	2.0	704	34	1714	84	40
audums	3.1	1127	40	2642	94	37
4800tex	3.4	1043	36	2426	83	37
1200tex	2.8	889	33	2109	84	41
auduma sloksnīte	3.2	841	28	2177	72	39
auduma sloksnīte	2.7	754	30	1951	80	39
audums (savērpts šķiedru kūlis)	1.9	777	42	1561	84	31

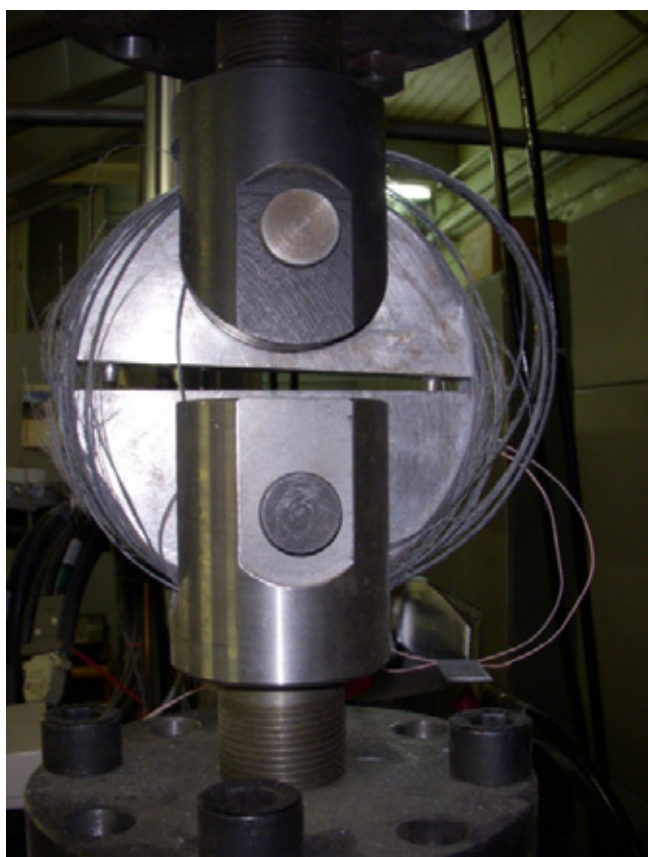
2. tabula. Mikroplastikas pārbažu rezultāti.

Sveķu tips	ϵ_{\max} [%] kompozīts	σ_{\max} [MPa] kompozīts	E [GPa] kompozīts	σ_{\max} [MPa] šķiedra	E [GPa] šķiedra	Sveķu daudzums [%]
Sika Dur 330	3.3	525	19	2184	81	52
D.E.R 353	3.3	596	20	2251	75	40

3. tabula. Mikroplastikas pārbažu rezultāti. Izmantots dažāds sveķu tips.

Gredzenu pārbaudes

Lai noteiktu graužošo deformāciju šķiedras virzienā un graužošo deformāciju aptinuma kompozītā, izmanto gredzenu pārbaudes (ASTM D 2291). Tika pārbaudīti gredzeni, kas tika izgatavoti no bazalta auklas 1200tex. Šis materiāls tika izmantots, lai izgatavotu ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprināta betona kolonnu paraugus. Tika izgatavoti divu veidu gredzeni – ar 4 aptinuma kārtām un ar 8 aptinuma kārtām. Gredzenu izmēri – platums 20mm, diametrs – 150mm. Sloģšanas ātrums visām gredzenu pārbaudēm bija 2mm/min., un tie tika sloģti līdz sabrukšanai (3. attēls). Iegūtie pārbaudžu rezultāti aplūkojami 4. tabulā.



3. attēls. Bazalta šķiedru kompozīta gredzenu pārbaude.

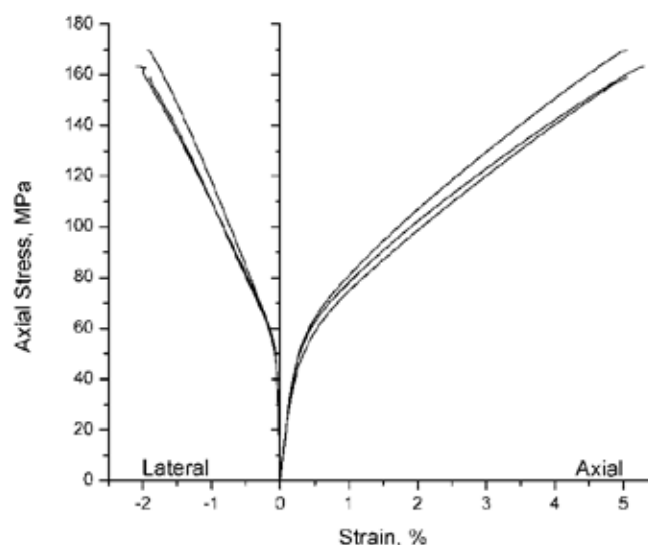
Kārtu skaits	ϵ_{\max} [%] kompozīts	σ_{\max} [MPa] kompozīts	E [GPa] kompozīts	σ_{\max} [MPa] šķiedra
4	2.1	729	35	1400
8	1.8	798	45	1533

4. tabula. Gredzenu pārbaudžu rezultāti.

Ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprinātas betona kolonnas

Šajā projektā ir pētītas ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprinātas apaļas betona kolonnas, kuras izgatavotas no dažādas stiprības betona. Apaļā pastiprinātā betona kolonnā kompozīta aptinums tiek slogots aploces virzienā, bet betons atrodas trīsasiņās spiedes spriegumstāvoklī. Tādējādi tiek pilnībā izmantota kompozīta pastiprinājuma augstā stiepes stiprība, ievērojami paaugstinot betona stiprību un maksimālās deformācijas. Lai gan atsevišķi betons un kompozīts ir trausli materiāli, pastiprināts betons uzvedas kā plastisks materiāls, jo pastiprinājums aizkavē bojājumu pieaugumu, ierobežojot betona deformācijas.

Tika izgatavots divu dažādu stiprību betons (spiedes stiprība 12MPa un 49MPa). Visu kolonnu diametrs bija 150mm, garums – 300mm. Betons tika pastiprināts, uztinot ar epoksīdsveķiem piesūcinātu bazalta šķiedru grīsti (Basaltex KVT1200Tex13E) uz rotējošas betona kolonnas. Lai sabrukums norisinātos betona kolonnu vidusdaļā, kolonnu gali ir papildus jāpastiprina, tāpēc jau aptīto betona kolonnu gali tika apstrādāti, lai novērstu nelidzenums, un aplīmēti ar šaurām bazalta šķiedru lentām. Pastiprinātie paraugi tika atstāti nožūt 10 dienas pie temperatūras 22°C. Pastiprinājums sastāvēja no 4 un 8 grīstes slāņiem. Pārbaudžu laikā reģistrēja garendeformācijas un šķērsdeformācijas. Spiedes sprieguma – šķērsdeformācija un spiedes sprieguma – garendeformācija likņu piemēri ir parādīti 4. attēlā. Noskaidrots, ka bazalta šķiedru aptinums rada ievērojamu pastiprinājuma efektu, būtiski palielinot betona kolonnas nestspēju un maksimālās deformācijas. Tajā pašā laikā bazalta šķiedru aptinums ir ievērojami lētāks par oglekļa šķiedru aptinumu.



4. attēls. Ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprinātas betona kolonnas sprieguma-deformācijas likņu piemērs. Nepastiprinātā betona spiedes stiprība – 49MPa, pastiprinājuma slāņu skaits – 8.

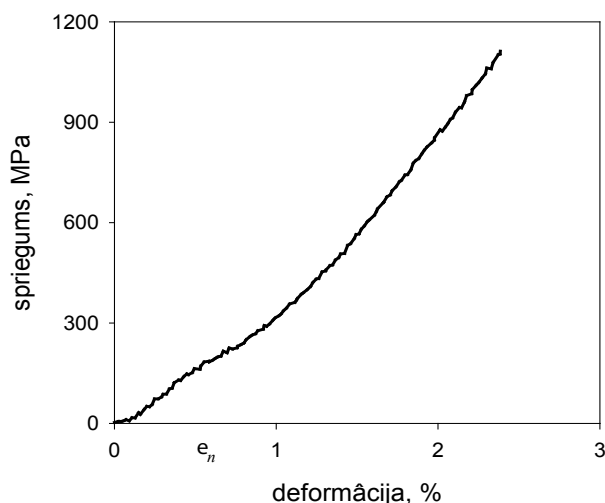
2. projekta aktivitāte.

Celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu izpēte.

Projekta 2.aktivitāte ir celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu izpēte. Aktivitātes vadītājs – Dr. Sc. Ing. Jānis Andersons. Galvenie pētījumi tiek veikti ar dabīgas izcelsmes celulozes šķidrām – linu šķidrām.

Projekta darba otrajā gadā tika pētīti linu šķiedru graujošo deformāciju sadalījumi pie dažādiem parauga garumiem.

Lai arī linu šķiedru sprieguma–pārvietojuma likne ir izteikti nelineāra (5. attēls), var secināt, ka arī šķiedru maksimālo deformāciju sadalījums ir aprakstāms ar Veibula sadalījuma funkciju. Izmantojot šķiedru elastības moduli un nelineāro deformāciju, iespējams savstarpēji saistīt iegūtā šķiedru deformācijas sadalījuma parametrus ar šo šķiedru stiprības sadalījuma parametriem. Rezultāti rāda, ka, neskatoties uz vairākiem vienkāršojošiem pieņēmumiem, iegūtā prognozētā un eksperimentālā šķiedru stiprības sadalījuma atbilstība ir ļoti laba.



5. attēls. Linu elementāršķiedras stiepes slogošanas diagramma.

Šie rezultāti var tikt praktiski pielietoti situācijās, kad ir zināmas šķiedru elastīgās īpašības, bet stiprību nav iespējams nomērīt. Piemēram, nevar nomērīt šķiedru diametru (tas ir mazs, dažkārt tikai pāris mikroni, dabīgajām šķidrām mainīgs pa garumu), jo nav atbilstošas aparatūras. Šādās situācijās var mērīt tikai šķiedru deformāciju sadalījumus, bet stiprības sadalījumus izrēķināt izmantojot piedāvāto formulu

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\gamma_\varepsilon} \left(\frac{\sigma / \langle E \rangle + \langle \varepsilon_n \rangle}{\beta_\varepsilon} \right)^{\alpha_\varepsilon} \right]$$

kur l apzīmē šķiedras garumu, γ_ε , α_ε un β_ε ir šķiedru robeždeformācijas sadalījuma parametri, Junga moduļa

vidēja vērtība apzīmēta ar $\langle E \rangle$ un nelineārā deformācija

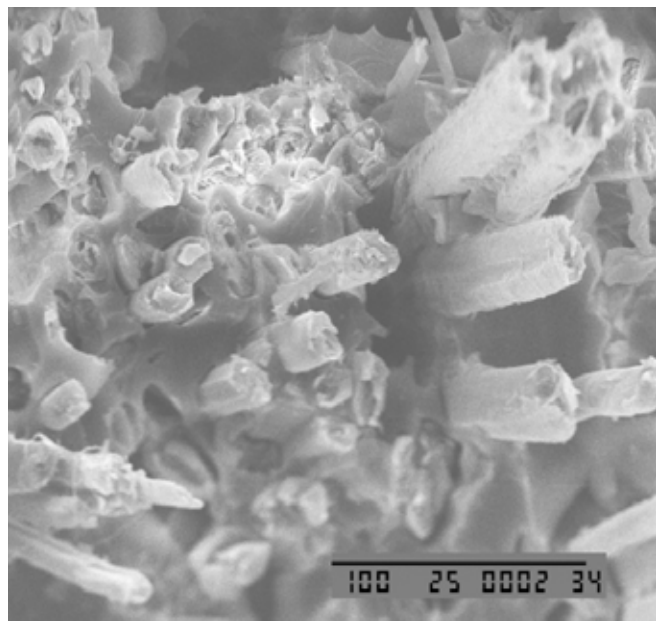
$\langle \varepsilon_n \rangle$. Iegūtā izteiksme ļauj izmantot šķiedras fragmentācijas pārbaudes, kurās nosaka robeždeformācijas sadalījumu, arī šķiedras stiprības sadalījuma novērtēšanai.

Komponentu savstarpējā adhēzija ir viens no galvenajiem kompozītu raksturojošajiem lielumiem. No tās kvalitātes ir atkarīgas kompozīta galvenās mehāniskās īpašības, tādēļ ir svarīgi spēt to noteikt materiālu izstrādes gaitā. Adhēzijas noteikšanai šķiedru kompozītmateriālos eksistē vairākas metodes, tomēr to komplikētība un adekvātums atšķiras, turklāt ne visas no tām ir iespējams pielietot dabīgo šķiedru kompozītiem. Projekta gaitā tika izstrādāta metode, ar kuras palīdzību iespējams novērtēt adhēziju materiālā, izmantojot impregnētu vienvirziena šķiedru kūļu stiepes pārbaudi paraugus.

Metode balstās uz matemātisku varbūtisku modeli, kas izmanto pieņēmumu, ka matricas un dabīgo šķiedru galvenais adhēzijas mehānisms ir tīri mehāniskas dabas, t.i. komponenti nav savstarpēji saistīti ar ķīmiskām saitēm. Tādā gadījumā, zinot šķiedru stiprības sadalījuma funkciju, materiāla adhēziju raksturojošā starpvirsmu bīdes stiprība ir tieši saistīta ar no vienvirziena kompozīta stiepē izrauto šķiedru garuma un diametra savstarpējās attiecības sadalījumu.

Eksperimentāli visus modeļa ieejas datus var viegli nomērīt. Linu šķiedru stiprības sadalījums bija zināms jau no iepriekšējiem pētījumiem. Trūkstošo datu iegūšanai tika izgatavoti nelieli vienvirziena linu šķiedru un vinilestera sveķu kompozītu paraugi. Pēc to sagraušanas stiepē, to sabrukuma virsmas tika pētītas mikroskopā un tika nomērīts atsevišķu no sveķiem izrauto linu elementāršķiedru garuma un diametra attiecības sadalījums. No datiem aprēķinātā starpvirsmu bīdes stiprība 17 MPa atbilst iepriekš literatūra publicētiem adhēzijas datiem, kas iegūti ar citām metodēm no līdzīgiem (dabīgo šķiedru un termoreaktīvu polimēru) kompozītiem.

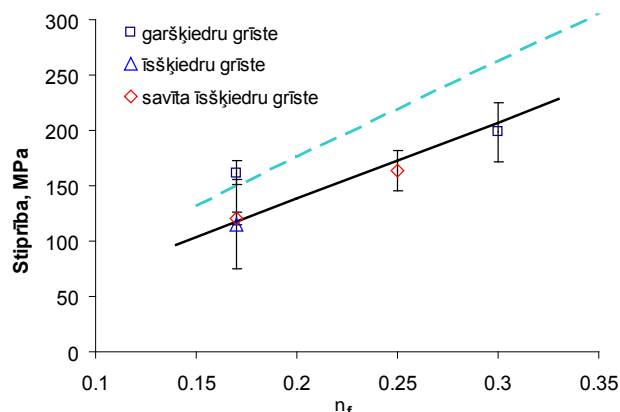
Piedāvātās metodes priekšrocība ir tās reālistiskums – materiālu adhēzija tiek noteikta no reālu kompozītu (ar reālu spriegumu stāvokli) pārbaudēm. No stiepes pārbaudēm netiek izmantoti (jo nav nepieciešami) nekādi mehāniski dati, ir nepieciešams paraugu tikai sagraut, lai iegūtu sabrukuma virsmas un būtu iespējams mikroskopā redzēt un pētīt no sveķiem izrautās šķiedras. Tipiska stiepes plīsuma aina orientēti stiegrotam kompozītam, kurā redzamas izrautās šķiedras, parādīta 6. attēlā.



6. attēls. Orientēti stiegrota linšķiedru kompozīta stiepes plīsuma virsma.

Kompozītmateriāla defektu statistiskās izkliedes dēļ tā stiprība samazinās, pieaugot parauga izmēriem. Eksperimentāli novērtēts stiepes stiprības mēroga efekts stiegtiem linšķiedru kompozītiem pie sloģojuma šķiedru virzienā, veicot stiepes pārbaudes FinFlax linu šķiedru kūļu/Tribest sveķu kompozītmateriālam un FinFlax linu šķiedru kūļu/vinilestera sveķu kompozītmateriālam. Konstatēts, ka stiprības samazināšanos līdz ar parauga izmēru palielināšanu var aprakstīt, izmantojot Veibula stiprības sadalījuma funkciju, un mēroga efektu nosaka slodzei pakļautais parauga tilpums.

Lai novērtētu vienā virzienā stiegrota linšķiedru kompozīta stiepes stiprības teorētisko augstāko robežvērtību, pielietots Curtin (2000) varbūtiskais stiegrota kompozīta stiprības modelis idealizētas struktūras kompozītam, ko veido regulāri izkārtotas taisnas, paralēlas, nepārtrauktas šķiedras ar linu elementāršķiedru stiprības sadalījumu un robežvirsmas bīdes stiprību. Izmantojot impregnētu FinFlax linšķiedru **kūļu stiprības datus, kā arī literatūrā publicētos datus par manuāli orientētu** FinFlax linšķiedru kompozītu stiprību, veikts teorētiskās robežstiprības un eksperimentālās stiprības salīdzinājums. Konstatēts, ka tikai zemām kompozīta armējuma koeficienta vērtībām 0,15 ... 0,2 kompozīta stiprība sasniedz teorētisko robežvērtību (7. attēls). Lielākām šķiedru tilpuma daļas vērtībām eksperimentālie stiprības dati ir par ~30% zemāki par teorētiski sasniedzamo vērtību.



7. attēls. Orientētu linšķiedru/vinilestera kompozīta stiepes stiprības stieģrojuma virzienā atkarība no šķiedru tilpuma daļas. Teorētiskā stiprības prognoze idealizētai kompozīta struktūrai parādīta ar raustītu līniju un kompozītam ar 4x4 šķiedru lielu defektu – ar nepārtrauktu līniju.

zstrādāts modelis defektu ietekmes uz ar vienā virzienā orientētām linšķiedrām stiegtu polimērkompozītu stiepes stiprību novērtēšanai. Dabīgo šķiedru polimēru kompozītos stieģrojums mēdz būt izteikti nevienmērīgs šķiedru ierobežotā garuma un dabīgās izcelsmes dēļ. Turklāt šķiedru gali bieži vien atrodas blakus viens otram, veidojot klāsterus. Šādi stiegtā materiāla apgabali var tikt uzskatīti par tā defektiem, kuri darbojas kā sprieguma koncentratori un ievērojami ietekmē materiāla sabrukšanu. Lai korekti modelētu kompozītmateriāla stiprību, ir jāņem vērā šķiedru galu klāsteru klātbūtne. Stiprības prognozēšanai izmantots idealizēts modelis, kurā reālā vienvirziena linu kompozīta struktūra tuvināti aizstāta ar ideāli cilindrisku, vienmērīgi kvadrātiskā režģī izvietotu šķiedru kompozītu, kas satur sprieguma koncentratorus šķiedru galu klāsteru formā. Izveidots šādi situācijai atbilstošs matemātiskais modelis. Analizējot modelēšanas rezultātus un salīdzinot tos ar eksperimentālajiem datiem, konstatēts, ka 4x4 šķiedru liels pārtraukumu klāsteris nodrošina labu teorētiskās stiprības sakritību ar eksperimentālajiem linu/vinilestera kompozītmateriāla vidējās stiprības datiem (7. attēls). Aprēķinu veikšanai tika izmantotas iepriekš eksperimentāli noteiktās šķiedru stiprības sadalījuma un adhēzijas parametru vērtības.

Izmantojot kohezīvos elementus šķiedras un matricas saķeres aprakstīšanai un tipiskas adhēzīvās stiprības vērtības, veikti īsšķiedru linu kompozītmateriāla ar nelineāru polipropilēna matricu vienības šūnas deformēšanās galīgo elementu aprēķini pie dažādiem sloģošanas veidiem. Apstrādājot iegūtos rezultātus, iegūti šūnas efektīvie parametri un ar vidējošanas metodi noteiktas haotiski orientētu linu īsšķiedru kompozīta ar nelineāru polipropilēna matricu nelineārās deformēšanās līknes pie vienasīgas stiepes. Salīdzinot tās ar eksperimentālajiem datiem konstatēts, ka modelis apmierinoši prognozē deformēšanās nelinearitāti praktiski nozīmīgā diapazonā līdz ~1,5% lielai deformācijai.

Projekta 3. aktivitāte.

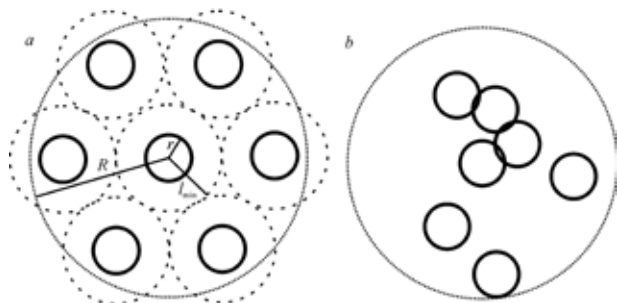
Dispersi pildīto polimēru kompozītmateriālu īpašību izpēte

Projekta 2.aktivitātes mērķis ir dispersi pildīto polimēru kompozītmateriālu izpēte. Aktivitātes vadītājs – Dr.Sc.Ing. Andrejs Aņiskevičs.

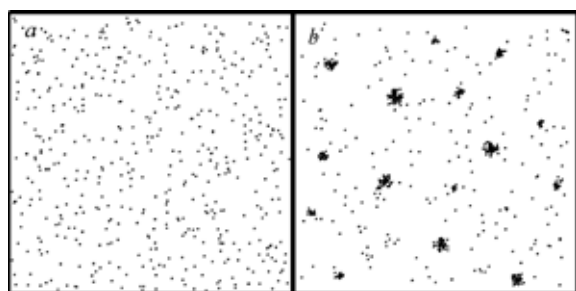
2011. gadā veikti nanokompozītmateriālu kompleksie pētījumi, pētīta kompozītmateriālu uzvedība mitruma un siltuma ietekmē, veikti pašdziedējamo kompozītu ar bojājumu indicējošo pārklājumu pētījumi un polimērbe-
tona paraugu izgatavošana ar reciklējamām saistvielām būvniecības izstrādājumu pielietojumiem.

Nanokompozītmateriālu kompleksie pētījumi

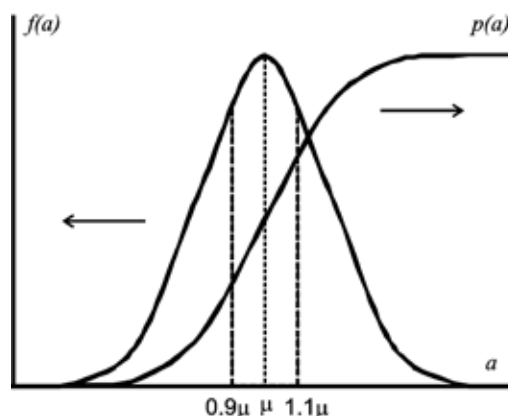
Veikti pētījumi un apkopoti rezultāti, lai izstrādātu paņēmienus pildvielas daļiņu homogēnā sadalījuma novērtēšanai, balstoties uz pildvielas daļiņu haotiskā sadalījuma modeli, daļiņu izmēru histogrammām un dispersitātes parametra noteikšanu. Rezultātā tika izveidots modeļa pildvielas daļiņu dispersitātes algoritms sistēmām ar un bez klasteriem. Šī metodika tika pielietota paraugiem no epoksīda saistvielas pildītas ar oglekļa nanocaurulītēm (ONC), kas tika izgatavoti pēc sešām dažādām eksperimentālajām shēmām.



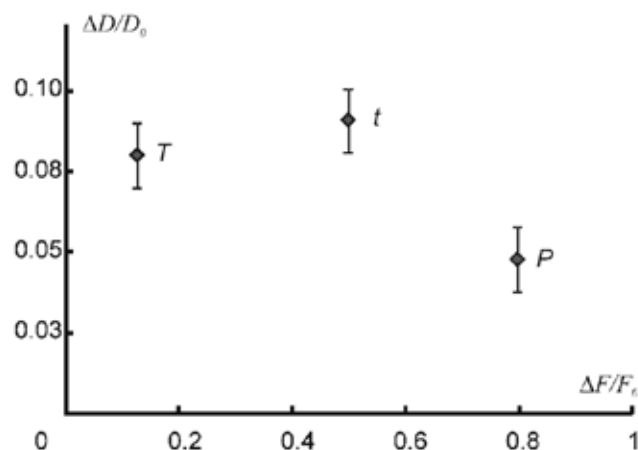
8. attēls. Homogēns (a) un nehomogēns (b) septiņu daļiņu sadalījums kādā pārstāvju apgabalā.



9. attēls. Homogēns pildvielas daļiņu sadalījums (a) un pildvielas daļiņu sadalījums ar aglomerātiem (b).



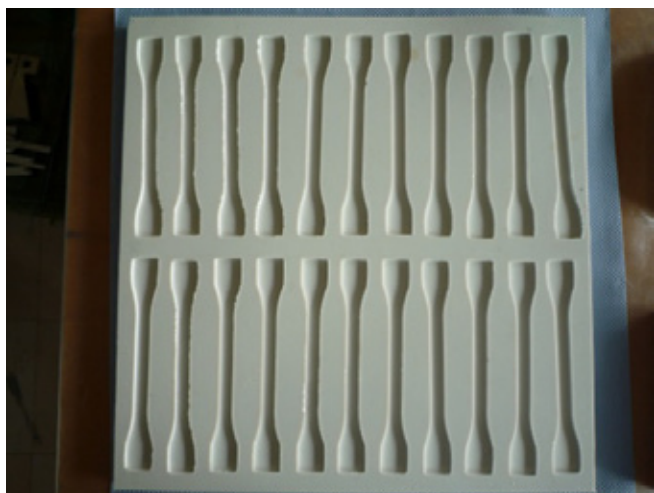
10. attēls. Dispersitātes parametra D_k shematiskais attēlojums (laukums zem līknes $\mu \pm 0.1\mu$ apgabalā).



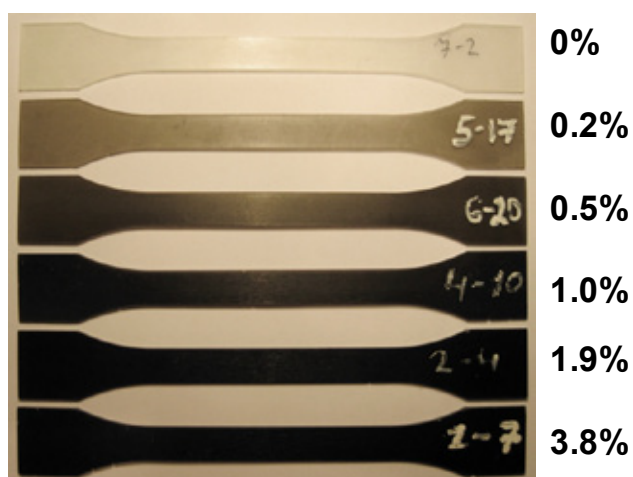
11. attēls. Dispersitātes parametra relatīvā izmaiņa atkarībā no ultraskaņas iedarbības parametru relatīvās izmaiņas (T – temperatūra, t – laiks, P – jauka).

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, tika secināts, ka vislielāko efektu oglekļa nanocaurulišu dispersijas uzlabošanai epoksīda saistvielā dod temperatūra un ultraskaņas iedarbības laiks. Tā cēlonis ir strauja polimēra saistvielas viskozitātes samazināšana pie augstām temperatūrām (90-100 °C). Šie rezultāti labi korelē ar netiešās metodes rezultātiem – gaismas caurlaidības eksperimentiem. Nanokompozīta paraugi ar lielāku dispersitātes parametra vērtību uzrādīja mazāku gaismas caurlaidību, jo labākā oglekļa nanocaurulišu sadalījuma gadījumā gaismas izkliedes centru daudzums būtiski palielinās.

Izstrādāti tehnoloģiski paņēmieni termoreaktīvu matricu (epoksīda sveķu RTM6, Hexcel, Itālija, LH 289, Havel, Čehija un Araldite LY 564, Nanocyl, Beļģija) kompozītmateriālu ar asimetriskās formas nanostrukturētām daļiņām (oglekļa nanocaurulītes, Nanocyl, Beļģija) paraugu izgatavošanai ar dažādu oglekļa nanocaurulišu koncentrāciju (līdz 3,8% pēc masas). Kopā tika izgatavoti apmēram 1000 paraugi (12. un 13. attēls).



12. attēls. Silikona veidne 22 lāpstiņveida paraugu izgatavošanai.

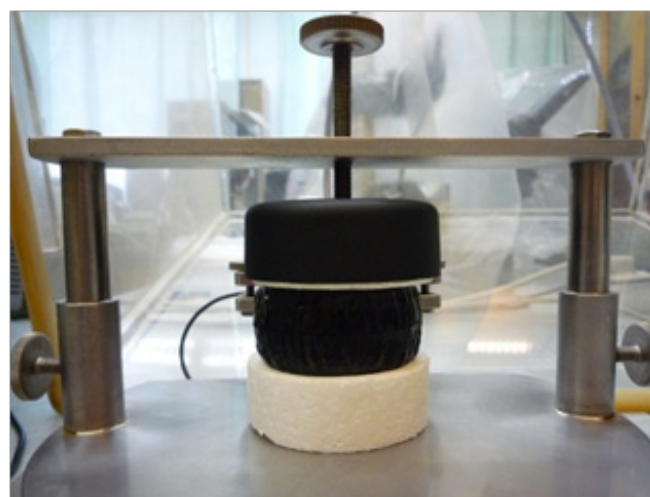


13. attēls. Izgatavotie NK paraugi ar dažādām ONC koncentrācijām pēc masas.

Eksperimentāli tika izpētītas vairāku termoreaktīvas matricas kompozītmateriālu mehāniskās (stiprības, elastīgās, viskoelastīgās) (epoksīda sveķu *RTM6*, *Hexcel*, Itālija, *LH 289*, *Havel*, Čehija un *Araldite LY 564*, *Nanocyl*, Beļģija) un siltumfizikālās (termiskā izplešanās, siltuma vadāmība, temperatūras vadāmība un siltumietilpība) (epoksīda sveķu *LH 289*, *Havel*, Čehija un *Araldite LY 564*, *Nanocyl*, Beļģija) īpašības atkarībā no oglekļa nanocaurulišu pildvielas satura (līdz 3,8% pēc masas). Pētot šķūdi, tika veikti gan statistiskie, gan cikliskie eksperimenti ar pakāpeniski pieaugošu slodzes līmeni. Statiskajā režīmā eksperimenti tika realizēti pie dažādiem slodzes līmeņiem un temperatūrām.



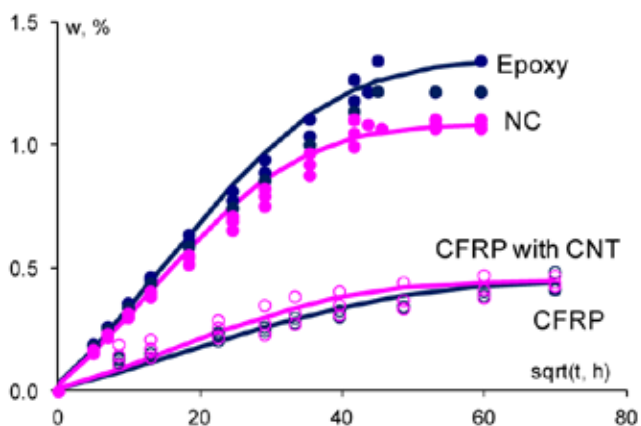
14. attēls. Šķūdes stends ar nanokompozītu paraugiem, kas tika noslogoti pie trim dažādiem sprieguma līmeņiem.



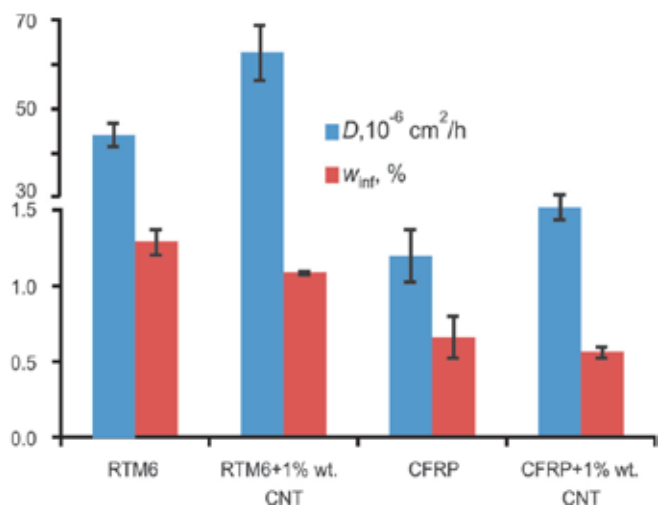
15. attēls. Siltuma vadāmības noteikšanas eksperimentālā ierīce ar nanokompozītu paraugiem.

Var secināt, ka kopumā apskatāmās nanokompozītu īpašības tiek uzlabotas, pievienojot ONC. To šķūdes deformācija monotoni samazinās, palielinot spriegumu un temperatūru, kā arī ONC pievienošana uzlabo to pretestību šķūdē. Ir novērojams, ka materiāla elastīgās, viskoelastīgās un termofizikālās īpašības pasliktinās, kad ONC koncentrācija sasniedz 1.9% pēc masas. Rezultāti parāda, ka optimālā pildvielas koncentrācija pētāmajiem kompozītmateriāliem ir 1% pēc masas, pie kuras tiek sasniegti maksimālie nanokompozītu mehāniskie un termofizikālie raksturlielumi.

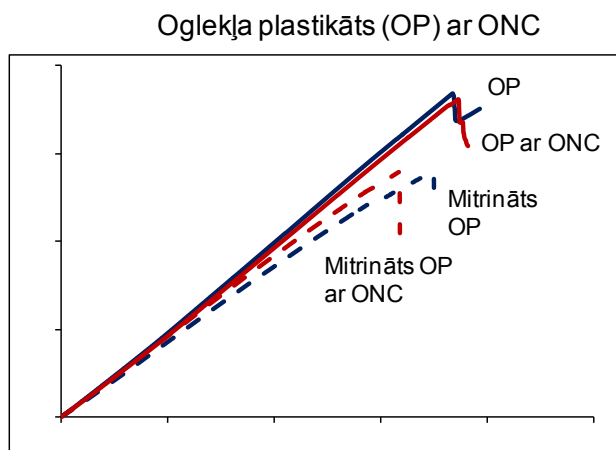
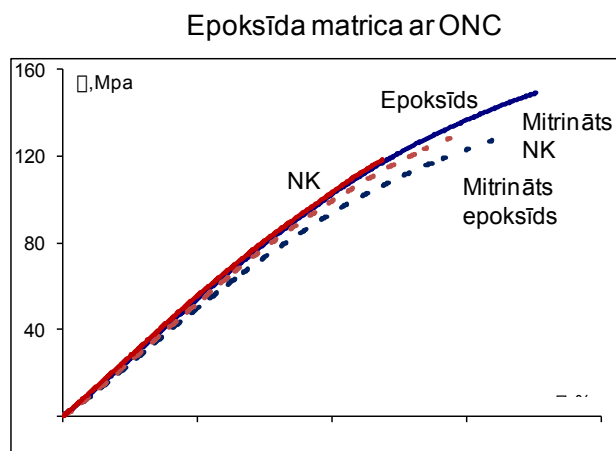
2011. gadā tika realizēti absorbcijas eksperimenti kompozītmateriālam (*RTM6*, *Hexcel*, Itālija) un oglekļa plastikātam (0/45/90/-45)₂ ar nanocauruļu saturu 0 un 1% pēc masas atmosfērās ar relatīvo mitrumu 98%. *RTM6* (*Hexcel*, Itālija) un oglekļa plastikāta paraugiem ar 1% pēc masas oglekļa nanocaurulišu un bez tām sasniedzot līdzsvara mitruma daudzumu, tika realizēti kvazistatiskie eksperimenti trīs punktu liecē, izmantojot universālo testēšanas mašīnu *Zwick 2.5* pēc ASTM standarta Nr.D0790.



16. attēls. Nanokompozītu un oglekļa plastikāta paraugu absorbētais mitruma daudzums atkarībā no laika (atmosfēras relatīvais mitrums – 98%, simboli – eksperimenta dati, līnes – aprēķins pēc Fika modeļa).



17. attēls. Nanokompozītu un oglekļa plastikāta paraugu efektīvais difūzijas koeficients.



18. attēls. Kvizistatiskie eksperimenti trīs punktu liecē epoksīda matricai un oglekļa plastikātam ar ONC sausā un mitrinātā stāvoklī.

Iegūtie rezultāti neliecina par ONC pozitīvo efektu uz NK lieces moduli, maksimālo deformāciju un stiprību. Oglekļa plastikātam ar 1% ONC pēc masas tika novērota neliela lieces moduļa (par 9%) un stiprības (par 16%) uzlabošana salīdzinājumā ar nepildīto OP.

Kompozītmateriālu uzvedība mitruma un siltuma ietekmē

Tika izanalizēti uz poliestersveķu pamata izgatavotā slāņaina stiklaplasta dilatometriskās testēšanas (20÷125°C) rezultāti, lai novērtētu termiskās deformācijas un to kinētikas izmaiņas pēc kompozītmateriāla paraugu mitrināšanas ūdenī un termocikliskas slogošanas, pārejot pāri nulles temperatūrai, t.i. -30 +20°C diapazonā. Ir noteikts, ka uzbriešanas un termiskās izplēšanas koeficienti ir dažādi trijos galvenajos virzienos: šķiedras ass virzienā, perpendikulāri šķiedras asij parauga plaknē un normāli plaknei. Vislielākie uzbriešanas un termiskās izplēšanās koeficienti ir perpendikulāri šķiedras asij parauga plaknē. Ir aprēķināti tilpuma termiskās izplēšanās koeficienti. Ir noteikts, ka lineārie un tilpuma termiskās izplēšanās koeficienti mainās pie kom-

pozītmateriāla temperatūras izmaiņām, radot polimēras saistvielas stiklošanas pāreju. Lineārie un tilpuma termiskās izplēšanās koeficienti un stiklošanās temperatūra kompozītmateriālam sākumstāvoklī (sausam) un pēc mitrināšanas ūdenī nav atkarīgi no termociklu skaita. Pēc uzsildīšanas – atdzesēšanas cikla kompozītmateriālam ir paliekošā deformācija, kas liecina par neatgriezeniskām izmaiņām struktūrā. Tās deformācijas lielumi ir atkarīgi no mitruma satura materiālā.

Noteiktas un izanalizētas ar oglekļa nanocaurulem pildīto epoksīdsveķu tilpuma uzbriešanas deformācijas paraugiem ar dažādām pildvielas koncentrācijām un apkārtējo mitrumu, lai novērtētu pildvielas koncentrācijas efektu uz nanokompozīta uzbriešanu. Ir noteikts, ka tilpuma uzbriešanas deformācijas kā funkcija no mitruma satura ir dažādas nanokompozītam un epoksīdsveķiem. Epoksīdsveķiem sorbcijas procesa sākumā piemīt lineāro izmēru samazināšanās, pēc tam – palielināšanās (uzbriešana).

Darba gaitā tika modelēta polimērkompozīta mehānisko īpašību atkarība no mitruma satura, ņemot vērā polimēra uzbriešanas efektu, kā arī nanokompozīta elastīgās un viskoelastīgās īpašības. Modeļi ir aprobēti, izmantojot laboratorijā esošos eksperimentu datus.

Tika izanalizēti laboratorijā iegūtie eksperimentālie rezultāti par nanokompozīta šļūdi atkarībā no pildvielas koncentrācijas, konstruētas apkopotas (vispārinātās) šļūdes līknes. Tika izanalizēti nelineāri modeļi šļūdes un atgriezeniskas šļūdes procesu aprakstam, kuri būtu piemēroti oglekļa nanocaurules/epoksīdsveķa nanokompozītam. Aprobētas arī dažādas atgriezeniskās šļūdes aproksimācijas. Ir izrēķinātas šļūdes līknes, salīdzinātas ar eksperimentāliem datiem un izanalizēta starpība.

Paveikta poliimīda plēves Upilex mitruma sorbcijas procesa eksperimentāla izpēte un modelēšana dažādos mitruma apstākļos. Iegūtas eksperimentālas līknes materiāla mitruma saturam atkarībā no laika priekš dažādiem vides mitrumiem diapazonā no 47% līdz 98%. Ir konstatēts, ka Fika modelis apraksta ūdens tvaiku sorbcijas procesu pietiekami apmierinoši. Noteikti minēto modeļu parametri. Maksimālais mitruma saturs materiālā sasniedza 3.76%. Vides mitruma pieaugums no 47% līdz 98% notiek vienlaikus ar difūzijas koeficienta lineāru samazināšanos no $6.5 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{h}$ līdz $1.1 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{h}$.

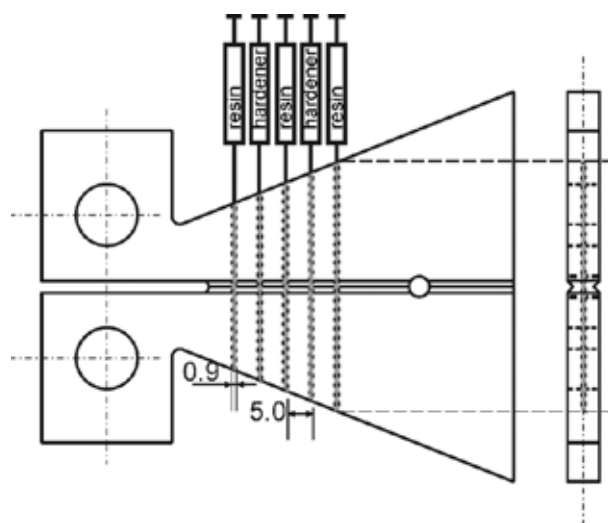
Pamatojoties uz ilglaicīgas šļūdes eksperimentu rezultātiem, pie konstanta mitruma satura paraugos ir iegūta apkopota šļūdes līkne. Iegūti relaksācijas laiku spektri un tiem atbilstošas amplitūdas, kā arī aprēķināti elastības modulis $E = 7.30 \pm 0.04 \text{ GPa}$ un Puasona koeficients $\mu = 0.34 \pm 0.02$ priekš sākotnēja stāvokļa. Ir noteikta redukcijas funkcija un ir secināts, ka deformācija kura attīstījās 5 nedēļu garumā (šļūdes eksperimentu ilgums) maksimāli mitrinātā paraugā ar mitruma saturu 3.76% ir 1.8 reizes lielāka, nekā paraugā ar mitruma saturu 0.91%.

Eksperimentāli izpētīta poliimīda plēves Upilex ilglaicīga šļūde nelīdzsvarota mitruma satura apstākļos. Ir konstatēts, ka mitruma – laika analogijas principu var pielietot

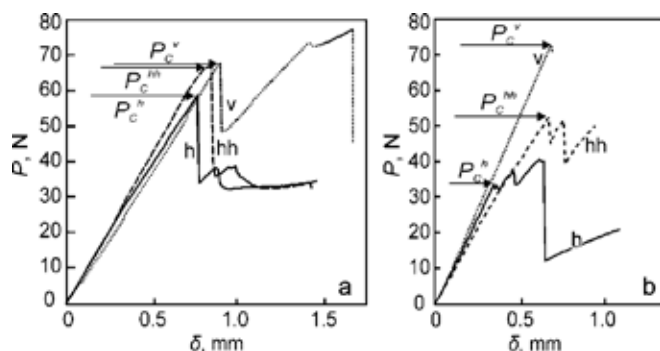
priekš pētāmā materiāla mainīgos vides mitruma apstākļos. Ilglaicīgas šļūdes eksperimentālu datu kopa pie fiksēta mitruma un sorbcijas dinamikas ļauj aprakstīt plēves šļūdi nelīdzsvarotā mitruma satura apstākļos.

Pašdziedējamo kompozītu ar bojājumu indicējošo pārklājumu pētījumi

Ar mērķi radīt dispersi pildītus funkcionālos kompozītus ar biomimētiskām īpašībām (pašdziedēšanas un bojājumu indicējošām īpašībām), 2011. gadā paveikts darbs modeļa vaskulārās pašdziedēšanas sistēmas izstrādāšanā traušiem epoksīda polimēriem. Izstrādāts ekonomisks makroskopisku vaskulāru kanālu izgatavošanas veids, izmantojot politetrafluoretilēna elastīgas caurulītes kā veidnes. Apgūti kanālu aizpildīšanas paņēmieni ar bināru dziedējošo aģentu; to viena daļa sastāv no epoksīdu sveķiem ar virsmas aktīvas vielas piemaisījumu un otra daļa ir cietinātājs. Uz sašaurinātas dubultas kansolsijas (SDKS) veida paraugiem (19. attēls) mehānisku izmēģinājumu gaitā bija eksperimentāli pierādīta iespēja pašdziedēt parauga asis virzienā izveidotu plaisu. Veidojoties plaisai, no piepildītiem kanāliem plaisā ietecēja sveķi un cietinātājs. Pēc epoksīdu saistvielas polimerizācijas plaisā pie istabas temperatūras tika novērota efektīva epoksīda polimēra parauga stiprības atjaunošanās (20. attēls). Uz paraugu sērijas bija sasniegta vidēja pašdziedēšanas efektivitāte 70 % un pierādīta atkārtota iespēja pašdziedēties ar esošo kanālu sistēmu.

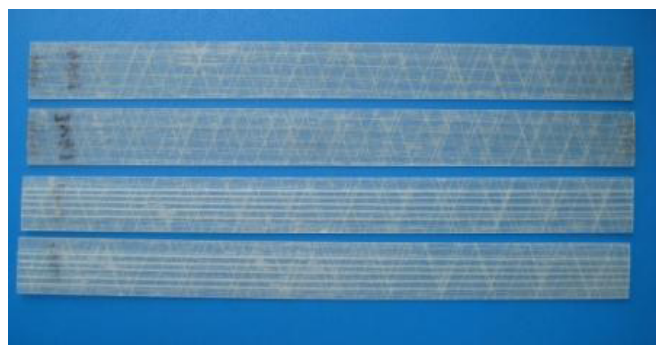


19. attēls. SDKS paraugu ģeometrija ar dziedējošo aģentu pildīšanas shēmu pašdziedēšanas sistēmas kanālos.



20. attēls. Reprezentatīva slodze–pārvietošanās likne priekš plaisas veidošanās sākotnējā paraugā (v), pašdziedētā (h) un atkārtoti dziedētā – (hh) paraugā.

Papildus eksperimenti apstiprināja pieņēmumu, ka pie istabas temperatūras cietējoši epoksīda sveķi, kuru komponentes polimerizējas tuvu pie ekvivalentiem daudzumiem, neprasa papildus savstarpējas saskaņošanas un piekļūšanas darbības pašdziedēšanas laikā. Izstrādātā padziedēšanas sistēma tiek piemērota stiegtiem vienvirziena stikla auduma kompozītiem ar epoksīdu saistvielā (21. attēls).



21. attēls. Vienvirziena kompozīta paraugi ar tukšiem pašdziedēšanas kanāliem (apakšā) un piepildīt ar dziedējošu aģentu (augšā).

Stiegti polimēru kompozīti augstas īpašību anizotropijas dēļ viegli pakļaujas dažādiem bojājumiem, kuri bieži neizpaužas uz materiāla virsmas. Atbilstoši slodzes indicēšanas virziens tiek attīstīts ar stratēģisku mērķi paaugstināt polimēru kompozītu konstrukciju projektēšanas efektivitāti, kā arī samazināt šo konstrukciju tehniskas uzraudzības procesa izdevumus ekspluatācijas laikā.

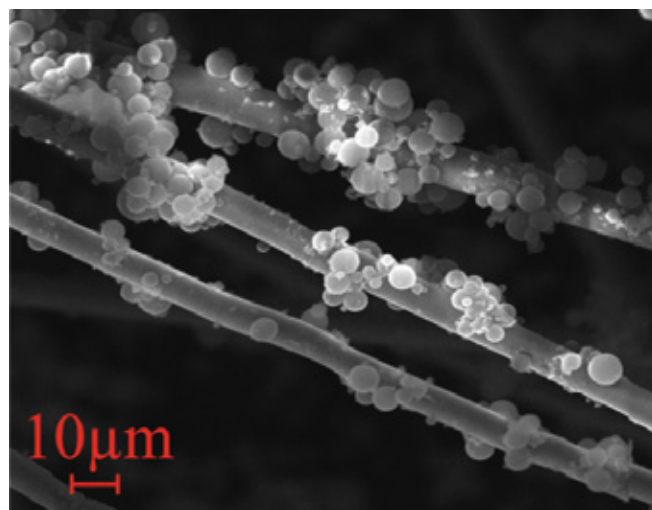
Pētījuma galvenais mērķis bija izstrādāt polimēra kompozītmateriālu ar ārējas mehāniskās slodzes vizualizācijas funkciju. Mērķa sasniegšanai tika izstrādāta biomimētiskā kompozīta pamata daļa – indicējošais slānis.

Indicējošā slāņa izstrādei tika piemērota metode, kad bojājuma vizualizēšanai izmanto iekapsulētās leikokrāsvielas. Izmantotie materiāli – mikrokapsulētas krāsvielas un to attīstītāja daļiņas – nodrošina krāsas parādīšanos vietā, kura tika pielikts spēks. Tas notiek tad, kad mikrokapsulas apvalks tiek saplēsts un šķidra leikokrāsviela savienojas ar attīstītāja daļiņām. Schematiski tas ir parādīts 22. attēlā.



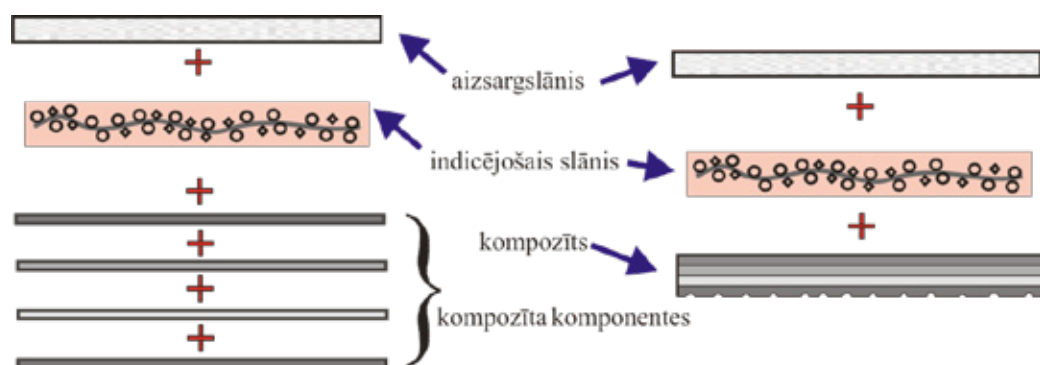
22. attēls. Krāsas izmaiņa pēc pieliktā spēka.

Mikrokapsulas izskats uz stikla šķiedrām palielinot 2000 reizes, ir parādīts 23. attēlā.



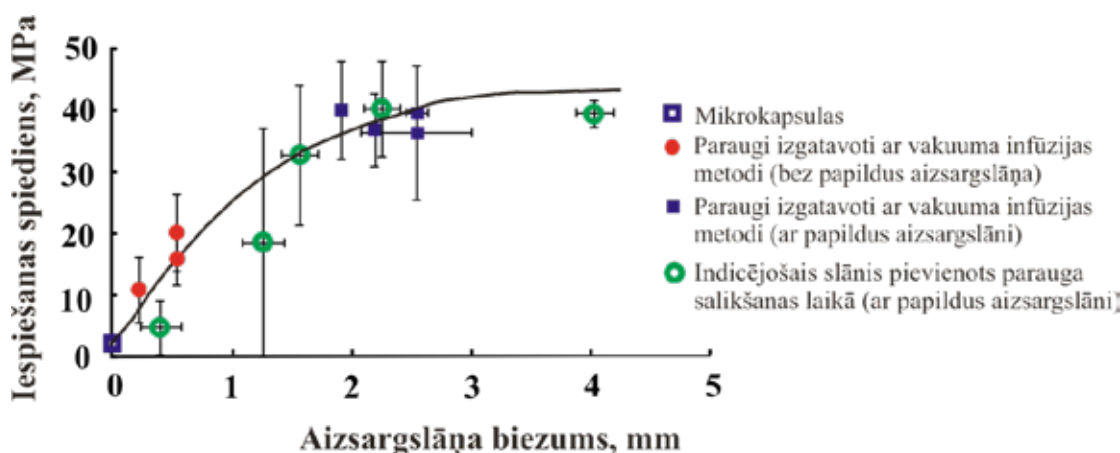
23. attēls. Mikrokapsulas izskats uz stikla šķiedrām.

Darba rezultātā tika izstrādāts indicējošais slānis, izstrādāta indicējošā slāņa izgatavošanas metodika, optimizēts indicējošā slāņa sastāvs, izstrādāta vizuālas atsauksmes novērtēšanas metode. un metode indicējošā slāņa pievienošanai kompozītmateriālam. Eksperimentāli tika pārbaudītas iespējas gatavot funkcionālu kompozītu ar jūtīgu slāni pret ārējo slodzi ar vakuuma infūzijas metodiku kompozītmateriāla izgatavošanas laikā vai piestiprinot jau esošam kompozītmateriālam. Schematiski abas metodes ir parādītas 24. attēlā.



24. attēls. Konstruktīvu salikšanas metodes: indicējošā slāņa pievienošana kompozītmateriāla izgatavošanas laikā vai jau esošam kompozītmateriālam.

Darba gaitā ir izstrādāta indicējošā slāņa jutīguma regulēšanas metode. Tas ir iespējams, mainot arējā epoksīda aizsargslāņa biezumu konstrukcijas salikšanas laikā (25. attēls).



25. attēls. Minimālais nepieciešamais iespēšanas spiediens vizuālās atsaukmes radīšanai atkarībā no aizsargslāņa biezuma.

Polimērbetona paraugu izgatavošana ar reciklējamām saistvielām būvniecības izstrādājumu pielietojumiem

Izlietota termoplastiskā polimēru iepakojuma un rūpniecisko atkritumi izmantošanai par saistvielu ir vairākas priekšrocības: samazina atkritumu apjomu, līdz ar to arī atlogo dabu, rada stabilu vietējās izejvielas bāzi, ekonomē dabas resursus un iegūst celtniecības elementus ar specifiskām īpašībām.

Plastmasas atkritumi no kopējā Getliņu poligonā ievestajiem sadzīves atkritumiem sastāda 14,91%, t.i. 10 dienās ievesti 22500 kg polimēru. Ievērojamo daudzumu (21,39%) no iepakojuma plastmasas atkritumiem sastāda PET.

Polimēru atkārtota pārstrāde ir ļoti specifisks pārstrādes process. Pasaules prakse liecina, ka, piemēram, pēc dalītās

vākšanas rezultātā iegūtā izlietotā polimēru iepakojuma šķirošanas, 25% no savāktajiem atkritumiem nav izdevīgi pārstrādāt pārslās vai granulās ekonomisku apsvērumu dēļ. Ir racionāli šos atkritumus izmantot, piemēram, par saistvielu celtniecības elementu ražošanā.

2011. gadā tika veikta „sendviča” tipa polimērkompozītu celtniecības elementu paraugu konstrukcijas izvēle un pārbaude, kā arī šādu paraugu izgatavošanas tehnoloģijas analīze. Kopumā ir paredzēts izstrādāt un pārbaudīt triju veidu kompozītmateriālus: viendabīgu polimērbetonu, daudzslāņu kompozītmateriālu loksnes un telpiskus daudzslāņu kompozītus. Tika izgatavoti pirmie polimērbetona (termoplastiskā polimēra un smilšu kompozīts) paraugi.

Kompozītmateriālu izstrādājumu paraugu mehāniskās un fizikālās pārbaudes

Tika veikti pirmie eksperimenti, nosakot polimērbetona (saistviela – zema blīvuma polietilēna PE un polietilēftalāta PET maisījums pildviela – smiltis) spiedes robežizturību; analizēti iespējamie pasākumi polimērbetona paraugu fizikāli mehānisko īpašību stabilizēšanai pie paraugu sērijas izgatavošanas; tika veikta saistvielas mitruma daudzuma novērtēšana pirms pārstrādes, kā arī īstenoti pasākumi izejvielas iepriekšējai žāvēšanai, lai mazinātu mehānisko pārbažu rezultātu izkliedi.

Ir paveikta polimērbetona šķeļamības stiprības noteikšana un secināts, ka polimērbetona izstrādājumu paraugu šķeļamības stiprība svārstās ļoti plašās robežās. Izmantojot vienas un tās pašas kompozīta sastāvdaļas, to savstarpējā attiecība ļoti strauji maina šķeļamības rādījumus atšķirībā, piemēram, no spiedes stiprības rādījumiem.

2011. gadā pārbaudīti dažādi tehnoloģiskie parametri un izgatavošanas paņēmieni polimērbetona paraugu šķeļamības stiprības paaugstināšanai un stabilizēšanai no viena parauga uz otru paraugu. Ir optimizēts polimērbetona paraugu kompozīcijas sastāvs, lai iegūtu nepieciešamās šķeļamības īpašības un izgatavota pirmā partija jaunā tipa paraugu šķeļamības pārbažu.

Ir pārbaudīta iespēja smilšu kā inertas pildvielas nomainīšanai ar drupināta dolomīta smalkumiem, kam vajadzētu nodrošināt izstrādājumu augstākas mehāniskās īpašības.

Gada noslēgumā tika veikta paraugu no termoplastiskā polimēra saistvielas un drupināta dolomīta smalkumu pildvielas šķeļamības testa veikšana un atkārtota paraugu no termoplastiskā polimēra saistvielas un drupināta dolomīta smalkumu pildvielas izgatavošana. Ir īstenots termoplastiskā polimēra saistvielas un drupināta dolomīta smalkumu pildvielas parauga šķeļamības tests.

	T [Mpa] Pirmais bloks	T [Mpa] Otrais bloks
Paraug Nr.1	2,21	5,65
Paraug Nr.2	2,28	4,72
Paraug Nr.3	2,14	4,69

5. tabula. Testa rezultāti.

5. tabulā ir redzams, ka otra veida betona bloki ar dolomīta smalkumu pildvielu ir divreiz izturīgāki, nekā pirmā veida bloki ar smilšu pildvielu. Otra veida betona bloks atbilst prasītam LVS EN 1338:2004 standartam, jo šķeļamības stiprība T ir lielāka par 3,6 MPa un sagraušanas slodze ir lielāka par 250 MPa.

Kontakinformācija:

Latvijas Universitātes aģentūra „Latvijas Universitātes
Polimēru mehānikas institūts”

Aizkraukles iela 23, Rīga, LV – 1006

Tālrunis +371 67551145

Fakss +371 67820467

www.pmi.lv