

MODEĻI UN DATU KOPAS

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



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



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

Ar kompozītmateriāliem pastiprinātu celtniecības konstrukciju izpēte

1. aktivitātes ietvaros izstrādātā metodika un datu kopas

I. Laboratorijas metodika ar kompozītmateriāliem pastiprinātu būvkonstrukciju monitoringam

Ievads

Betona konstrukciju projektēšanas nepilnības, agresīva ķīmiskā vide un betona konstrukciju nolietojšanās rada nepieciešamību pēc atjaunināšanas metodēm, kas būtu lētas un ātras apkalošanā, kā arī minimāli paaugstinātu konstrukcijas svaru.

Šķiedru kompozītu izmantošana ļauj atrisināt daudzus praktiskus uzdevumus, kur tradicionālu materiālu pielietojums nenodrošina pietiekamu betona konstrukciju nestspējas uzlabojumu. Šķiedru kompozītiem ir augsta īpatnējā stiprība, tie nav pakļauti korozijai un ir nemagnētiski. Šķiedru kompozīti pastiprina betona konstrukcijas, minimāli izmainot to svaru un izmērus. Bieži šķiedru kompozīta loksnēs tiek izmantots kā aptinums kolonnai, lai palielinātu tās stiprību spiedē. Šādi pastiprinātas kolonnas sabrūk, ja aploces deformācijas aptinumā sasniedz savu galējo vērtību. Tāpēc ir svarīgi veikt deformāciju monitoringu slogošanas gaitā. Iegūtā informācija par deformāciju lielumu un izmaiņas raksturu ir svarīga pastiprināto konstrukcijas elementu īpašību prognozei.

Šīs aktivitātes mērķis ir izstrādāt metodiku deformāciju monitoringam pastiprinātās apaļās un kvadrātiskās betona kolonnās.

Deformāciju monitorings apaļās pastiprinātās betona kolonnās

Betona īpašības

Ar oglekļa šķiedru pastiprinātu paraugu izgatavošanā tika izmantots trīs dažādu stiprību betons. Spiedē tika pārbaudītas 6 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprināta betona stiprību. Visu kolonnu (nepastiprinātu un pastiprinātu) diametrs bija 152 mm, garums – 300 mm. Rezultāti ir apkopoti tab. 2.1.

Ar bazalta šķiedru pastiprinātu paraugu izgatavošanā tika izmantots divu dažādu stiprību betons. Spiedē tika pārbaudītas 8 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprināta betona stiprību. Visu kolonnu (nepastiprinātu un pastiprinātu) diametrs bija 150 mm, garums – 300 mm. Rezultāti ir apkopoti tab. 2.2.

Tab. 2.1. Betona īpašības ar oglekļa šķiedru pastiprinātos paraugos

Stiprība spiedē, f_{co} [MPa]	Maksimālā garendeformācija, ϵ_{co} [%]	Maksimālā šķērsdeformācija, ϵ_{to} [%]	Junga modulis, E_o [GPa]	Puasona koeficients, ν_o
18.7	0.30	0.16	24.1	0.21
38.1	0.26	0.15	29.7	0.20
44.6	0.24	0.10	32.6	0.20

Tab. 2.2. Betona īpašības ar bazalta šķiedru pastiprinātos paraugos

Stiprība spiedē, f_{co} [MPa]	Maksimālā garendeformācija, ϵ_{co} [%]	Maksimālā šķērsdeformācija, ϵ_{to} [%]	Junga modulis, E_o [GPa]	Puasona koeficients, ν_o
12.3	0.45	0.43	15.6	0.18
49.2	0.30	0.20	28.6	0.22

Pastiprinātie paraugi

Ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātie paraugi

Daļa betona kolonnu tika pastiprinātas, aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātu oglekļa šķiedru grīsti. Ražotāja dotās oglekļa šķiedru grīstes *Tenax – JUTS 7731* īpašības ir šādas: stiprība stiepē 5193 MPa, Junga modulis 244 GPa, maksimālā deformācija 2.13%, šķiedras diametrs 7 μ m, šķiedru skaits 24000 un blīvums 1.79 g/cm³.

Lai noteiktu kompozīta pastiprinājuma stiprību un maksimālo deformāciju, tika izmantotas kompozīta gredzenu pārbaudes saskaņā ar *ASTM D 2290* standartu. Eksperimentāli noteikto oglekļa šķiedru grīstes īpašību (aprēķinātas no kompozīta, izmantojot maisījuma likumu, neievērojot matricas stiprību un moduli) salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām ir atrodams tab. 2.3.

Tab. 2.3. Eksperimentāli noteikto oglekļa šķiedru grīstes īpašību salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām

Attiecība starp eksperimentālo stiprību un ražotāja doto stiprību	Attiecība starp eksperimentālo moduli un ražotāja doto moduli	Attiecība starp eksperimentālo maksimālo stiepes deformāciju un ražotāja doto maksimālo stiepes deformāciju
0.68	0.97	0.57

Redzams, ka eksperimentālais modulis ir par 3% zemāks nekā ražotāja dotais modulis, savukārt tikai nedaudz vairāk kā puse ražotāja dotās stiprības ir realizējusies kompozītā. Iegūtā galējā stiepes deformācija ir par 43% zemāka nekā ražotāja dotā vērtība.

Pavisam tika izgatavoti un pārbaudīti 26 ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprināti paraugi. Pastiprinājums sastāvēja no 2 un 4 aptinuma slāņiem. Pastiprinātie paraugi tika atstāti nožūt 10 dienas pie temperatūras 22 °C.

Bazalta šķiedru kompozīts

Daļa betona kolonnu tika pastiprinātas, aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātu bazalta šķiedru grīsti. Ražotāja (*Basaltex*) dotās bazalta šķiedru grīstes *KVT1200Tex13E* īpašības ir šādas: stiprība stiepē > 1755 MPa, Junga modulis 87 GPa, šķiedras diametrs 13 μ m, lineārais blīvums 1200 tex

un blīvums 2.67 g/cm³.

Lai noteiktu kompozīta pastiprinājuma stiprību un maksimālo deformāciju, tika izmantotas kompozīta gredzenu pārbaudes saskaņā ar *ASTM D 2290* standartu. Pārbaužu rezultāti ir atrodami tab. 2.4. Pavisam tika izgatavoti un pārbaudīti 24 ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprināti paraugi. Pastiprinājums sastāvēja no 4 un 8 aptinuma slāņiem. Pastiprinātie paraugi tika atstāti nožūt 10 dienas pie temperatūras 22 °C.

Tab. 2.4. Bazalta kompozīta gredzenu pārbaužu rezultāti

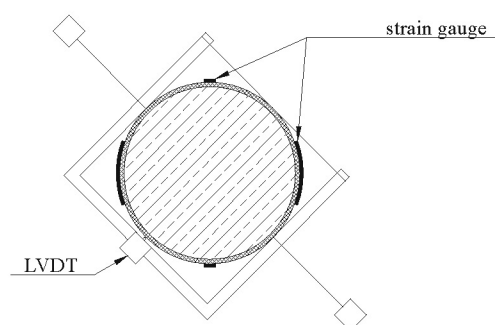
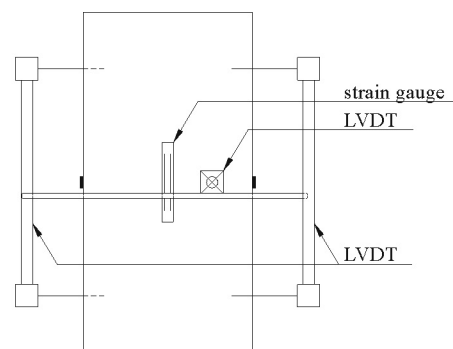
Slāņu skaits	Biezums [mm]	Stiprība [MPa]	Junga modulis [GPa]	Maksimālā aploces deformācija [%]
4	0.79	729	34.7	2.10
8	1.58	798	45.0	1.75

Deformāciju monitoringa metodika un iegūtie rezultāti

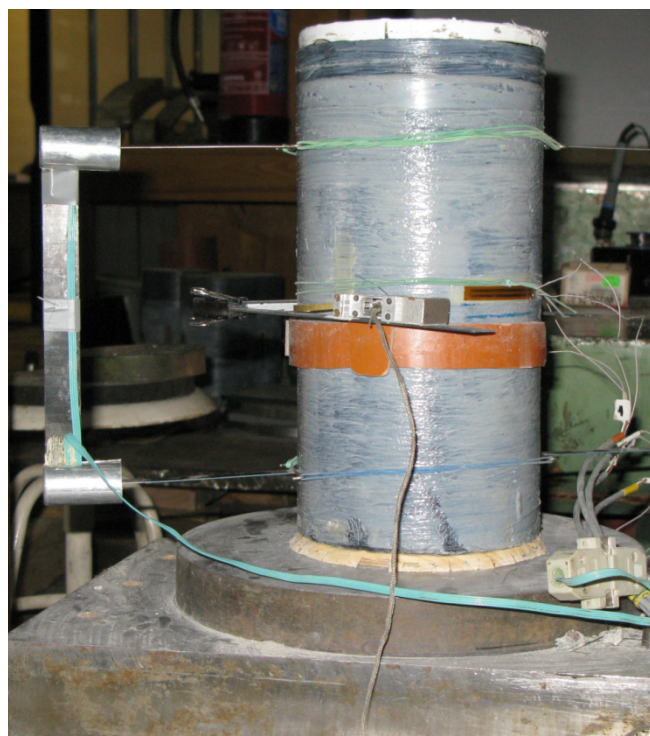
Apalā pastiprinātā betona kolonnā kompozīta aptinums tiek slogots aploces virzienā, bet betons atrodas trīsasīgās spiedes spiegunstāvoklī. Lai noteiktu pastiprinātu apaļu betona kolonnu deformāciju izmaiņu slogošanas gaitā, piedāvāta šāda deformāciju monitoringa metodika (att. 2.1):

- Divi diametrāli pretēji novietoti tenzorezistori, kas pielīmēti kolonnas vidusdaļā, mēra garendeformācijas.
- Divi diametrāli pretēji novietoti tenzorezistori, kas pielīmēti kolonnas vidusdaļā, mēra aploces deformācijas.
- Divi diametrāli pretēji novietoti pārvietojuma mērītāji nosaka kolonnas garuma izmaiņas.
- Viens pārvietojuma mērītājs nosaka kolonnas diametra izmaiņas.

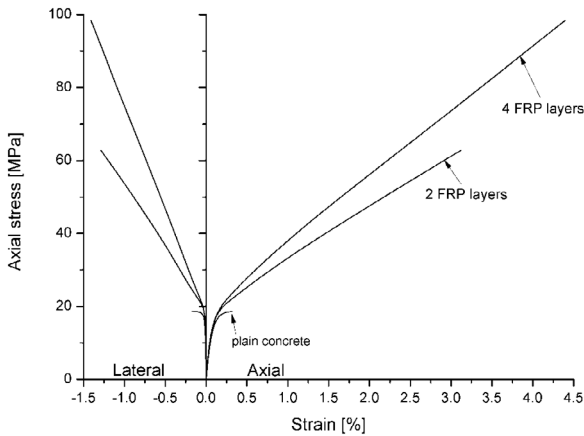
Kompozīta pastiprinājuma augstās stiepes stiprības dēļ vairakkārt pieaug betona maksimālās deformācijas. Tenzorezistoru mērāmo deformāciju diapazons parasti ir samērā ierobežots, tāpēc tie tiek izmantoti, lai ar augstu precizitāti noteiktu deformāciju izmaiņu slogošanas sākumposmā. Deformāciju monitoringam slogošanas beigu posmā pirms sabrukšanas tiek izmantoti pārvietojuma mērītāji. Deformāciju mērītāju izvietojuma piemērs pastiprinātā kolonnā ir parādīts att. 2.2. Saskaņā ar *ASTM C 39/C39M – 99* standartu slogošanas ātrums bija 10 MPa/min. Vidējotas ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes ir parādītas att. 2.3–2.5. Vidējotas ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes ir parādītas att. 2.6–2.7..



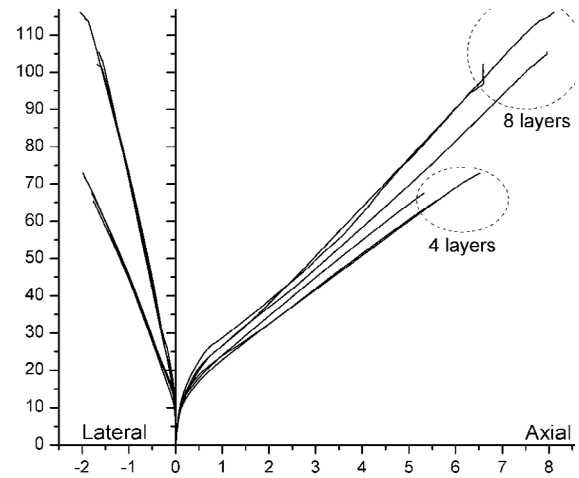
Att. 2.1. Deformāciju mērītāju izvietojums



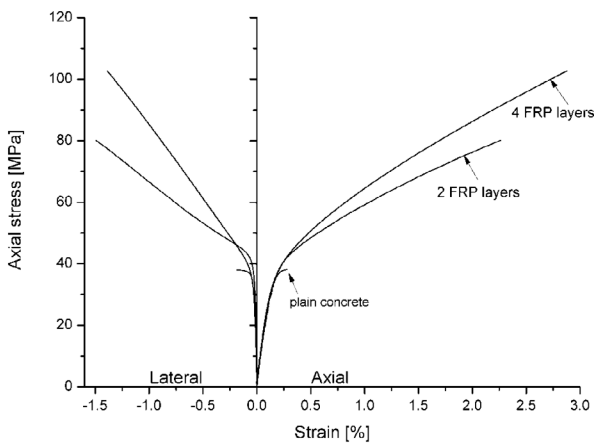
Att. 2.2. Deformāciju mērītāju izvietojuma piemērs



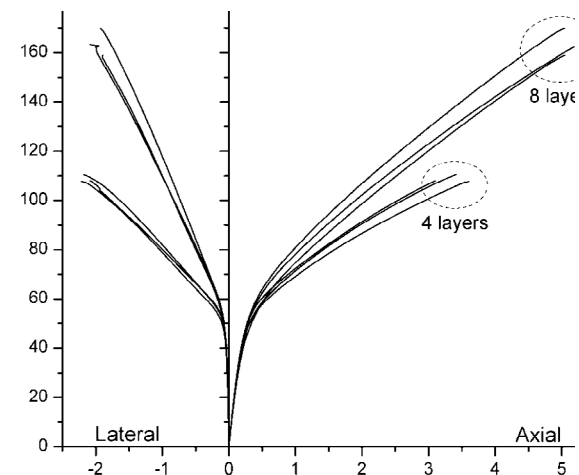
Att. 2.3. Ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co} = 18.7$ MPa



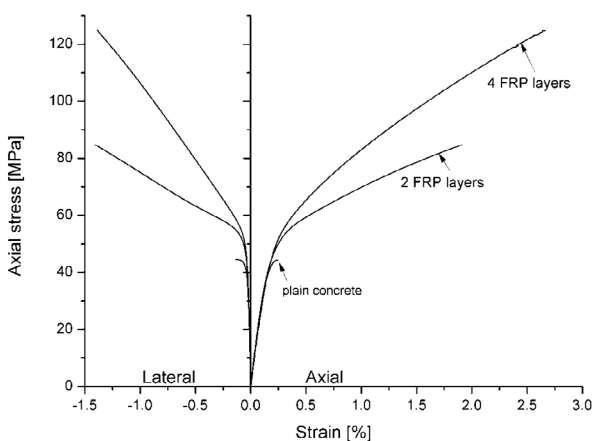
Att. 2.6. Ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co} = 12.3$ MPa



Att. 2.4. Ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co} = 38.1$ MPa



Att. 2.7. Ar bazalta šķiedru kompozītu pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co} = 49.2$ MPa



Att. 2.5. Ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co} = 44.6$ MPa

Deformāciju monitorings kvadrātiskās pastiprinātās betona kolonnās

Betona īpašības

Betona paraugu izgatavošanā tika izmantots divu dažādu stiprību betons. Spiedē tika pārbaudītas 12 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprināta betona stiprību. 6 kolonnas bija ar apaļas formas šķērsgriezumu (diametrs 150 mm), 6 – ar kvadrātiskas formas šķērsgriezumu (šķērsgriezuma izmēri 150 × 150 mm). Visu kolonnu (nepastiprinātu un pastiprinātu) garums bija 450 mm. Rezultāti ir apkopoti tab. 3.1.

Tab. 3.1. Betona īpašības

Betona klase	Kolonnas tips	Stiprība spiedē f_{co} [MPa]	Junga modulis E_o [GPa]
I	Apaļa	18.4	25.6
	Kvadrātiska	18.6	21.5
Vidējā vērtība		18.5	23.6
II	Apaļa	38.7	32.1
	Kvadrātiska	42.7	30.5
Vidējā vērtība		40.7	31.3

Pastiprinātie paraugi

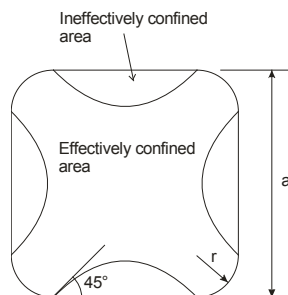
Kvadrātiskās betona kolonnas tika pastiprinātas, apzinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātu oglekļa šķiedru lentu. Ražotāja dotās oglekļa šķiedru lentas SikaWrap-230C īpašības ir šādas: stiprība stiepē 4300 MPa, Junga modulis 238 GPa, maksimālā deformācija 1.8%, biezums 0.131 mm un blīvums 1.76 g/cm³.

Pavisam tika izgatavotas un pārbaudītas 24 ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātās kvadrātiskas betona kolonnas. Pastiprinājums sastāvēja no 2 un 4 aptinuma slāņiem. Paraugu stūra liekuma rādiuss bija $r = 15$ mm un $r = 30$ mm.

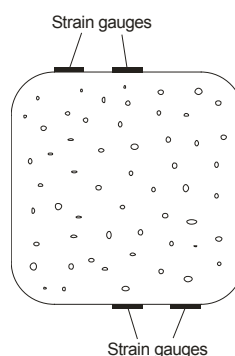
Deformāciju monitoringa metodika un iegūtie rezultāti

Att. 3.1. ir parādīts kvadrātiskas kolonnas šķēsgriezums. Šādā kolonnā pastiprinājums pilnībā ierobežo tikai to betona daļu, kuru ietver att. 3.1. redzamās parabolas. Parabolu ietvertajā daļā ir trīsasīgsspriegumstāvoklis, bet ārpus tās – divasīgs. Jo mazāks ir stūra liekuma rādiuss, jo mazāka ir tā betona daļa, kurā eksistē trīsasīgaisspriegumstāvoklis. Kvadrātiskām kolonnām ir nevienmērīgs deformāciju sadalījums aploces virzienā. Tāpēc, lai noteiktu pastiprinātu kvadrātisku betona kolonnu deformāciju izmaiņu sloģošanas gaitā, piedāvāta šāda deformāciju monitoringa metodika (att. 3.2. un att. 3.3):

- Divi diametrāli pretēji novietoti tenzorezistori pielīmēti sānu virsmas vidū, 100 mm un 225 mm attālumā no kolonnas gala. Mēra aploces deformācijas.
- Divi diametrāli pretēji novietoti tenzorezistori pielīmēti aploces liekuma rādiusa maiņas vietā, 100 mm un 225 mm attālumā no kolonnas gala. Mēra aploces deformācijas.
- Trīs pārvietojuma mērītāji nosaka kolonnas garuma izmaiņas.



Att. 3.1. Kvadrātiskas kolonnas šķēsgriezums



Att. 3.2. Deformāciju mērītāju izvietojums aploces virzienā

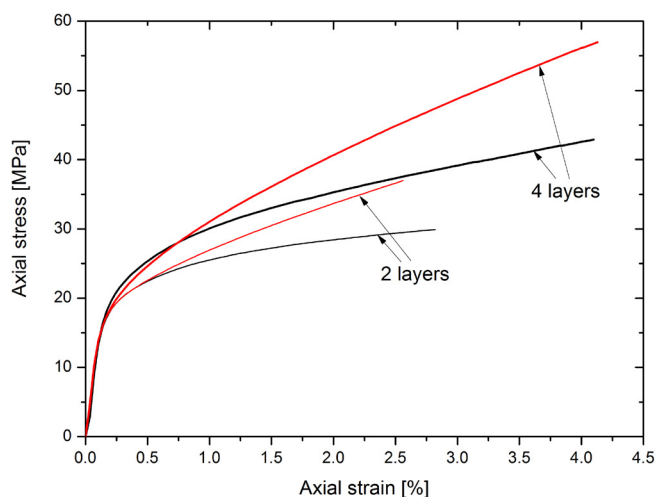


Att. 3.3. Deformāciju mērītāju izvietojuma piemērs kvadrātiskā pastiprinātā kolonnā

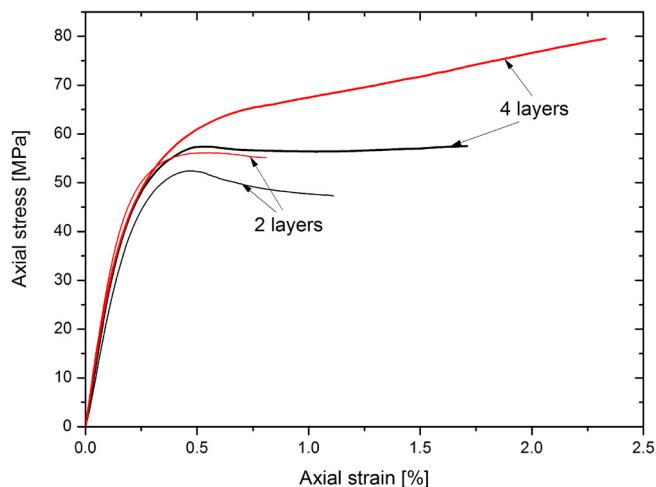
Vidējoti monitoringa rezultāti ir parādīti tab. 3.2., kurā izmantoti šādi apzīmējumi: h – pastiprinājuma biezums, f_{cc} – pastiprinātas kolonnas spiedes stiprība, ε'_{lu} – aploces deformācijas sānu virsmas vidū, ε''_{lu} – aploces deformācijas aploces liekuma rādiusa maiņas vietā. No tab. 3.2. redzams, ka aploces deformācijas sānu virsmas vidū ir ievērojami lielākas par deformācijām liekuma rādiusa maiņas vietā, jo pastiprinājuma loksne ne tikai izstiepjas, bet arī izliecas uz āru sloģošanas gaitā. Pastiprinātu kvadrātisku betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes ir parādītas att. 3.4.–3.5.

Tab. 3.2. Kvadrātisku pastiprinātu kolonnu pārbaužu rezultāti

f_{co} [MPa]	h [mm]	r [mm]	f_{cc} [MPa]	ε_{cc} [%]	ε'_{lu} [%]	ε''_{lu} [%]
18.5	0.26	15	30.0	2.82	0.87	0.53
	0.52	15	42.7	4.11	0.93	0.44
	0.26	30	36.7	2.56	1.04	0.64
	0.52	30	56.8	4.13	1.24	0.76
40.7	0.26	15	47.1	1.11	0.64	0.43
	0.52	15	57.3	1.71	0.71	0.45
	0.26	30	55.1	0.81	0.63	0.57
	0.52	30	79.4	2.33	1.15	0.70



Att. 3.4. Ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātu kvadrātisku betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes. I. betona klase. Melnās līnijas – $r = 15$ mm, sarkanās līnijas – $r = 30$ mm



Att. 3.5. Ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātu kvadrātisku betona kolonnu sprieguma-deformācijas liknes. II. betona klase. Melnās līnijas – $r = 15$ mm, sarkanās līnijas – $r = 30$ mm

Kopsavilkums

Izstrādāta metodika deformāciju monitoringam pastiprinātās apaļās un kvadrātiskās betona kolonnās. Piedāvātā metodika ļauj iegūt pilnīgu informāciju par pastiprināto kolonnu deformēšanās raksturu. Kvadrātisku betona kolonnu gadījumā šī metode ļauj iegūt informāciju par aploces deformāciju sadalījumu aptinumā.

II. Ar kompozītmateriāliem pastiprinātā betona modelis

Ievads

Pēdējo gadu laikā ir strauji pieaudzis pieprasījums pēc betona konstrukciju atjaunināšanas. Betona konstrukciju nolietojumā rada nepieciešamību pēc lētām un efektīvām atjaunināšanas metodēm. Eksploatācijas slodžu pieaugums (piemēram, satiksmes plūsmas intensitātes pieaugums) var radīt noslogojumu, kas pārsniedz projektēto konstrukcijas noslogojumu. Tas rada nepieciešamību pēc steidzīgas betona konstrukcijas pastiprināšanas.

Šķiedru kompozītu izmantošana ļauj atrisināt daudzus praktiskus uzdevumus, kur tradicionālu materiālu pielietojums nenodrošina pietiekamu betona konstrukciju nestspējas uzlabojumu. Šķiedru kompozītiem ir augsta īpatnējā stiprība, tie nav pakļauti korozijai un ir nemagnētiski. Šķiedru kompozīti pastiprina betona konstrukcijas, minimāli izmainot to svaru un izmērus. Tomēr augstās kompozītmateriālu izmaksas ierobežo to praktisko pielietojumu. Viena no galvenajām šķiedru kompozītu pastiprinājuma priekšrocībām ir iespēja to pielietot tā, lai panāktu specifiskus pastiprinājuma efektus. Piemēram, pastiprinājums var būt lokšņu veidā, kuru pielīmē betona virsmai, lai palielinātu lieces stingumu, vai kā aptinums kolonnai, lai palielinātu tās stiprību.

Apaļā pastiprinātā betona kolonnā kompozīta aptinums tiek slogots aploces virzienā, bet betons atrodas trīsasīgās spiedes spiegunstāvoklī. 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.

Modeļi, kuri pietiekami precīzi aprakstītu pastiprinātā betona mehānisko uzvedību, joprojām atrodas attīstības fāzē. Šādu modeļu izstrādei ir nepieciešami eksperimentālo pētījumu rezultāti, kādi, piemēram, ir atrodami darbā [1], kur ir eksperimentāli pētīta ar oglekļa šķiedru-epoksīda kompozītu pastiprinātā betona uzvedība.

Aktivitātes mērķis

Aktivitātes ietvarā tika izvirzīti sekojoši uzdevumi:

1) Noteikt pastiprinātā betona kolonnu maksimālo garrendeformāciju un pieskares moduli pie spiedes spriegumiem, kuri pārsniedz nepastiprinātā betona spiedes stiprību.

2) Noteikt sakarību starp neelastīgo deformāciju komponentēm un to atkarību no sprieguma stāvokļa. Šai sakarībai ir izšķiroša nozīme betona uzvedības modelēšanā, pielietojot plastiskuma teoriju.

Novērtēt pastiprinājuma priekšspriegojuma ietekmi uz pastiprinātā betona mehānisko uzvedību.

Ar kompozītmateriāliem pastiprinātu apaļu betona kolonnu deformatīvās īpašības

Betona īpašības

Pētījumā tika izmantots dažādu stiprību betons (sagaidāmā stiprība (MPa) jeb betona klase 20, 40 un 60). Spiedē tika pārbaudītas 12 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprinātā betona stiprību. Visu kolonnu diametrs bija 150 mm. Rezultāti ir apkopoti tab. 3.1.

Tab. 3.1. Betona īpašības

Betona klase	Stiprība spiedē, f_{co} [MPa]	Maksimālā garrendeformācija, ϵ_{co} [%]	Maksimālā šķērsdeformācija, ϵ_{to} [%]	Junga modulis, E_o [GPa]	Puasona koeficients, ν_o
20	26.6	0.264	0.097	24.7	0.195
40	37.0	0.194	0.066	27.5	0.164
60	47.6	0.227	0.137	34.4	0.194

Kompozīta pastiprinājums

Betona kolonnas tika pastiprinātas, aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātām oglekļa šķiedru lentām (oglekļa šķiedru audums SikaWrap®-230C). Ražotāja dotās oglekļa auduma īpašības ir šādas: stiprība stiepē 4300 MPa, Junga modulis 238 GPa, maksimālā deformācija 1.8%, biežums 0.131 mm un blīvums 1.76 g/cm³.

Šķiedras stiprība, kura realizējas kompozītā, ir atkarīga no armējuma koeficienta, šķiedras vidējās stiprības, kura ir noteikta pie fiksēta šķiedras garuma, un šķiedras stiprības izkliedes. Diemžēl ražotājs nesniedz informāciju par vidējo šķiedras stiprību pie fiksēta šķiedras garuma un stiprības izkliedi. Tāpēc kompozīta stiprība un maksimālā deformācija ir jānosaka, izmantojot speciālas pārbaudes.

Lai noteiktu kompozīta pastiprinājuma stiprību un maksimālo deformāciju, tika izmantotas kompozīta gredzenu pārbaudes saskaņā ar ASTM D 2290 standartu. Eksperimentāli noteikto oglekļa auduma īpašību (aprēķinātas no kompozīta, izmantojot maisījuma likumu, neievērojot matricas stiprību un moduli) salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām ir atrodams tab. 3.2.

Tab. 3.2. Eksperimentāli noteikto oglekļa auduma īpašību salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām

Attiecība starp eksperimentālo stiprību un ražotāja doto stiprību	Attiecība starp eksperimentālo moduli un ražotāja doto moduli	Attiecība starp eksperimentālo maksimālo stiepes deformāciju un ražotāja doto maksimālo stiepes deformāciju
0.65	0.95	0.67

Redzams, ka eksperimentālais modulis ir par 5% zemāks nekā ražotāja dots modulis, savukārt, tikai aptuveni 2/3

no ražotāja dotās stiprības ir realizējusies kompozītā. Iegūtā maksimālā stiepes deformācija ir par 33% zemāka nekā ražotāja dotā vērtība.

Pastiprinātie betona paraugi

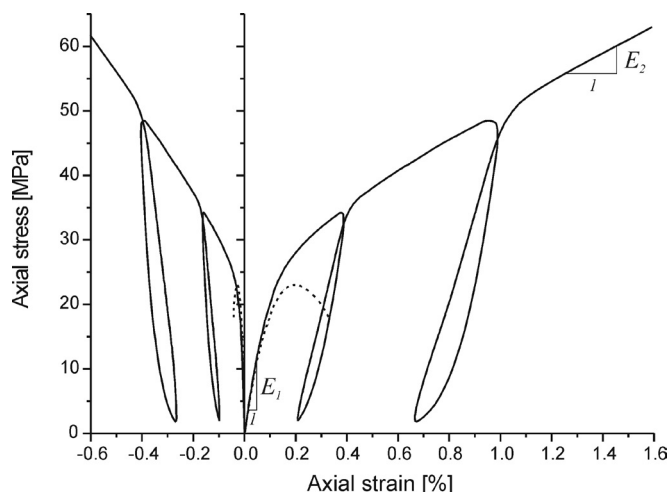
Pastiprināto paraugu diametrs bija 150 un 250 mm, augstums, attiecīgi, 450 un 750 mm (attiecība starp augstumu un diametru: $H/D=3$). Paraugu, kuru izmēri bija 150 mm × 450 mm, aptinums sastāvēja no 3, 5, un 7 oglekļa auduma slāņiem. Paraugu, kuru izmēri bija 250 mm × 750 mm, aptinums sastāvēja no 5 oglekļa auduma slāņiem.

Pastiprinātie paraugi tika pakļauti monotoni pieaugoši vienāsīgai spiedes slodzei līdz paraugi sabruka. Slogošanas laikā tika mērīta slodze, garendeformācija un šķērsdeformācija. Slogošanas ātrums bija 10 MPa/min saskaņā ar ASTM C 39/C39M – 99 standartu.

Sakarības starp spriegumiem un deformācijām pastiprinātā betonā

Betons ir trausls kompozīts, kurš sastāv no pildvielām, ūdens un saistvielām, kura, savukārt, arī satur daudz maza izmēra daļiņu. Betons ir porains. Pildvielas daļiņu izmērs un forma ietekmē betona stiprību. Tipiskas nepastiprināta betona spriegumu-deformāciju līknes vienasīgā spiedē ir parādītas att. 3.1. Neslogots betons satur daudz mikroplaisu. Īpaši daudz to ir pildvielas un saistvielas savienojumu vietās. Šīs mikroplaisas rodas noslāņošanās, rukuma, kā arī saistvielas termiskā izplešanās dēļ. Sākotnējā slogošanas posmā esošās plaisas izplatās maz un betona uzvedību var raksturot kā elastīgu. Palielinot slodzi, pildvielas un saistvielas stingumu atšķirība rada spriegumu koncentrācijas, kuru dēļ betonā rodas un izplatās jaunas plaisas, kas noved pie betona sabrukuma.

Att. 3.1. ir parādītas tipiskas pastiprināta betona spriegumu-deformāciju līknes spiedē. Atšķirībā no nepastiprināta betona, pastiprināts betons uzvedas kā plastisks materiāls. Pastiprināta betona sprieguma-deformācijas līkni nosacīti var sadalīt trīs posmos. Pirmajā posmā pastiprināts betons uzvedas kā elastīgs materiāls ($E_1 = E_0$). Pieaugot mikroplaisu blīvumam, iestājas pārejas posms, kurā pastiprinājums iedarbojas uz betonu ar pieaugošu sānu spiedienu, lai samazinātu betona kolonnas stinguma zudumu. Trešajā posmā pastiprinājums ir pilnībā aktivēts un kolonnas stingums vairs praktiski nemainās. Šajā posmā betona uzvedību nosaka pastiprinājuma īpašības.



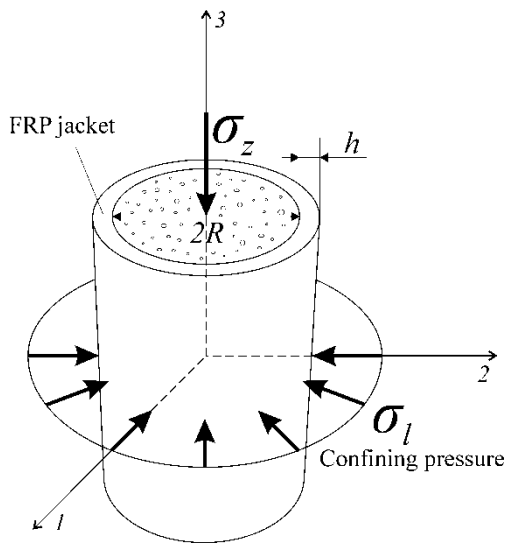
Att. 3.1. Tipiska nepastiprināta un pastiprināta betona uzvedība spiedē (dati ņemti no [1]). Pārtrauktā līnija – nepastiprināts betons; nepārtrauktā līnija – pastiprināts betons

Pāreja starp pirmo un trešo posmu notiek tad, kad spiedes spriegums sasniedz nepastiprināta betona stiprību f_{co} . Spriegumu pārejas posmā mēdz saukt par linearitātes robežu vai spriegumu noliekuma punktu.

Pastiprinājums, ierobežojot šķērsdeformācijas, rada betonā trīsasīgu sprieguma stāvokli. Sānu sprieguma lielums ir atkarīgs no šķērsdeformāciju lieluma. Aksiālo spriegumu σ_z tieši nomēra eksperimenta laikā, bet sānu spriegumu σ_l var aprēķināt, ja ir nomērīta aploces deformācija ϵ_j . Vienvirziena oglekļa šķiedru kompozīts deformējas lineāri līdz pat sabrukšanai. Tā dā gadījumā kompozīta pastiprinājumā darbojas gredzenspriegums $\sigma_j = E_j \epsilon_j$, kurš rada spiedienu uz betona kolonnas sānu virsmas (skat. att. 2.).

$\sigma_l = -\frac{E_j h}{R} \epsilon_j = -E_{lat} \epsilon_j$	(3.1)
--	-------

kur E_j – kompozīta pastiprinājuma modulis, h – pastiprinājuma biezums, R – kolonnas rādiuss un $E_{lat} = E_j h / R$ ir tā saucamais “sānu modulis”.



Att. 3.2. Pastiprināta betona kolonna

Rakstā [2] tika parādīts, ka pastiprināta betona kolonnas spiedes stiprību f_{cc} var novērtēt, izmantojot formulu:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + K_{\sigma} \cdot \frac{f_{lu}}{f_{co}}, \quad (3.2)$$

K_{σ} nosaka šādi:

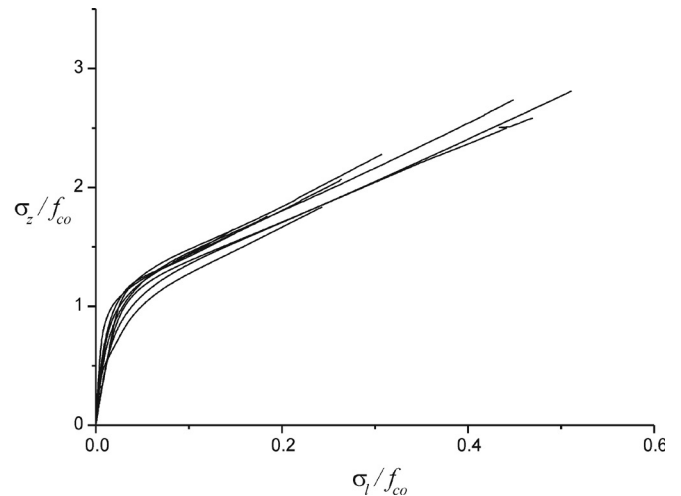
$$K_{\sigma} = \frac{1 - \nu_o}{\nu_o}, \quad (3.3)$$

kur ν_o nepastiprināta betona Puasona koeficients. Tipiska nepastiprināta betona Puasona koeficienta vērtība ir 0.2. Tādā gadījumā $K_{\sigma} = 4$, f_{lu} ir maksimālais sānu spiediens:

$$f_{lu} = E_{lat} \varepsilon_{ju}, \quad (3.4)$$

kur ε_{ju} – pārbaudēs noteiktā pastiprinājuma maksimālā aploces deformācija. Tā kā betona un pastiprinājuma pārvietojumi to savienojuma vietā ir vienādi, tad pastiprināta betona maksimālā deformācija ε_{lu} ir vienāda ar pastiprinājuma maksimālo aploces deformāciju: $\varepsilon_{lu} = \varepsilon_{ju}$.

Att. 3.3. ir parādītas slogošanas trajektorijas bezdimensionālā spriegumu telpā (normētā aksiālā sprieguma σ_z / f_{co} un normētā sānu sprieguma σ_l / f_{co} telpā) paraugiem, kuriem ir atšķirīgs pastiprinājuma biežums un atšķirīga nepastiprināta betona stiprība.



Att. 3.3. Pastiprinātu betonu slogošanas trajektorijas

Slogošanas trajektorijas sākuma posms atbilst elastīgai uzvedībai. Otrajā slogošanas trajektorijas posmā betons intensīvi plaisā. Ja betons ir pietiekami pastiprināts ($E_{lat} / f_{co} > 11$), tad visi otrie slogošanas trajektoriju posmi neatkarīgi no betona klases un pastiprinājuma biežuma tiecas uz vienoto likni, kuru apraksta:

$$\frac{|\sigma_z|}{f_{co}} = 1 + K_{\sigma} \cdot \frac{|\sigma_l|}{f_{co}}, \quad |\sigma_z| > f_{co}, \quad (3.5)$$

vai

$$\frac{|\sigma_z|}{f_{co}} = 1 + 4 \cdot \frac{|\sigma_l|}{f_{co}}, \quad |\sigma_z| > f_{co}. \quad (3.6)$$

Slogošanas trajektorija pārtrūkst, kad gredzenspriegums pastiprinājumā sasniedz maksimumu.

Diferenciālais Puasona koeficients un Puasona koeficients

Ja spiedes spriegums σ_z pārsniedz linearitātes robežu, tad, lai betons nesabruktu, sānu spiedienam σ_l ir jāpieaug tā, lai izpildītos (3.6). Tas nozīmē, ka bojājumu uzkrāšanās betonā norisinās tā, ka sānu spiediena pieaugums $\Delta\sigma_l$ ir proporcionāls aksiālā spiediena pieaugumam $\Delta\sigma_z$:

$$\Delta\sigma_l = \frac{1}{4} \cdot \Delta\sigma_z. \quad (3.7)$$

Puasona koeficienta (šķērsdeformācijas attiecība pret garendeformāciju: $\varepsilon_l / \varepsilon_z$) maiņas rezultātā virs linearitātes robežas būtiski pieaug sānu spiediens un visu pastiprināto paraugu slogošanas trajektorijas tiecas uz vienoto likni.

Deformāciju aprakstam izmantosim diferenciālo Puaso-

na koeficientu (DPK) jeb šķērsdeformācijas pieauguma atiecību pret garendeformācijas pieaugumu:

$$\tilde{\nu} = -\frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta \varepsilon_z} \quad (3.8)$$

Diferenciālais Puasona koeficients $\tilde{\nu}$ raksturo, cik strauji pieaug šķērsdeformācijas. Pastiprināta betona pieskares moduli E_2 definē sekojoši:

$$E_2 = \frac{\Delta \sigma_z}{\Delta \varepsilon_z} \quad (3.9)$$

No (3.7) un (3.9) seko, ka:

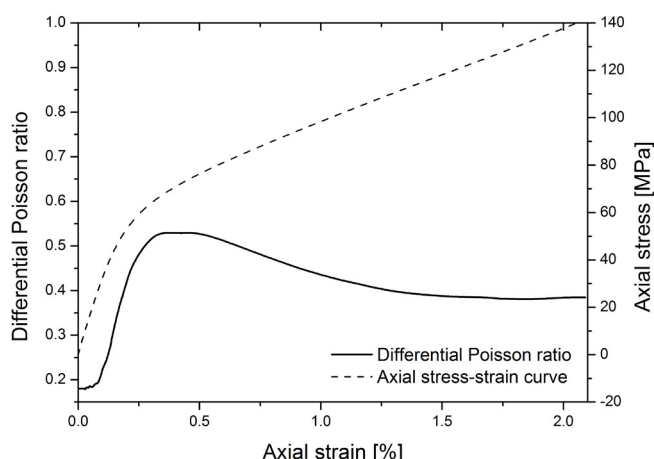
$$E_2 = 4 \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \varepsilon_z} \quad (3.10)$$

Tā kā $\Delta \sigma_1 = -E_1 \Delta \varepsilon_1$, tad:

$$E_2 = 4E_{lat} \tilde{\nu} \quad (3.11)$$

No (3.11) seko, ka slogošanas posmā, kuru apraksta (3.6) $E_2 = \text{const}$, ja $\tilde{\nu} = \text{const}$.

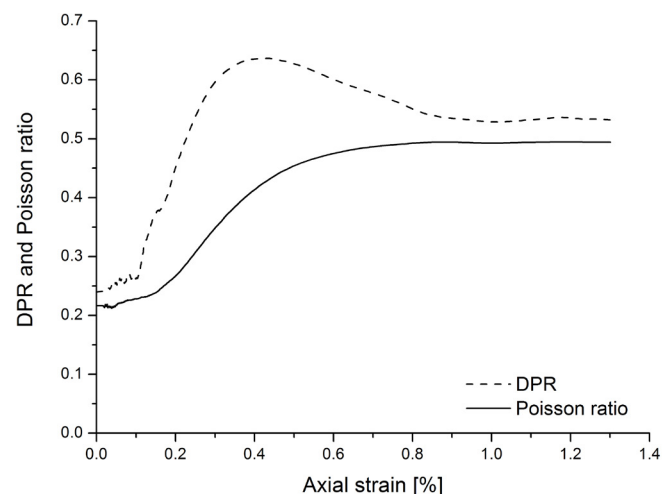
Tipiska eksperimentālā DPR atkarība no garendeformācijas ir parādīta att. 3.4. Sākotnējā DPK vērtība sakrīt ar nepastiprināta betona Puasona koeficientu ν_o . Liknes maksimums atbilst pārejas zonai. Redzams, ka $\tilde{\nu}$ tiecas uz kādu asimptotisku vērtību.



Att. 3.4. Tipiska pastiprināta betona diferenciālā Puasona izmaiņa (60 betona klase, parauga garums 450 mm, 7 pastiprinošā materiāla slāņi)

Tipiska eksperimentālā Puasona koeficienta atkarība no garendeformācijas ir parādīta att. 3.5. Virs linearitātes robežas betons intensīvi plaisā. Tas izraisa strauju šķērsdeformā-

ciju augšanu un attiecīgi Puasona koeficienta pieaugumu. Puasona koeficients arī tiecas uz kādu asimptotisku vērtību.



Att. 3.5. Pastiprināta betona Puasona koeficients un DPK (20 betona klase, parauga garums 450 mm, 3 pastiprinošā materiāla slāņi)

Vispārīgi $\tilde{\nu} \neq \nu$, taču var parādīt, ka Puasona koeficienta un DPK asimptotiskās vērtības sakrīt. Puasona koeficients ir atkarīgs no aksiālā σ_z :

$$\nu(\sigma_z) = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_z} \quad (3.12)$$

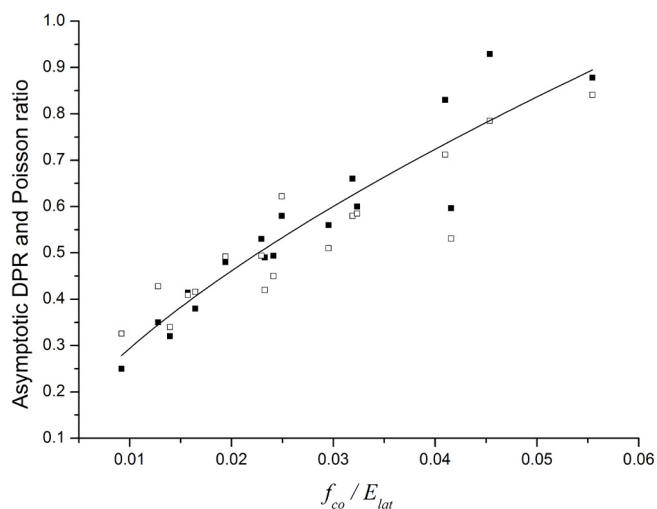
Atvasinot (3.12) iegūst:

$$\frac{d\nu}{d\sigma_z} = \frac{d\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_z - \varepsilon_1 \cdot d\varepsilon_z}{\varepsilon_z^2 d\sigma_z} = \frac{(\tilde{\nu} - \nu)d\varepsilon_z}{\varepsilon_z d\sigma_z}$$

or $\tilde{\nu} = \nu + \frac{d\nu}{d\sigma_z} E_1 \varepsilon_z$ (3.13)

kur $E_1 = d\sigma_z / d\varepsilon_z$ ir pastiprināta betona pieskares modulis. Kad Puasona koeficients ir sasniedzis asimptotisko vērtību, tad $d\nu / d\sigma_z = 0$, un no (3.13) seko, ka Puasona koeficienta un DPK asimptotiskās vērtības ir vienādas. Praktiski par asimptotiskajām vērtībām tiek pieņemtas eksperimentāli noteiktās galējās vērtības, kuras parasti nesakrīt. Gadījumos, kad nav skaidrs, vai asimptotiskā vērtība ir sasniegta, galējais DPK norāda augšējo robežu, bet galējais Puasona koeficients – apakšējo asimptotiskās vērtības robežu.

Eksperimenti rāda, ka asimptotiskais DPK $\tilde{\nu}_{as}$ un asimptotiskais Puasona koeficients ν_{as} pieaug, ja pieaug nepastiprināta betona spiedes stiprība f_{co} , un samazinās, ja pieaug sānu modulis E_{lat} . Asimptotiskā DPR un Puasona koeficienta atkarība no bezdimensionālā parametra f_{co} / E_{lat} ir parādīta att. 3.6.



Att. 3.6. Asimptotiskais DPK un Puasona koeficients. Iekrāsotie simboli – DPR, neiekrāsotie simboli – Puasona koeficients. Nepārtrauktā līnija – aproksimācija

Aproksimējot eksperimentālos datus (att. 3.6.), tika iegūta formula asimptotiskā DPK $\tilde{\nu}_{as}$ novērtējumam:

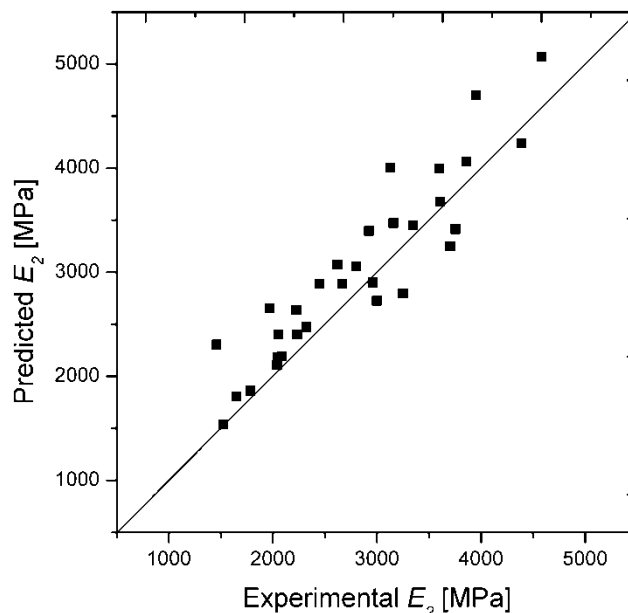
$$\tilde{\nu}_{as} = 5.9 \cdot \left(\frac{f_{co}}{E_{lat}} \right)^{0.65} \quad (3.14)$$

Pieskares moduļa un maksimālās garendeformācijas novērtējums

Ievietojot (3.14) formulā (3.11), iegūstam formulu pastiprinātā betona pieskares moduļa novērtējumam E_2 :

$$E_2 = 23.6 \cdot E_{lat} \cdot \left(\frac{f_{co}}{E_{lat}} \right)^{0.65} \quad (3.15)$$

Salīdzinājums ar eksperimentu rezultātiem ir parādīts att. 3.7. Datu izkledi att. 3.7. var izskaidrot ar dažādu pastiprinājuma izgatavošanas kvalitāti.



Att. 3.7. Prognozēto un eksperimentālo E_2 vērtību salīdzinājums. Nepārtrauktā līnija – ideālā sakritība. Papildus izmantoti eksperimentālie rezultāti no [1] un [3]

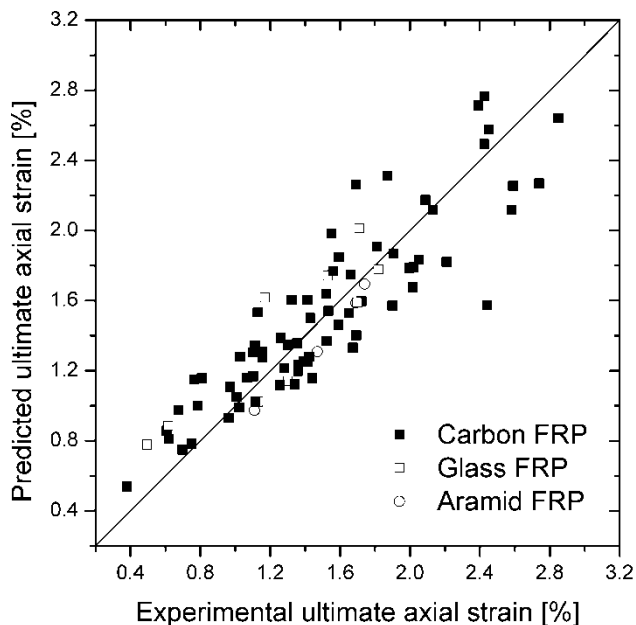
Formulu maksimālās garendeformācijas novērtējumam var iegūt, izmantojot asimptotisko DPR $\tilde{\nu}_{as}$, kuru pieraksta šādā formā:

$$\tilde{\nu}_{as} = \frac{\epsilon_{lu} - \epsilon_{lo}}{\epsilon_{cc} - \epsilon_{co}} \quad (3.16)$$

kur $\epsilon_{co}, \epsilon_{lo}$ – nepastiprināta betona maksimālā garendeformācija un maksimālā šķērsdeformācija un $\epsilon_{cc}, \epsilon_{lu}$ – pastiprināta betona maksimālā garendeformācija un maksimālā šķērsdeformācija. No (3.16) un (3.14) iegūst formulu pastiprināta betona maksimālās garendeformācijas novērtējumam ϵ_{cc} :

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} + 0.17 \cdot (\epsilon_{ju} - \epsilon_{lo}) \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{0.65} \quad (3.17)$$

Salīdzinājums ar eksperimentu rezultātiem ir parādīts att. 3.8. Iegūtā formula ir vienkārša un piemērota praktiskai izmantošanai.



Att. 3.8. Prognozēto un eksperimentālo pastiprināta betona galējo garendeformāciju salīdzinājums. Nepārtrauktā līnija – ideālā sakritība. Papildus izmantoti eksperimentālie rezultāti no [1] un [3-14]

Formulā (3.17) tiek izmantota pastiprinātu betonu pārbaudēs noteiktā pastiprinājuma maksimālā aploces deformācija. Lai, nesagraujot paraugu, noteiktu pastiprināta betona maksimālo garendeformāciju, jāizmanto ražotāja dotā pastiprinājuma materiāla graužoša deformācija, vai jāveic pastiprinājuma materiāla pārbaudes, lai to noteiktu.

Pastiprinātu betonu pārbaudēs noteiktā pastiprinājuma maksimālā aploces deformācija ϵ_{ju} ir ievērojami mazāka par kompozīta gredzenu pārbaudēs noteikto maksimālo aploces deformāciju ϵ_{ju}^d . Tam par iemeslu ir deformācijas lokalizācija plaisājošajā betonā, kas rada nevienmērīgu spriegumu sadalījumu pastiprinājumā un, rezultātā, noved pie pastiprinājuma priekšlaicīga sabrukuma. Lai varētu izmantot kompozīta gredzenu pārbaudžu rezultātus, jāievieš redukcijas koeficients $c_s: \epsilon_{ju} = c_s \epsilon_{ju}^d$. Salīdzinot kompozīta gredzenu pārbaudēs noteikto maksimālo aploces deformāciju ar pastiprinātu betonu pārbaudēs (papildus izmantojot rezultātus no [1]) noteiktajām vērtībām, iegūts, ka redukcijas koeficients ir 0.60. Redukcijas koeficients c_m , ja tiek izmantota ražotāja dotā vērtība ϵ_{ju}^m , ir 0.36 ($\epsilon_{ju} = c_m \epsilon_{ju}^m$). Redukcijas koeficientu vērtības ir derīgas tikai oglekļa šķiedru kompozīta pastiprinājumam. Redukcijas koeficienti stikla un aramīda šķiedru kompozītu pastiprinājumam ir jānosaka atsevišķi.

Apaļu pastiprinātu betona kolonnu neelastīgā deformēšanās

Pastiprinātu betonu slogojot spiedē, tajā rodas neatgriezeniskās jeb neelastīgās deformācijas, kuras ievērojami pārsniedz elastīgās deformācijas, tādēļ reālistisks neelastīgo deformāciju apraksts ir nepieciešams precīzai betona mehāniskās uzvedības modelēšanai.

Lai aprakstītu materiālu uzvedību spiedē, bieži tiek izmantota plastiskuma teorija. Prognozēto plastisko deformāciju sakritība ar eksperimentu ir atkarīga no plastiskā potenciāla izvēles. Eksistējošie betona plastiskuma modeļi ir balstīti uz nepastiprināta betona trīsasus spiedes ar nemainīgu sānu spiedienu eksperimentu rezultātiem [15–17]. Šo modeļu spēja pietiekami precīzi aprakstīt ar kompozītmateriāliem pastiprināta betona deformēšanos ir apšaubāma, jo pastiprināta betona uzvedība būtiski atšķiras no nepastiprināta betona uzvedības trīsasus spiedē ar konstantu sānu spiedienu. Šajā aktivitātē ir analizēti pastiprinātu betona kolonnu spiedes eksperimentu rezultāti ar mērķi noteikt, kā pastiprinātā betonā attīstās plastiskās deformācijas.

Plastiskuma teorijas postulāti

Pirmais plastiskuma teorijas postulāts nosaka, ka eksistē slogošanas virsma f , kura ir atkarīga no sprieguma stāvokļa un slogošanas vēstures. Spriegumu telpā slogošanas virsma atdala apgabalu, kurā materiāls deformējas elastīgi, no apgabala, kurā materiālā rodas neatgriezeniskās deformācijas. Slogošanas virsma nav fiksēta, bet maina savu formu atkarībā no nostiprināšanās funkcijas χ :

$f(\sigma_{ij}, \chi) = 0$	(4.1)
----------------------------	-------

Ja $f < 0$, tad materiāls deformējas elastīgi. Slogošanas virsmai nav jāmainās, ja tiek veikta koordinātu transformācija. Tas nozīmē, ka slogošanas virsma ir spriegumu tenzora un spriegumu deviatora invariantu funkcija:

$f(I_1, J_2, J_3, \chi) = 0$	(4.2)
------------------------------	-------

kur I_1 spriegumu tenzora pirmais invariants, J_2 un J_3 ir otrs un trešais spriegumu deviatora invariants. Galveno spriegumu telpā ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) slogošanas virsma veido konusveidīga figūru, kuras ass ir vērsta pa taisni $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Tas nozīmē, ka slogošanas virsmu ir ērti apskatīt cilindriskā koordinātu sistēmā (*Haigh – Westergaard stress space*):

$f(\xi, \rho, \theta, \chi) = 0$	(4.3)
----------------------------------	-------

kur ξ ir hidrostatiskā koordināta, ρ ir deviatora koordināta un θ ir Lodes leņķis. Cilindriskās koordinātas tiek pierakstītas sekojoši:

$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}}, I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$	(4.4)
--	-------

$$\rho = \sqrt{2J_2}, J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (4.5)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3} J_3}{2 J_2^{3/2}} \right), J_3 = (\sigma_1 - I_1/3) \cdot (\sigma_2 - I_1/3) \cdot (\sigma_3 - I_1/3) \quad (4.6)$$

Pastiprinātām apaļām betona kolonnām $\sigma_z = \sigma_3$ un sānu spiediens ir $\sigma_1 = \sigma_1 = \sigma_2$. Tādā gadījumā no (4.4), (4.5) un (4.6) seko, ka $\theta = \pi/3$ un:

$$\xi = \frac{\sigma_z + 2\sigma_1}{\sqrt{3}} \quad (4.7)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{2}{3}} |\sigma_1 - \sigma_z| \quad (4.8)$$

Materiālā rodas plastiskās deformācijas, kad slogošanas trajektorija sasniedz sākotnējo slogošanas virsmu f_y :

$$f_y(\xi, \rho, \theta) = f(\xi, \rho, \theta, \chi_o) = 0 \quad (4.9)$$

kur χ_o ir nostiprināšanās funkcijas sākotnējā vērtība. Nostiprināšanās funkcija nosaka, kā slogošanas virsma pārvietosies slogošanas gaitā. Ja $\chi = 1$, tad ir sasniegta sabrukuma virsma F :

$$F(\xi, \rho, \theta) = f(\xi, \rho, \theta, 1) = 0 \quad (4.10)$$

Otrais plastiskuma teorijas postulāts nosaka, ka pilnās deformācijas pieaugumu $d\varepsilon_{ij}$ var sadalīt divās komponentēs – elastīgajā $d\varepsilon_{ij}^{el}$ un plastiskajā $d\varepsilon_{ij}^{pl}$:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{el} + d\varepsilon_{ij}^{pl} \quad (4.11)$$

Trešais plastiskuma teorijas postulāts jeb plastiskās tecēšanas likums nosaka, kā attīstās plastiskās deformācijas. Plastiskās tecēšanas likumu pieraksta šādā formā:

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g(\sigma_{ij}, \chi)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.12)$$

kur $d\lambda \geq 0$ ir plastiskais reizinātājs un $g(\sigma_{ij}, \chi)$ plastiskais potenciāls. Arī plastiskajam potenciālam nav jāmainās, ja tiek veikta koordinātu transformācija: $g(\xi, \rho, \theta, \chi) = 0$. No (4.10) seko, ka plastisko deformāciju pieauguma vektors ir vērsts pa plastiskā potenciāla virsmas normāli.

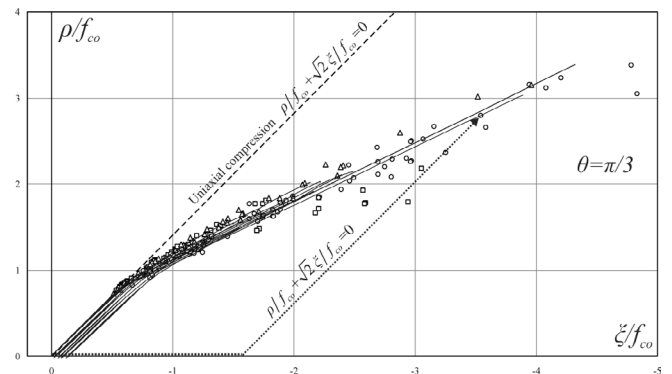
Plastiskās tecēšanas likumu sauc pa asociētu, ja plastis-

kais potenciāls g sakrīt ar slogošanas virsmu f : $g = f$. Eksperimenti rāda, ka betonu raksturo neasociētais plastiskās tecēšanas likums: $g \uparrow f$ [18]. Ja $\chi = 1$, tad iegūst plastisko potenciālu G , kas atbilst sabrukuma virsmai:

$$G(\xi, \rho, \theta) = g(\xi, \rho, \theta, 1) = 0 \quad (4.13)$$

Sabrukuma virsma un slogošanas trajektorijas

Att. 4.1. ir parādīta apaļu betona kolonnu stiprība (neiekrāsoti simboli) trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu ($\sigma_1 = \sigma_1 = \sigma_2 = \text{const}$) [16] un pastiprinātu apaļu betona kolonnu slogošanas trajektorijas (nepārtrauktas līnijas). Salīdzinājumam att. 4.1. ir parādīts slogošanas trajektorijas piemērs (pārtrauktā līnija) trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu. Simboli att. 4.1. veido betona sabrukuma virsmu, kura ir atkarīga no hidrostatiskā spiediena. Betona kolonnu, kuru pastiprinājums ir sākotnēji nospriegots, slogošanas trajektorijas ir nobīdītas pa hidrostatisko asi.



Att. 4.1. Neiekrāsoti simboli – apaļu betona kolonnu stiprība trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu. Nepārtrauktās līnijas – pastiprinātu apaļu betona kolonnu slogošanas trajektorijas. Pārtrauktā līnija – slogošanas trajektorijas piemērs trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu

Plastisko deformāciju attīstība

Plastiskās deformācijas pieaugumu var sadalīt divās komponentēs – plastisko tilpuma deformāciju pieaugumā $d\varepsilon_{\xi}^{pl}$ un plastisko deformāciju deviatora pieaugumā $d\varepsilon_{\rho}^{pl}$:

$$d\varepsilon_{\xi}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \xi} = \frac{dI_1^e}{\sqrt{3}}, dI_1^e = d\varepsilon_1^{pl} + d\varepsilon_2^{pl} + d\varepsilon_3^{pl} \quad (4.14)$$

$$d\varepsilon_\rho^{pl} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \rho} = \sqrt{2dJ_2^e},$$

$$dJ_2^e = \frac{(d\varepsilon_1^{pl} - d\varepsilon_2^{pl})^2 + (d\varepsilon_2^{pl} - d\varepsilon_3^{pl})^2 + (d\varepsilon_3^{pl} - d\varepsilon_1^{pl})^2}{6} \quad (4.15)$$

kur $d\varepsilon_1^{pl}$, $d\varepsilon_2^{pl}$ un $d\varepsilon_3^{pl}$ ir plastisko deformāciju tenzora galveno vērtību pieaugumi.

No Huka likuma seko, ka elastīgās garendeformācijas ε_z^{el} un šķērsdeformācijas ε_1^{el} apaļā pastiprinātā betona kolonnā ir:

$$\varepsilon_z^{el} = \frac{1}{E_o} [\sigma_z - 2\nu_o \cdot \sigma_1] \quad (4.16)$$

$$\varepsilon_1^{el} = \frac{1}{E_o} [(1-\nu_o) \cdot \sigma_1 - \nu_o \cdot \sigma_z] \quad (4.17)$$

No (3.1), (4.16) un (4.17) seko, ka:

$$\varepsilon_z^{el} = \frac{1}{E_o} \left[1 - \frac{2k\nu_o^2}{1+k(1-\nu_o)} \right] \cdot \sigma_z \quad (4.18)$$

$$\varepsilon_1^{el} = \frac{\nu_o}{E_o [k(\nu_o - 1) - 1]} \cdot \sigma_z \quad (4.19)$$

kur parametrs k tiek definēts sekojoši:

$$k = \frac{E_{lat}}{E_o} = \frac{E_j h}{E_o R} \quad (4.20)$$

Plastiskās deformācijas aprēķina, atņemot no pilnajām deformācijām, kuras tiek noteiktas eksperimentāli, elastīgās deformācijas:

$$\varepsilon_z^{pl} = \varepsilon_z^{total} - \varepsilon_z^{el} \quad (4.21)$$

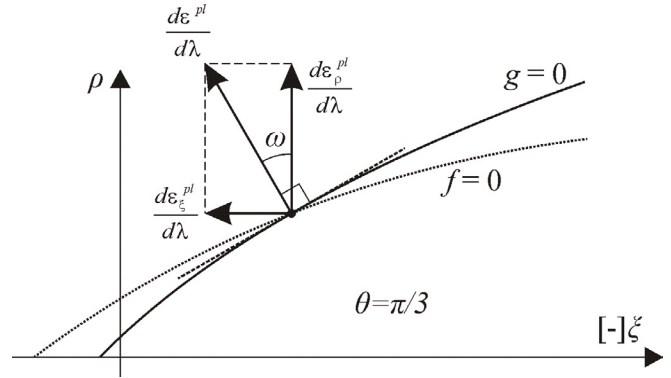
$$\varepsilon_1^{pl} = \varepsilon_1^{total} - \varepsilon_1^{el} \quad (4.22)$$

Apaļām pastiprinātām betona kolonnām $\varepsilon_3^{pl} = \varepsilon_z^{pl}$ un $\varepsilon_1^{pl} = \varepsilon_2^{pl} = \varepsilon_1^{pl}$. Tad no (4.14) un (4.15) seko, ka pilnā plastiskā tilpuma deformācija un pilnais plastisko deformāciju deviators ir:

$$\varepsilon_\xi^{pl} = \frac{\varepsilon_z^{pl} + 2\varepsilon_1^{pl}}{\sqrt{3}} \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_\rho^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3}} |\varepsilon_1^{pl} - \varepsilon_z^{pl}| \quad (4.24)$$

Plastisko deformāciju pieauguma vektora sadalīšana komponentēs ir parādīta att. 4.2.

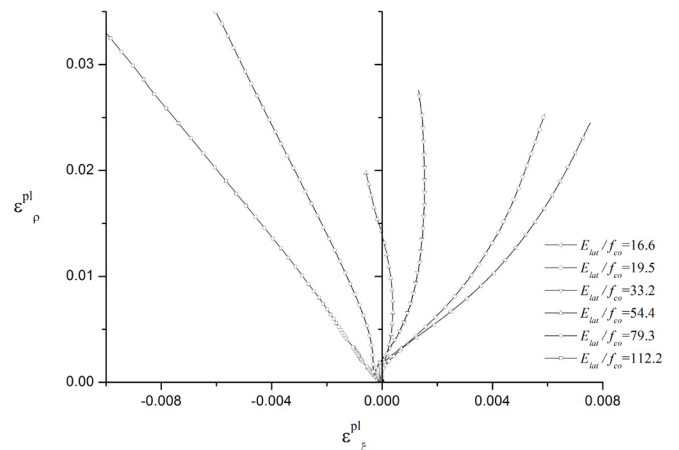


Att. 4.2. Neasociētā plastiskā tecēšanas likuma shematisks attēlojums

Attiecību starp plastiskās deformācijas komponentu pieaugumiem nosaka plastisko deformāciju pieauguma vektora virziens ψ :

$$\psi = \text{tg}\omega = \frac{d\varepsilon_\xi^{pl}}{d\varepsilon_\rho^{pl}} \quad (4.25)$$

Tipiskas eksperimentālās pastiprinātu apaļu betona kolonnu plastisko deformāciju trajektorijas ir parādītas att. 4.3.

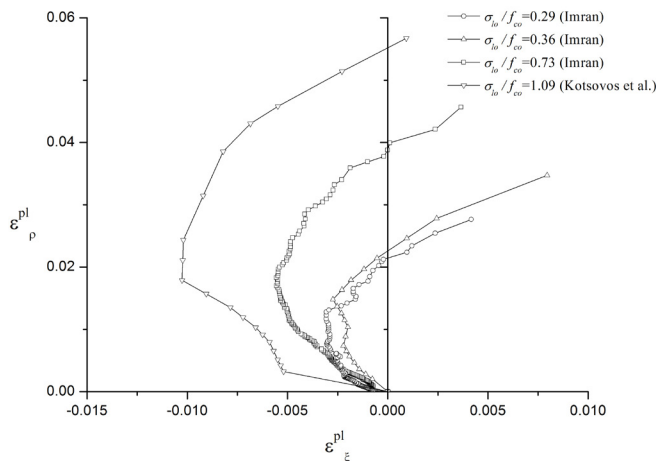


Att. 4.3. Apaļu pastiprinātu betona kolonnu plastisko deformāciju trajektorijas

Sakarību starp plastisko tilpuma deformāciju un plastisko deformāciju deviatoru ietekmē parametrs E_{lat}/f_{co} . Sākumā notiek plastiska tilpuma samazināšanās. Ja parametra E_{lat}/f_{co} vērtība ir maza, tad otrajā slogošanas trajektorijas posmā notiek plastisks tilpuma pieaugums. Pie vidējām parametra E_{lat}/f_{co} vērtībām otrajā slogošanas trajektorijas posmā plastisku tilpuma pieaugumu nomaina plastiska tilpuma samazināšanās. Pie lielām parametra E_{lat}/f_{co} vē-

tībām otrajā slogošanas trajektorijas posmā norisinās tikai plastiska tilpuma samazināšanās.

Pretēji iepriekš minētajam, nepastiprināta betona trīsasīgās spiedes pārbaudēs ar nemainīgu sānu spiedienu plastisko tilpuma samazināšanos vienmēr nomaina plastisks tilpuma pieaugums (att. 4.4., liknes iegūtas, apstrādājot datus, kuri ir publicēti [17] un [19]).

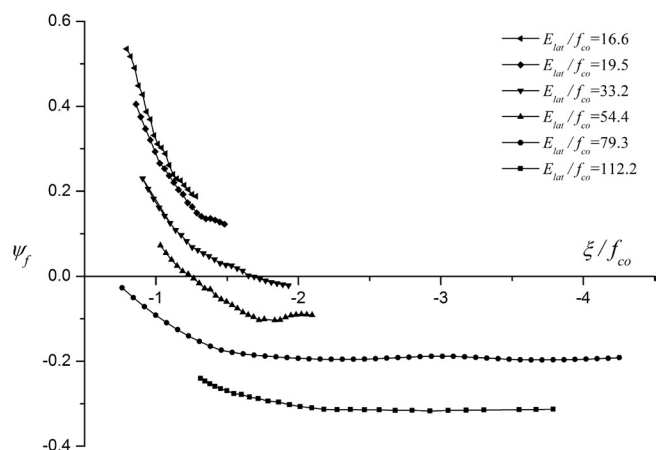


Attēls 4.4. Plastisko deformāciju trajektorijas trīsasīgās spiedes pārbaudēs ar nemainīgu sānu spiedienu σ_{lo}

Ja ir zināmas eksperimentālās plastisko deformāciju trajektorijas, tad var noteikt plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienu ψ .

Lai gan eksperimentu rezultātiem att. 4.1. ir ievērojama izkliede, var redzēt, ka pastiprināta betona slogošanas trajektoriju otrie posmi praktiski sakrīt ar sabrukšanas virsmu. Tāpēc tālāk uzskatīsim, ka plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni slogošanas trajektoriju otrajos posmos, ψ_f , atbilst plastiskajam potenciālam pie sabrukuma (formula (4.13)).

Virziens ψ_f ir atkarīgs no parametra E_{lat}/f_{co} un hidrostatiskā spiediena ξ . ψ_f atkarība no normalizētā hidrostatiskā spiediena ir parādīta att. 4.5.



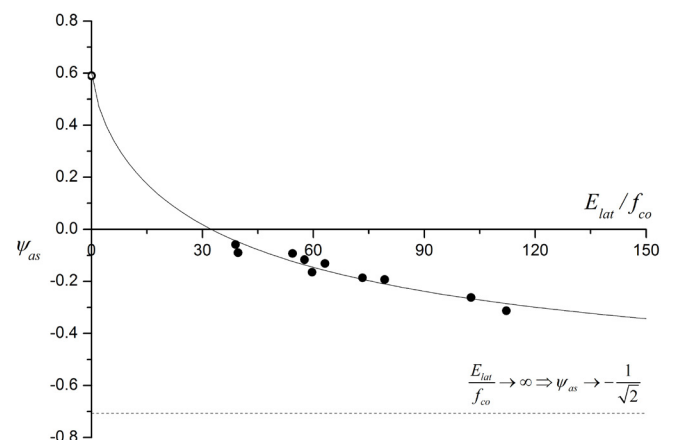
Att. 4.5. Eksperimentālie plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni ψ_f pie sabrukuma

Var redzēt, ka pieaugot hidrostatiskajam spiedienam, ψ_f tiecas uz kādu asimptotisku vērtību.

Asimptotiskā plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtība pie sabrukuma trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu atbilst gadījumam, kad $E_{lat}/f_{co} = 0$, jo šķērsdeformācijas nav atkarīgas no sānu spiediena.

Ja $E_{lat}/f_{co} \rightarrow \infty$, tad šķērsdeformāciju nav un no (4.23), (4.24) un (4.25) seko, ka $\psi_f \rightarrow -1/\sqrt{2}$.

Asimptotisko plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtību pie sabrukuma ψ_{as} atkarība no parametra E_{lat}/f_{co} ir parādīta att. 4.6.



Att. 4.6. Asimptotiskās plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtības pie sabrukuma ψ_{as} . Iekrāsoti simboli – pastiprināts betons. Neiekrāsotais simbols – vidējā vērtība betona trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu. Nepārtrauktā līnija – aproksimācija

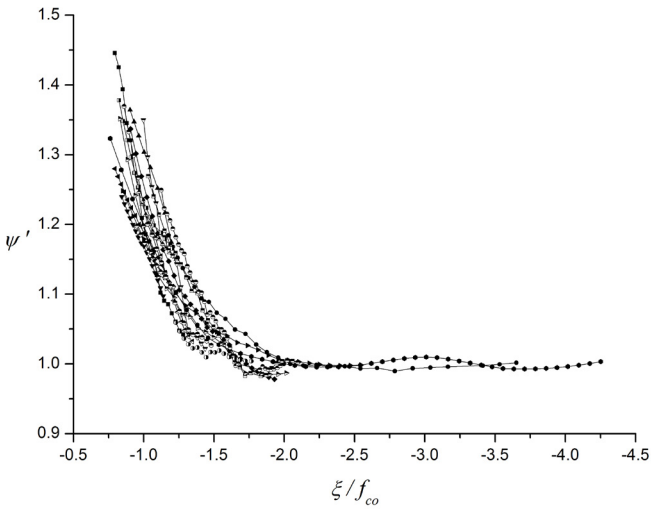
Formula asimptotisko plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtību noteikšanai:

$$\psi_{as} = \frac{1}{A_{\psi} + B_{\psi} \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{n_{\psi}}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.26)$$

kur $A_{\psi} = 0.76$, $B_{\psi} = 0.05$ un $n_{\psi} = 0.73$. Normētos plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienus ψ' definējam sekojoši:

$$\psi' = \frac{\psi_f + \frac{1}{\sqrt{2}}}{\psi_{as} + \frac{1}{\sqrt{2}}} \quad (4.27)$$

Normēto plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienu atkarība no normētā hidrostatiskā spiediena ir parādīta att. 4.7.



Att. 4.7: Normētie plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni. Dažādi simboli apzīmē dažādas parametra E_{lat}/f_{co} vērtības

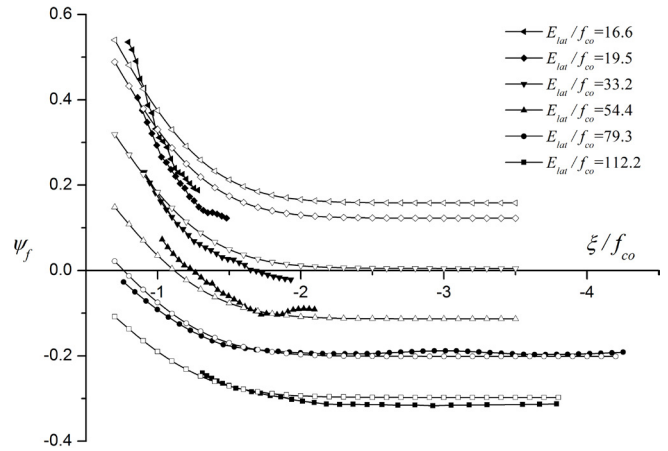
Var novērot, ka normētie virzieni ψ' tiecas veidot vienkotliki, kuru var aprakstīt ar formulu:

$$\psi' = 1 + A_m \exp \left[- \left(B_m \frac{\xi}{f_{co}} \right)^2 \right] \quad (4.28)$$

kur $A_m = 0.76$ un $B_m = 1.11$. Izmantojot (4.26), (4.27) un (4.28), iegūstam formulu plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena pie sabrukuma novērtēšanai:

$$\psi_f(E_{lat}, f_{co}, \xi) = \left(\frac{1}{A_\psi + B_\psi \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{n_\psi}} \right) \cdot \left(1 + A_m \exp \left[- \left(B_m \frac{\xi}{f_{co}} \right)^2 \right] \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.29)$$

Novērtējuma salīdzinājums ar eksperimentu ir parādīts att. 4.8.



Att. 4.8. Plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni ψ_f pie sabrukuma. Iekrāsotie simboli – eksperiments, neiekrāsotie simboli – novērtējums

Plastiskā potenciāla virsmu pie sabrukuma G var uzrakstīt šādā formā:

$$G(\xi, \rho, E_{lat}, f_{co}) = \rho + \Psi(\xi, E_{lat}, f_{co}) = 0 \quad (4.30)$$

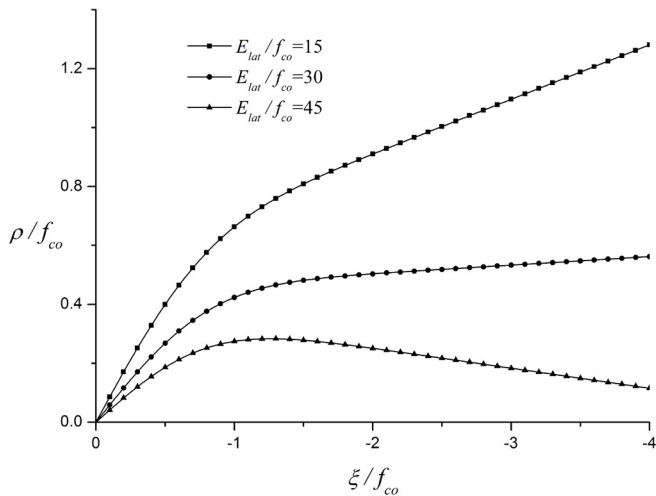
Tiek pieņemts, ka plastiskais potenciāls nav atkarīgs no Lodes leņķa. No (4.14), (4.15) un (4.25) seko, ka:

$$\psi_f = \frac{\frac{\partial G}{\partial \xi}}{\frac{\partial G}{\partial \rho}} = \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \quad (4.31)$$

Izmantojot (4.29) un (4.31), iegūstam, ka plastiskais potenciāls ir:

$$G = \rho - \frac{\xi}{f_{co} \sqrt{2}} + \left(\frac{1}{A_\psi + B_\psi \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{n_\psi}} \right) \left(\frac{\xi}{f_{co}} + \frac{A_m \sqrt{\pi} \operatorname{Erf} \left(B_m \frac{\xi}{f_{co}} \right)}{2 B_m} \right) = 0 \quad (4.32)$$

kur $\operatorname{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$. Plastiskais potenciāls ir parādīts att. 4.9.



Att. 4.9. Plastiskā potenciāla atkarība no parametra E_{lat}/f_{co}

Sākotnējā sānu spiediena ietekme uz apaļu pastiprinātu betona kolonnu uzvedību

Betonu sākotnēji nospriegojot, tiek aizkavēta betona plaisāšana. Sākotnējais sānu spiediens izraisa sprieguma pieaugumu noliekuma punktā, tādējādi palēninot plaisu augšanu betonā. Šajā aktivitātē ir pētīta priekšsprieguma ietekme uz betona uzvedību.

Betona īpašības

Pētījumā tika izmantots divu dažādu stiprību betons. Spiedē tika pārbaudītas 8 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprināta betona stiprību. Visu kolonnu (nepastiprinātu un pastiprinātu) diametrs bija 150 mm, garums – 300 mm. Rezultāti ir apkopoti tab. 5.1.

Tab. 5.1. Betona īpašības

Stiprība spiedē, f_{co} [MPa]	Maksimālā garendeformācija, ϵ_{co} [%]	Maksimālā šķērsdeformācija, ϵ_{to} [%]	Junga modulis, E_o [GPa]	Puasona koeficients, ν_o
12.3	0.45	0.43	15.6	0.18
49.2	0.30	0.20	28.6	0.22

Kompozīta pastiprinājums

Betona kolonnas tika pastiprinātas, aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātu bazalta šķiedru grīsti. Ražotāja (Basaltex) dotās bazalta šķiedru grīstes KVT1200Tex13E īpašības ir šādas: stiprība stiepē > 1755 MPa, Junga modulis 87 GPa, šķiedras diametrs 13 μ m, lineārais blīvums 1200 tex un blīvums 2.67 g/cm³.

Lai noteiktu kompozīta pastiprinājuma stiprību un maksimālo deformāciju, tika izmantotas kompozīta gredzenu pārbaudes saskaņā ar ASTM D 2290 standartu. Pārbaudžu rezultāti ir atrodami tab. 5.2.

Tab. 5.2. Kompozīta gredzenu pārbaudžu rezultāti

Slāņu skaits	Biezums [mm]	Stiprība [MPa]	Junga modulis [GPa]	Maksimālā aploces deformācija [%]
4	0.79	729	34.7	2.10
8	1.58	798	45.0	1.75

Grīstes uztīšanas process un pastiprinātie paraugi

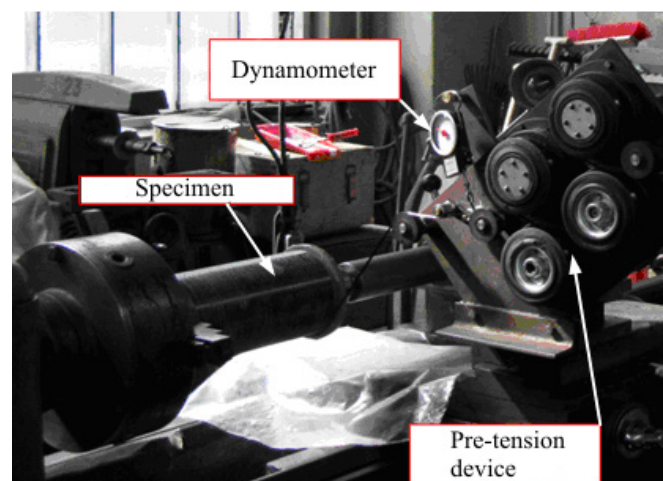
Betons tika pastiprināts, uztinot ar epoksīdsveķiem piesūcinātu bazalta šķiedru grīsti uz rotējošas betona kolonnas. Iekārta grīstes uztīšanai ir parādīta att. 5.1. Uztīšanas process ir shematiski parādīts att. 5.2. Grīste no spoles nonāk priekšspriegošanas ierīcē, kura sastāv no četriem ar gumiju pārklātiem riteniem. Katrs ritenis ir atsevišķi regulējams, lai iegūtu vajadzīgo priekšsprieguma spēku. Grīstes novietojumu kontrolēja, pārvietojot priekšsprieguma ierīci gar parauga asi. Paraugam veicot pilnu apgriezianu, priekšsprieguma ierīce pārvietojas par 2.25 mm. Pirms grīstes uztīšanas betona virsmai uzklāja epoksīdsveķu slāni. Uztīšanas procesā tika sekots tam, lai grīste netiktu bojāta. Pastiprinātie paraugi tika atstāti nožūt 10 dienas pie temperatūras 22 °C.

Pavisam tika izgatavoti un pārbaudīti 24 pastiprināti paraugi. Pastiprinājums sastāvēja no 4 un 8 grīstes slāņiem. Pastiprinājuma biezumu var aprēķināt sekojoši:

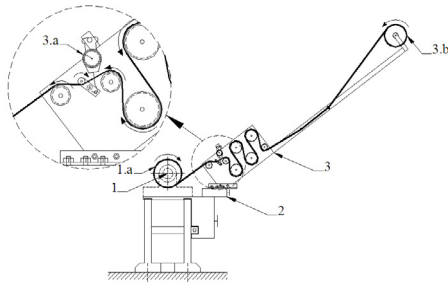
$$h = \frac{nS_o}{t} \tag{5.1}$$

kur S_o – vidējais grīstes šķērsgriezuma laukums, t – grīstes uztīšanas solis (2.25 mm) un n – pastiprinājuma slāņu skaits.

Priekšsprieguma spēks P bija 0 N un 200 N. Pārbaudžu laikā reģistrēja garendeformācijas un šķērsdeformācijas. Saskaņā ar ASTM C 39/C39M – 99 standartu sloģošanas ātrums bija 10 MPa/min.



Att. 5.1. Uztīšanas iekārta



Att. 5.2. Uztišanas iekārtas shematisks attēlojums. 1- rotējošs parauga stiprinājums; 1a – paraugs; 2 – horizontāla platforma, kura var pārvietoties gar parauga asi; 3 – platformai 2 piestiprināta priekšspriegojuma ierīce; 3a – dinamometrs; 3b – spole

Priekšspriegojuma ietekmes novērtējums

No Huka likuma izriet, ka pirmā slogošanas trajektorijas posma slīpums ir:

$$\frac{d\sigma_z}{d\sigma_l} = \frac{1+k(1-\nu_o)}{k\nu_o} \quad (5.2)$$

No (5.2) seko, ka sānu spriegums ir:

$$\sigma_l = \frac{k\nu_o}{1+k(1-\nu_o)} \sigma_z \quad (5.3)$$

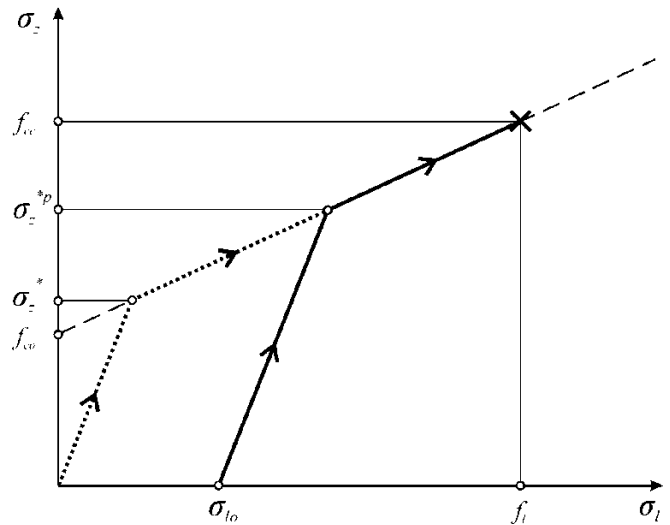
Sākotnējā slogošanas trajektorija krusto stiprības līniju noliekuma punktā. Ievietojot (5.3) formulā (5.5), iegūst spriegumu noliekuma punktā:

$$\sigma_z^* = -[1+k(1-\nu_o)] \cdot f_{co} \quad (5.4)$$

Spriegumu noliekuma punktā var palielināt, priekšspriegojot kompozīta pastiprinājumu. Pastiprinājuma priekšspriegojums rada sākotnējo sānu spiedienu σ_{lo} , tādēļ sākotnējā slogošanas trajektorija krustos stiprības līniju pie augstāka spiedes sprieguma (att. 5.3). Sākotnējais sānu spiediens ir:

$$\sigma_{lo} = -\frac{nP}{Rt} \quad (5.5)$$

kur P – grīstes priekšspriegojuma spēks.



Att. 5.3. Sākotnējā sānu spiediena ietekme uz noliekuma punktu. Punktētā līnija – nepriekšspriegots paraugs, nepārtrauktā līnija – priekšspriegots paraugs. Raustītā līnija – stiprības līnija

Tādā gadījumā sānu spiediens ir:

$$\sigma_l = \frac{k\nu_o}{1+k(1-\nu_o)} \sigma_z + \sigma_{lo} \quad (5.6)$$

Ievietojot (5.6) formulā (3.5) iegūst priekšspriegota betona spriegumu noliekuma punktā:

$$\sigma_z^{*p} = [1+k(1-\nu_o)] \cdot [-f_{co} + K_{\sigma} |\sigma_{lo}|] \quad (5.7)$$

vai

$$\sigma_z^{*p} = [1+k(1-\nu_o)] \cdot \left[-f_{co} + \frac{1-\nu_o}{\nu_o} \cdot \frac{nP}{Rt} \right] \quad (5.8)$$

Rezultāti

Tab. 5.3. ir uzrādīta pastiprināta betona maksimālā garēndeformācija ϵ_{cc} , maksimālā šķērsdeformācija ϵ_{tr} , normētā spiedes stiprība f_{cc}/f_{co} , normētais spiedes spriegums noliekuma punktā $|\sigma_z^*|/f_{co}$ un normētais spiedes spriegums noliekuma punktā priekšspriegotiem $|\sigma_z^{*p}|/f_{co}$ paraugiem. Izmantots sekojošs paraugu apzīmējums: stiprība spiedē [MPa] - aptinuma slāņu skaits – priekšspriegojuma spēks [N]. Relatīvais spiedes sprieguma pieaugums noliekuma punktā priekšspriegojuma dēļ, Δ , ir:

$$\Delta = \frac{\sigma_z^{*p} - \sigma_z^*}{\sigma_z^*} \times 100\% \quad (5.9)$$

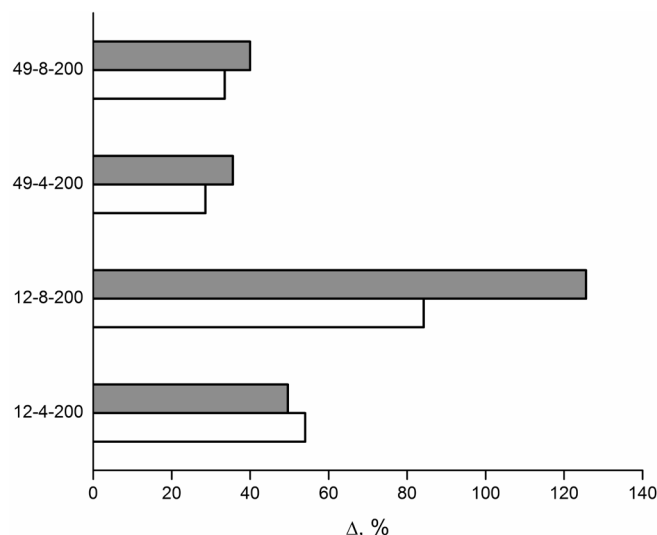
Prognozēto relatīvo pieaugumu Δ_{est} iegūst, ievietojot (5.4) un (5.8) formulā (5.9):

$$\Delta_{est} = \frac{1 - \nu_o}{\nu_o} \cdot \frac{nP}{Rt} \quad (5.10)$$

Visu paraugu eksperimentālais un prognozētais relatīvais spiedes sprieguma pieaugums noliekuma punktā priekšsprieguma dēļ ir parādīts att. 5.4.

Tab. 5.3. Eksperimentu rezultāti

Apzīmējums	σ_{lo} [MPa]	ϵ_{cc} [%]	ϵ_{lu} [%]	f_{cc}/f_{co}	$ \sigma_z^* /f_{co}$ un $ \sigma_z^p /f_{co}$
12-4-0	0	5.81	1.85	5.59	1.01
12-4-200	4.7	5.16	1.46	5.07	1.55
12-8-0	0	7.55	1.79	8.80	1.12
12-8-200	9.5	6.68	1.39	8.18	2.06
49-4-0	0	3.37	2.16	2.21	1.07
49-4-200	4.7	3.24	1.73	2.19	1.37
49-8-0	0	5.13	1.94	3.34	1.10
49-8-200	9.5	4.46	1.64	3.12	1.47



Att. 5.4. Eksperimentālais (baltie stabiņi) un prognozētais (pelēkie stabiņi) relatīvais spiedes sprieguma pieaugums noliekuma punktā priekšsprieguma dēļ

No att. 5.4 redzams, ka pastiprinājuma priekšspriegojums palielina spiedes spriegumu noliekuma punktā pat par 84%.

Tā kā priekšspriegotā pastiprinājumā oglekļa šķiedras ir jau pagarinātas, tad priekšspriegotu paraugu maksimālās šķērsdeformācijas ir mazākas par nepriekšspriegotu paraugu maksimālajām šķērsdeformācijām (skatīt tab. 5.3). Šķērsdeformāciju samazinājums izraisa spiedes stiprības un maksimālās garendeformācijas samazinājumu. Praktiskos

pielietojumos tam ir maza nozīme, jo betona konstruktīvā elementa ekspluatācijas slodzei ir jābūt zemākai par spiedes spriegumu noliekuma punktā.

Pastiprināta betona kolonnas spiedes stiprība ir atkarīga no pastiprinājuma maksimālās aploces deformācijas (skat. formulu (3.2)). Maksimālā aploces deformācija pastiprinātu betona kolonnu pārbaudēs, ja kolonnas ir pastiprinātas, manuāli aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātām oglekļa šķiedru lentām, ir par 40% zemāka nekā maksimālā aploces deformācija kompozīta gredzenu pārbaudēs. Savukārt, maksimālā aploces deformācija pastiprinātu betona kolonnu pārbaudēs, ja kolonnas ir pastiprinātas, uztinot uz tām oglekļa šķiedru grīsti, ir tāda pati vai pat nedaudz augstāka nekā maksimālā aploces deformācija kompozīta gredzenu pārbaudēs. Tas nozīmē, ka ar grīstes uztīšanas metodi iegūtajam pastiprinājumam ir augstāka kvalitāte, jo tiek nodrošināts vienmērīgāks šķiedru sadalījums un mazināts šķiedru viļņainums.

Kopsavilkums

Šīs aktivitātes galvenie rezultāti ir šādi:

- 1) iegūtas formulas maksimālās garendeformācijas un otrā pieskares moduļa aprēķinam.
- 2) iegūta formula, kas ļauj noteikt plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienus pie sabrukuma. Konstruēts plastiskais potenciāls, kas atbilst sabrukuma stāvoklim.
- 3) iegūta formula, kas ļauj noteikt spiedes spriegumu noliekuma punktā priekšspriegota aptinuma gadījumā.

Atsauces

- [1] V. Tamužs, R. Tepfers, Chi-Sang You, T. Rousakis, I. Repe-lis, V. Skruls and U. Vilks, “Behavior of concrete cylinders confined by carbon-composite tapes and prestressed yarns. 1. Experimental data”, *Mechanics of Composite Materials*, 42(1), 13-32 (2006).
- [2] V. Tamužs, R. Tepfers and E. Spārniņš, “Behavior of concrete cylinders confined by a carbon composite. 2. Prediction of strength”, *Mechanics of Composite Mate-rials*, 42(2), 109-118 (2006).
- [3] Rousakis T., (2001). “Experimental Investigation of Concrete Cylinders Confined by Carbon FRP Sheets, under Monotonic and Cyclic Axial Compressive Load.” Research report. Laboratory of Reinforced Concrete, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Demokritus University of Thrace, Greece and Division for Building Technology, Chalmers University of Tech-nology, Göteborg, Sweden (2001).
- [4] L. Lam, J.G. Teng, C.H. Cheung and Y. Xiao, “FRP-confined concrete under axial cyclic compression”, *Cement & Concrete Composites*, 28, 949-958 (2006).
- [5] J.F. Berthet, E. Ferrier and P. Hamelin, “Compressive be-havior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study”, *Construction and Building Materials*, 19, 223-232 (2005).
- [6] S. Pessiki, K.A. Harries, J.T. Kestner, R. Sause and J.M. Ricles, “Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 5 (4), 237-245 (2001).
- [7] V. Dias da Silva and J.M.C. Santos, “Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composi-tes”, In: J. Figueiras, L. Juvandes, R. Faria, A.T. Marques, A. Ferreira, J. Barros, J. Appleton, Eds. *Composites in Constructions, Proceedings of the International Confe-rence*, Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 257-262 (2001).
- [8] M. Shahawy, A. Mirmiran and T. Beitelman, “Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns”, *Composites: Part B*, 31, 471-480 (2000).
- [9] Y. Xiao and H. Wu, “Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets”, *Journal of Materials for Civil Engineering, ASCE*, 12(2), 139-146 (2000).
- [10] P. Rochette and P. Labossiere, “Axial testing of rec-tangular column models confined with composites”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 4(3), 129-136 (2000).
- [11] S. Kshirsagar, R.A. Lopez-Anido and R.K. Gupta, “Envi-ronmental aging of fiber-reinforced polymer-wrapped concrete cylinders”, *ACI Materials Journal*, 97(6), 703-712 (2000).
- [12] S. Matthys, L. Taerwe and K. Audenaert, “Tests on axial-ly loaded concrete columns confined by fiber rein-forced polymer sheet wrapping”, In: C.W. Dolan, S.H. Rizkalla and S.H. Nanni, Eds. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188, Farmington, Michigan, USA: American Concrete Institute, 217-229 (1999).
- [13] H. Toutanji, “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber com-posite sheets”, *ACI Materials Journal*, 96(3), 397-404 (1999).
- [14] S. Kono, M. Inazumi and T. Kaku, “Evaluation of con-fining effects of CFRP sheets on reinforced concrete members”, *Proceedings of the 2nd International Confe-rence on Composites in Infrastructure ICCI'98*, Tucson, Arizona, 343-355 (1998).
- [15] I. Imran, “Applications of nonassociated plasticity in modeling the mechanical response of concrete”, *PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of To-ronto*, (1994).
- [16] V.K. Papanikolaou and A.J. Kappos, “Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression”, *Int. J. of Solids and Structures*, 44, 7021-7048 (2007).
- [17] P. Grassl, K. Lungren and K. Gylltoft, “Concrete in com-pression: a plasticity theory with a novel hardening law”, *Int. J. of Solids and Structures*, 39, 5205-5223 (2002).
- [18] D. Sfer, I. Carol, R. Gettu and G. Etse, “Study of the beha-vior of concrete under triaxial compression”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 128(2), 156-163 (2002).
- [19] M.D. Kotsovos and J.B. Newman, “Mathematical desc-ription of deformational behavior of concrete under generalized stress beyond ultimate strength.” *Journal of the American Concrete Institute—ACI*, 77(5), 340–346 (1980).

III. Ar kompozītmateriāliem pastiprināto būvkonstrukciju plaisu rašanās un attīstības modelis

Ievads

Betons ir trausls materiāls ar zemu stiepes stiprību. Betona nelineāro deformēšanos un betona konstrukciju sabrukumu izraisa plaisu rašanās un izplatīšanās. Plaisu izplatīšanās mehānisma analīze sarežģītas ģeometrijas un nevienmērīgas slogošanas gadījumā ir svarīga, lai varētu prognozēt betona konstrukciju nestspēju.

Plaisu izplatīšanās analīzei bieži tiek izmantotas skaitliskā metodes kā, piemēram, galīgo elementu metode (GEM). Ļoti populāri ir kohezīvo plaisu modeļi. Šādā modeli makroplaisa tiek ieviesta GEM, izmantojot kohezīvos interfeisa elementus (KIE). Šajā metodē tiek izmantota samērā komplicēta galīgo elementu režģa pārveidošanas procedūra, kura pastāvīgi maina režģi plaišai izplatoties [1-3]. Ja plaisas izplatīšanās ceļš nav iepriekš zināms, tad ir nepieciešams kāds plaisas pieaugšanas kritērijs, kas noteiktu kad un kura virzienā plaisa izplatīsies. Tas parasti ietver sevī sprieguma intensitātes koeficienta (SIK) aprēķinu plaisas galā. SIK aprēķina precizitāti nosaka režģa izmērs plaisas galā, vai, lai panāktu augstu precizitāti, ir jāizmanto tā saucamie singulārie elementi. Tas viss būtiski sarežģī režģa pārveidošanas procedūru. Ar modeļiem, kas izmanto režģa pārveidošanu, ir ārkārtīgi grūti modelēt plaisu sistēmu izplatīšanos, tāpēc šie modeļi pamatā tiek izmantoti, lai modelētu vienas vai dažu plaisu izplatīšanos.

Pēdējos gados plaisu izplatīšanās modelēšanai tiek izmantota paplašinātā galīgo elementu metode (PGEM) [4, 5]. PGEM ievieš pārtraukumus tieši galīgajos elementos. Plaisas izplatīšanās notiek neatkarīgi no galīgo elementu izveidojuma, tāpēc režģa pārveidošanas procedūra nav nepieciešama. PGEM metodei ir nepieciešams, lai plaisas galos būtu maza izmēra režģis kā tradicionālai GEM, kas ar augstu precizitāti ļautu aprēķināt SIK, jo SIK tiek izmantots plaisas pieauguma kritērijam. Tas nozīmē, ka gadījumā, ja plaisas izplatīšanās ceļi iepriekš nav zināmi, ir nepieciešams maza izmēra sākotnējais galīgo elementu režģis, kas būtiski palielina skaitliskajiem aprēķiniem nepieciešamos resursus.

Lielākoties skaitliskie plaisu izplatīšanās modeļi ir ieviesti, izmantojot pašu modeļu autoru radītas specializētas datorprogrammas, kuras praksē būtu grūti izmantot. Universālās komerciālas GEM datorprogrammas (ABAQUS, ANSYS) nav spējīgas modelēt komplicētu plaisu izplatīšanos bez lietotāja veiktām izmaiņām.

Aktivitātes mērķis

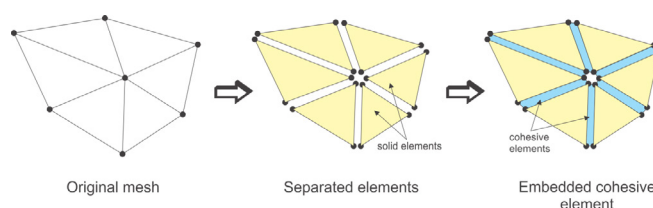
Šīs aktivitātes mērķis ir izstrādāt praktisku GEM modeli, kas ļautu modelēt sarežģītu plaisu izplatīšanos tādos trauslos materiālos kā, piemēram, betons. Modelis izmantos

ABAQUS datorprogrammā atrodamos KIE. Tiks izstrādāts efektīvs algoritms, kas ievieš KIE galīgo elementu režģi, kurš iegūts, izmantojot ABAQUS režģa ģeneratoru.

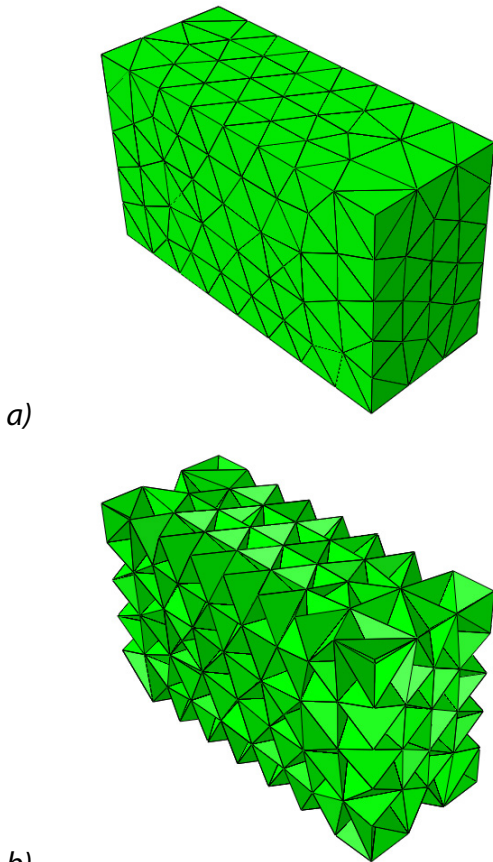
Modeļa apraksts

Lai modelētu stohastisko plaisu augšanas procesu, kohezīvie elementi tiek ieviesti starp katriem diviem parastajiem galīgajiem elementiem. Lielākās grūtības sagādā galīgo elementu režģa ģenerācija, jo komerciālajās GEM paketēs nav iespējas automātiski ģenerēt šāda tipa režģi. Komerciālā GEM pakete ABAQUS tiek izmantota, lai ģenerētu sākotnējo galīgo elementu režģi, kurš tiks modificēts, izmantojot aktivitātes ietvarā izstrādātu speciālu datorprogrammu. Metodes algoritms sastāv no šādiem soļiem:

- 1) Sākotnējā galīgo elementu režģa ģenerācija, izmantojot ABAQUS/CAE.
- 2) Iegūtā modeļa izvads teksta failā (INP formāts).
- 3) INP faila ielasišanās *Perl* skriptā un sākotnējā režģa modificēšana (att. 1.):
 - a. katrs divu blakus esošu normālo elementu kopējais mezglu punkts tiek dubultots. Atsevišķs mezglu punkts tiek definēts katram elementam tajā pašā vietā.
 - b. galīgo elementu definīcija tiek modificēta, izmantojot jaunus mezglu punktus, lai elementi vairs nebūtu saistīti savā starpā.
 - c. KIE tiek ieviesti starp katriem diviem blakus esošiem elementiem, savienojot tos kopā.
- 4) Modificētā INP faila ģenerācija un ielasišana ABAQUS/CAE. Modificētā režģa piemērs ir parādīts att. 2.
- 5) Uzdevuma risinājums, izmantojot *standart* vai *explicit* solveri.

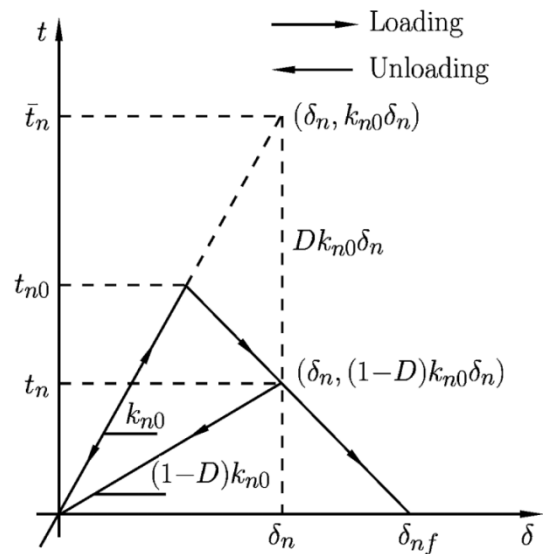


Att. 1. KIE ieviešana esošā galīgo elementu režģī



a) *sākotnējais galīgo elementu režģis, b) KIE, kas ieviesti starp parastajiem galīgajiem elementiem*

Kohezīvajā plaisu modeli pieņem, ka reālās plaisas galā eksistē procesa zona, kurā norisinās enerģijas dispācija plaisāšanas rezultātā. Procesa zonā uz plaisas virsmām darbojas normālie spriegumi t_n un bīdes spriegumi t_s . Att. 3. ir parādīta sakarība starp normālajiem spriegumiem t_n un plaisas atvērumu δ_n . Tāda pati sakarība tiek definēta starp bīdes spriegumiem t_s un plaisas virsmas punktu nobīdi δ_s . KIE īpašības tiek definētas, izmantojot šo sakarību. Lai modelētu sākotnējo, nesaplaisājošo materiālu, tiek pieņemta lineāra sakarība starp spriegumiem un pārvietojumiem. Kad rodas un sāk izplatīties plaisa, spriegumi sāk lineāri samazināties. Sākotnējam stiepes stingumam (k_{n0}) un bīdes stingumam (k_{s0}) ir jābūt pietiekami augstam, lai reprezentētu nesaplaisājušu materiālu, bet ne tik augstam, lai izraisītu konverģences problēmas. Šo parametru vērtības nosaka mēģinājumu un kļūdu ceļā. Laukums G_c , ko ierobežo likne att. 3., ir vienāds ar enerģijas atbrīvošanās ātrumu plaisai izplatoties, kas ir materiālu raksturojošs lielums.



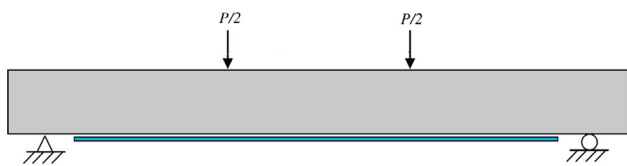
Att. 3. *Sakarība starp spriegumu un plaisas atvērumu, kas tiek izmantota kohezīvo elementu īpašību definīcijai*

Ar kompozītmateriāliem pastiprinātas betona sijas plaisāšanas modelēšana

Piestiprinot šķiedru kompozīta loksnes sijas stieptajā zonā, var ievērojami uzlabot sijas lieces stiprību (att. 4.). Pastiprinātas sijas plaisāšanas pētīšanai tiks izmantota četru punktu lieces sloģošana, kas parādīta att. 5. Šādi pastiprināta sija sabrūk pastiprinājuma atslāņošanās rezultātā, kuru nosaka kompozīta/betona interfeisa bīdes stiprība S . Tika analizētas 6 dažādas parametru konfigurācijas, kas atšķirās ar dažādām S un betona G_c vērtībām. Šīs konfigurācijas ir uzskatītas tab. 1.



Att. 4. *Tilta pastiprināšana, izmantojot kompozīta loksnes*

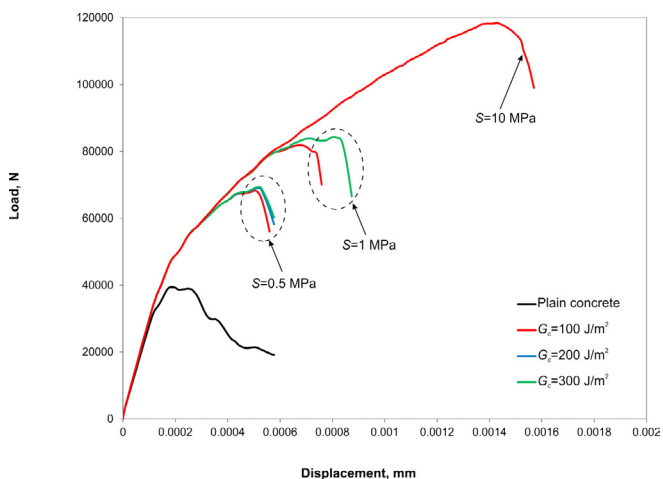


Att. 5. Četrpunktu liece

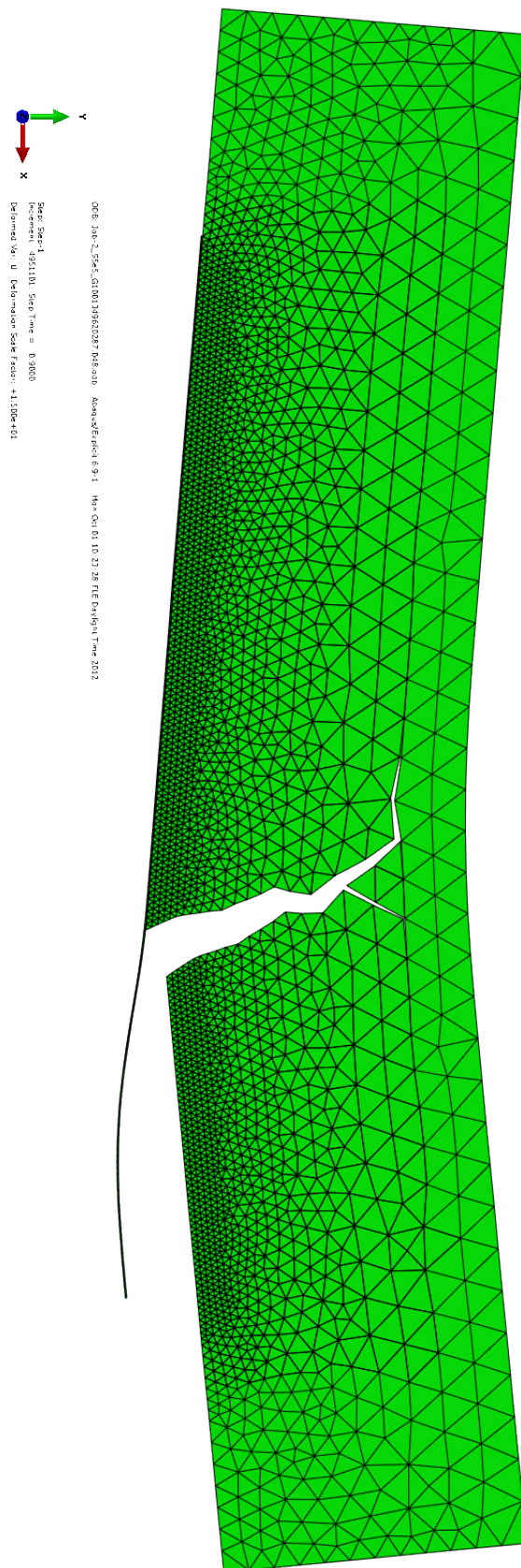
Tab. 1. Modelēšanā izmantotie parametri.

Konfigurācijas Nr.	S, MPa	G_c , J/m ²
1	0.5	100
2	0.5	200
3	0.5	300
4	1	100
5	1	300
6	10	100

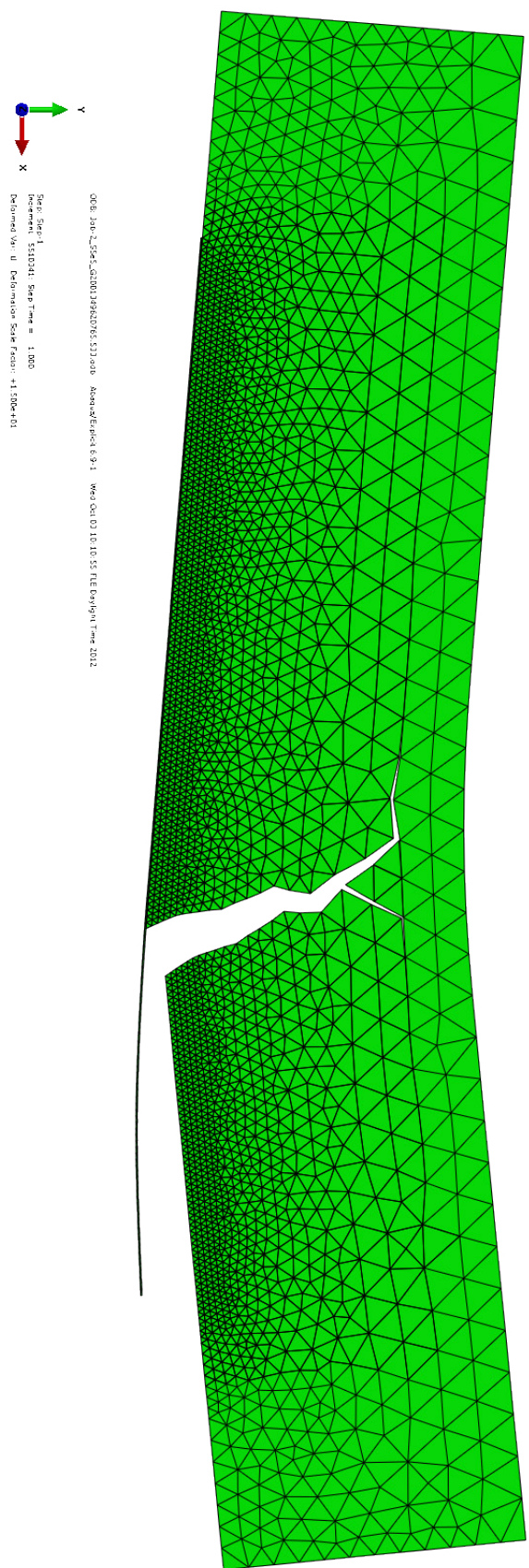
legūtās slodze-izliece liknes ir parādītas att. 6. Redzams, ka G_c minimāli ietekmē maksimālo slodzi. Palielinot kompozīta/betona interfeisa bīdes stiprību, būtiski pieaug maksimālā slodze. Plaisu izvietojums visām konfigurācijām ir parādīts att. 7–12. 1., 2., 4., 5. un 6. konfigurācijas gadījumā ir izveidojusies viena makroplaisa un notikusi pilnīga pastiprinājuma atslāņošanās. 6. konfigurācijas gadījumā novērojams, ka kompozīta/betona interfeiss ir nebojāts, bet pastiprinājuma atrauto daļu klāj betona slānis. Tas nozīmē, ka pie augstām S vērtībām atslāņošanās nosaka betona īpašības. 3. konfigurācijas gadījumā novērojamas trīs makroplaisas un neliela pastiprinājuma atslāņošanās.



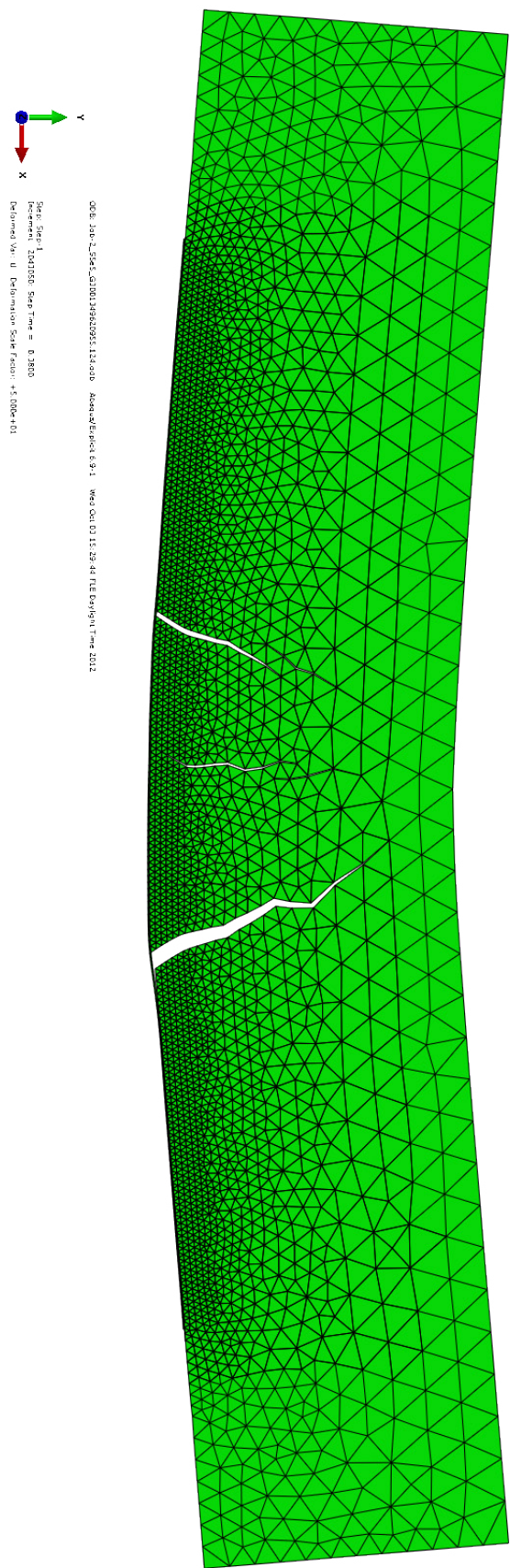
Att. 6. Visu konfigurāciju slodze-izliece liknes



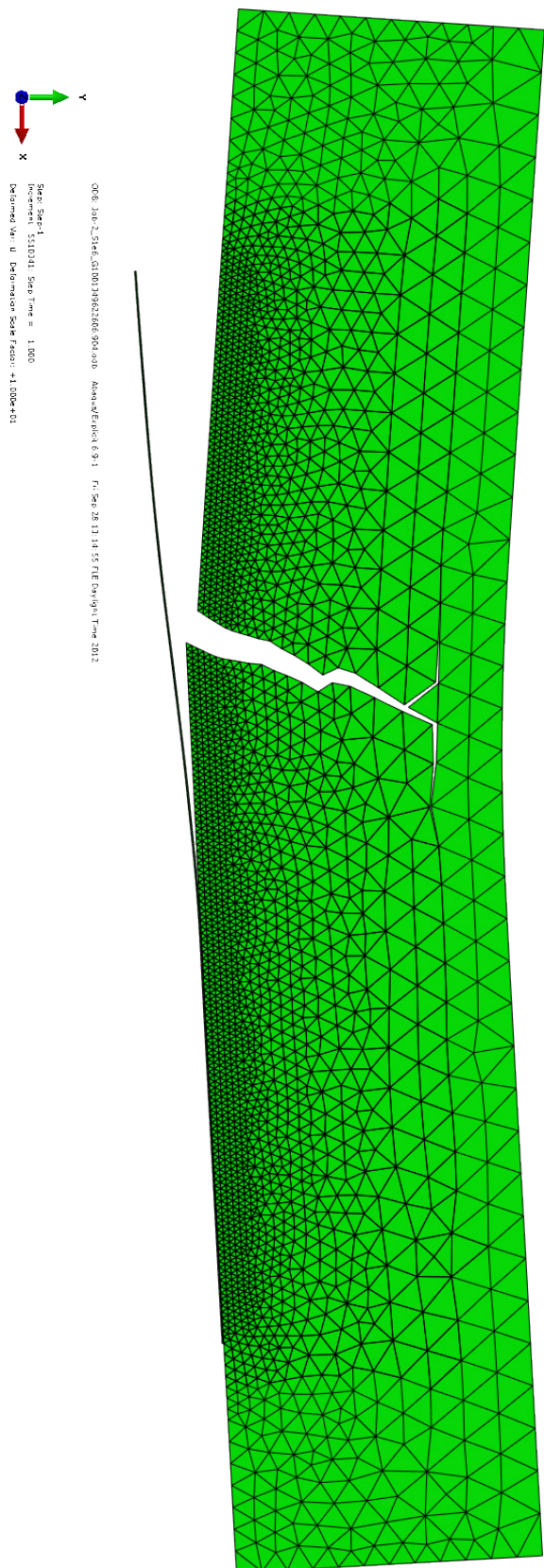
Att. 7. Plaisu izvietojums 1. konfigurācijā



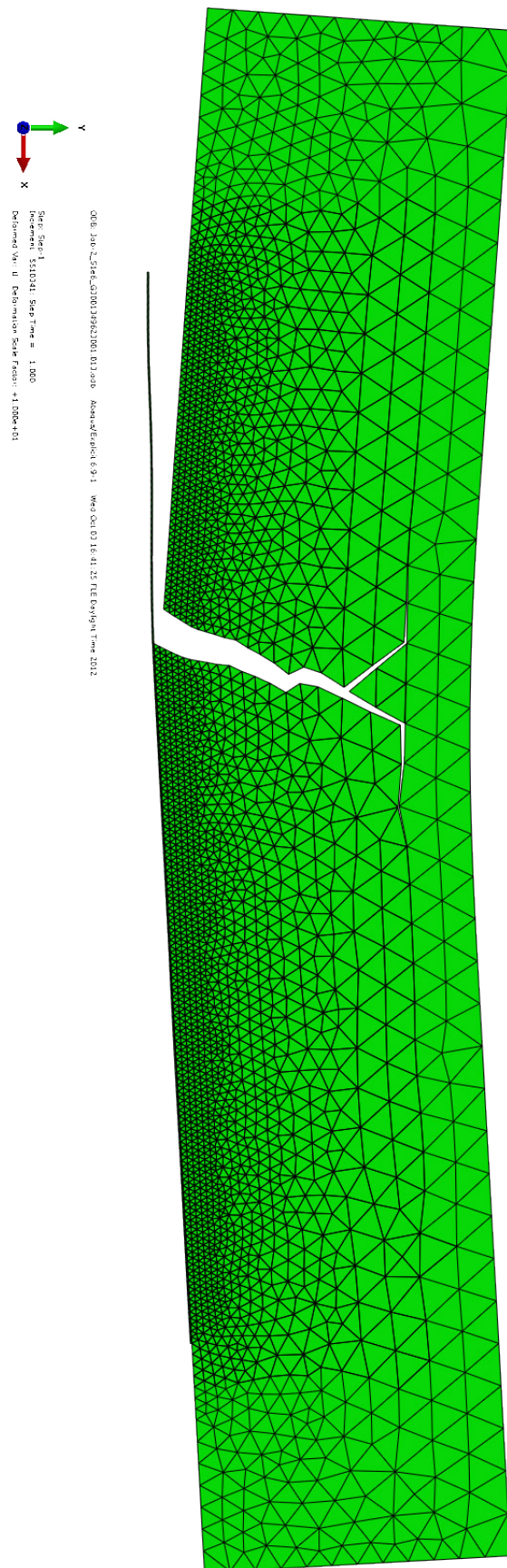
Att. 8. Plaisu izvietojums 2. konfigurācijā



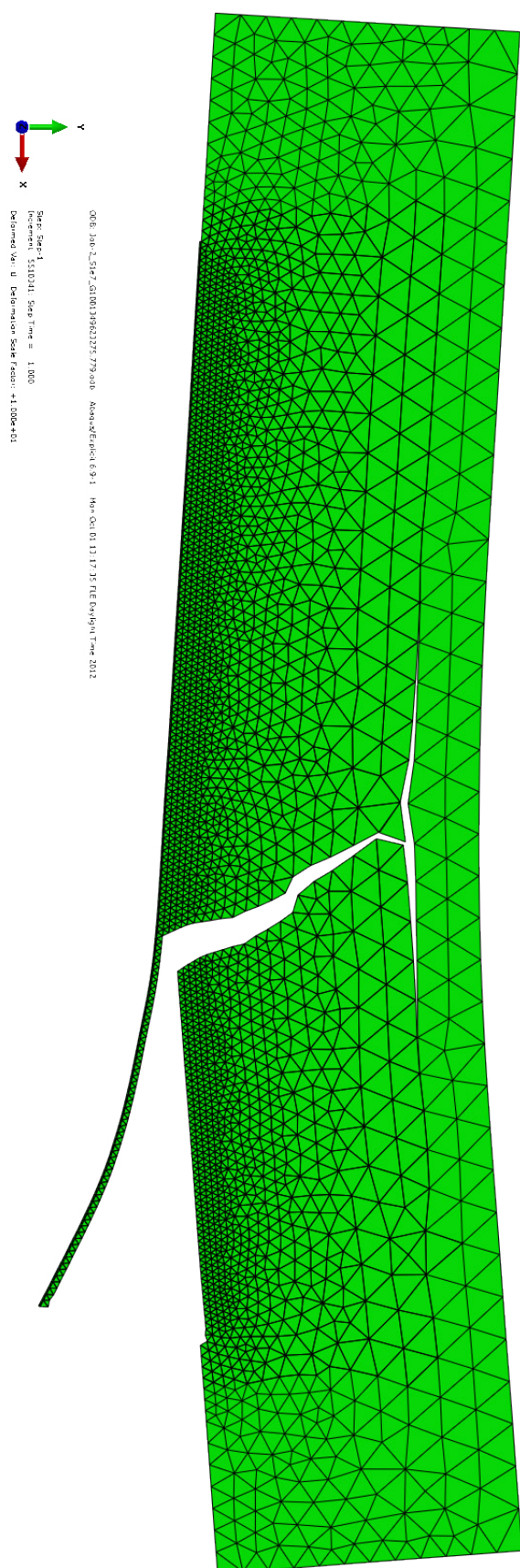
Att. 9. Plaisu izvietojums 3. konfigurācijā



Att. 10. Plaisu izvietojums 4. konfigurācijā



Att. 11. Plaisu izvietojums 5. konfigurācijā



Att. 12. Plaisu izvietojums 6. konfigurācijā

Kopsavilkums

Šīs aktivitātes ietvarā izstrādāts vienkāršs un efektīvs plaisu izplatīšanās skaitliskais modelis, kas izmanto komerciālās galīgo elementu paketes ABAQUS piedāvātos kohezīvos interfeisa elementus. Modelis izmanto algoritmu, kas ievieto kohezīvos elementus sākotnējā galīgo elementu režģī. Izstrādātais modelis spēj paredzēt plaisu sistēmas rašanos un izplatīšanos ar kompozītmateriāliem pastiprinātos betona konstrukciju elementos. Tas tika demonstrēts, modelējot pastiprinātas betona sijas deformēšanos četrpunktu liecē. Piedāvātais modelis spēj prognozēt arī pastiprinājuma atslāņošanos.

Atsauces

1. Wawrzynek, P.A. and A.R. Ingraffea, *An interactive approach to local remeshing around a propagating crack*. Finite Elements in Analysis and Design, 1989. **5**(1): p. 87-96.
2. Yang, Z. and J. Chen, *Fully automatic modelling of cohesive discrete crack propagation in concrete beams using local arc-length methods*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(3-4): p. 801-826.
3. Yang, Z. and X. Frank Xu, *A heterogeneous cohesive model for quasi-brittle materials considering spatially varying random fracture properties*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008. **197**(45-48): p. 4027-4039.
4. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
5. Areias, P.M.A. and T. Belytschko, *Analysis of three-dimensional crack initiation and propagation using the extended finite element method*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005. **63**(5): p. 760-788.

2. projekta aktivitāte

Celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu izpēte

2.aktivitātes ietvaros izstrādātā metodika un datu kopas

I. Sistematizēta datu kopa par celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu mehāniskajām īpašībām

Ievads

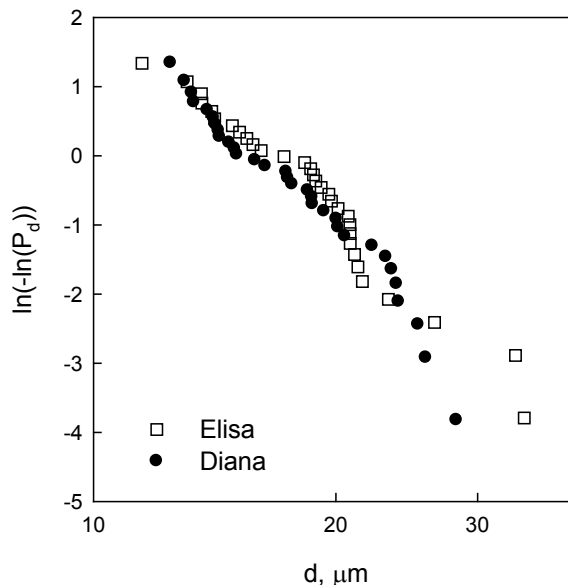
2. aktivitātes „Celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu izpēte” rezultātu „Sistematizēta datu kopa par celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu mehāniskajām īpašībām” atspoguļojošajā atskaitē apkopoti projekta laikā iegūtie eksperimentālie rezultāti. Vispirms, izmantojot vienas šķiedras stiepes pārbaudes, tika raksturotas līnu šķiedras. Iegūtie rezultāti ietver šķiedru moduli, maksimālo deformāciju, kā arī stiprības un diametru sadalījumus. Tad ar starpvirsmu bīdes stiprību tika raksturota arī līnu šķiedru un polimēru adhēzija. Pētītie matricas materiāli bija VE, dabīgas izcelsmes polimērs Tribest, kā arī tīrs un modificēts PP. Visbeidzot tika pētītas arī līnu šķiedru kompozītmateriālu mehāniskās īpašības. Tribest un VE kompozītiem tika pētīts stiprības mēroga efekts. Izvēsta eksperimentālā programma līnu šķiedru / epoksīda matricas preprega kompozītam ļāva eksperimentāli noteikt visas tā stinguma un stiprības konstantes plaknē.

Šķiedras

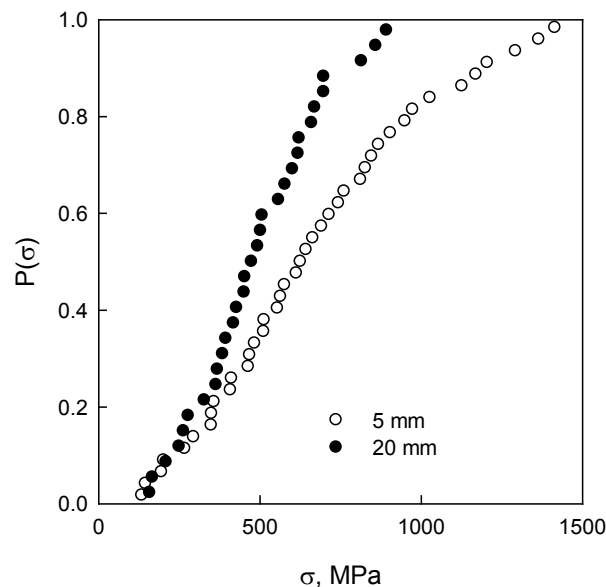
Stiepes pārbaudes tika veiktas 5 mm un 20 mm garām Diana šķirnes līnu elementāršķiedrām, kuras tika apstrādātas līnu priekšapstrādes cehā Preiļos. Tās ir audzētas Latvijā, Krāslavas rajonā. Šķiedras ir mērcētas un mehāniski atdalītas no stiebra.

Stiprības pārbaudes tika veiktas saskaņā ar ASTM D 3379-75 standartu. Pēc manuālas atdalīšanas no tehniskajām šķiedrām, nepieciešamā garuma elementāršķiedras tika uzlīmētas uz papīra rāmīša. Pēc tam paraugi tika apstrādāti, pieskaroties tikai papīra rāmītim. Pēc galu iestiprināšanas pārbaudes iekārtā, abas rāmīša pusēs vidū tika uzmanīgi pārgrieztas. Stiepes pārbaudes tika veiktas izmantojot Zwick elektromehānisko slogošanas iekārtu, kas aprīkota ar mehāniskiem paraugu turētājiem (žokļiem). Pārbaudes tika veiktas pārvietojuma kontroles režīmā, slogošanas ātrums – 10 %/min. Šķiedras tika stieptas līdz sagrūšanai.

Spriegums šķiedrā tika aprēķināts, izmantojot vidējo šķiedras diametru, kas noteikts no desmit mērījumiem visā šķiedras garumā (mērījumi veikti ar optisko mikroskopu), pieņemot, ka šķiedras šķērsgriezums ir aplis. Diametru sadalījums 20 mm garām Elisa un Diana šķirņu elementāršķiedrām ir parādīts attēlā 1.1 [1]. Empīriskais stiprības sadalījums Elisa šķiedrām ir parādīts attēlā 1.2 un Diana šķiedrām – attēlā 1.3.



Attēls 1.1. Diametru sadalījums elementāršķiedrām Elisa un Diana



Attēls 1.2. Stiprības sadalījums līnu elementāršķiedrām Elisa

Šķiedru deformācija tika iegūta, izmantojot pārbaudes iekārtas pārvietojumu, tādēļ tika nomērīta un ņemta vērā arī sistēmas compliance. Vadoties pēc standartā aprakstītās procedūras, tika veikta stiepes pārbaude stikla šķiedrai un tika noteikts, ka sistēmas compliance eksperimentālai sistēmai ir 0.046 mm/N.

Vairākām Diana tipa šķiedrām ar garumu $L = 5$ mm tika skaitītas nodas, izmantojot Olympus BX51 mikroskopu ar krustotiem polarizatoriem. Attālums starp nodām katrai

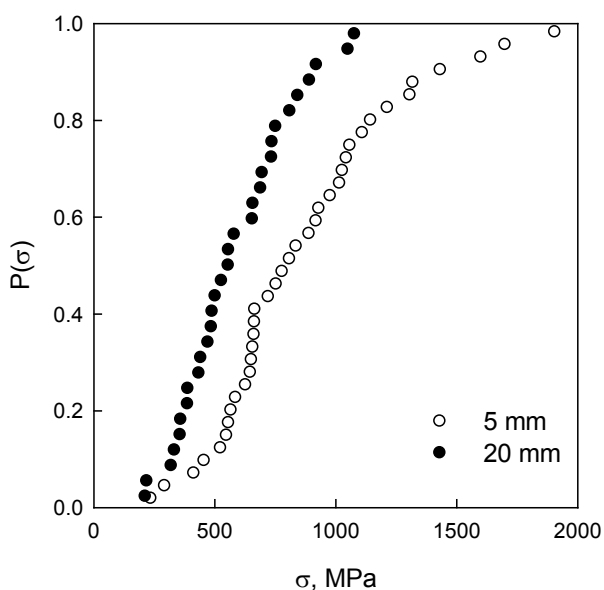
šķiedrai tika rēķināts kā $s = L/k$, kur k ir nodu skaits attiecīgajā šķiedrā. Empīriskais sadalījums attālumam starp nodām s parādīts attēlā 1.4.

Elastības modulis E šķiedrām tika noteikts, lineāri aproksimējot sprieguma – deformāciju līknes posmu pie relatīvi augstām deformācijām, intervālā, kas nepārsniedz 1% [2]. Šķiedru deformācija stiepē tika raksturota kā lineāras un nelineāras komponentes superpozīcija. Nelineārā deformācija ε_n tiek aprēķināta kā

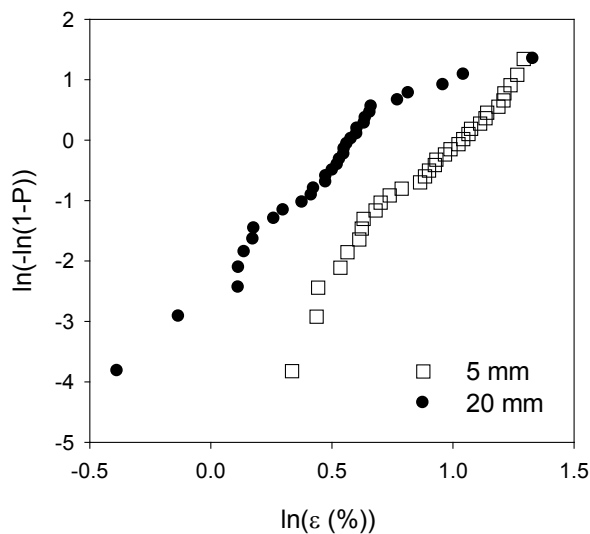
$\varepsilon_n = \varepsilon - \sigma/E$, kur e ir maksimālā deformācija, σ – šķiedras stiprība un E – Junga modulis. Mazāk nekā 20% gadījumu minētā aprēķinu metode deva negatīvas ε_n vērtības (parasti nelielas). Šādos gadījumos tika pieņemts, ka $\varepsilon_n = 0$. Šķiedru moduļa un nelineārās deformācijas vidējās vērtības abiem šķiedru veidiem un katram parauga garumam ir dotas Tabulā 1.1 (iekavās norādītas standartnovirzes), un maksimālo deformāciju sadalījums ir parādīts attēlā 1.5.

Tabula 1.1 Vidējās vērtības (un standartnovirzes) dažāda garuma elementāršķiedru Diana raksturlielumiem

Šķiedras garums L , mm	Pārbaužu skaits	Stiprība σ , MPa	Maksimālā deformācija ε , %	Junga modulis E , GPa	Nelineārā deformācija ε_n , %
5	33	880 (405)	2.53 (0.65)	39 (12)	0.58 (0.40)
20	32	611 (264)	1.71 (0.59)	41 (14)	0.25 (0.31)



Attēls 1.3. Stiprības sadalījums linu elementāršķiedrām Diana



Attēls 1.5. Maksimālās deformācijas sadalījums Diana tipa elementāršķiedrām diviem paraugu garumiem, attēlots Veibula koordinātēs

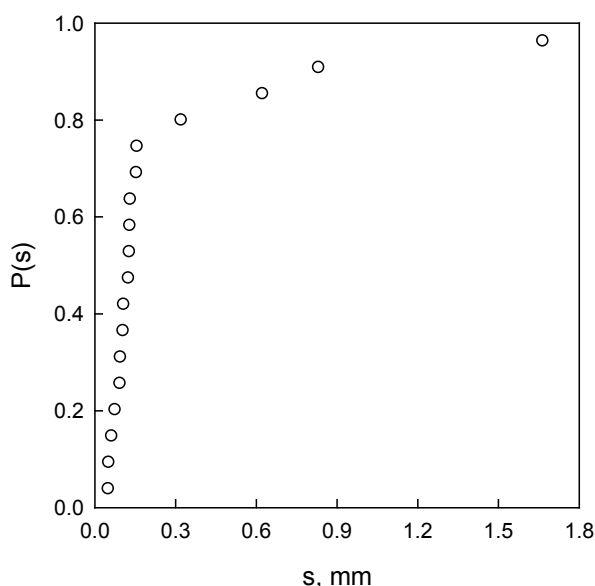


Fig. 1.4. Nodu attālumumu sadalījums elementāršķiedrām Diana

Robežvirsmā

Lini (FinFlax, kūļi)/VE

Šajā darba daļā izmantotās linu šķiedras ir iegūtas no Ziemeļsomijā audzētiem līniem. Tirdzniecībā šīs šķiedras ir pieejamas ar nosaukumu ArcticFlax. Šķiedru piegādātājs ir FinFlax Oy (Kiiminki, Somija). Linu šķiedrām ir augsta kvalitāte, un tās uzrāda labas mehāniskās īpašības. Tām nav daudz nodu, jo atdalīšana no stiebra nenotiek tikai mehāniskās apstrādes procesā. Atšķirībā no parastās mērcēšanas un tālākās mehāniskās apstrādes, šķiedras tiek atšķeltas no stiebra, izmantojot enzīmus un mikrobioloģiskas kultūras. Šāda atdalīšanas metode linu pirmapstrādes procesā ne

tikai ļauj saglabāt augstākas šķiedru mehāniskās īpašības, bet arī nodrošina vienmērīgāku šķiedru kvalitāti nekā tradicionāli iegūtām līnu šķiedrām. Stiegrojums tika piegādāts viegli savērtu kūļu veidā.

Šķiedru kūļu impregnēšanai tika izmantoti vinilestera sveķi (Derakane 8090, Dow Chemicals). Paraugu gatavošana notika četros soļos: 1) kūļu impregnēšana, izmantojot RTM (resin transfer molding) procesu; 2) impregnēto kūļu pēccietināšana (postcuring) 5 stundas 80 °C temperatūrā; 3) parauga galu veidošana; 4) paraugu galu pēccietināšana, 5 stundas pie 80 °C. Šādi izgatavoto cilindrisko paraugu izmēri bija sekojoši: kūļa garums ≈ 250 mm (ar parauga galiem); kūļa diametrs darba daļā 3.5 mm; parauga galu garums (paralēlā un konusveida daļas kopā) ≈ 70 mm; paraugu galu diametrs (paralēlajā zonā) ≈ 8 mm.

Cilindriskie (darba daļas garums ~110 mm) FinFlax/VE kompozīta paraugi tika slogoti stiepē līdz sabrukšanai. Pārbaudes tika veiktas ar Zwick/Roell elektromehānisko slogošanas mašīnu (maksimālā slodze 2.5 kN) pārvietojuma kontroles režīmā ar ātrumu 2 mm/min. Stiepes pārbaudēs tika iegūtas materiāla sprieguma-deformācijas liknes. Paraugu plīsuma virsmas tika pētītas, izmantojot skenējošo elektronu mikroskopu (SEM) Jeol T300 un Olympus BX51 optisko mikroskopu.

Izrauto elementāršķiedru diametrs un garums tika mērīts, izmantojot optisko mikroskopu 50x–100x palielinājuma diapazonā, ar precizitāti ±0.5 μm. Katram no četriem pārbaudītajiem impregnēto šķiedru kūļiem 11 līdz 13 elementāršķiedrām tika nomērīts šķiedras diametrs un izrautās daļas garums. Vidējās šķiedru izmēru (t.i. garuma un diametra) attiecības paraugos bija ļoti tuvas (23,9 – 25,8), tādēļ izrauto šķiedru mērījumu dati visiem paraugiem tika analizēti kopā. Mazākā noteiktā izmēru attiecība ir apmēram 12, un vidējā izmēru attiecība = 24.8. Mazāku izmēru attiecību trūkums, visticamāk, saistīts ar ierobežoto optiskā mikroskopa asuma dziļumu. Īsākajās izrautās šķiedras parasti ir izkārtotas kūļos, kas apgrūtina precīzu to garumu mērījumu veikšanu. Arī kompozīta plīsuma virsmas nelīdzenumi apgrūtina īso izrauto šķiedru mērījumus.

Izmantojot vidējo diametru $d = 11.3 \mu\text{m}$, eksperimentāli noteikto $\langle \lambda \rangle$ un λ_{min} , tika iegūta starpvirsmu bīdes stiprības (IFSS) vērtība 16.8 MPa [3].

Lini (FinFlax, neausts audums)/VE un Tribest

Neausts lina audums (t.i., audums ar taisniem šķiedru kūļiem) no Engtex (Zviedrija), kas gatavots no nebalinātas 570 tex 58 t/m auklas, tika izmantots kā stiegrojums dabiskas izcelsmes un uz naftas bāzes gatavotiem sveķiem. Kā dabiskas izcelsmes matrica tika lietoti no sojas eļļas iegūtie sveķi Tribest S350-01EXP no Cognis. Tradicionālo polimēru matrica bija vinilestera sveķi Dion 9192 no Reichhold.

Kompozīta lamināts tika izgatavots uz metāliska ar ūdeņi uzkaršējama galda, izmantojot vakuuma piesūcināšanas tehniku. Trīs orientēti lina auduma slāņi tika izkārtoti viens uz otra un piesūcināti ar attiecīgajiem sveķiem, izmantojot

vakuuma maisu. VE gadījumā tika veikta cietināšana istabas temperatūrā un 2 stundu ilga pēccietināšana 50 °C temperatūrā. Tribest lamināts tika atstāts cietēt uz nakti 80 °C pie 250 mbar vakuuma spiediena.

No kompozītmateriālu plāksnēm šķiedru virzienā tika izgriezti 5 mm plati taisnstūra formas paraugi ar 25 mm garu darba daļu. Kompozīta paraugi tika pārbaudīti, slogojot stiepē pārvietojuma kontroles režīmā līdz sagrūšanai. Tika izmantoti divi slogošanas ātrumi, 1,33 %/min un 8 %/min. Pārbaudes tika veiktas, izmantojot Zwick/Roell elektromehānisko pārbaudes iekārtu (maksimālā slodze 2.5 kN). Stiprības aprēķinos izmantotās parauga šķēsgriezuma laukuma vērtības tika noteiktas, izmantojot vidējo katra parauga platumu un vidējo kompozīta plāksnes biezumu. Stiepes stiprības vērtības ir apkopotas tabulā 2.1 [4].

Sabrukšanas virsmas tika pētītas skenējošajā elektronu mikroskopā un optiskajā mikroskopā. SEM attēlos abu matricu kompozītiem ir redzama līdzīga sabrukšanas virsmas morfoloģija, kas liecina par salīdzināmu adhēzijas līmeni.

Izrauto elementāršķiedru diametrs un garums tika mērīts, izmantojot optisko mikroskopu 50x–100x palielinājuma diapazonā. Izrauto šķiedru mērījumu dati no dažādiem paraugiem ar to pašu matricu un slogošanas ātrumu tika apstrādāti kopīgi. Vidējās un minimālās izrauto šķiedru izmēru attiecības vērtības, kā arī vidējais šķiedras diametrs katrai matricas un slogošanas ātruma kombinācijai ir atspoguļoti tabulā 2.1.

Tabulā 2.2 apkopotas starpvirsmu bīdes stiprības vērtības, kas iegūtas, izmantojot iepriekš minētos datus un divas alternatīvas pieejas šķiedru stiepes stiprības modificētā Veibula sadalījuma parametru noteikšanai, šķiedru fragmentācijas pārbaudes un šķiedru stiprības pārbaudes.

Tabula 2.1. Līnu/VE un līnu/Tribest kompozītu stiepes stiprība un ģeometriskie raksturlielumi no sabrukšanas virsmas izrautajām šķiedrām

Matrica	VE		Tribest	
	8	1.33	8	1.33
Slogošanas ātrums, %/min	8	1.33	8	1.33
Vidējā stiepes stiprība (standartnovirze), MPa	174 (12)	166 (19)	159 (6.5)	150 (6.2)
Vidējā izrauto šķiedru izmēru attiecība $\langle \lambda \rangle$	18.7	19.8	16.9	21.2
Mazākā izrauto šķiedru izmēru attiecība λ_{min}	5.3	6.8	3.5	6.7
Vidējais izrauto šķiedru diametrs d , μm	17.8	16.9	17.5	17.7

Tabula 2.2 Starpvirsmu bīdes stiprība liniem/VE un liniem/Tribest

Matrica	VE		Tribest	
Slogošanas ātrums, %/min	8	1.33	8	1.33
IFSS, iegūts izmantojot šķiedru fragmentāciju, MPa	16.0	15.7	17.1	14.2
IFSS, iegūts izmantojot šķiedru stiepes pārbaudes rezultātus, MPa	15.1	14.8	16.1	13.3

Lini/PP

Īsu linšķiedru (FinFlax, Somija) kompozītos kā matrica tika izmantots polipropilēns (PP) Adstif 770 ADXP Basell un modificēts polipropilēns ar maleīnskābes anhidrīta piejaukumu, lai uzlabotu adhēziju (turpmāk apzīmēts ar PPM). Kompozīts tika izgatavots ar polimēra un linšķiedru ekstrūzijas metodi. Tika izgatavoti kompozīti ar 20%, 30% un 40% šķiedru masas daļu. Atbilstošā šķiedru tilpuma daļa tika izrēķināta, balstoties uz sastāvdaļu blīvumu.

Lai noteiktu šķiedru tilpuma daļas ietekmi uz starpvirsmu bīdes stiprības lielumu, tika pielietota Bowyer un Bader izstrādātā metode [5]. Iegūtās starpvirsmu bīdes stiprības un šķiedru orientācijas koeficienta vērtības dažādām šķiedru tilpuma daļām kompozītā apkopotas tabulā 2.3.

Tabula 2.3. Starpvirsmu bīdes stiprība vērtības un šķiedru orientācijas factors kā funkcija no šķiedru tilpuma daļas

Matrica	Šķiedru tilpuma daļa, %	Starpvirsmu bīdes stiprība, MPa	Šķiedru orientācijas koeficients
PP	0.13	4.6 (0.36)	0.27 (0.067)
	0.21	3.2 (0.32)	0.33 (0.069)
	0.29	3.3 (0.39)	0.24 (0.033)
PPM	0.13	6.9 (0.37)	0.23 (0.029)
	0.21	6.2 (0.55)	0.26 (0.041)
	0.29	5.3 (0.33)	0.25 (0.017)

Kompozīti

Lini (FinFlax, neausts audums)/VE un Tribest

Engtex ražotais FinFlax linšķiedru neaustais audums tika izmantots kā stiegrojums polimēru matricas kompozītā. Šis audums ir izgatavots no nebalinātas 570 tex, 58 t/m auklas, kura ir nedaudz savērpta, lai nodrošinātu impregnēšanu un optimāli izmantotu šķiedru mehāniskās īpašības garenvirzienā. Šķērsvirzienā linu šķiedru kūļi ir sašūti, izmantojot

16 tex poliestera diegu. Masas laukuma blīvums (t.i., laukuma vienības masa) audumam ir 230 g/m².

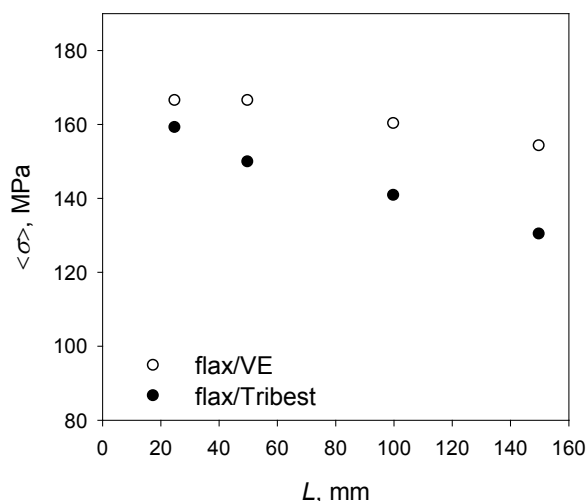
Tika izmantoti divu veidu sveķi: dabiskas izcelsmes un uz naftas bāzes gatavoti. Kā dabiskas izcelsmes matrica tika lietoti sojas eļļas pārstrādes rezultātā iegūti sveķi Tribest S350-01EXP no Cognis ar 2.25% cietinātāju Benox B 40 un 0.9% katalizatoru DMA9826. Kā naftas produktu izcelsmes matrica tika lietoti vinilestera (VE) sveķi, Dion 9102 no Reichhold ar 2% Norpol 24 cietinātāju un 0,1% NL51P katalizatoru.

Kompozīta lamināts tika gatavots, izmantojot vakuuma piesūcināšanas tehniku. Pēc laukuma vienības masas un plāksnes biezuma noteikšanas, zinot matricas un linu šķiedru blīvumu, tika aprēķināta šķiedru tilpuma daļa. Šķiedru tilpuma daļa linu/Tribest kompozītam bija 26%, bet linu/VE kompozītam – 23%.

No kompozīta plāksnēm šķiedru virzienā tika izgriezti taisnstūrveida paraugi. Šķiedras linu/Tribest plāksnē izrādījās nedaudz viļņainākas nekā linu/VE kompozītā. Tika izvēlētas sekojošas paraugu platuma vērtības: $w = 30, 20$ un 10 mm. Lai iegūtu līdzēnas virsmas, paraugu malas tika sliņpētas. Paraugu garums L tika variēts proporcionāli paraugu platumam: $L = 150, 100$ un 50 mm.

Linu/Tribest paraugi tika slogoti ar ātrumu 2 mm/min. Linu/VE paraugi tika slogoti ar konstantu deformācijas ātrumu 1.33%/min.

Stiprības aprēķinos izmantotās parauga šķērsriezuma laukuma vērtības tika aprēķinātas, izmantojot vidējo katra parauga platumu un vidējo attiecīgās kompozīta plāksnes biezumu. Stiprības atkarība no parauga garuma L linu/Tribest un linu/VE paraugiem ir parādīta attēlā 3.1 [6].



Attēls 3.1. Stiepes stiprības atkarība no parauga darba daļas garuma linu/Tribest un linu/VE kompozītam

Linu/epoksīda prepregi

Pētītais materiāls bija vienvirziena lina šķiedru un epoksīda sveķu matricas kompozīts [7]. Tas tika izgatavots no četriem vienā virzienā sakārtotiem vienvirziena prepreg materiāla slāņiem, kas ražots LINEO (Beļģija). Cietināšana tika veikta 120 °C temperatūrā pie 3 bāru spiediena, pieliecot arī vacuum-bag tehnoloģiju

No iegūtās materiāla plāksnes dažādos virzienos attiecībā pret šķiedru virzienu tika izgriezti taisnstūra formas paraugi, kuri vidējais platums bija 18 mm. Pavisam tika iegūti septiņu dažādu konfigurāciju paraugi: 04, 154, 304, 454, 604, 754 un 904. Paraugu malas tika pulētas, slodzei pakļautais parauga garums bija 100 mm.

Trīs paraugi no katras orientācijas tika slogoti stiepē līdz pat sagrūšanai ar mērķi noteikt to stiprību, Junga moduli un Puasona koeficientu. Slogošanas ātrums bija 1.5 mm/min. Ar atbilstošiem ekstensometriem tika mērītas paraugu deformācijas gan garenvirzienā, gan šķērsvirzienā.

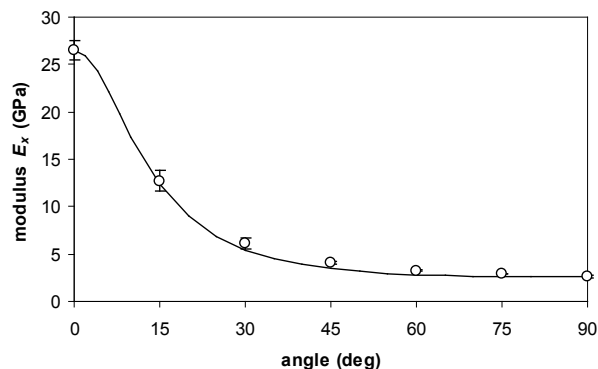
Sprieguma – deformācijas diagrammas pētītajam materiālam ir nelineāras pat šķiedru virzienā. Tādēļ Junga moduļa un Puasona koeficienta noteikšanai izmantots sākotnējais lineārais līknes apgabals 0.05–0.20%.

Aprēķinātās stinguma konstantes plaknē vienvirziena materiālam tabulā 3.1. Indekss 1 apzīmē šķiedru virzienu, bet indkss 2 – virzienu perpendikulāri šķiedrām. Gan Junga modulis, gan Puasona koeficients noteikti tieši, bet bīdes modulis – apksimējot dažādos leņķos nomērītos elastības moduljus ar teorētisko likni, skat. 3.2 attēlu.

Tabulā 3.1 doti arī stiprības dati. Analógiski, garenvirziena un šķērsvirziena stiprība noteikta tieši no attiecīgajiem testiem, kamēr slāņa bīdes stiprība – apksimējot visus eksperimentālos stiprības datus ar analītisku izteiksmi, skat. 3.3 attēlu.

Tabula 3.1. FlaxPreg UD180 vienvirziena kompozīta elastīgās īpašības un stiprības vērtības

E_1	26.5 (1.0) GPa
E_2	2.6 (0.2) GPa
ν_{12}	0.35 (0.03)
G_{12}	1.3 GPa
σ_1	283 (11) MPa
σ_2	16.4 (0.7) MPa
σ_{12}	14 Mpa



Attēls. 3.2 Junga moduļa atkarība no leņķa starp slogošanas un stiegrojuma virzieniem lina šķiedru vienvirziena kompozītam. Ar punktiem ir apzīmēti eksperimentālie dati

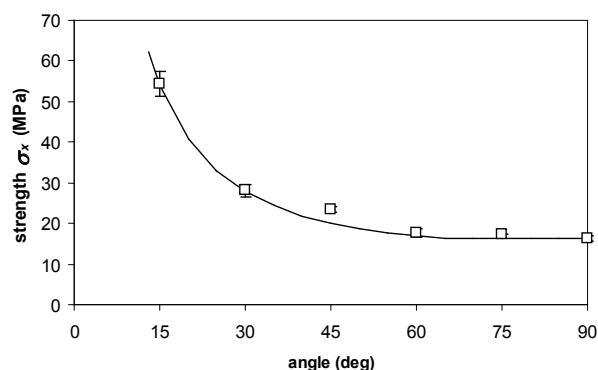
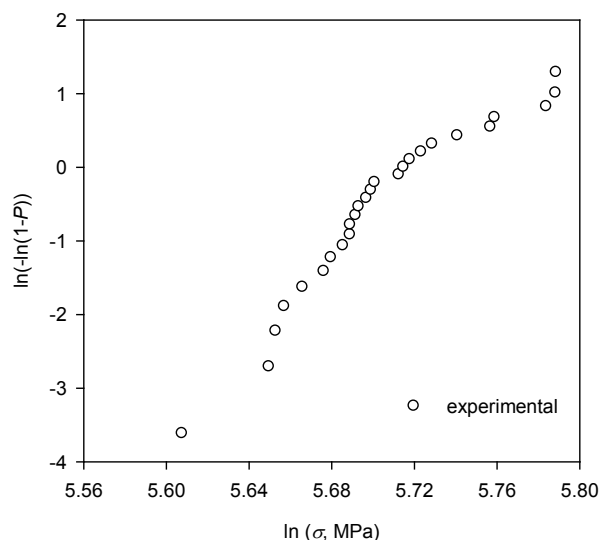


Fig. 3.3 Vienvirziena kompozīta stiprības atkarība no leņķa starp slogošanas un stiegrojuma virzieniem. Ar punktiem ir apzīmēti eksperimentālie dati

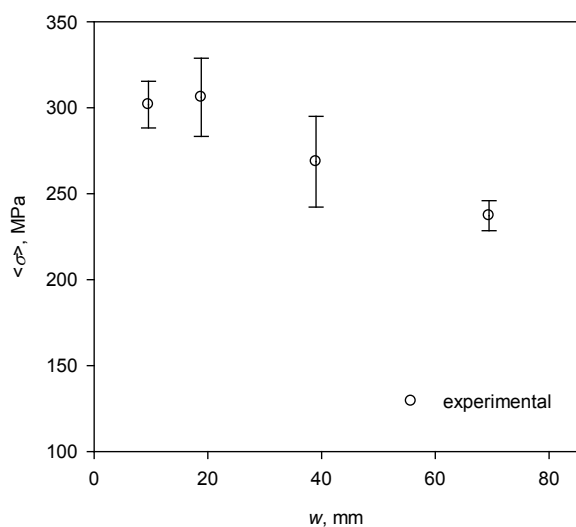
Tika pētīts stiepes stiprības mēroga efekts vienvirziena lina kompozītam. Kompozīta plāksne tika izgatavota no LINEO lina/epoksīdu preprega FLAXPLY® UD 150. Kompozīta plāksne tika izveidota no sešām vienvirziena prepreg kārtām, cietināšanu veicot termopresē 1 stundu ~1 atm spiedienā un 130 °C temperatūrā. Tika izgatavotas četras dažādu platumu paraugu grupas – w = 10, 20, 40 un 70 mm. Paraugus izgriezta paralēli šķiedru virzienam tā, lai to garuma un platumā attiecība būtu 5.

Paraugu galos tika uzliktas stiklaplasta plāksnes. Lai noteiktu stiprību, paraugi tika slogoti stiepē šķiedru virzienā pārvietojuma kontroles režīmā. Slogošanas ātrums tika mainīts atkarībā no parauga garuma tā, lai deformēšanās ātrums būtu 0.75 %/min. Stiprības aprēķināšanai tika izmantots spēks, pie kura paraugs sabruka, parauga platums un vidējais attiecīgās plāksnes biezums.

Eksperimenta rezultāti parādīti attēlos 3.4 un 3.5. Stiprības sadalījums fiksētā parauga izmēram redzams attēlā 3.4 Veibula koordinātēs. Stiprības atkarība no parauga lieluma redzama attēlā 3.5. Redzams, ka vienvirziena lina šķiedras/epoksīdsveķu matricas kompozītam novērojams izteikts mēroga efekts.



Attēls 3.4. Stiepes stiprības sadalījums Veibula koordinātes 10 mm platiem paraugiem



Attēls 3.5. Stiepes stiprības atkarība no parauga platuma

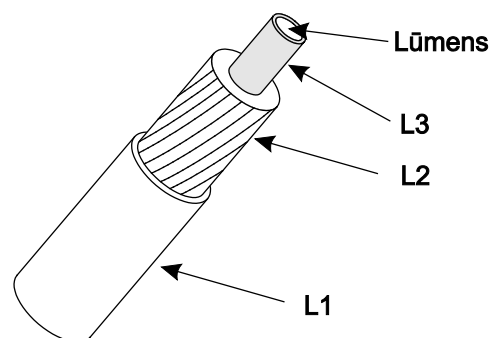
Literatūra

1. J. Andersons, E. Poriķe, E. Spārniņš. Modeling strength scatter of elementary flax fibers: the effect of mechanical damage and geometrical characteristics. *Composites A*, 2011, Vol. 42, 543–549.
2. J. Andersons, E. Poriķe, E. Spārniņš. Limit strain and deformability of elementary flax fibers. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2011, Vol. 46, 428–435.
3. J. Andersons, R. Joffe, E. Spārniņš. Evaluation of interfacial shear strength by tensile tests of impregnated flax fiber yarns. *Journal of Composite Materials*, 2012, Vol. 46, 351–357.
4. E. Spārniņš, B. Nyström, J. Andersons. Interfacial shear strength of flax fibers in thermoset resins evaluated via tensile tests of UD composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2012, Vol. 36, 39–43.
5. J. Modniks, E. Poriķe, J. Andersons, R. Joffe. Evaluation of the apparent interfacial shear strength in short-flax-fiber/PP composites. *Mechanics of Composite Materials*, 2012, Vol. 48, 571–578.
6. J. Andersons, E. Spārniņš, B. Nyström, R. Joffe. Scale effect of the tensile strength of flax-fabric-reinforced polymer composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, Vol. 30, 1969–1974.
7. E. Spārniņš, J. Modniks, J. Andersons. Experimental study of the mechanical properties of unidirectional flax fiber composite. In: Proc. of ICEM15: 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 22–27 July, 2012, 7 p.

II. Izstrādātie modeļi celulozes šķiedru un to kompozītu mehānisko īpašību aprakstam, prognozēšanai un optimizēšanai

Ievads

2. aktivitātes „Celulozes šķiedru un to kompozītmateriālu izpēte” rezultātu “Izstrādāti modeļi celulozes šķiedru un to kompozītu mehānisko īpašību aprakstam, prognozēšanai un optimizēšanai” atspoguļojošajā atskaitē detalizēti aprakstīti modeļi, kas izstrādāti ar īsām linšķiedrām stiegtu polimērkompozītu elastības raksturlielumu un neelastīgās deformēšanās prognozēšanai, kā arī sniegti īsi apraksti linšķiedru stiprības izkliedes modelim, linšķiedru robeždeformācijas apraksta modelim, vienā virzienā stiegtu linšķiedru kompozīta sabrukšanas procesa stiepē šķiedru virzienā, stiprības un mēroga efekta modeļiem.



1. attēls. Linu šķiedras modelis

Slāņu L1 un L3 biezumi bija 1% no rādiusa. Lūmena rādiuss tika izvēlēts tā, lai tas aizņemtu 1.5% no šķiedras šķērsriezuma laukuma [4]. Visu atlikušo daļu aizņēma slānis L2, kas pēc būtības ir celulozes mikrošķiedru kompozīts, kam matrica veidota no hemicelulozes un lignīna. Mikrošķiedras ir orientētas pa spirāli leņķī pret šķiedras asi [1,4].

Izmantojot izveidoto linu šķiedras modeli, ir iespējams noteikt tās efektīvo elastības moduli E_f garenvirzienā. Lai to izdarītu, šķiedras modelim tiek pielikts spriegums σ_f garenvirzienā un noteikta elastīgā enerģija U_f , kas tiek uzkrāta šķiedras tilpumā V_f . Moduli šajā gadījumā var noteikt pēc formulas [2]:

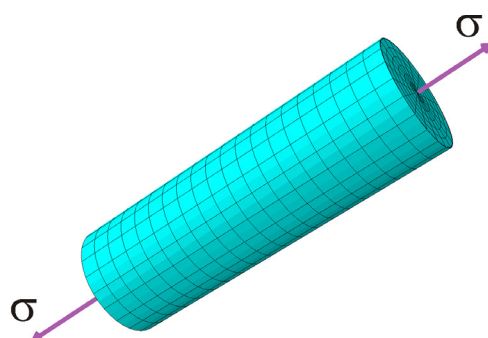
$$E_f = \frac{\sigma_f^2 V_f}{2U_f} \quad (1)$$

kas seko no $\frac{U_f}{V_f} = \frac{\sigma_f \varepsilon_f}{2}$ un $\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$, kur ε_f ir šķiedras deformācija.

Linu išķiedras kompozītu lineāri elastīgās īpašības

Linu šķiedras modelis

Linu elementārās šķiedras struktūra ir samērā sarežģīta. Tā sastāv no vairākiem slāņiem, kas pilda dažādas funkcijas [1-3]. Linu šķiedras šķērsriezums pēc formas nav apaļš, kā tas ir mākslīgām šķiedrām, bet gan veido daudzstūri, kura forma ir atkarīga no augšanas apstākļiem, novietojuma stumburā un citiem faktoriem. Lai atvieglotu linu šķiedras modeļa izveidi, tās uzbūve tika vienkāršota. Modelis tika izveidots kā cilindrisks ķermenis, kas sastāv no 3 slāņiem un lūmena. Slānis L1 ir linu elementāršķiedras jeb šūnas apvalks. L2 ir nesošais slānis, kas uzņem ārējo slodzi un nodrošina šķiedras mehāniskās īpašības. L3 ir iekšējais slānis, kurš aptver lūmenu. Lūmens ir kanāls šķiedras vidū, pa kuru tiek transportēts ūdens tās dzīves laikā.



Vienības šūna

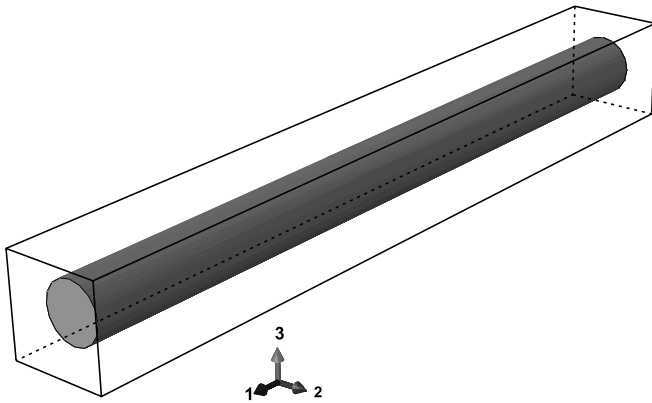
Lai raksturotu linu išķiedras kompozītu, tika izveidota vienības šūna, kas sastāv no šķiedras ar vidējo garumu un matricas [5, 6] (2. attēls). Vienības šūna tika izveidota tā, lai matrica šķiedru aptvertu vienādi no visām pusēm, t.i. attālums no šķiedras virsmas līdz vienības šūnas ārējai virsmai būtu vienāds.

Matricas daudzums vienības šūnā atbilst kompozītmateriāla armējuma koeficientam v_f , ko ar šķiedras rādiusu r un garumu h saista sakarība:

$$v_f = \frac{h\pi r^2}{4(h+2c)(r+c)^2} \quad (2)$$

kur h – šķiedras garums, c – attālums no šķiedras līdz vienības šūnas ārējai virsmai, r – šķiedras rādiuss.

Risinot vienādojumu (2) iegūst parametru c , kas vajadzīgs, lai izveidotu vienības šūnu ar atbilstošu armējuma koeficientu.



2. attēls. Vienības šūna

Pieņemot, ka vienības šūna raksturo transversāli izotropu materiālu, var noteikt materiāla elastības konstantes, kuru skaits šajā gadījumā ir 5. Slogojot vienības šūnas garīgo elementu modeli ar spriegumu σ dažādos veidos un iegūstot uzkrāto elastīgo enerģiju U , aprēķina elastīgās konstantes līdzīgi kā šķiedras modelim.

Junga moduli E_1 iegūst, pieliekot spriegumu s_1 garenvirzienā (3.a att.):

$E_1 = \frac{\sigma_1^2 V}{2U}$	(3)
---------------------------------	-----

Moduli E_2 iegūst, slogojot vienības šūnu šķērsvirzienā (3.b att.):

$E_2 = \frac{\sigma_2^2 V}{2U}$	(4)
---------------------------------	-----

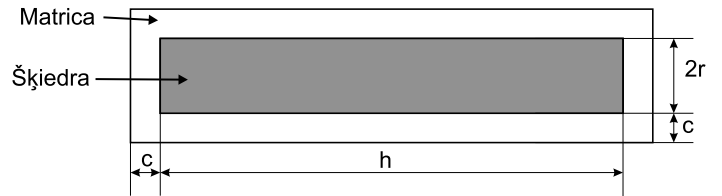
Bīdes moduli izotropijas plaknē G_{23} iegūst, izmantojot divasīgu slogošanu $\sigma_2 = -\sigma_3 = \sigma$ (3.c att.):

$G_{23} = \frac{\sigma^2 V}{2U}$	(5)
----------------------------------	-----

Bīdes moduli G_{12} iegūst, pieliekot bīdes spriegumu τ_{12} (3.d att.):

$G_{12} = \frac{\tau_{12}^2 V}{2U}$	(6)
-------------------------------------	-----

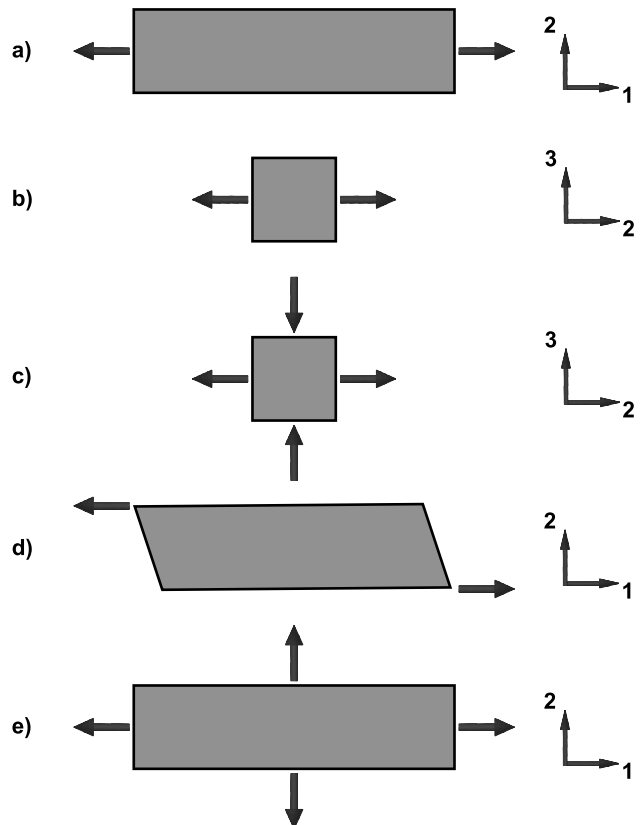
Puasona koeficientu ν_{12} var aprēķināt, pieliekot divasīgu slodzi virzienos 1 un 2. Elastīgā enerģija tad ir
$$\frac{U}{V} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{1}{E_1} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \sigma_1^2 + \left(\frac{1}{E_2} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \sigma_2^2 \right)$$
. Izvēloties spriegumus $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ (3.e att.) vienādus abos virzienos, iegūst:



$\nu_{12} = \frac{1}{2} + \frac{E_1}{2E_2} - \frac{E_1 U}{V \sigma^2}$	(7)
--	-----

Puasona koeficientu izotropijas plaknē ν_{23} aprēķina, zīnot atbilstošo Junga moduli un bīdes moduli:

$\nu_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1$	(8)
--------------------------------------	-----



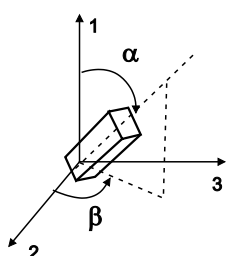
3. attēls. Slogošanas veidi, lai iegūtu transversāli izotropas vienības šūnas elastības konstantes

Lineāri elastīgo īpašību vidējošana

Zinot transversāli izotropas elementārās šūnas elastīgās īpašības aprakstošās konstantes un līdz ar to arī stinguma tenzoru A_{ijkl} , ko var aprēķināt no šīm konstantēm, var novērtēt haotiski armēta īsšķiedru kompozīta elastīgās īpašības, lietojot vidējošanas metodi veidā, kā tas piedāvāts [7]. Ja šķiedru orientāciju sadalījumu apraksta sadalījuma blīvuma funkcija $p(\alpha, \beta)$, kur α un β nosaka šķiedras orientāciju telpā (4. att.), tad vispārīgā gadījumā stinguma tenzora komponentes kompozītam var iegūt šādi:

$$A_{ijkl}^* = \iint A_{ijkl}(\alpha, \beta) p(\alpha, \beta) \sin \alpha \, d\alpha \, d\beta \quad (9)$$

kur $A_{ijkl}(\alpha, \beta)$ ir vienības šūnas stinguma tenzors, kura galveno materiāla asu orientāciju nosaka leņķi α un β (4.att.).



4. attēls. Vienības šūnas orientācija

Vienmērīga šķiedru orientācijas sadalījuma gadījumā materiāls ir izotropas un izteiksme (9) pēc nointegrēšanas iegūst formu:

$$A_{ijkl}^* = \frac{1}{30} [2(2(A_{mmmm} - A_{mmmm}))\delta_{ij}\delta_{kl} + (3A_{mmmm} - A_{mmmm})(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})] \quad (10)$$

kur δ_{ij} ir Kronekera delta.

Izotropam materiālam pietiek noteikt 2 stinguma tenzora komponentes, lai būtu iespējams aprēķināt Junga moduli un Puasona koeficientu:

$$E_c = A_{1111}^* - \frac{2(A_{1122}^*)^2}{A_{1111}^* + A_{1122}^*}; \nu_c = \frac{A_{1122}^*}{A_{1111}^* + A_{1122}^*} \quad (11)$$

Modeļa pārbaude

Šķiedras un matricas modeļi tika veidoti, izmantojot galīgo elementu programmpaketi ABAQUS. Galīgo elementu režģis tika būvēts no 20 mezglpunktu kvadrātiskajiem elementiem C3D20.

Šķiedras slāņi L1 un L3 tika modelēti kā izotropas materiāls ar lignīna elastīgajām īpašībām (1. tabula). Šķiedras 2.

slānis L2 (2.a att.) tika modelēts kā celulozes šķiedru vienvirziena kompozītmateriāls. Šādam kompozītmateriālam matrica sastāv galvenokārt no hemicelulozes un lignīna. Lai vienkāršotu modeli, tika pieņemts, ka matrica sastāv tikai no lignīna. Izmantojot sakarības vienvirziena kompozītam armētam ar transversāli izotropām šķiedrām [9, 10] tika iegūtas to raksturojošās elastības konstantes. Aprēķinu rezultāti celulozes mikrošķiedras kompozītam ar armējuma koeficientu ir doti 1. tabulā.

1. tabula. Celulozes mikrošķiedru kompozītmateriāla un tā sastāvdaļu elastīgās īpašības

Materiāls	E_1 , GPa	E_2 , GPa	G_{12} , GPa	ν_{12}	ν_{23}
Celulozes mikrošķiedras [2]	134	27.2	4.4	0.1	0.3*
Lignīns [2]	4	4	1.5	0.33	0.33
Slānis L2	100.2	14.2	3.4	0.15	0.32

*pieņemta vērtība

Lai iegūtu šķiedras Junga moduli garenvirzienā, galīgo elementu modelim (1. att.) ar garuma un diametra attiecību 75 tika pielikts spriegums garenvirzienā. Šķiedras rotācija netika ierobežota. Slāņa L2 armējuma leņķis φ tika piemēlēts tā, lai pēc sakarības (1) aprēķinātais šķiedras efektīvais elastības modulis garenvirzienā sakristu ar eksperimentālo vērtību 69 GPa. Tādā veidā iegūtā armējuma leņķa vērtība atbilst lūku šķiedrām novērotajām leņķu vērtībām $6^\circ - 10^\circ$ [2].

Vienības šūna tika izveidota atbilstoši [11] pētītajiem haotiski armētiem linu īsšķiedras polipropilēna kompozītmateriāliem. Iepriekš aprakstītais šķiedras modelis ar garumu 1.21 mm, kas atbilst vidējam šķiedras garumam linu-polipropilēna kompozītā, un diametru 16 mm tika izmantots vienības modelēšanai (3. att.). Polipropilēna matricas aprēķinos lietotais elastības modulis bija 1.6 GPa un Puasona koeficients 0.4. Vienības šūnas efektīvās elastīgās īpašības tika iegūtas, izmantojot sakarības (3)–(8) un galīgo elementu rēķinos iegūtās elastīgās enerģijas vērtības pie dažādiem sloģošanas veidiem (3. att.). Aprēķini tika veikti trīs armējuma koeficientiem – 0.13, 0.2 un 0.29. Rezultāti ir doti 2. tabulā.

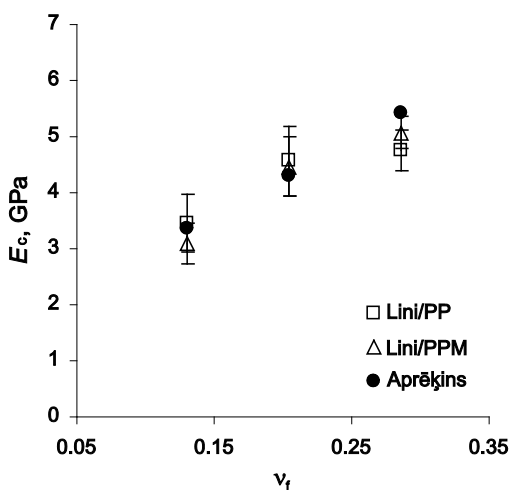
2. tabula. Vienības šūnas elastīgās īpašības

Armējuma koeficients rf	E_1 , GPa	E_2 , GPa	G_{12} , GPa	ν_{12}	ν_{23}
0.13	10.3	2.1	0.68	0.38	0.61
0.2	15	2.3	0.76	0.37	0.62
0.29	20.3	2.6	0.87	0.35	0.62

[12] tika konstatēts, ka šķiedru orientācija kompozītā ir gandrīz haotiska, ar nedaudz izteiktu orientāciju parauga garenvirzienā, tāpēc aprēķinos tuvināti tika pieņemts, ka šķiedru orientāciju sadalījums ir vienmērīgs, kā rezultātā

var lietot formulas (10) un (11) līnu-polipropilēna kompozīta elastīgo īpašību noteikšanai. Izmantojot kā ieejas datus 2. tabulā dotās vienības šūnas elastīgās īpašības, tika aprēķināts haotiski orientētas līnu īsšķiedras kompozītmateriāla ar polipropilēna matricu Junga modulis un Puasona koeficients. Aprēķinātās elastības moduļa vērtības salīdzinātas ar eksperimentālajiem datiem [11] 5. attēlā. Eksperimentālie dati ir doti divu tipu kompozītmateriāliem – līnu-polipropilēna (Lini/PP) un līnu-modificētā polipropilēna (Lini/PPM). Matricas modifikācija tika veikta saķeres starp līnu šķiedru un polipropilēnu uzlabošanai un neietekmēja tās elastīgās īpašības.

Iegūtie rezultāti pie zemākiem armējuma koeficientiem 0.13 un 0.2 labi sakrīt ar eksperimentālajiem datiem, tomēr pie lielāka armējuma aprēķinātais elastības modulis ir uz augšējās eksperimentālo datu izkliedes robežas. Puasona koeficienta izmaiņa bija neliela – no 0.35 pie armējuma koeficienta 0.13 līdz 0.33 pie armējuma koeficienta 0.29.



5. attēls. Ar līnu šķiedru armēta polipropilēna elastības moduļa atkarība no armējuma koeficienta

Līnu īsšķiedras kompozītu nelineārā deformācija

Matemātiskais modelis

Matricas nelinearitātes un šķiedras un matricas saķeres īpatnību dēļ vienības šūna deformējas nelineāri. Matricas nelinearitāte tika aprakstīta, izmantojot Ramberga-Osgūda sakarību formā, kādā tā tiek lietota galīgo elementu programmapaketē ABAQUS:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 + a \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n-1} \right) \tag{12}$$

E – matricas Junga modulis
 ϵ – deformācija
 σ – spriegums
 a, σ_0, n – parametri.

Vienības šūnas nelineārās deformācijas aprakstam tika izmantota forma, kas piedāvāta [13]. Zinot pieliktos spriegumus, nelineāro deformāciju var aprakstīt sekojošā veidā:

$$\epsilon_{ij} = a_{ijkl} \sigma_{kl} \frac{1}{kp} \tan(kp) \tag{13}$$

kur ϵ_{ij} – deformāciju tenzors,
 a_{ijkl} – kompiānces tenzors,
 σ_{kl} – sprieguma tenzors,
 k – konstante

$$p = p(\sigma) = h(b_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl})^{\frac{1}{2}} \tag{14}$$

b_{ijkl} – ceturtā ranga tenzors ($b_{ijkl} = b_{jikl} = b_{ijlk} = b_{klij}$)

$$h = h(\sigma) = \frac{1 + c_1 \omega}{1 + c_2 |\omega|}, c_1 \omega > -1, c_2 \geq 0 \tag{15}$$

c_1, c_2 – konstantes

$$\omega = \frac{(a_{ik} a_{jm} a_{ln} \sigma_{ij} \sigma_{kl} \sigma_{mn})^{\frac{1}{3}}}{(a_{ik} a_{jl} \sigma_{ij} \sigma_{kl})^{\frac{1}{2}}}, a_{ij} = a_{ijmm} \tag{16}$$

$\omega = \text{sign} \sigma_{\alpha\alpha}$, ja $\sigma_{ij} = \sigma_{\alpha\alpha} \delta_{ia} \delta_{ja}$
 $\omega = 0$, ja $\sigma_{ij} = \sigma_{\alpha\alpha+1} (\delta_{ia} \delta_{j\alpha+1} + \delta_{ja} \delta_{i\alpha+1})$, $\alpha = 1, 2, 3$

Spriegumu atkarībai no deformācijām sakarības ir sekojošas

$$\sigma_{ij} = A_{ijkl} \epsilon_{kl} \frac{1}{kp} \arctan(kp) \tag{17}$$

A_{ijkl} – stinguma tenzors

$$P = P(\epsilon) = H(\epsilon) (B_{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl})^{\frac{1}{2}} \tag{18}$$

B_{ijkl} – ceturtā ranga tenzors

$$H(\epsilon) = h(A * \epsilon) = h(\sigma) \tag{19}$$

$$B_{ijkl} = A_{ijmn} b_{mnop} A_{opkl} \tag{20}$$

No vienības šūnas deformēšanās liknēm jānosaka tenzora b_{ijkl} komponentes un konstantes k, c_1, c_2 . Tenzoram b_{ijkl} jābūt nenegatīvi definētam, tāpat tam izpildās tās pašas īpašības kā kompiānces tenzoram – tādas pašas simetrijas un sakarības starp komponentēm.

$\begin{aligned} b_{1111} \geq 0, b_{2222} = b_{3333} \geq 0, b_{1212} = b_{3131} \geq 0, b_{2323} \geq 0, \\ b_{1111}b_{2222} - b_{1122}^2 \geq 0, b_{2222}^2 - b_{2233}^2 \geq 0, \text{Det } \mathbf{b} \geq 0. \end{aligned} \quad (21)$	
--	--

Ja materiāls ir transversāli izotropš, tad ir spēkā arī sakarība:

$b_{2222} - b_{2233} = 2b_{2323} \quad (22)$	
--	--

Ja papildus pieprasa, lai hidrostatiskās slogošanas gadījumā materiāla tilpums mainās lineāri, tad no tā seko, ka

$b_{ijij} = b_{1111} + 2b_{2222} + 4b_{1122} + 2b_{2233} = 0 \quad (23)$	
--	--

Ja šķiedru virzienā kompozīta deformēšanās ir lineāri elastīga, tad var pieņemt, ka $b_{1111} = 0$. No (21) seko, ka $b_{1122} = 0$, un (23) pārvēršas par $b_{2222} + b_{2233} = 0$.

Ja pieņem, ka $b_{1212} = b_{2323}$, t.i., līknes $\varepsilon_{12}(\sigma_{12})$ un $\varepsilon_{23}(\sigma_{23})$ sakrīt, tad no (22) $b_{2222} - b_{2233} = 2b_{1212}$. Tā kā tenzors \mathbf{b} tiek noteikts ar precizitāti līdz multiplikatīvai konstantei, tad var pieņemt, ka $b_{1212} = 1 \text{ GPa}^{-1}$. No tā seko $b_{2222} = b_{3333} = -b_{2233} = b_{1212} = b_{2323} = b_{3131} = 1 \text{ GPa}^{-1}$.

Koeficientu k var noteikt no līknes $\varepsilon_{12}(\sigma_{12})$ aproksimācijas ar funkciju (13), kas šajā gadījumā iegūst sekojošu izskatu:

$\varepsilon_{12} = 2a_{1212}\sigma_{12} \frac{1}{kp} \tan(kp), p = 2\sqrt{b_{1212}} \sigma_{12} , h = 1 \quad (24)$	
--	--

Zinot koeficientu k , var noteikt b_{2323} , ja līknes $\varepsilon_{12}(\sigma_{12})$ un $\varepsilon_{23}(\sigma_{23})$ nesakrīt. $\varepsilon_{23}(\sigma_{23})$ apraksta līdzīga izteiksme kā (24) tikai indeksi 12 jānomaina uz 23.

Konstantes c_1 un c_2 var noteikt no stiepes un spiedes līknēm $\varepsilon_{22}(\sigma_{22})$. Tādā gadījumā

$\varepsilon_{22} = a_{2222} \frac{\text{sign } \sigma_{22}}{kh\sqrt{b_{2222}}} \tan(kh\sqrt{b_{2222}} \sigma_{22}) \quad (25)$	
--	--

kur \bar{h} un \bar{h} ir funkcija h attiecīgi spiedē un stiepē. Zinot h, c_1 un c_2 var iegūt no šādām sakarībām:

$c_1 = \frac{\bar{h} - \bar{h}}{\bar{h} + \bar{h}} \text{ un } c_2 = \frac{2 - \left(\frac{\bar{h} + \bar{h}}{\bar{h} + \bar{h}}\right)}{\bar{h} + \bar{h}} \quad (26)$	
---	--

Ja $\bar{h} = \bar{h}$, tad $c_1 = 0$. Iepriekšējais izklāsts balstās uz [13] doto metodiku.

Ja ir jāņem vērā nelinearitāte arī šķiedru virzienā, tad koeficientu noteikšana ir komplicētāka. Koeficientus k un

b_{2323} nosaka tāpat kā iepriekš, pieņemot, ka $b_{1212} = 1 \text{ GPa}^{-1}$. Lai iegūtu pārējos tenzora b_{ijkl} elementus un koeficientus c_1 un c_2 , var izmantot deformēšanās līknes $\varepsilon_{11}(\sigma_{11})$, $\varepsilon_{22}(\sigma_{22})$ kā arī papildus $\varepsilon_{22}(\sigma_{11}, \sigma_{22})$, kur $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$, un sakarības (22) un (23). Līkni $\varepsilon_{11}(\sigma_{11})$ aproksimē ar izteiksmi

$$\varepsilon_{11} = a_{1111}\sigma_{11} \frac{1}{kp} \tan(kp), p = h\sqrt{b_{1111}}|\sigma_{11}| \text{ un no aproksimācijas iegūst } h\sqrt{b_{1111}} = C_1 \text{ vērtību. Līdzīgi no } \varepsilon_{22}(\sigma_{22}) \text{ aproksi-}$$

mācijas iegūst arī $h\sqrt{b_{2222}} = C_2$. Tā kā h vērtība abos gadījumos ir vienāda, jo $\omega = \pm 1$, ja ir pielikts tikai viens normālais spriegums, tad, izdalot abas izteiksmes, iegūst:

$\frac{b_{2222}}{b_{1111}} = \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \quad (27)$	
---	--

Slogojuma $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$ gadījumā ω vairs nav precīzi 1, bet pieņem diezgan tuvu vērtību ($\omega \approx 0.99$ – to var konstatēt, izmantojot vienības šūnas lineāri elastīgās konstantes, kas iegūtas ar iepriekš aprakstīto metodiku), tāpēc var uzskatīt, ka h arī šajā gadījumā ir tāds pats. Tā kā $\varepsilon_{22}(\sigma_{11}, \sigma_{22})$ līknes aproksimāciju apraksta izteiksme

$$\varepsilon_{22} = (a_{2222} + a_{2211})\sigma \frac{1}{kp} \tan(kp), p = h\sqrt{b_{1111} + 2b_{1122} + b_{2222}}|\sigma|, \text{ tad var iegūt } h\sqrt{b_{1111} + 2b_{1122} + b_{2222}} = C_3 \text{ un, izdalot šo izteiksmi ar } h\sqrt{b_{1111}} = C_1, \text{ iegūst:}$$

$\frac{b_{1111} + 2b_{1122} + b_{2222}}{b_{1111}} = \left(\frac{C_3}{C_1}\right)^2 \quad (28)$	
--	--

Apvienojot kopā (22), (23), (27) un (28), iegūst vienādojumu sistēmu, kuru atrisinot iegūst $b_{1111}, b_{2222}, b_{1122}$ un b_{2233} vērtības un tālāk arī h vērtību. Lai noteiktu c_1 un c_2 ir jāveic papildus slogojums uz spiedi virzienā 2 un jāizmanto sakarības (26) to noteikšanai.

Zinot tenzora b_{ijkl} komponentes, var aprēķināt komponentes tenzoram B_{ijkl} no sakarības (20). Tenzors B_{ijkl} būs vajadzīgs vidējošanas procesā.

Lai iegūtu slogošanas līkni haotiski armētam kompozītam, ir jāveic vidējošana pa visiem šķiedru orientācijas virzieniem. Tā kā vidējošana, izmantojot pieņēmumu par vienādu deformāciju stāvokli dod tuvāku rezultātu eksperimentam [15-17], tad turpmāk tiks apskatīts tikai šis vidējošanas veids

Vispārīgā gadījumā kompozīts tiek slogots ar deformācijām $\varepsilon_{ij}^c, i, j = 1, 2, 3$. Pieliktās deformācijas tiek transformētas vienības šūnas materiāla asīs: $\varepsilon_{ij}^i = \varepsilon_{kl}^c L_{ik}^c L_{jl}^c$, kur L – rotācijas matrica. Zinot pieliktās deformācijas ε_{ij}^c var izrēķināt spriegumus σ_{ij}^i materiāla asīs, izmantojot aproksimāciju (17). Šie spriegumi tiek transformēti atpakaļ uz kompozīta materiāla asīm $\sigma_{ij}^i = \sigma_{kl}^c L_{ki}^c L_{lj}^c$ un tiek iegūti vienības šūnas

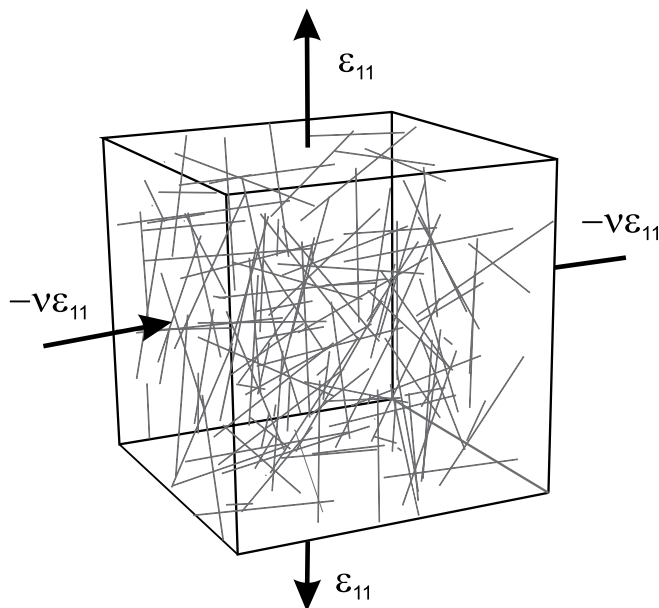
spriegumi $\sigma_{ij}(\varepsilon^c, \phi, \theta)$ kompozīta globālajās asīs. Spriegumi kompozītmateriālā tiek aprēķināti, izmantojot vidējošanas procedūru pa leņķiem φ un θ :

$$\sigma_{ij}^c(\varepsilon^c) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_{ij}(\varepsilon^c, \phi, \theta) f(\phi, \theta) \sin \theta d\phi d\theta \quad (29)$$

kur $f(\phi, \theta)$ - sadalījuma blīvuma funkcija, kas ir vienāda ar 1, ja šķiedras orientētas visos virzienos vienādi.

Tā kā eksperimentāli tika noteikta īsšķiedras kompozīta deformācija vienvirziena stiepē arī modelī tika izmantots tāds pats slogojuma veids – kompozītmateriālam tika pielikta deformācija $\varepsilon_{11} = \varepsilon$. Lai nodrošinātu dabiskos robežnosacījumus $\sigma_{22} = 0$ un $\sigma_{33} = 0$ kompozītam, slogojot to ar deformāciju $\varepsilon_{11} = \varepsilon$, ir jāpieliek papildus deformācijas $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\nu_{12}\varepsilon$, kur ν_{12} – Puasona koeficients, kas tiek noteikts iterāciju procesā, kamēr tiek apmierināti robežnosacījumi $\sigma_{22} = 0$ un $\sigma_{33} = 0$. Šeit tiek pieņemts, ka kompozīts ir transversāli izotropš (un tiek slogots simetrijas ass virzienā) vai izotropš, kas atbilst attiecīgi haotiskam šķiedru orientāciju sadalījumam ar vienu dominējošu virzienu, vai vienmērīgam šķiedru orientāciju sadalījumam. Vidējošanas rezultātā tika iegūts kompozīta spriegums garenvirzienā:

$$\sigma_{11}(\varepsilon_{11}) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_{11}(\varepsilon_{11}, \phi, \theta) f(\phi, \theta) \sin \theta d\phi d\theta \quad (30)$$



6. attēls. Kompozītam pieliktās deformācijas

Lai kontrolētu dabisko robežnosacījumu izpildi, ir jāzina arī spriegumi šķērsvirzienā. Transversāli izotropam vai izotropam gadījumam pietiek aprēķināt vienu spriegumu $\sigma_{22}(\varepsilon_{11})$ šķērsvirzienā:

$$\sigma_{22}(\varepsilon_{11}) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_{22}(\varepsilon_{11}, \phi, \theta) f(\phi, \theta) \sin \theta d\phi d\theta \quad (31)$$

Modeļa pārbaude

Kā pirmais tuvinājums tika izmantota vienības šūna, kurā matrica un šķiedra ir cieši saistītas – nav nekādas atslāņošanās vai izslīdēšanas. Matricas nelinearitāti raksturoja sekojoši Ramberga-Osgūda sakarības parametri: $\sigma_0 = 16$ MPa, $a = 0.235$, $n = 5.44$. Linu šķiedra tika modelēta kā lineāri elastīga.

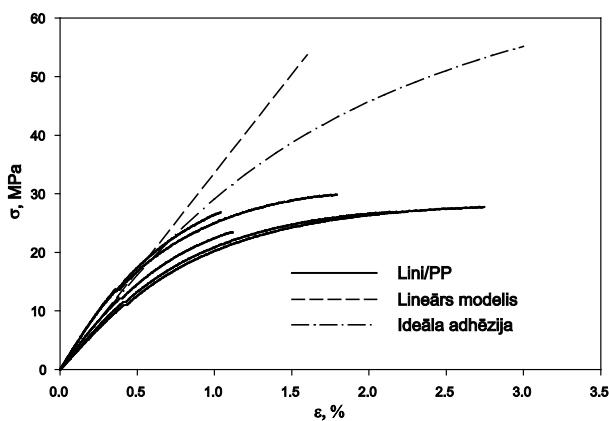
Tika veikti 4 vienības šūnas slogojuma veidi, izmantojot galīgo elementu aprēķinus, lai iegūtu līknes $\varepsilon_{12}(\sigma_{12})$, $\varepsilon_{23}(\sigma_{23})$ un $\varepsilon_{22}(\sigma_{22})$ stiepē un spiedē. Vienības šūnai tika pielietoti simetriskie robežnosacījumi [8]. Izmantojot iepriekš aprakstīto metodiku tika iegūtas parametru k un c_2 vērtības. Tā kā $\varepsilon_{22}(\sigma_{22})$ līknes stiepē un spiedē sakrita un no tā izriet, ka

$\bar{h} = \bar{h}^+$, tad $c_1 = 0$. $\varepsilon_{23}(\sigma_{23})$ līkne praktiski sakrita ar $\varepsilon_{12}(\sigma_{12})$ pie visiem aplūkotajiem armējuma koeficientiem (0.13, 0.2 un 0.29), tāpēc tika pieņemts, ka $b_{1212} = b_{2323}$. Šķiedru virzienā tika pieņemts, ka deformācija ir elastīga, tādēļ $b_{1111} = 0$ un līdz ar to arī $b_{1122} = 0$. Vienības šūnai, kas atbilda armējuma koeficientam 0.13, tika iegūtas šādas parametru vērtības: $k = 44.4$ GPa^{-1/2} un $c_2 = 0.0298$. Pieņemot, ka šķiedru sadalījums pa orientācijām ir vienmērīgs, izmantojot iegūtās parametru vērtības, tika veikta vidējošana, ko apraksta izteiksme (30). Stinguma tenzora komponentes, kas vajadzīgas šajos rēķinos, tika aprēķinātas no elastīgajos rēķinos noteiktajām elastības konstantēm.

Nelineārās deformācijas līknes aprēķins tika veikts, izmantojot programmpaketi Wolfram Mathematica. Lai nodrošinātu robežnosacījumus $\sigma_{22} = 0$ un $\sigma_{33} = 0$, kopējā pieliktā deformācija bija $\varepsilon_{11} = \varepsilon$ un $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\nu_{12}\varepsilon$, kur ν_{12} nebija zināms, tāpēc bija jāveic iteratīvs process, kas norisinājās šādi: tika paņemta kaut kāda ν_{12} sākotnējā vērtība un aprēķināti spriegumi σ_{11} un σ_{22} , skaitliski nointegrējot (30) un (31) pie dotās deformācijas. Ja σ_{22} nebija nulle ar kaut kādu uzdoto precizitāti, tad ν_{12} vērtība tika koriģēta un tika izrēķināti σ_{11} un σ_{22} ar jauno ν_{12} vērtību un atkal pārbaudīta σ_{22} vērtība. Tā process tika turpināts, kamēr σ_{22} bija tuvāk nullei par uzdoto precizitāti. Šāda iterāciju procesa rezultātā tika iegūta σ_{11} vērtība pie vienas deformācijas vērtības – viens σ - ε līknes punkts. Ar nākamo ε vērtību viss process tika atkārtots un tādā veidā iegūta pilna σ - ε līkne. 7. attēlā ir dots vidējošanas rezultātu un linu-polipropilēna kompozītmateriālu eksperimentālo datu salīdzinājums pie armējuma koeficienta 0.13.

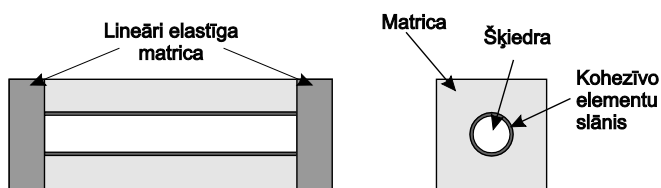
Kā redzams, no grafikiem iegūtā līkne labi neaprapsta eksperimentālos datus, tai ir novērojama nelinearitāte, bet stingums ir stipri lielāks nekā reālajam kompozītam. Līdz ar to, lai aprakstītu linu-polipropilēna kompozītmateriāla nelineāro deformāciju ar vidējošanas metodi, nepietiek ievē-

rot tikai matricas nelineāro deformāciju. [18] ir apgalvots, ka starp līnu šķiedru un matricu neveidojas ķīmiskas saites. Šķietamo adhēziju, kas izpaužas kā bīdes spriegumu pārnesē starp šķiedru un matricu, rada tikai robežvirsmu negluduma un tehnoloģisko spriegumu noteiktie berzes spēki. Noteikt berzes spēku līnu šķiedras un polimēru matricas robežvirsmā ir komplicēti, jo tās virsma ir nelīdzena un līdz ar to arī spēks, kas vērsts pa virsmas normāli ir stipri mainīgs. Šķiedras saķeri ar matricu var novērtēt, nosakot kritisko bīdes spriegumu starp šķiedru un matricu.



7. attēls. Vidējošanas rezultātu un eksperimentālo datu [11] salīdzinājums līnu-polipropilēna kompozītam ar armējuma koeficientu $\nu_f = 0.13$

Lai mēģinātu labāk aprakstīt līnu-polipropilēna kompozīta nelineāro deformāciju, vienības šūnas galīgo elementu modelis tika modificēts. Šķiedras gali tika atsaistīti no matricas. Uz šķiedras un matricas robežvirsmas tika izveidots plāns kohezīvo elementu slānis (0.1 mm), kas tika izmantots, lai modelētu saķeri (8. att.).

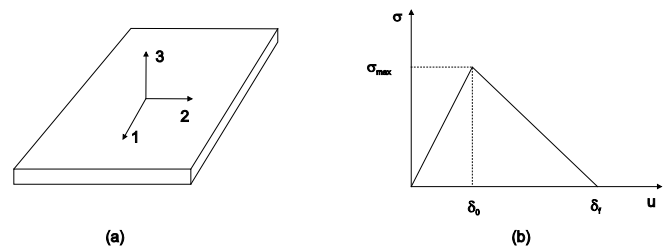


8. attēls. Modificētais vienības šūnas modelis

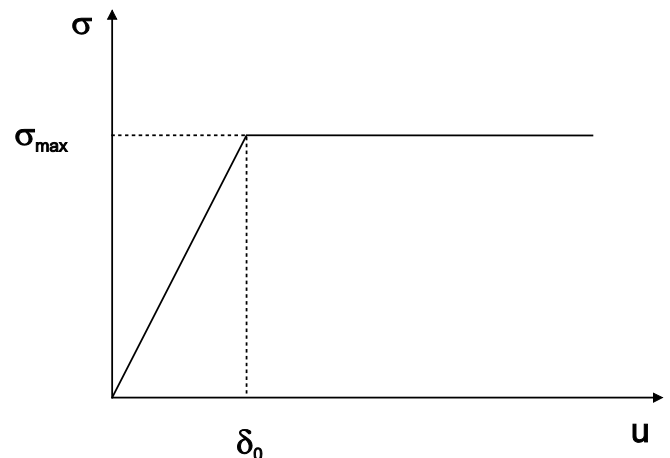
Kohezīvie elementi ļauj modelēt sabrukšanas procesu. Tiem ir iespējams definēt maksimālos spriegumus vai pārvietojumus, pie kuriem sākas sabrukšana 3 virzienos – divi plaknē un viens normālais (9.a att.). Pēc maksimālā sprieguma sasniegšanas šiem elementiem ir iespējams arī kontrolēt sabrukšanas procesu, definējot δ_f (pārvietojumu, pie kura elements ir pilnībā sabrucis), kā arī iespējams mainīt sabrukšanas procesa līknes formu (starp δ_0 un δ_f). Līknes slīpumu sākumposmā nosaka stingums, ko var definēt katram virzienam atsevišķi.

Dotajā modelī kohezīviem elementiem tika definēti šādi parametri: stingums virzienā 1 un 2 vienāds ar polipropilē-

na matricas bīdes moduli $G = 0.57$ GPa, normālajā virzienā stingums bija 1000 GPa. δ_f arī tika izvēlēts liels – $1 \cdot 10^6$ m ar mērķi, lai iegūtu platu sprieguma-pārvietojuma līknei pēc maksimālā sprieguma sasniegšanas, tas ir, lai spriegums būtu nemainīgs un tuvināti izturēšanās būtu līdzīga berzei pie konstanta normālā spēka (10. att.). σ_{max} virzienos 1 un 2 bija vienāds ar kritisko bīdes spriegumu līnu šķiedrai un polipropilēna matricai. Normālajā virzienā, lai nepieļautu atslāņošanos, σ_{max} bija uzlikts daudz lielāks – $1 \cdot 10^6$ MPa.



9. attēls. Kohezīvie elementi. (a) – elements, (b) – sprieguma-pārvietojuma diagramma



10. attēls. Bīdes sprieguma atkarība no pārvietojuma šķiedras un matricas saķerei galīgo elementu modeli

Lai noteiktu konstantes, kas ietilpst aproksimācijā (13), tika izmantoti vairāki sloģojuma veidi – stiepe garenvirzienā (līkne $\epsilon_{11}(\sigma_{11})$), stiepe un spiede šķērsvirzienā (līkne $\epsilon_{22}(\sigma_{22})$), bīde plaknē 12 (līkne $\epsilon_{12}(\sigma_{12})$), bīde plaknē 23 (līkne $\epsilon_{23}(\sigma_{23})$), kā arī divasīgā stiepe $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$ (līkne $\epsilon_{22}(\sigma)$). Stiepei garenvirzienā un divasīgai stiepei vienības šūnas galos, kur nav šķiedras, tika definētas lineāri elastīgas matricas īpašības, lai novērstu nelineārās deformācijas koncentrāciju šajos galos (8. att.). Tika lietoti simetriskie robežnosacījumi [8].

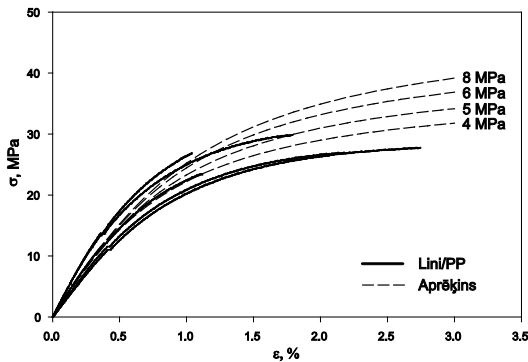
Konstantes un tenzora b_{ijkl} komponentes tika noteiktas, izmantojot metodiku, kas aprakstīta matemātiskajā modeli gadījumam, kad ievēro nelinearitāti arī šķiedras garenvirzienā. No iegūtajām tenzora b_{ijkl} komponentēm tika aprēķinātas tenzora B_{ijkl} komponentes, kas turpmāk tika izmantotas vidējošanai.

Tā kā kritiskā bīdes sprieguma precīzas vērtības nebija zināmas, aprēķini tika veikti ar vairākām tā vērtībām no inter-

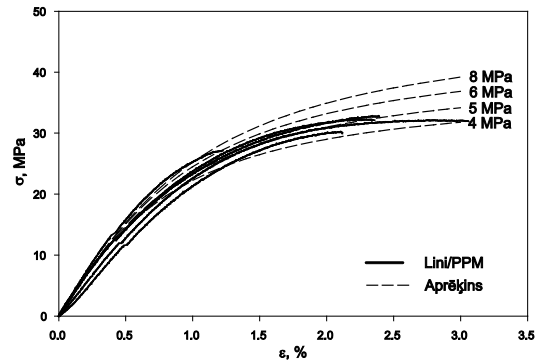
vāla 4–8 MPa, kas atbilst kritiskā bīdes sprieguma vērtībām, kas atrodamas literatūrā šāda veida materiāliem [19, 20].

Linu šķiedras vienības šūnai ar polipropilēna matricu pie armējuma koeficienta 0.13 un kritiskā bīdes sprieguma tika iegūtas sekojošās nelinearitāti raksturojošā tenzora b_{ijkl} komponentu skaitliskās vērtības: $b_{1212} = 1 \text{ GPa}^{-1}$,

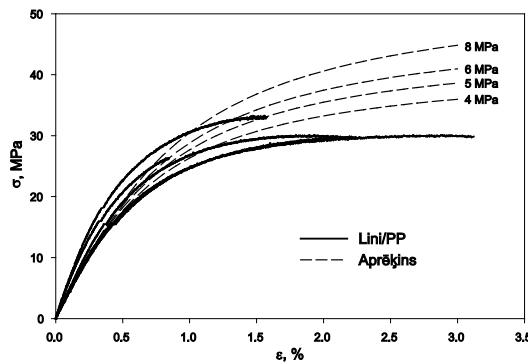
$b_{2323} = 0.572 \text{ GPa}^{-1}$, $b_{2222} = 0.635 \text{ GPa}^{-1}$, $b_{1111} = 0.198 \text{ GPa}^{-1}$, $b_{2233} = -0.510 \text{ GPa}^{-1}$, $b_{1122} = -0.112 \text{ GPa}^{-1}$, $k = 59.5 \text{ GPa}^{-1/2}$, $c_1 = 0$ un $c_2 = 0.1$. Izmantojot šos datus tika veikta vidējošanas procedūra un iegūtas kompozīta nelineārās deformācijas liknes pie armējuma koeficientiem 0.13, 0.2 un 0.29 un vairākām kritiskā bīdes sprieguma vērtībām (11.-16.att.)



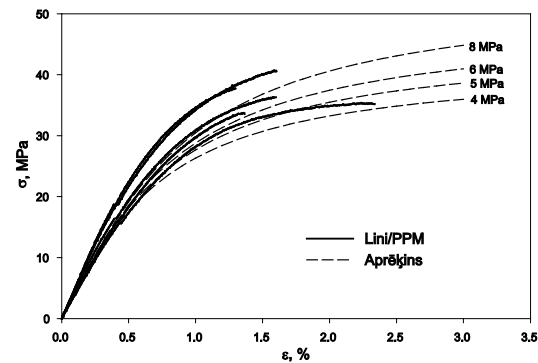
11. attēls. Linu-polipropilēna kompozīta eksperimentālo datu [11] un aprēķinu pie dažādiem kritiskajiem bīdes spriegumiem salīdzinājums. Armējuma koeficients $\nu_f = 0.13$



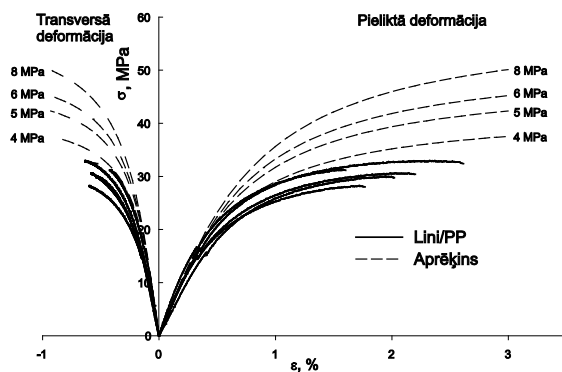
12. attēls. Linu-modificēta polipropilēna kompozīta eksperimentālo datu [11] un aprēķinu pie dažādiem kritiskajiem bīdes spriegumiem salīdzinājums. Armējuma koeficients $\nu_f = 0.13$



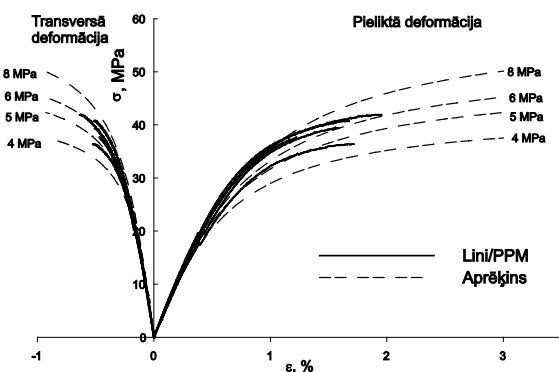
13. attēls. Linu-polipropilēna kompozīta eksperimentālo datu [11] un aprēķinu pie dažādiem kritiskajiem bīdes spriegumiem salīdzinājums. Armējuma koeficients $\nu_f = 0.2$



14. attēls. Linu-modificēta polipropilēna kompozīta eksperimentālo datu [11] un aprēķinu pie dažādiem kritiskajiem bīdes spriegumiem salīdzinājums. Armējuma koeficients $\nu_f = 0.2$



15. attēls. Linu-polipropilēna kompozīta eksperimentālo datu [11] un aprēķinu pie dažādiem kritiskajiem bīdes spriegumiem salīdzinājums. Armējuma koeficients $\nu_f = 0.29$



16. attēls. Linu-modificēta polipropilēna kompozīta eksperimentālo datu [11] un aprēķinu pie dažādiem kritiskajiem bīdes spriegumiem salīdzinājums. Armējuma koeficients $\nu_f = 0.29$

Iegūtās nelineārās deformēšanās liknes labi sakrīt ar eksperimentālajiem rezultātiem kritiskā bīdes sprieguma diapazonā 4–8 MPa, izņemot līnu-polipropilēna kompozītu ar armējuma koeficientu $n_f = 0.29$. Kā tas bija sagaidāms, eksperimentālie rezultāti kompozītam ar modificētu polipropilēna matricu atbilst augstākām kritiskā bīdes sprieguma vērtībām.

Līnu elementāro šķiedru stiprības izkliedes modelēšana, ievērojot mehāniskos bojājumus un ģeometrijas parametrus

Lai gan elementārajām lūksnes šķiedrām piemīt labas mehāniskās īpašības, tomēr ir jāņem vērā ģeometrisko parametru lielā izkliede un arī mehāniskie bojājumi, kas būtiski ietekmē to stiprību garenvirzienā. Rakstā [21] ir iegūta stiprības sadalījuma funkcija, kura ļauj ievērot nodu (kink bands) un diametru izkliedes ietekmi:

$$P(\sigma) = 1 - (1 - P_k(\sigma))(1 - P_i(\sigma)) \tag{32}$$

kur $P_k(\sigma)$ ir nodas sabrukšanas varbūtība un $P_i(\sigma)$ ir šķiedras bez nodām stiprības sadalījums. Šo sadalījuma funkciju forma ir izvesta [21] un to parametri izteikti ar atšķirību starp nodām šķiedrās un šķiedru diametru izkliedes raksturlielumiem. Sadalījuma funkcijas (32) pielietojamība tika pārbaudīta, izmantojot to gan rūpīgi apstrādātām, laboratorijas apstākļos izdalītām no stiebra, nebojātām šķiedrām, gan arī šķiedrām ar mehāniskiem bojājumiem, kuras tika iegūtas rūpnieciskā veidā. Rezultāti rāda, ka nodas šķiedrās būtiski ietekmē šķiedru stiprību.

Līnu elementāro šķiedru sabrukšanas deformācijas sadalījuma modelēšana

Līnu šķiedrām ir augsta stiprība un stingums, tāpēc tās ir iespējams izmantot kā polimērkompozītu stiebrojumu tradicionālo rūpnieciski ražoto šķiedru vietā. Dabisko šķiedru mehāniskajām īpašībām ir liela izkliede, kas ir kvantitatīvi jāapraksta, lai analizētu tās ietekmi uz kompozīta mehāniskajām īpašībām. Rakstā [22] graujošās deformācijas izklīdie un mēroga efekts ir aprakstīts ar modificētā Veibula sadalījuma palīdzību ar samērā labu precizitāti. Tika iegūta un pārbaudīta tuvināta līnu šķiedras analītiska stiprības sadalījuma funkcija

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\gamma_\varepsilon} \left(\frac{\sigma / \langle E \rangle + \langle \varepsilon_n \rangle}{\beta_\varepsilon} \right)^{\alpha_\varepsilon} \right] \tag{33}$$

kas balstās uz šķiedras graujošās deformācijas sadalījumu $P(\varepsilon) = 1 - \exp \left[- (l/l_0)^{\gamma_\varepsilon} (\varepsilon/\beta_\varepsilon)^{\alpha_\varepsilon} \right]$ un ietver šķiedru vidējo Junga moduli $\langle E \rangle$ un nelineārās deformācijas pieaugumu $\langle \varepsilon_n \rangle$ [22].

Orientētu līnu šķiedru kompozītu sabrukšanas procesa modelēšana stiepes slodzes gadījumā

Adhēzija starp līnu šķiedru un polimēru matricu, kā arī elementāro šķiedru savstarpēja saķere tehniskajā šķiedrā ir viens galvenajiem faktoriem, kas nosaka ar līnu šķiedrām stiegtrotu polimēru mehāniskās īpašības. Rakstā [23] ir izstrādāta adhēzijas novērtēšanas metode, kas balstās uz ar polimēru piesūcinātu kūļu stiepes pārbaudēm un izrauto šķiedru garumu sadalījumu uz kūļa sabrukšanas virsmām, ko novērtē ar optiskās mikroskopijas palīdzību. Izstrādāts vienkāršs varbūtisks modelis, kas sasaista izrauto šķiedru garuma un diametra attiecību ar šķiedru stiepes stiprības sadalījumu un efektīvo kritisko bīdes spriegumu [23]. Šī metode tika pielietota līnu šķiedras kūļiem, kas impregnēti ar vinilesteru, kā rezultātā tika iegūta kritiskā bīdes sprieguma vērtība 17 MPa.

Metode tālāk tika pilnveidota, izmantojot divas pieejas šķiedru stiprības modificētā Veibula sadalījuma parametru noteikšanai – šķiedru fragmentācijas testus un šķiedru stiepes testus [24]. Šīs divas pieejas tika salīdzinātas, analizējot vinilestera un no sojas eļļas iegūta polimēra kompozītu izrauto šķiedru garumus, kā iegūstot tuvas kritiskā bīdes sprieguma novērtējumus.

Orientētu līnu šķiedru kompozītu ar polimēru matricu stiepes stiprības modelis

Visefektīvāk dabiskās šķiedras tiek izmantotas vienā virzienā stiegtrotos kompozītos. Tomēr dabisko šķiedru stiegtrojums nav nepārtraukts šķiedru ierobežotā garuma dēļ un arī nav viendabīgs, jo vienlaicīgi kompozītā ir atrodamas gan elementārās šķiedras, gan arī tehniskās šķiedras. Lai novērtētu šāda gandrīz vienvirziena kompozīta stiprības augšējo robežu, rakstā [25] ir pielietots vienvirziena kompozīta varbūtiskais stiprības modelis, pieņemot, ka kompozītam ir perfekta iekšējā struktūra. Eksperimentāli ir konstatēts, ka vienvirziena līnu kompozītiem, kas izgatavoti no līnu kūļiem vai arī orientējot šķiedras manuāli, stiprība tuvojas teorētiskai robežai tikai pie salīdzinoši zemām šķiedru tilpuma daļām (ap 0,2), kamēr pie lieliem armējuma koeficientiem stiprība ir ievērojami mazāka par teorētisko.

Prognozējot kompozītu mehāniskās īpašības ir jāņem vērā šķiedru ierobežotā garuma ietekme. Ievērojot šo faktoru, rakstā [26] izstrādātajā modelī orientētu līnu šķiedru stiepes stiprības noteikšanai tiek pieņemts, ka kompozīta sabrukšanas process sākas no blakus esošu šķiedru galu klastera. Tiek pielietots varbūtisks stiprības modelis kompozītam, kas satur mikrodefektus. Teorētiskā analīze rāda, ka ar apmierinošu precizitāti var aprakstīt kompozīta stiprības atkarību no šķiedru tilpuma daļas, ja pieņem, ka kompozīts satur 4×4 šķiedru klasterus.

Polimērkompozīta stiegtrojumam izmanto arī līnšķiedru audumu, ko veido viegli savērti, paralēli orientēti līnšķiedru kūļi. Rakstā [27] izstrādāts un aprobēts šādu kompozītu stiprības aplēses varbūtisks modelis, ievērojot šķiedru savērpumu un kūļu daudzumu kompozītā.

Linu auduma kompozīta ar polimēru matricu mēroga efekta modelis stiepes stiprībai

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\beta_V} \right)^\alpha - \frac{2L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\beta_L} \right)^\alpha \right] \quad (34)$$

Rakstā [28] ir noskaidrots, ka līnu/Tribest matricas kompozītam dominē stiprības tilpuma mēroga efekts. Tātad pārgriestās šķiedras uz parauga malām, kas rodas izgriežot paraugu stieģojuma viļņainuma plaknē dēļ, tikai nedaudz ietekmē stiepes stiprību šķiedru virzienā.

Literatūra

1. Baley C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Compos. A*, 2002, vol. 33, 939-948.
2. Gassan J., Chate A., Bledzki A.K. Calculation of elastic properties of natural fibers. *J. Mater. Sci.*, 2001, vol. 36, 3715-3720.
3. Nilsson T., Gustafsson P.J. Influence of dislocations and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres. *Compos. A*, 2007, vol. 38, 1722-1728.
4. Bos H.L., Donald A.M. In situ ESEM study of the deformation of elementary flax fibres. *J. Mater. Sci.*, 1999, vol. 34, 3029-3034.
5. Modniks J., Andersons J. Prediction of the stiffness of short flax fiber reinforced composites by orientation averaging. 23rd Nordic Seminar on Computational Mechanics (NSCM-23), A. Eriksson and G. Tibert (Eds), KTH, Stockholm, 2010, pp. 146-149.
6. Modniks J., Andersons J. Modeling elastic properties of short flax fiber reinforced composites by orientation averaging. *Comput. Mater. Sci.*, 2010, vol. 50, 595-599.
7. Lagzdins A., Maksimov R.D., Plume E. Anisotropy of Elasticity of a Composite with Irregularly Oriented Anisometric Filler Particles. *Mech. Compos. Mater.*, 2009, vol.45, 345-358.
8. Li S. Boundary conditions for unit cells from periodic microstructures and their implications. *Compos. Sci. Technol.*, 2008, vol. 68, 1962-1974.
9. Hashin Z. Theory of Fiber Reinforced Materials. NASA-CR-1974, 1972.
10. Hashin Z. Analysis of properties of fiber composites with anisotropic constituents. *J. Appl. Mech.*, 1979, vol. 46, 543-550.
11. Modniks J., Joffe R., Andersons J. Model of the Mechanical Response of Short Flax Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites, *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 10: 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, pp. 2016-2021.
12. Andersons J., Spārniņš E., Joffe R. Stiffness and strength of flax fiber/polymer matrix composites. *Polym. Compos.*, 2006, vol. 27, 221-229.
13. Lagzdins A., Teters G., Zilaucs A. Nonlinear deformation of composites with consideration of the effect of couple-stresses. *Mech. Compos. Mater.*, 1998, vol. 34, No. 5, 403-418.
14. Modniks J., Andersons J. Modeling the non-linear deformation of a short-flax-fiber-reinforced polymer composite by orientation averaging. Submitted to *Compos. B*.
15. Gusev A., Heggli M., Lusti H.R., Hine P.J. Orientation averaging for stiffness and thermal expansion of short fiber composites. *Adv. Eng. Mater.*, 2002, vol. 4, p. 931-933.
16. Hine P.J., Lusti H.R., Gusev A.A. On the possibility of reduced variable predictions for the thermoelastic properties of short fibre composites. *Compos. Sci. Technol.*, 2004, vol. 64, 1081-1088.
17. Hine P. J., Duckett R. A., Ward I. M., Allan P. S., Bevis M. J. A comparison of short glass fiber reinforced polypropylene plates made by conventional injection molding and using shear controlled injection molding. *Polym. Compos.*, 1996, vol. 17, . 400-407.
18. Thomason J.L. Dependence of interfacial strength on the anisotropic fiber properties of jute reinforced composites. *Polym. Compos.*, 2010, vol. 31, 1525-1534.
19. van den Oever M.J.A., Bos H.L., van Kemenade M.J.J.M. Influence of the physical structure of flax fibres on the mechanical properties of flax fibre reinforced polypropylene composites. *Appl. Compos. Mater.*, 2000, vol. 7, 387-402.
20. Awal A., Cescutti G., Ghosh S.B., Müssig J. Interfacial studies of natural fibre/polypropylene composites using single fibre fragmentation test (SFFT). *Compos. A*, 2011, vol. 42, 50-56.
21. Andersons J., Poriķe E., Spārniņš E. Modeling strength scatter of elementary flax fibers: the effect of mechanical damage and geometrical characteristics. *Compos. A*, 2011, vol. 42, 543-549.
22. Andersons J., Poriķe E., Spārniņš E. Limit strain and deformability of elementary flax fibers. *J. Strain Anal. Eng. Design*, 2011, vol. 46, 428-435.
23. Andersons J., Joffe R., Spārniņš E. Evaluation of interfacial shear strength by tensile tests of impregnated flax fiber yarns. *J. Compos. Mater.*, 2012, vol. 46, 351-357.
24. Spārniņš E., Nyström B., Andersons J. Interfacial shear strength of flax fibers in thermoset resins evaluated via tensile tests of UD composites. *Int. J. Adhes.&Adhes.*, 2012, vol. 36, 39-43.
25. Andersons J., Joffe R. Estimation of the tensile strength of an oriented flax fiber-reinforced polymer composite. *Compos. A*, 2011, vol. 42, 1229-1235.
26. Andersons J., Joffe R., Spārniņš E., Weichert D. Modeling the effect of reinforcement discontinuity on the tensile strength of UD flax fiber composites. *J. Mater. Sci.*, 2011, vol. 46, 5104-5110.
27. Andersons J., Spārniņš E., Modniks J. Probabilistic strength modeling of flax-fabric-reinforced polymer composites. In: *Proc. SMTDA2012 (2nd Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis International Conference, 5 - 8 June 2012, Chania, Crete, Greece)*, p. 9-15.
28. Andersons J., Spārniņš E., Nyström B., Joffe R. Scale effect of the tensile strength of flax-fabric-reinforced polymer composites. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2011, vol.

3. projekta aktivitāte.

**Dispersi pildīto polimēru
kompozītmateriālu īpašību izpēte.**

**3.aktivitātes ietvaros izstrādātā
metodika un datu kopas**

I. Datu kopa par dispersi pildīto polimēru kompozītmateriālu mehāniskajām un fizikālajām īpašībām

Datu kopa sniedz ieskatu par dispersi pildīto polimēru kompozītmateriālu mehāniskajām un fizikālajām īpašībām. Darbā tiek apskatītas polimēra vispārīgās fizikālās īpašības, pakāpeniski pārejot un iedziļinoties polimēru materiālos, tādos kā epoksīda sveķi pildīti ar oglekļa nanocaurulītēm (ONC) vai ar montmorilonīta mālu nanokompozītos, kā arī ar silīciju pildītu elastomēru, to pielietojumā, iegūšanas un samaisīšanas metodēs. Apskatot polimēru nanokompozītu modificēšanas iespējas ar nanodaļiņām, tiek kvantitatīvi apskatīti materiālu fizikālie raksturlielumi, kas tiek ietekmēti, ievadot polimēra saistvielā nanopildvielu. Detalizētāk tiek apskatīti materiāla mehāniskie, termofizikālie, morfoloģiskie raksturlielumi, kuri tiek pētīti ar tādām eksperimentālām metodēm kā termiskā izplešanās, kvazistatiskie eksperimenti stiepē, šļūde, hidrostatiskā svēršana, gaismas caurlaidība, elektronu skenējošā mikroskopija. Papildus tiek aprakstīta arī šļūdes likņu aproksimācija ilgtermiņa šļūdes prognozēšanai, izmantojot īstermiņa eksperimentus. Rezultātā izveidotā datu kopa sniedz diezgan plašu informāciju par polimēra nanokompozītmateriālu, tā struktūru, elastīgām/viskoelastīgām un termofizikālām īpašībām, kā arī dažām no iespējamām pētījuma metodēm.

Nav noslēpums, ka pagājušajā gadsimtā plašu pielietojumu guva materiāli, kas gatavoti no polimērsavienojumiem, tai skaitā no epoksīda sveķiem. Šie materiāli ir kļuvuši nozīmīgi rūpniecībā, jo tiem piemīt zināmas priekšrocības attiecībā pret tradicionālajiem materiāliem tādiem, kā metāli, koks, stikls u.c. Tie ir salīdzinoši viegli, izturīgi pret koroziju, tai pašā laikā nav trausli. Polimēriem ir raksturīgas arī daudzas citas īpašības, kas ļauj izmantot tos industrijā, aizvietojojam pirms tam pierastos materiālus. Tomēr polimērmateriāliem piemīt arī kritiskie aspekti, piemēram, epoksīda sveķi ir jutīgi pret apkārtējās vides faktoru iedarbību (temperatūra, mitrums). Tādēļ tos mēģina uzlabot, pievienojot pildvielu, tādā veidā iegūstot kompozītmateriālu, kam ir raksturīgas citas uzlabotas īpatnības, un rezultātā to perspektīvais pielietojums ievērojami paplašinātos.

Līdz ar zinātnes un tehnoloģijas attīstību arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta nanozinātnei, tādējādi nanodaļiņu un nanokompozītu (NK) izpēte un pielietošana dažādās nozarēs palielinās. Nanopildviela, salīdzinot ar mikropildvielu, pat nelielā daudzumā (sākot jau no dažām saturu procentu simtdaļām) kompozītmateriālā spēj ievērojami uzlabot daudzus raksturlielumus, piemēram, stiprību, elektrovadītspēju, materiāla stiklošanās temperatūru, u.c. svarīgas mehāniskās, elektriskās, fizikālās īpašības. Vienas no populārākām nanodaļiņām ir oglekļa nanocaurulītes (ONC), kurām sava liela īpatnējā virsmas laukuma un ievērojamo mehānisko un elektrisko īpatnību dēļ piemīt unikālas fizikālās un ekspluatācijas īpašības. Šiem cilindriskas formas oglekļa atomu savienojumiem garums ir mērāms mikrometros, bet

diametrs atkarībā no ONC veida (viensieniņu vai daudzsie- niņu) nanometros [1]. Šo un citu unikālu īpatnību dēļ pēdējā laikā noris plašas diskusijas par ONC un to izpēti ar dažādām metodēm [2-7] materiālu raksturlielumu uzlabošanai.

Šobrīd aktīvi tiek meklēti nanodaļiņu un polimēru savienojumi, kuri ievērojami spētu uzlabot materiālu fizikālās īpašības, tāpēc viens no uzdevumiem ir atrast pareizo savienojumu vajadzīgajās proporcijās. Viena no aktuālajām problēmām ir, ka ONC mazas masas un izmēru, kā arī Van der Waalsā pievilkšanās spēku dēļ veido aglomerātus polimēra saistvielā, to ievadišanas procesā. Tas sarežģī homogēna nanokompozīta izveidi. Kompozītam, kļūstot nehomogēnam, veidojas apgabali, kas lielā mērā ietekmē kopējo funkcionalitāti, piemēram, izturību, stingrību, gaismas caurlaidību var atšķirties dažādos tilpuma apgabalos, kas norāda, ka kompozītā ir defekti, kas spēj ietekmēt tā kopējo mehānisko uzvedību [8]. Izgatavojot NK, ir jāievēro, ka ONC sadalījums materiālā ir svarīgs parametrs un vēlams ir tā kontrole. Daudzi zinātnieki [2, 3, 913] ir atklājuši metodes, kā var novērtēt optimālo pildvielas sadalījumu (dispersitāti), taču joprojām sagādā grūtības pielietot šīs metodes tiešā veidā NK.

Kopumā nanopildviela izmaina materiāla struktūru, un tāpēc parasti tā ietekmē modificētā materiāla mehāniskās īpašības. Svarīga mehāniskās uzvedības īpatnība ir tāda, ka, salīdzinot ar mikropildvielu, nanopildviela dod lielāku iespaidu uz starpfāžu mijiedarbību starp epoksīda sveķiem un nanodaļiņām [14]. Tā kā ONC elastības modulis ir daudz lielāks nekā polimēram, tad kompozīta modulim būtu jāpieaug, pievienojot pildvielas daļiņas sveķiem. Teorētiski pielietojot dažādus modeļus materiāla elastības moduļa aprēķināšanai, tiek noteikts, ka palielinot pievienoto ONC daudzumu, tam ir jāpieaug ONC lielā elastības moduļa dēļ (ap 1 *TPa*). Taču realitātē pievienojot lielu daudzumu ONC (parasti nepārsniedz 5% pēc masas), rezultāti visbiežāk ir tālu no idealizētiem teorētiskajiem aprēķiniem. Ir jāpiemin, ka pastāv arī daudzi citi faktori, kas ietekmē elastības moduļa vērtību, it īpaši NK, piemēram, kompozīta homogenitāte (atšķirības materiāla blīvumā), arī testēšanas metodes, jo polimēros deformācijas ātrums stipri ietekmē eksperimentālos datus, u.c. Elastības modulis daļiņu/polimēra kompozītā kopumā nosaka komponentu elastīgās īpašības, pievienoto daļiņu daudzums, attiecība un izmērs [15]. Pievienojot vairāk ONC, mehānisko īpašību uzlabojumi ir ierobežoti materiāla augstas viskozitātes dēļ, kas rezultātā izraisa aglomerēšanos un defektu veidošanos [16]. Ir konstatēts [17], ka defekti materiālā darbojas kā sprieguma koncentratori, un tāpēc tie ierosina materiāla sagraušanu, ko savukārt izraisa lokālie spriegumi (blakus defektu apgabaliem), pārsniedzot materiāla izturību.

Vairākos literatūras avotos [18, 19] ir pieminēts, ka pievienojot ONC, ir iespējams uzlabot arī termofizikālās īpašības polimēra kompozītam: palielināt materiāla stiklošanās temperatūru T_g un pamazināt termisko izplešanās koeficientu (TIK). Zems TIK ir vēlams labas materiāla ģeometrisku izmēru stabilitātes sasniegšanai. Augstas saišu enerģijas un cietības dēļ ONC piemīt zems TIK, un tāpēc tiek pare-

dzēts, ka, pievienojot ONC epoksīda sveķiem, pazemināsies arī kompozīta TIK. T_g parāda polimēra ķēžu kustību, un, ar pildvielas pievienošanu, tiek samazināts polimēra brīvais tilpums starp polimēra ķēdēm. Šai raksturīgajai temperatūrai NK vajadzētu atšķirties no nepildīto epoksīda sveķu T_g , jo tā ir jutīga pret starpfāžu piejaukumiem starp sveķiem un dažāda izmēra pildvielu. Ir zināms, ka ONC, līdzīgi kā citas nanopildvielas, ietekmē sacietējušo epoksīda sveķu struktūru, ierobežojot polimēra ķēžu mijiedarbību sacietēšanas reakcijā. Pie tam, ONC esība materiālā ietekmē polimēra ķēžu iztaisnošanos un, tādējādi, palielina polimēra T_g .

Literatūrā bieži piemin, ka nepietiekoši laba dispersitāte un nepietiekama starpfāžu adhēzija starp ONC un polimērsaistvielām ir limitējošie faktori pilnīgai nanopildvielas spēju realizēšanai [20]. Tādēļ mehānisko īpašību uzlabojumi pildītai polimēru saistvielai ar ONC, salīdzinot ar nepildītu, ir niecīgi, ņemot vērā to, kas varētu būt sagaidāms no nanoizmēru pildvielas. Kopumā var teikt, ka epoksīda sveķu eksploatācijas iespējas pieaug, tajos ievadot labi disperģētas ONC, savukārt, pie salīdzinoši lielām ONC koncentrācijām (vairāk kā 0.5-1.0%), nanopildviela pārmērīgas virsmas enerģijas dēļ rada aglomerātu parādīšanos, tādējādi, pasliktinot mehāniskās un termofizikālās materiāla īpašības [21, 22]. Pildvielas sadalījums ir saistīts ne tikai ar NK izgatavošanas metodes izvēli (temperatūras režīms un ieviešanas veids polimēra saistvielā), nanopildvielas un saistvielas tipu, bet tas ir tiešā veidā saistīts ar pildvielas daudzumu.

Epoksīda sveķiem piemīt viskoelastīgās un viskoplasiskās īpašības. Sakarā ar to, ka polimēri arvien biežāk tiek izmantoti dažādās konstrukcijās, tādās kā ēkas, transports, dažāds sporta inventārs, tad ir nepieciešama šo materiālu izpēte un uzlabojumu ieviešana ilgtermiņa izturībā. Iedarbojoties uz polimēru ar kādu spēku, laikā mainās materiāla struktūra un īpašības. Pievienojot polimēram optimālu daudzumu pildvielas, piemēram, tādās kā ONC [23, 24], kas ir vienmērīgi sadalīta kompozītā, ir iespējams ievērojami palielināt tā pretestību šļūdē un tādā veidā uzlabot materiāla ilgmūžību.

Polimēriem tiek pielietotas metodes, pēc kurām tiek prognozēta ilgtermiņa izturība un deformējamība, izmantojot analogiju (superpozīciju) principu [25-28]. Metode balstās uz faktoru, kas palielina relaksācijas procesu, piemēram, temperatūras, atmosfēras mitruma, slodzes u.c. faktoru apvienošanu ar analogijas principa būtību. Mainot kāda faktora vērtības, piemēram, temperatūru un spriegumu, un veicot īstermiņa eksperimentus materiāla izmantošanas apstākļos, iespējams iegūt pamatliknes šļūdes aprakstam, pēc kurām var prognozēt ilgtermiņa deformējamību. Savukārt, izmantojot Šeperi formulas kopā ar laika-temperatūras-deformācijas analogijas principiem, ir iespējams analītiski modelēt šļūdes un atgriezeniskās šļūdes uzvedību NK, tādā veidā nosakot pildvielas efektu šļūdē pie dažādām temperatūrām un spriegumiem.

Kā jau tika pieminēts, ir grūti izpētīt tieši nanopildvielas sadalījumu un nepieciešamo pildvielas daudzumu, un paredzēt, kā tā ietekmēs NK īpašības kopumā. Taču ir iespē-

jams veikt eksperimentālo pārbaudi uz mehāniskām, termofizikālām, kā arī citām īpašībām. Tādēļ ir svarīgi izvēlēties optimālu pildvielas koncentrāciju, kas maksimāli uzlabotu NK mehāniskās vai citas fizikālās īpašības. Lai pārlicinātos par izveidotā materiāla efektivitāti, ir nepieciešams veikt ne tikai pildvielas sadalījuma novērtējumu NK, bet arī kompleksu eksperimentālo pārbaudi, kas tieši ļauj noteikt, vai materiāla īpašības un funkcionalitāte ir uzlabotas. Veicot eksperimentu analīzi, ir iespējams salīdzināt iegūtos datus, kas dod salīdzinošu novērtējumu pildvielas daudzuma ietekmei uz konkrēta materiāla pārbaudītām īpašībām.

Dispersi pildīti polimēra kompozītmateriāli

Polimērmateriāla fizikālās īpašības un tās ietekmējošie faktori

Polimēru īpašības [17] galvenokārt ir saistītas ar paša polimēra īpatnībām un polimēra parauga īpašībām, kas lielākoties ir saistītas ar tā izmēru, formu, izkārtojumu un izgatavošanas procesiem. Taču šāds polimēru īpašību iedalījums ne vienmēr ir precīzs un neapšaubāms. Materiāla īpašības ietekmē paraugu īpašības, bet izgatavošanas apstākļi ietekmē pašu materiālu un tādā arī tā īpašības. Piemēram, daudzi polimēri var būt izgatavoti ar dažādu kristalizācijas pakāpi, mainot izgatavošanas metodi vai apdedzināšanas apstākļus, un tāpēc tiem būs dažāds blīvums.

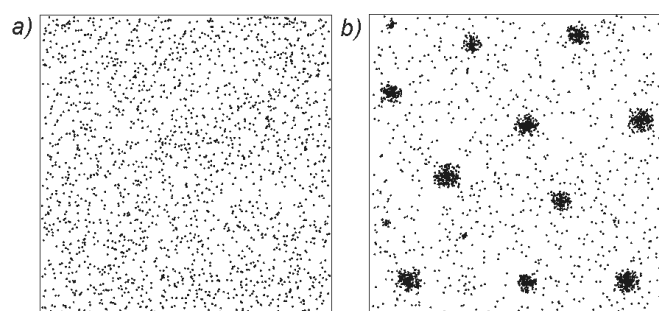
Strādājot ar noteiktiem polimēru raksturlielumiem, kurus ievērojami ietekmē testēšanas metožu nosacījumi, galvenokārt ir iespēja salīdzināt polimērus, kas izgatavoti un/vai izpētīti pie noteiktiem, ekvivalentiem nosacījumiem. Polimērmateriālu īpašības var iedalīt divās pamatgrupās: fundamentālās un iegūtās īpašības. Fundamentālās īpašības, tādās kā saišu enerģija, siltumietilpība u.c., ir bāzes materiāla īpašības. Ir zināms, ka materiāli ir veidoti no noteiktu izmēru un elektronisko struktūru atomiem un to savienojumiem, un mijiedarbība starp atomiem definē noteiktu telpisku sakārtojumu, kas, savukārt, nosaka fundamentālās īpatnības. Iegūtās īpašības, tādās kā stiklošanās temperatūra, blīvums, elastības modulis u.tml., ir daudz sarežģītākas un var būt izteiktas kā fundamentālo raksturlielumu kombinācijas [17].

Epoksīda sveķi - monomēri, kas molekulā satur ne mazāk par divām epoksīda vai glicidila grupām. Sacietējušiem epoksīda sveķiem piemīt globulu tipa mikroheterogēnā struktūra, kas sāk veidoties jau šķidrā fāzē sacietēšanas pirmajā posmā [29]. Globulāro daļiņu izmērs (ap 103Å) ir atkarīgs no kompozīcijas sastāva un sacietēšanas nosacījumiem (palielinot temperatūru, izmērs samazinās). Samazinoties globulu izmēriem, samazinās polimēra blīvums. Samazinoties attālumam starp tikla ķēžu mezgliem, palielinās stiklošanās temperatūra, saspiešanas stiprība, ķīmiskā un termostabilitāte, taču parasti pieaug polimēra trauslums. Palielinoties segmentu sakārtojuma blīvumam, palielinās stiprība un ķīmiskā izturība. Lai izmainītu sacietējušo epoksīda sveķu sākotnējos raksturlielumus, tajos, pirms sajaukšanas ar cietinātāju, ievada plastifikatorus vai dažādas pildvielas [30].

Pievienojot pildvielu epoksīda sveķiem [29], tiek palielināta viskozitāte, sacietēšanas procesā samazinās rukums, kā arī palielinās cietība un stiprība sacietējušā stāvoklī. Populāras pildvielas ir kvarcs, azbests, kaolīns, stikla un oglekļa šķiedra, kā arī dažādas nanopildvielas, tādas kā ONC, montmorillonīta māls, alumīnija oksīds u.c. Sacietējušiem epoksīda sveķiem piemīt vērtīga īpašība – laba adhēzija praktiski pret visiem materiāliem (metāliem, porcelānu, keramiku, stiklu, plastmasu, koku u.c.). Tāpat tie ir izturīgi pret vidējās un vājās koncentrācijas sālsskābes un sērskābes iedarbību, pret sārmiem un benzīnu. Sveķiem piemīt augsti dielektriskie rādītāji, laba mitruma un siltumizturība.

Epoksīda sveķu nanokompozīti, to pielietojums, iegūšanas un samaisīšanas metodes

Polimēru nanokompozīts – divu vai vairāku komponentu materiāls, kas sastāv no polimēra saistvielas un pildvielas ar raksturīgo izmēru no 1 līdz 100 nm kaut vienā dimensijā. Salīdzinājumā ar nepildītiem polimēriem, atbilstošie nanokompozīti dod būtisku īpašību uzlabošanu, turklāt pildvielas saturs sastāda ne vairāk par 2-10% pēc masas. Pastāv dažas pamatmetodes NK izveidei [16, 31, 32], tādas kā interkalācija šķīdumā (nanopildvielu vispirms samaisa kādā šķīdumā, kas nav polimēra sastāvā) vai kausējumā (samaisa polimēra sastāvdaļās, neizmantojot šķīdumus), in-situ polimerizācija vai polimerizācija emulsijā. Tās ir aprakstītas zemāk, kā arī sniegts to salīdzinājums (1. tabula.). Metodes atšķiras ar pildvielas sadalījuma efektivitāti, kā arī ar iespējamiem piejaukumiem izveidotajā polimēru NK, kas savukārt var ietekmēt tā īpašības.



1. attēls. Pildvielas sadalījuma shēmatisks attēlojums, kur (a) ir homogēns pildvielas sadalījums, bet (b) satur aglomerātus jeb nehomogenitātes

Nanokompozītu sintēzes metodes

Interkalācija šķīdumā. Sakotnēji notiek nanocaurulišu samaisīšana šķīdumā (ūdenī, metanolā, etanolā, acetonā vai citā), pie tam var tikt pielietotas virsmas aktīvās vielas (VAV). Tad augstā temperatūrā tiek pievienots polimērs, šķīdums iztvaikojas un pilnīgi tiek izvests degazācijas rezultātā (gaisa burbuliņu izvešana pie zemiem spiedieniem, t.i, vakuumā).

Interkalācija kausējumā. Nanocaurulišu sajaukšana sakausētā polimērā pie augstām temperatūrām neizmantojot

šķīdinātāju. Metode nav tik efektīva kā interkalācija šķīdumā lielas kompozīta viskozitātes dēļ, kas noved pie pievienoto nanocaurulišu koncentrācijas samazināšanās kā arī pie nepietiekamas homogenitātes. Pielietojamie polimēri – polikarbonāts, polipropilēns, poliamīds, neilons-6 u.c.

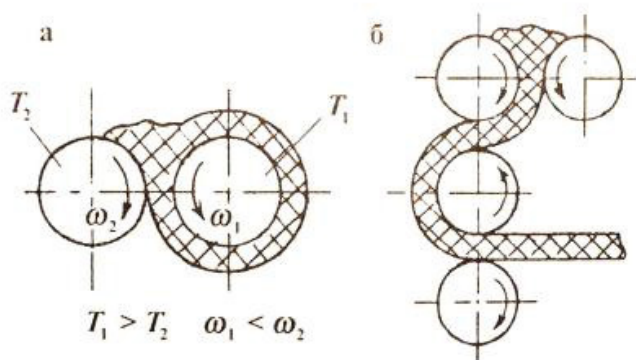
In-situ polimerizācija. Sakotnēji tiek disperģētas funkcionalizētas jeb apstrādātās ar VAV nanocaurulītes monomērā. Tad polimerizējas un ar cietinātāja, t.i katalizatora, palīdzību tiek veikts pēdējais solis – sacietēšana. Metode labi piemērota epoksīda sveķiem, jo tie ir divkomponentu polimēri. Disperģēšanas efektivitāte un ONC koncentrācija ir zemāka polimerizācijas procesa lielas viskozitātes dēļ.

Polimerizācija emulsijā. Īstenojas starp nesajaucamām fāzēm, viena no kurām satur monomēru. Kā dispersijas vidi visbiežāk izmanto ūdeni. Tādā gadījumā monomēru, kas nav šķīstošs vai slikti šķīstošs ūdenī, ievada daudzumā 30–60% pēc tilpuma. Emulsijas stabilizēšanai visbiežāk izmanto VAV. Pie diezgan lielām koncentrācijām ūdens šķīdumos izveidojas emulgatora micellas. Monomērs daļēji izšķīst micellās, bet daļēji paliek sistēmā diezgan lielu pilienveidā (diametrā 10-4 cm), kas stabilizēti ar emulgatora palīdzību. Micellu skaits sistēmā ir aptuveni 108 reizes lielāks nekā monomēra pileinu skaits. Polimerizācija sākas micellās, kuras drīz vien pārvēršas kolloīdālu izmēru polimēra lateksa daļiņās, kas ieskaiti emulgatora slānī. Pie tam procesa sākuma stadijās notiek lateksa daļiņu gan skaitlisks pieaugums, gan izmēru palielināšanās. Polimerizācija tiek pabeigta, kad tiek patērēti visi monomēra pilieni [31, 33].

Viendabīga nanokompozīta iegūšanu iespaido nanodaļiņu „salipšana”, tādejādi veidojot aglomerātus (1. attēls. b), kas negatīvi ietekmē kompozīta īpašības. Aglomerātu skaita un lieluma samazināšanai ir nepieciešama efektīva nanopildvielas un saistvielas samaisīšanas metodes ir ekstrūzija un valcēšana. Tās ir piemērotas jau sadalīto ONC samaisīšanai ar polimēra saistvielu, kas pieder pie termoplastiskiem polimēriem. Tās netiek pielietotas šķīdumu sajaukšanai. Savukārt, nelielu suspensijas daudzumu pagatavošanai efektīvi var pielietot sasmalcināšanas metodi ar ultraskaņu [34], kur viendabīgu maisījumu pagatavošana (homogenizācija) notiek kavitācijas dēļ. Parādība, kas novērojama kavitācijas laukā, rada suspensiju un emulsiju veidošanos, tādēļ tā tiek plaši pielietota viendabīgu maisījumu izveidei jeb homogenizācijai. Šo samaisīšanas veidu parasti izmanto pirms ONC interkalācijas šķīdumā metodē.

Nanokompozītu samaisīšanas metodes

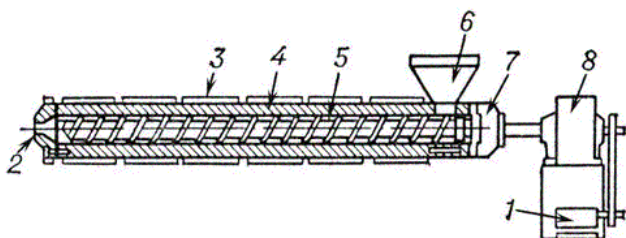
Valcēšana – polimēru pārstrādes metode, kas sevī iekļauj daudzkārtējo materiāla caurlaišanu caur spraugu, kas atrodas starp sakarsētiem metāliskiem veltniem, kuri griežas pretī viens otram. Temperatūras un mehānisko spēku ietekmē spraugā starp veltniem materiāls pāriet no cietvielas stāvokļa (stiklveida) viskozi tekošā stāvoklī, pie tam tas pakļaujas deformācijas spēkiem, paliek mīksts, tiek sajaukts un homogenizēts. Metodi pielieto arī ingredientu samaisīšanai ar polimēru.



2. attēls. Valcēšanas un kalandrēšanas shēma [35]

Lielākai deformācijas intensitātei, veltņi griežas ar dažādiem ātrumiem. Pie tam aizmugurējā veltņa griešanās ātrums ω_2 ir divreiz lielāks nekā priekšējā ω_1 . Attiecību ω_2/ω_1 sauc par frikcijas koeficientu vai vienkārši frikciju (2. attēls.). Visbiežāk šī koeficienta vērtības ir intervālā 1.1-1.4. Veltņi var darboties gan periodiskā, gan nepārtrauktā režīmā [35].

Ekstrūzija – neierobežota garuma izstrādājumu vai pusfabrikātu iegūšanas veids no polimēru materiāliem sakausējuma izspiešanas ceļā caur vajadzīgā profila formējošo atveri (fuljēru).



3. attēls. Viengliemeža ekstrūdera shēma (1- piedziņas dzinējs, 2 – formējošā atvere, 3 – sildelements, 4 – čaula, 5 – gliemežskrūve, 6 – pildīšanas atvere, 7 - atbalsta gultnis, 8 – reduktors) [36]

Lielāko pielietojumu guva gliemežekstrūders (3. attēls.). Tas darbojas līdzīgi gaļas maļamajai mašīnai - gliemežskrūve pārvieto materiālu no iekrāvējdaļas gar korpusu uz izeju. Pie tam materiāls tiek saspiests (spiediens ekstrūderī sasniedz 15–50 MN/m²), sasildīts, tas plastificējas un homogenizējas [36].

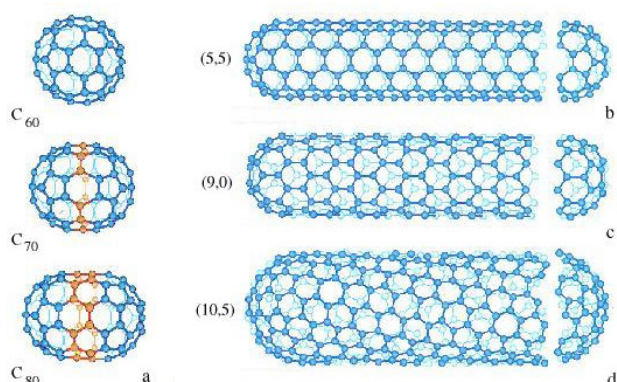
Sasmalcināšana ar ultraskaņu – tiek pielietota viendabīgu maisījumu izgatavošanai (homogenizācijai). Svārstību frekvence līdz 800 tūkst./sek. Šķīdumā veidojošos poru aizciršanas rezultātā rodas sitiena mikroviļņi (kavitācija). Kavitācija - ar gāzi, tvaiku vai to sajaukumu pildīti burbuliši šķīdumā. Kavitācija rodas šķīduma spiediena samazināšanās rezultātā, kas rodas vai nu palielinoties šķīduma ātrumam (hidrodinamiskā kavitācija) vai arī pieaugot akustiskā viļņa virzes lielai intensitātei (akustiskā kavitācija). Pārvietojoties šķīdumam straumes veidā ar daudz augstāku spiedienu vai šķīduma saspišanas brīdī, radušais kavitācijas burbulis sasitas (aizcērtas), radot trieciena vilni [34].

1. tabula. Nanokompozītu sintēzes metožu salīdzinājums

Polimerizācijas process	Priekšrocības	Trūkumi	Turpmākā apstrāde
Interkalācija šķīdumā [31]	Vienkārša temperatūras kontrole. Laba disperģēšanas efektivitāte.	Nepieciešamība tikt vaļā no šķīdinātāja. Var tikt izmainītas polimēra īpašības.	US, mehāniska ekstrūzija vai valcēšana.
Interkalācija kausējumā [31]	Tikai monomēra klātbūtne, nekādu piejaukumu.	Liela viskozitāte, neizreaģēta monomēra klātbūtne.	US, mehāniska ekstrūzija vai valcēšana.
In-situ polimerizācija	Divstadiju ONC dispeģēšana polimērā, iespējama VAV izmantošana, kas palielinās disperģēšanas efektivitāti. Labi piemērota epoksīda sveķiem.	Der ne visiem polimēriem. Zemāka disperģēšanas efektivitāte un daļiņu koncentrācija viskozitātes dēļ. VAV klātbūtne.	US vai mehāniska.
Polimerizācija emulsijā [31]	Monomērs reaģē pilnībā, iespējama temperatūras kontrole. Iespēja izgatavot materiālus ar augstu stiklošanās temperatūru. Maza viskozitāte.	VAV klātbūtne var novest pie ūdens jutības. Papildus tēriņi gala produkta attīrīšanai no emulgatora.	US vai mehāniska.

Oglekļa nanocaurulītes un to sintēzes metodes

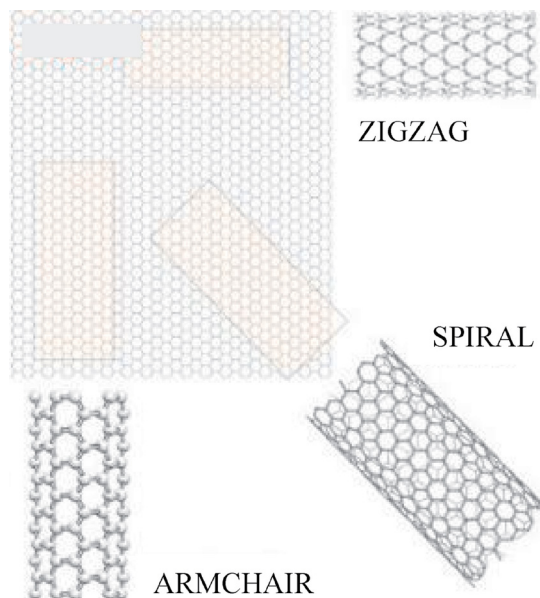
Oglekļa nanocaurulītes – viendimensiju organizētas cilindriskas struktūras, kuru diametrs ir no viena līdz vairākiem desmitiem nanometriem un garums līdz dažiem mikroniem. Tās tika atklātas 1991. gadā [1, 32]. Atkarībā no sintēzes tehnoloģijas nanocaurulīšu gali var būt vai nu vaļēji, vai pusfēriski, kas ir izveidoti no fullerēna pusītēm (4. attēls. b, c, d). ONC piemīt unikālas īpašības; tām ir ļoti maza masa un tai pašā laikā caurulītēm piemīt ļoti augsts elastības modulis (līdz 1 TPa). Šobrīd no tām var izveidot izturīgākās šķiedras, kuras deformācijas procesā nelūzīs, bet tikai lieksies [37].



4. attēls. Dažādu konfigurāciju fullerēnu shēma (a) un dažāda sakārtojuma nanocaurulītes (b, c, d) [38]

Fulerēni – lieli, stabili klasteri (vairāku homogēnu atomu savienojumi, kas var tikt uzskatīti kā viens vesels elements ar noteiktām īpašībām). Tie pieder oglekļa alotropo veidu klasei un izskatās kā izliekti noslēgti daudzkārtņi, kuriem ir pāra skaits trīskoordināšu oglekļa atomu (4. attēls. a). Šie klasteri pie noteiktiem, parasti paaugstinātiem, spiediena un temperatūras veido fullerītus jeb fullerēnu molekulu savienojumus kristālā. Fullerīta kristālā starp fullerēna molekulām ir raksturīgas Van der Valsa saites.

Oglekļa nanocaurulītes var būt viensieniņu vai daudz-sieniņu. Ideāla viensieniņu oglekļa nanocaurulīte, kuras zināmais mazākais diametrs 0.7 nm (kas arī ir vismazākais fullerēna C₆₀ molekulas diametrs), izveidojas augstā temperatūrā (virs 800 °C) grafitā plaknes savērpšanas procesā, oglekļa ķīmisku pārvērtību rezultātā. Plakne sastāv no sešstūriem un savērpšanas cilindriskas virsmas formā. Nanocaurulītes savērpšanas rezultāts ir atkarīgs no grafitā plaknes orientācijas leņķa attiecībā pret caurulītes asi (5. attēls.). Tas lielā mērā nosaka ONC fizikālās īpašības. Vienāda veida ONC, kurām atšķiras tikai plakņu sakārtojuma tips, raksturīgas dažādas īpašības, piemēram, «krēsla» (angl. «armchair») tipa viensieniņu ONC piemīt metāliskā vadītspēja, savukārt «zāģveida» (angl. «zigzag») tipa ONC piemīt pusvadītāju īpašības. Nanocaurulītes, kas sastāv no vairākiem koaksiāliem grafitā cilindriem un kurās starpslāņu attālums ir mazāks par 1 nm, tiek sauktas par daudz-sieniņu oglekļa nanocaurulītēm [32].

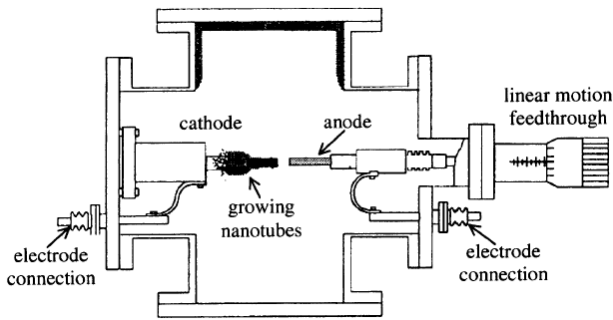


5. attēls. Viensieniņu nanocaurulītes struktūra «krēsla», «zāģveida» un «spirāles» (patvaļīgas saritināšanas veids) tipa shematiskais attēlojums [39]

Eksistē trīs pamatmetodes ONC sintēzei [32]: elektrolokizlādes grafitā izsmidzināšana, grafitā ablācija ar lāzera vai saules starojumu bufergāzes atmosfērā un ogļūdeņražu katalītiskā sadalīšanās. Lai izveidotos pārsvarā ONC nevis fullerēni, ir nepieciešams uzturēt noteiktu spiediena un temperatūras režīmu (katrai metodei šie parametri ir atšķirīgi, tomēr parasti tie ir paaugstināti, piemēram, temperatūra var variēt no viena līdz vairākiem tūkstošiem Celsijas grādiem un spiediens parasti 60–100 kPa), kā arī lāzerablācijas metodē jāizmanto garākus un intensīvākus impulsus (vairākas ns). Raksturīgie ONC sintēzes metožu piemēri ir aprakstīti zemāk, kā arī sniegts to salīdzinājums (2. tabula.).

Elektrolokizlādes grafitā izsmidzināšana

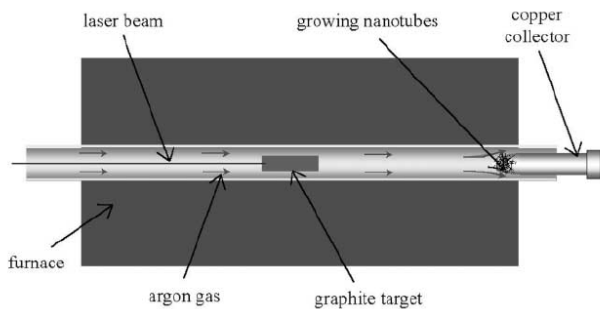
Starp grafitā elektrodēm kamerā ar dzesinātām sienām bufergāzes spiedienā notiek lokizlāde, kur kustīgo elektrodu savstarpējais attālums ir uzturēts aptuveni 1 mm. Pie strāvas stipruma 100 A un elektrodu sprieguma 25-35 V plazmas temperatūra starpelektrodu apgabalā sasniedz 4000 °C. Konvekcijas dēļ oglekļa atomi tiek aiznesti uz aukstāku plazmas apgabalu, kur daļa no tām veido nanocaurulītes. Iegūto ONC struktūra un īpašības ir atkarīgas no metālu katalizatoru klātbūtnes apgabalā, kur tiek audzētas nanocaurulītes. Katalizatoru (Co, Ni, Cr, Pd u.c.) pielietojšanas rezultātā izveidojas viensieniņu ONC ar diametru mazāku par 1 nm, savukārt, ja netiek pielietoti katalizatori izveidojas daudz-sieniņu caurulītes ar iekšējo diametru virs 1 nm un ārējo diametru 2–25 nm [32, 40].



6. attēls. Elektrolizēšanas ar grafitu elektrodiem izmantošanas shēma [40]

Grafitu ablācija ar lāzera vai saules starojumu bufergāzes atmosfērā

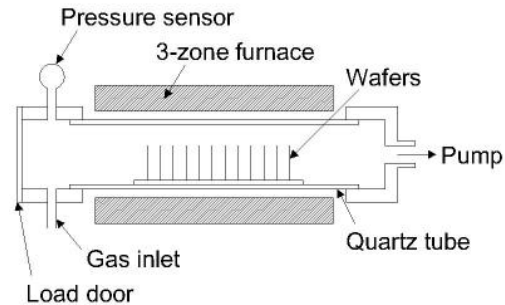
Piemēram, var pielietot Nd:Yag (neodymium-doped yttrium aluminium garnet; $Nd:Y_3Al_5O_{12}$) lāzeru ar impulsa garumu 8 ns un ar 1.6 mm lielu aktīvo punktu uz grafitu stieņa. Grafitu termiskās izkliedes produkti tiek aiznesti kopā ar bufergāzi no karsta apgabala un nosēžas uz vara kolektora virsmas, kas tiek dzesēta ar ūdeni. ONC raksturlielumi ir jutīgi pret lāzerstarojuma parametriem, visvairāk pret lāzerimpulsa intensitāti un garumu. Tas ļauj sintezēt ONC ar noteiktām struktūripašībām. Galvenais faktors, kas ietekmē materiāla ablācijas režīmu ir lāzerstara jaudas blīvums. Lāzers var tikt aizvietots ar safokusētu saules starojumu, kas novirzīts uz sakarsētu līdz 1200 °C grafitu mērķi [40, 41].



7. attēls. Lāzerablācijas procesa shēma [40]

Ogļūdeņražu katalītiskā sadalīšanās

Katalizators, kas sastāv no augstās dispersitātes metāla, aizpilda keramisko tīģeli ar temperatūru 700–1000 °C, kas iekļauts cauruļveida krāsnī, un tiek nopūsts ar gāzveida oglekļa un bufergāzes maisījumu, piemēram, ar $C_2H_2 : H_2$ ar attiecību 1 : 10. Augsta ONC homogenitātes pakāpe tiek sasniegta poraina paliktņa dēļ, kuram ir maksimāli augsta poru viendabība. Optimāls variants ir, ja poras ir aizpildītas ar metāla klasteriem, kuru izmērs sakrīt ar poru izmēriem. Tad ONC, kas izveidojas uz katalizatoru virsmas, diametrs paliek līdzīgs klastera un poru diametra izmēriem. Izveidojas ONC, kas ir orientētas attiecībā pret paliktņa virsmu [32, 42].



8. attēls. Ogļūdeņražu katalītiskās sadalīšanās reaktora shēma [42]

2. tabula. ONC sintēzes metožu salīdzinājums

Sintēzes metode	Priekšrocības	Trūkumi
Lokalizācija ar grafitu elektrodiem	Iespējama iegūto ONC kontrole ar katalizatoru palīdzību (viensieniņu vai daudzieniņu ONC).	Neliela produktivitāte. Ātra elektrodu nolietojšanās (daži simti stundu) lokālās iedarbības dēļ, un kā sekas – dārdzība. Nepieciešamība darboties pie noteikta strāvas stipruma, kas prasa jaudīgu taisngriežu pielietojšanu.
Grafitu ablācija ar lāzerstarojuma palīdzību bufergāzes atmosfērā	Ļauj sintezēt ONC ar uzdotām struktūripašībām. Tiešā iztvaikošana detalizētāk ļauj kontrolēt augšanas nosacījumus, veikt ilgstošas operācijas un ražot labākas kvalitātes ONC lielākā daudzumā.	Neliela produktivitāte. Sarežģīts mērķa izgatavošanas process (metāliskās drupatas un grafitu pulveri nepieciešams izturēt vairākas stundas zem augsta spiediena un 1200 °C temperatūras).
Ogļūdeņražu katalītiskā sadalīšanās	Iespēja pārvaldīt ONC ģeometriskos raksturlielumus ar metālu katalizatoru klātbūtni. Viendabības augsta pakāpe. Nav ierobežojumu ražošanas daudzumam.	ONC izveidojas grūti kontrolējamu cietfāžu izejvielas pārvērtību rezultātā. Piejaukumu esamība galīga produkta sastāvā.

Parasti ONC pielieto kompozītu modificēšanai, lai uzlabotu matricas jeb kompozīta saistvielas pamatīpašības. Polimēra NK var būt ar daudzām atšķirīgām īpašībām, kuras tiek pielāgotas konkrētiem pielietojuma mērķiem. Arī ONC īpašības, piemēram, ir atkarīgas no tīrības (piejaukumu eksistēšana), sakārtojāmības (spirāliskā, zig-zag, krēslveida),

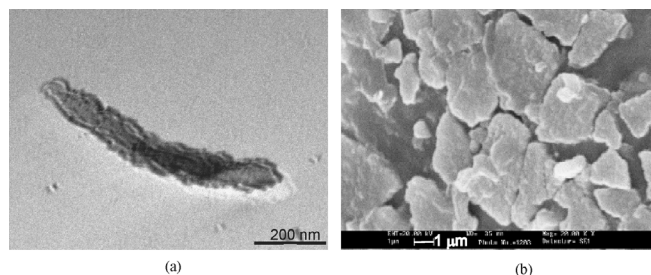
ģeometriskiem izmēriem, viensieniņu vai daudzieniņu ONC. Tādā veidā kopējās NK īpašības ir atkarīgas no daudziem faktoriem:

- Ar vai bez VAV (surfaktanti);
 - Ultraskaņas disperģēšanas metode var tikt pielietota papildus šķīdumam (piemēram, acetona) vai uzreiz epoksīda sveķiem (pārsvārā šķīdrijiem cietinātājiem), vai vispār nepielietota;
 - Ultraskaņas vietā kalandrēšana (svarīga intensitāte, efektivitāte, ilgums);
 - Dažāds ONC saturs (parasti intervālā no 0.01% līdz 5%);
 - Var tikt pielietotas vēl citas sastāvdaļas (piem., stikla vai oglekļa šķiedra);
 - u.c.
- Galarezultātu var ietekmēt:
- ONC tīrība (piejaukumi) un veids;
 - Epoksīda sveķu veids (tai skaitā karstā vai aukstā sacietēšana);
 - Surfaktantu pārpalikumi;
 - Citi piejaukumi (piem., acetons, etanols u.c.);
 - Vakuuma pielietojums, gaisa burbuļu izvadīšana;
 - u.c.

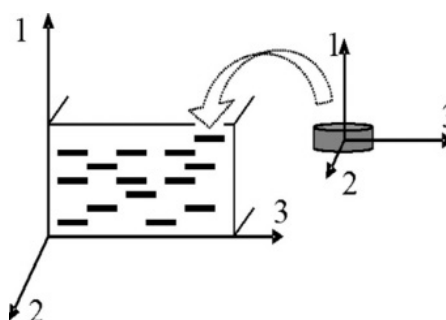
Montmorilonīta māls kā polimērmateriāla pildviela

Efektīva slāņainā silikāta nanopildviela ir montmorilonīta māls (MMT). To kristāliskajā struktūrā atrodas divi silīcija dioksīda tetraedriskie slāņi ar metāla atomiem un oktaedriskais slānis, kas veidots no metāla oksīda. Elementārmonoslāņa biezums ir aptuveni 1 nm, bet šķērsgriezumā tas ir 20–500 nm izmēru ietvaros.

Pētītā NK uz bisfenola A bāzes, pildīts ar monmorilonīta māla daļiņām, ar sastāvu $[(Mg_{0.33}Al_{1.67})Si_4O_{10}(OH_2)]Na_{0.33}$, kas kristalizējas monoklīnā sistēmā zvīnu veidā ar to biežumu 1 nm un diametru 100 nm [43, 44]. Hidroksilo grupu esamība uz daļiņu virsmas nosaka armēšanas efektu, un uz virsmas kā modifikators strādā oktadecilamīns. Tika izpētīts [44, 45] epoksīda sveķu uz bisfenola A bāzes kompozīts ar oktadecilamīnu modificēti mmT organisko mālu ar pildvielas saturu $c = 0, 2, 4$ un 6% , kur tika izskatīts mitruma un pildvielas daudzuma efekts uz mehānisko NK uzvedību. Mikrostruktūras analīzei tika izmantoti SEM un TEM mikroskopi (9. attēls.), tādējādi tika apskatīta nanodaļiņu dispersitāte acetona pirms to iejaušanas polimēra saistvielā. Apskatot iegūtos attēlus [44], ir redzams, ka nanomāla daļiņām ir slāņveida struktūra un diametra-biezuma attiecība ir liela (50). SEM attēls (9. attēls. b) parāda, ka šķērsdimensija daļiņām un to aglomerātiem ir daudz lielāka nekā garendimensija.



9. attēls. Tipisks māla nanodaļiņas TEM attēls acetona suspensijā (a) un NK ar $c = 2\%$ lūzuma virsmas SEM mikrofotogrāfija (b) [44]



10. attēls. Cilindriska tipa pildvielas daļiņu shematiska reprezentācija polimēra saistvielā [45]

Daļiņu shematiskā reprezentācija parāda, aptuveno mmT māla sadalījumu saistvielā (10. attēls.). Darba gaitā tika noteikts [45], ka augstu mehānisko raksturlielumu dēļ samazinās mitruma efekts uz mehāniskām īpašībām, tādējādi palielinās NK pielietojamība augsta mitruma apstākļos. Savukārt pētot termomehāniskās īpašības šim pašam materiālam [46], kur tika noteikts, ka māls saturošiem NK ir raksturīgi sarežģīti adsorbcijas procesi un efekti uz NK īpašībām, tādējādi ir diezgan grūti iegūt materiālu ar plašu termomehānisko īpašību daudzveidību. Galvenais raksturlielums, kas raksturīgs visiem NK ar dažādu māls pildvielas daudzumu (2, 4, 6%) ir notiekošā kristalizācija termomehāniskās analīzes gaitā, kur paraugs tika sildīts līdz 280 °C.

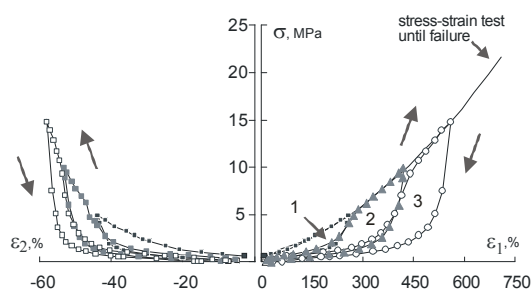
Ekspērimētāli ir pārbaudīts [47], ka nanopildvielas iekļaušana polimērā, samazina kustīgumu starp polimēra ķēdēm un uzlabo šķīdes pretestību polimērmateriālam sausā atmosfērā. Mitrums savukārt ietekmē kustīgumu negatīvi, tādējādi pazeminās arī stiklošanās temperatūra.

Butadiēnstirola elastomērs pildīts ar silīciju

Elastomēri [48, 49] tiek plaši izmantoti kā rūpniecības materiāli, it īpaši riepu ražošanā. To nostiprināšana ar pildvielām šobrīd ir diezgan izplatīta, jo pildvielu pievienošana izraisa elastomēra lielāku cietību, kas notiek ķīmisko un fizikālo mijiedarbību dēļ starp daļiņām un gumijas makromolekulārām ķēdēm, kā arī daļiņu-daļiņu mijiedarbības dēļ, kas notiek struktūras dažādos līmeņos. Pildviela bez elastomēra īpašību uzlabošanas var izraisīt arī citu efektu parādīšanos, piemēram, mīkstināšanos vai Mullinsa efektu, kas joprojām ir izpētes stadijā savas kompleksās dabas dēļ. To iespējams novērot cikliskās slodzes eksperimentos, palielinot spriegu-

mu amplitūdu. Taču mikstināšanās var tikt novērota kā piepildītos elastomēros, gan parastajos, un šis parādības kvantitatīva īpašība ir histerēzes zudumi. Analizējot histerēzes zudumu kinētiku, palielinot elastomēru spriegumu, ir iespējams novērtēt dažādu mikstināšanas mehānismu uzvedību dažādos deformāciju līmeņos, un tādējādi veikt secinājumus procesiem, kas izraisa elastomēra tilpuma izmaiņas.

Darbā [50] tika pētīts styrene-butadiene elastomērs, ka arī piepildīts ar silīcija pildvielu ar $c = 9, 14$ un 21% pēc tilpuma. Histerēze (11. attēls.) ir galvenais iemesls enerģijas zudumiem, kas saistīti ar vērpes pretestību un galvenokārt ir izskaidrojama ar elastomēra viskoelastīgiem raksturlielumiem. Enerģijas daļa, kas ir patērēta elastomēra deformācijās, izkļiedžas molekulārās pārkārtošanās viskozajā pretestībā un pārvar struktūras bojājumus.



11. attēls. Sprieguma-deformācijas līknes elastomēram ar 21% silīcija pildvielu cikliskajā testēšanā un līkne līdz materiāla sagraušanai, kur cipari raksturo slodzes-atslodzes ciklus [50]

Ši paša materiāla [50, 51] kvazistatisko testu analīze parāda stingrības, izturības un stiepes attiecības palielināšanos, palielinot pildvielas daudzumu. Ir zināms, ka mazu izmēru pildvielas daļiņas (arī silīcija) izraisa pastiprināšanas efektu elastomēra saistvielai, piemēram palielinās bīdes vai stiepes modulis. Eksperimentālo datu analīze var tikt izmantota teorētiskiem aprēķiniem un modeļu izveidei [52].

Polimēru kompozītu modificēšanas iespējas

Polimēru īpašības var dažādi ietekmēt ar ONC, un katrā gadījumā ir iespējams sasniegt dažādus rezultātus, tādējādi piemeklējot konkrētas materiāla īpatnības noteiktiem mērķiem. ONC praktiski vienmēr izmaina epoksīda sveķu kompozīta īpašības lielākā vai mazākā mērā, pārsvarā atkarībā no epoksīda sveķu sākotnējām īpašībām un pildvielas veida, kā arī tās koncentrācijas. ONC var būt viensieniņu vai daudzsieniņu, ar atšķirīgu grafīta plaknes savērpšanas leņķi, kas, savukārt, var ietekmēt to elektrisko vadāmību. Arī pašas ONC ir iespējams modificēt, piemēram, NK izveidei bieži vien izmanto virsmas aktīvās vielas, kas paaugstina šķīdumu un cietķermeņu disperģēšanas procesu efektivitāti. VAV plaši pielieto kā disperso sistēmu stabilizatorus.

Modificējot epoksīda sveķus [53] ar daudzsieniņu ONC, kur savukārt ONC tika modificētas ar VAV, tika pētīta stiklošanās temperatūra. Tika noteikts, ka kompozītam bez ONC modifikācijas stiklošanās temperatūra ir $168\text{ }^\circ\text{C}$, pievienojot 0.5% un

1.0% pēc masas ONC, šī temperatūra ir 166 un $180\text{ }^\circ\text{C}$ attiecīgi, bet ja ONC vēl modificē ar VAV, tad stiklošanās temperatūra attiecīgi pieaug līdz 200 un $207\text{ }^\circ\text{C}$. Tātad, izmainot epoksīda sveķus ar modificētām ONC ar koncentrāciju 1.0% pēc masas, tiek sasniegts labāks rezultāts, stiklošanās temperatūrai pieaugot par $39\text{ }^\circ\text{C}$, salīdzinot ar nemodificētiem epoksīda sveķiem.

Ogasawara [54] ir pildījis polimēra saistvielu ar daudzsieniņu ONC dažādās koncentrācijās, kuru garums mērāms simtos mikrometros, bet diametrs $20\text{--}100\text{ nm}$. Materiāls tika veidots, pielietojot mehānisko ONC iejaukšanas saistvielā metodi. Pētāmie raksturlielumi atkarībā no pildvielas daudzuma (3. tabula.) parāda, ka Junga modulis (noteikts no eksperimentiem stiepē sprieguma intervālā $0.5\text{--}1.0\%$), stiprība un stiklošanās temperatūra palielinās, pievienojot vairāk ONC.

3. tabula. Izpētīto [54] īpašību salīdzinājums atkarībā no ONC koncentrācijas polimēra saistvielā

ONC saturs, % pēc masas	$T_g, ^\circ\text{C}$	E, GPa	$e_{\text{max}}, \%$	$s_{0.2}, \text{MPa}$
0	335	2.84	7.6	69.8
3.3	339	3.07	4.0	80.5
7.7	350	3.28	3.6	84.6
14.3	357	3.90	2.6	92.6

Veicot labi un slikti sadalītu ONC ietekmes uz mehāniskajām īpašībām salīdzināšanu rakstā [55], ir novērojams sadalījuma kvalitātes efekts (4. tabula.), kur kvantitatīvie raksturlielumi ir norakstīti no grafika, tādēļ, iespējams kļūda robežās $\pm 0.3\text{ MPa}$ un $\pm 0.001\%$ attiecīgiem lielumiem. Daudzsieniņu ONC, kuru vidējais diametrs ir 20 nm un garums $10\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$, ir ievadītas epoksīda sveķu saistvielā, kur labs nanopildvielas sadalījums tiek panākta, izmantojot samaisīšanas metodi ar ultraskaņu.

4. tabula. Izpētīto [55] mehānisko raksturlielumu salīdzinājums atkarībā no ONC sadalījuma kvalitātes polimēra saistvielā

ONC saturs, % pēc masas	0	0.5	1.0	1.5
$E_{\text{stiepes}}, \text{MPa}$				
Labs ONC sadalījums	68.6	73.5	76.3	78.9
Slikts ONC sadalījums	68.6	75.9	77.9	79.3
$s_{\text{stiepe}}, \text{MPa}$				
Labs ONC sadalījums	68.1	74.1	75.9	79.3
Slikts ONC sadalījums	68.1	69.5	65.9	62.2
$e_{\text{max}}, \%$				
Labs ONC sadalījums	0.057	0.053	0.051	0.048
Slikts ONC sadalījums	0.057	0.052	0.043	0.041

Savukārt raksta [18] autori ir veikuši cita veida NK izveidi, kur tika izmantoti ONC (0.5% pēc masas), epoksīda sveķi un stikla šķiedras. Tika pētītas šo NK īpašības tādas kā stiklošanās temperatūra T_g , termiskās izplešanās koeficients TIK, NK stingrība (plaisas ierosināšanas moments un izplatīšanās (J/m^2)). Rezultāti parāda, ka stiklošanās temperatūra NK, salīdzinājumā ar nemodificētu ar ONC NK, ir palielinājusies no 110 °C līdz 122 °C, TIK samazinājās no 51 līdz $35 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. ONC izmainot struktūru, izmaina arī polimēra ķēžu kustību, un tādējādi ietekmē T_g un TIK. Bet mehāniskajās īpašībās tika novērota negatīva ONC ietekme. Šādas mikrostrukturālas modifikācijas ar ONC iespējams var negatīvi ietekmēt adhēziju (salipšanu) starp saistvielu un stikla šķiedru. Kā arī ONC aglomerāti iespējams pavairo tos apgabalus [18], kur novērojama slikta adhēzija starp sistēmas komponentēm (ONC, šķiedra un sveķi).

Rezultāti parāda (5. tabula.), ka stiklošanās temperatūra salīdzinājumā ar nemodificētiem epoksīda sveķiem un stikla šķiedru ir palielinājusies.

5. tabula. Aprēķināto īpašību salīdzinājums attiecībā pret nemodificēto NK (pirmais stabiņš) [18]

Īpašība/ Materiāls	Stikla šķiedra / tīrie ep. sveķi	Apstrādātā stikla šķiedra / tīrie ep. sveķi	Stikla šķiedra / ep. sveķi ar ONC	Apstrādātā stikla šķiedra / ep. sveķi ar ONC
Stiklošanās T_g , °C	110	122 (+11%)	119 (+8%)	117 (+6%)
Termiskās izplešanās koeficients 10–6/°C	51	35 (-31%)	45 (-12%)	42 (-17%)
Plaisas ierosināšanas moments (J/m^2)	375	414 (+10%)	467 (+25%)	474 (+28%)
Plaisas izplatīšanās (J/m^2)	1361	634 (-53%)	665 (-51%)	888 (-34%)

Negatīva ietekme ONC tika novērota plaisas izplatīšanās vērtībām. Šādas mikrostrukturālas modifikācijas ar ONC iespējams var negatīvi ietekmēt adhēziju (salipšanu) starp saistvielu un stikla šķiedru. Kā arī ONC aglomerāti iespējams pavairo tos apgabalus, kur notikusi slikta salipšana starp sistēmas komponentēm (ONC, šķiedra un sveķi). Savukārt, to, ka termiskais izplešanās koeficients ir augstāks modificētām stikla šķiedrām kopā ar modificētiem epoksīda sveķiem salīdzinājumā ar NK, kur modificētas ir tikai šķiedras, pēc autoru domām, varētu būt izskaidrota, ar to, ka ONC ir sakopojusies lielākās koncentrācijās pie šķiedru/polimēra apgabaliem.

Kopumā, zems TIK ir vēlams, labas telpiskās stabilitātes sasniegšanai (t.i., lai vielas struktūru formējošie elementi būtu pēc iespējas mazāk izkustināmi). Kompozītā to var panākt, iekļaujot sastāvā pēc iespējas cietāku vielu vai modificējot

sastāvā esošās šķiedras, lai tām ir labāka „saķere” ar saistvielu. ONC ir ļoti cietas struktūras, kas pazemina termisko izplešanās koeficientu TIK un tāpēc tiek sagaidīts, ka ONC esamībai NK, kā uz stikla šķiedrām tā arī epoksīda sveķos, vajadzētu stipri ietekmēt termisko izplešanās koeficientu kopējā NK. Jāpiebilst, ka tas tiek sagaidīts tikai perpendikulārā virzienā attiecībā pret šķiedrām, jo šķiedru virzienā šķiedrām ir dominējošs raksturs. ONC NK sastāvā samazina polimēra brīvo tilpumu un tāpēc samazinās kustības, kas tiek ierosinātas siltuma dēļ [18].

Dažkārt uzlabojot vienu polimēra īpašību, tiek pasliktināta kāda cita, piemēram, polimēri ar zemu TIK ir labi pielietojami elektronikā. Taču šādi polimēri parasti ir trausli, kas nav vēlams, jo tie viegli lūst [17]. Savukārt polimēri ar augstu T_g ir labāk piemēroti sfērās, kur tiek pielietotas augstas temperatūras, bet šādu polimēru ir grūti izveidot kausējumā, kas ir nevēlama parādība. Tāpēc ir svarīgi, apzināties mērķus, kādēļ tiek veidots materiāls un rast optimālo īpašību kombināciju.

Pildvielas sadalījums dispersi pildītā kompozītā

Nanopildvielas sadalījums NK, tā novērtēšana un ar to saistītās problēmas

Kā jau tika pieminēts, ONC ir grūti disperģējama pulverveida viela, kas bieži veido aglomerātus polimēra saistvielā [2]. Savukārt, aglomerātu liels daudzums un izmērs pasliktina nanopildvielas dispersitātes efektivitāti un var ietekmēt nanosistēmas uzvedību kopumā [12]. Tādēļ materiāla struktūras kvantitatīvs un kvalitatīvs novērtējums ir nepieciešams korelācijas izpratnei starp materiāla struktūru un tā īpašībām, kā arī materiāla izveides kontrolei, nepielietojot eksperimentālās metodes fizikālo īpašību noskaidrošanai. Materiāla mikrostruktūru (arī nanostruktūru) nosaka pildvielas un saistvielas sastāvs un īpašības, to savstarpējais izvietojums, kā arī ķīmisko reaģentu vai citu svešvielu piejaukums. Izpēte, kas veikta uz attēlu analīzes pamata, var sniegt informāciju ne tikai par kompozīta pildvielas parametriem tādiem kā vidējais daļiņu diametrs un laukums, relatīvais daļiņu saturs, bet arī par masas centru apgabaliem, t.i., vietas, kur ir koncentrējusies lielākā daļa no pildvielas daļiņām. Šos parametrus var noteikt, izmantojot attēlus no mikroskopiem, piemēram, ar programmu palīdzību, nosakot krāsas spožuma sliekšni dažādas struktūras fāzēm [3]. Struktūru dažādos pētījuma līmeņos (nano-, mikro-, mezo-līmeni) analīzei var izmantot gan optisko, gan skenējošo vai caurizgājušo elektronu mikroskopus (SEM, TEM) [2, 56].

Izmantojot mikroskopijas metodes, iespējams novērot nanodaļiņu sadalījumu un izvietojumu NK. Ar optisko mikroskopu nav iespējams novērot atsevišķas nanodaļiņas, to ierobežotas izšķiršanas spējas dēļ, bet iespējams novērot lielāka izmēra aglomerātus. Tomēr ir jāatceras, ka paraugam parasti ir jābūt gaismu caurlaidošam, kas ir ne vienmēr iespējams, jo, piemēram, pat pie nelielām ONC koncentrācijām, materiāls paliek diezgan tumšs vai pilnīgi melns. Mikrostruktūras novērošanai ar optisko mikroskopu būtu pietiekami, tomēr, ja ir jānovēro nanostruktūra un atsevišķas

nanodaļiņas (vai to nelieli sakopojumi) ir jāpielieto mikroskopā ar tādu izšķiršanas spēju, kas spēj izšķirt objektus dažu nanometru izmēros. Skenējošā elektronu mikroskopija ir piemērojama materiāla paraugu topogrāfijas raksturošanai, aprakstot saturošo komponentu sadalījumus. Galvenā SEM priekšrocība ir iespēja attēlot dažādu konfigurāciju tilpuma masīvu paraugu virsmas ar labu asuma dziļumu plašā palielinājumu diapazonā (no $10\times$ līdz $500000\times$), kā arī nav nepieciešami caurspīdīgi un plāni paraugi. Līdzīgi kā SEM pēc izšķiršanas spējas, nanoobjektu novērošanai piemērots ir arī TEM, bet tam ir nepieciešami salīdzinoši plāni un caurspīdīgi paraugi, jo tiek skenēta nevis paraugu virsma, bet tilpums.

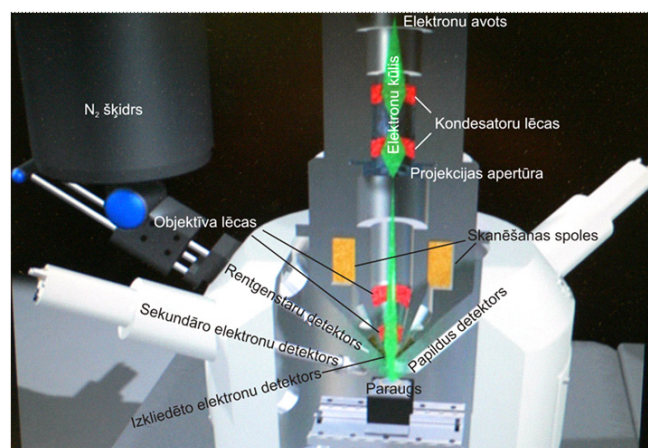
Piemēram, kompozīta, kurš sastāv no daudzsienuju ONC, divu veidu oglekļa šķiedrām un poliestera saistvielās, pildvielas dispersitāte tika pētīta mikro- un nanolīmeņos [3], kā arī tika analizēta tās ietekme uz nanokompozīta elektriskām un mehāniskām īpašībām. Dispersitātes pakāpe gan mikro-, gan nanolīmeņos tika pētīta, labākai pildvielas ietekmes uz nanokompozīta īpašībām izpratnei. Rezultāti parāda, ka pildvielas dispersitāte ir atkarīga no pildvielas īpašībām un struktūras. Tādēļ ir svarīgi vienmērīgi sadalīt pildvielu pa saistvielas tilpumu, lai kompozīta īpašības nepasliktinātos. Tika pierādīts, ka optimālā pildvielas koncentrācija rada labāku dispersitāti, tādējādi uzlabojot mehānisko veiktspēju. Lai noteiktu šāda veida īpašības nanokompozītā, pārsvarā izmanto elektronu mikroskopus, paraugu pildvielas sadalījuma noteikšanai. Piemēram, raksta [57] autori ir izpētījuši ar TEM, ka pildvielas sadalījums paraugiem ar ONC koncentrāciju 1% pēc masas. ir ievērojami labāks nekā koncentrācijai 5% pēc masas. Pēc attēliem var spriest, ka pie 1% pēc masas koncentrācijas ir novērojams nanopildvielas labs sadalījums, kur redzamas atsevišķas ONC savukārt pie augstās koncentrācijas ir skaidri saskatāmi to aglomerāti.

Galvenais trūkums aprakstītajās metodēs ir tas, ka tās nav vispārīgas, un nav iespējams analizēt pildvielas dispersitāti dažādos materiālos. Turklāt dispersitātes līmeņa efektivitāte nav līdz galam skaidra un noteikta. Tā kā pildvielas dispersitāti ir grūti novērtēt un kontrolēt, tad viena no problēmām ir pilnīga aglomerātu likvidācija NK, kas pagaidām praktiski nav iespējama, jo ONC vairāk vai mazāk aglomerējas, par ko liecina vairāki zinātniskie raksti [2, 3, 8, 10, 53-56]. Par pildvielas homogēno sadalījumu liecina ne vien tiešās novērtēšanas metodes, bet to ir iespējams novērtēt arī netieši, ar tādām metodēm kā gaismas caurlaidība, luminiscence, kā arī pārbaudot atsevišķas NK īpašības, tādējādi, nosakot, kuram paraugam ir visvairāk vai vismazāk defektu, kas noteiktos apstākļos būs tiešā veidā saistīti ar aglomerātu daudzumu.

Skenējošā elektrona mikroskopa pielietojums pildvielas sadalījuma izpētei un tā darbības princips

SEM ir elektronu mikroskopa tips, kurš veido attēlu skenējot parauga virsmu ar augstas enerģijas elektronu staru kūli rastra skenēšanas veidā (12. attēls.). Elektroni mijiedarbojas ar atomiem, veido no parauga signālus, kas satur informāciju par parauga virsmas topogrāfiju, sastāvu un citām īpašībām,

piemēram, elektrisko vadītspēju. SEM atšķirībā no optiskā mikroskopa fotonu vietā tiek izmantoti elektroni, savukārt lēcas ir aizvietotas ar precīzām elektromagnētiskajām sistēmām. SEM elektronu kūlis ar elektronstaru optisko sistēmu tiek fokusēts mazā punktā uz parauga virsmas, bet no tā virsmas emitētie sekundārie elektroni tiek reģistrēti ar elektronu detektoru. Elektronstaru optikas sistēmā iebūvētas nolieces spoles, kas, dēļ magnētiskā lauka, ļauj pārvietot elektronu stara fokusu pa rastra izvērse trajektoriju, skenējot parauga virsmu. Pierakstot sekundāro elektronu detektora signālu katrā parauga virsmas punktā, var konstruēt parauga attēlu visā rastra izvērse apgabalā, izmantojot datoru.



12. attēls. Elektronu mikroskopa Zeiss EVO 50 uzbūve šķērsgriezumā [58]

Lai radītu paātrinātu elektronu kūli dziļā vakuumā (sākot ar $2 \cdot 10^{-3}$ Torr) tiek lietots augsts paātrinātais spriegums (1-100 kV) un elektroni iegūst atbilstošu kinētisko enerģiju 1100 keV. Izšķiršanas spēja praktiski ir ierobežota ar SEM elektronu kūļa izmēru un tilpumu, kurā mijiedarbojas materiāls un uz tā krītošais elektronu kūlis, kas ļauj sasniegt izšķiršanu līdz 1 nm. Krītošo elektronu mijiedarbība ar vielu notiek dažādos dziļumos, tāpēc ir nepieciešams optimāli izvēlēties ierosinošā elektronu kūļa parametrus. Ja parauga virsma ir vadoša, elektriskie lādiņi aizplūst no virsmas un neietekmē SEM attēlu izveides procesu. Savukārt dielektriskiem paraugiem ir jāuzputina vadošs slānis. Ja pētāmā virsma nav vadoša, tad krītot uz paraugu, elektroni neaizplūst, bet uzkrājas rada negatīvo potenciālu elektronu stara fokusa punkta kustības apgabalā, kas atgrūž krītošos elektronus, ekranējot paraugu. Rezultātā tas samazina krītošo un attiecīgi arī emitēto elektronu skaitu un izkropļo to trajektoriju, kas pasliktina attēla kvalitāti [58].

Gaismas caurlaidības pielietojums pildvielas sadalījuma novērtēšanai

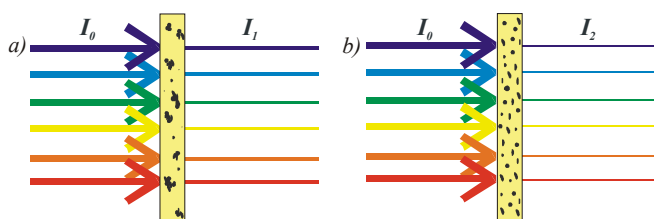
NK iegūto attēlu kvantitatīva analīze ir diezgan sarežģīta un nepastāv noteiktas metodoloģijas pildvielas dispersitātes analīzei, parasti tiek analizēts nepietiekams attēlu daudzums, lai droši varētu spriest par kvalitatīvu statistisko

analīzi visam NK [4]. Tāpēc ONC sadalījums materiālā var tikt novērtēts arī netieši, izmantojot gaismas caurlaidības eksperimentus [59, 60], kas parāda redzamās gaismas caurlaidību atkarībā no viļņa garuma. Pēc definīcijas gaismas caurlaidība G_λ , kas ir funkcija no viļņa garuma, ir izgājušās caur paraugu gaismas I un sākotnēji uz parauga izstarotās gaismas I_0 intensitāšu attiecība procentos:

$G_\lambda = \frac{I}{I_0} \cdot 100\%$	(0.1)
---	-------

Sakarā ar to, ka ONC piemīt liels īpatnējais virsmas laukums, tās ir melnas un absorbē redzamo gaismu, ir iespējams spriest par nanodaļiņu sadalījumu pēc caurlaidītās gaismas intensitātes. ONC darbojas kā absorbējošie centri [59]. Homogēnais ONC sadalījums nozīmē, ka daļiņas ir vienmērīgi sadalījušās materiāla tilpumā un var uzskatīt, ka labākai pildvielas dispersitātei būs lielāks daudzums absorbējošo centru, respektīvi, materiāls mazāk gaismas izlaidīs cauri. Salīdzinot vienādas pildvielas koncentrācijas, ir iespējams noteikt vai materiāls vienlīdzīgi absorbē redzamo gaismu dažādos tilpuma apgabalos, un jo mazāka ir izkliede, jo vienmērīgāks ir daļiņu sadalījums. Izmantojot šo alternatīvo metodi nanodaļiņu sadalījuma novērtēšanai, iespējams, kvalitatīvi spriest par ONC sadalījumu ne tikai dažādas koncentrācijas paraugiem, bet arī paraugiem ar vienādu pildvielas daudzumu, izmantojot faktu, ka paraugiem ar lielāku defektu daudzumu būs lielāka G_λ izkliede iegūtajos rezultātos nehomogenitāšu dēļ.

Tā kā ONC absorbē gaismas enerģiju, tad labāk sadalītiem ONC vajadzētu samazināt gaismas caurlaidību (13. attēls.), pie tam procesu ietekmē ne vien ONC sadalījums, bet arī daudzums. Labi sadalītas jeb disperģētas ONC nozīmē, ka vizuāli to ir vairāk (13. attēls.), jo katra nanodaļiņa vai to neliels (mērāms dažu desmitu vai simtu nanometros kaut vienā dimensijā) sakopojums ir atdalīts un aizņem lielāku tilpumu nekā nanodaļiņas, kas veido lielus sakopojumus, kas mērāmi mikrometros vai pat milimetros. Šis spriedums ir pamatā tam, ka vienādas pildvielas koncentrācijas aglomerētie paraugi laidīs cauri paraugam gaismas enerģiju ar lielāku intensitāti nekā labi sadalītie. Savukārt par homogēni sadalīto pildvielu paraugā var spriest pēc gaismas caurlaidības viena parauga ietvaros, un jo lielāka būs novirze, jo sliktāka ir homogenitāte.



13. attēls. Schematisks attēlojums gaismas caurlaidības atkarībai no pildvielas daļiņu sadalījuma materiāla tilpumā, kur I_0 – izstarotās un I_1, I_2 – caurlaidītās gaismas intensitātes, kur (a) – pildvielas daļiņas ir aglomerētas un (b) – daļiņas ir relatīvi homogēni sadalītas polimēru NK, kur $I_1 > I_2$

Darbos [59, 60] tika parādīts, ka laba un sliktā dispersitāte pie vienas un tās pašas ONC koncentrācijas ietekmē gaismas caurlaidību. Un pie labākas pildvielas dispersitātes gaismas sliktāk iziet cauri paraugam, jo ONC ir vienmērīgāk un efektīvāk sadalījušās pa parauga tilpumu. Labi disperģētam NK ir nepieciešams pavisam neliels pildvielas daudzums attiecībā pret slikti disperģēto, lai sasniegtu līdzīgus rezultātus, kas apliecina, ka tā ir efektīva metode kvalitatīvai pildvielas dispersitātes raksturošanai.

Polimērmateriāla īpašības

Polimērmateriāla termofizikālās īpašības

Polimēra svarīgākās termofizikālās īpašības, kas ietekmē materiāla pielietojamas iespējas, ir stiklošanās temperatūra T_g un termoizplešanās koeficients TIK. Materiāla T_g ir temperatūra [61], pie kuras pazeminās polimēra mehāniskās īpašības un atbilst otrai fāžu pārejai, kad polimērs pāriet no stiklveida augsti elastīgajā stāvoklī, palielinoties temperatūrai. Stiklveida stāvoklis šajā nozīmē atbilst cietam un trauslam materiālam, kas viegli spēj salūst, bet augsti elastīgs – vairāk lokans un piekāpīgs. Lineārās termiskās izplešanās pētīšana un mērīšana ļauj saprast, kā mainās polimēru īpašības temperatūru un laika ietekmē, kas savukārt nosaka šo polimērmateriālu iespējamās pielietojumus.

Stiklošanās temperatūra T_g ir saistīta ar termomehānisko stabilitāti, tādējādi ietekmē doto epoksīda sveķu iespējamās pielietojumus. T_g ir atkarīga no molekulāras uzbūves, ko ietekmē dažādi parametri, kā epoksīda sveķu un cietinātāja īpašības, sacietēšanas cikls u.c. Tā kā stiklošanās temperatūra ir saistīta ar sacietēšanas uzvedību, mehāniskām īpašībām un epoksīda sveķu pielietojumu, tad ir svarīgi izpētīt ONC ietekmi uz epoksīda sveķu sacietēšanu un īpašībām. Pēc vairāku literatūras datu rezultātiem, Allaoui [61] secina, ka modificējot epoksīda sveķus ar ONC T_g palielināšanās var būt saistīta ar elastīgo epoksīda sveķu brīvo tilpumu. ONC varētu ietekmēt polimēra ķēžu tīkla formēšanos ar to, ka apkārt ONC pastāv epoksīda saistviela, tādējādi, ONC spēj darboties kā efektīva pildviela polimēra ķēžu stiprināšanā. Pievienojot epoksīda sveķiem ONC, pamazīnās fracionēts brīvais tilpums, kas tiek izskaidrots [62] ar to, ka polimēra molekulas aizņem ONC dobumu, palielinot termisko stabilitāti. Tāpat ir zināms, ka T_g ir saistīts ar galveno polimēra ķēžu kustīgumu. Tāpēc, jo vienmērīgāk ONC ir sadalītas polimēra saistvielā, jo mazākas ir ķēžu kustības un lielāka stiklošanās temperatūra, kā rezultātā tiek uzlabota termiskā stabilitāte. Palielinot ONC daudzumu, pildvielas sadalījums pasliktinās, veidojas aglomerāti, kas pazemina termisko stabilitāti un ietekmē viskoelastīgo polimēra uzvedību. Pazeminoties T_g , pazeminās arī materiāla blīvums un elastības modulis, kas tiek skaidrots ar polimēra īpašībām tilpumā, kur pamatideja ir, ka brīvā tilpuma daļa samazinās, palielinoties blīvumam un ONC koncentrācijai [62].

6. tabula. Stiklveida as un elastīga ae polimēra termoizplešanās koeficienta vērtības un stiklošanās temperatūras vērtības dažādiem polimēriem [17]

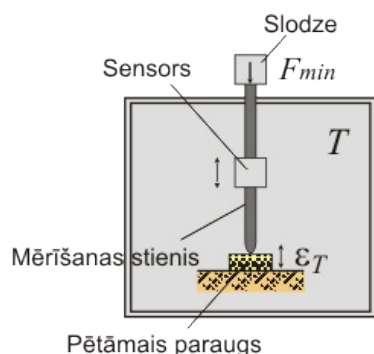
Polimērs	$\alpha_1, 10^{-6}/K$	$\alpha_2, 10^{-6}/K$	$T_g, ^\circ C$
Bisphenol-A polycarbonate	-8	262	150
Poly[oxy(2,6-dimethyl-1,4-phenylene)]	-69	240	209
Poly(vinyl chloride)	-98	212	75
Poly(ethylene terephthalate)	-111	169	72
Poly(o-methyl styrene)	-114	105	136
Poly(methyl methacrylate)	-60	217	105
Polystyrene	-23	277	100

Polimērmateriāla lineārais termoizplešanās koeficients TIK jeb α raksturo, [63] kā mainās objekta izmērs, palielinot temperatūru par katru Celsija grādu:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (0.2)$$

kur ΔL – materiāla garuma izmaiņa, L_0 – materiāla sākotnējais garums, ΔT – temperatūras izmaiņa. Šī attiecība ir bezdimensionāla, bet izplešanās tiek parādīta millionu daļās uz temperatūras izmaiņu [$10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]. Materiāls izplešas, palielinoties temperatūrai, jo tā palielina termiskās atomu svārstības, tādējādi palielinot blakus atomu vidējo atdalīšanās distanci. Cietvielu izplešanās pakāpe, kas atkarīga no temperatūras izmaiņām tiek saukta par materiāla termisko izplešanās koeficientu TIK, kas parasti mainās līdz ar temperatūru. Termiskā izplešanās parasti pazeminās palielinoties saišu enerģijai, kas ietekmē arī materiāla cietību, tāpēc cietākiem materiāliem ir mazāks TIK [64]. Materiāla termofizikālās īpašības iespējams noteikt ar dilatometrijas metodi

Dilatometrija – metode, kuras laikā mēra parauga lineāro izmēru izmaiņas, mainoties temperatūrai (14. attēls.). Pārsvārā tiek izmantots materiālu termoizplešanās, fāžu pāreju, procesu kinētikas augstās temperatūrās, materiālu mīkstināšanās u.c. procesu noteikšanai.



14. attēls. Dilatometrijas analīzes shēma

Mainoties temperatūrai ar dilatometru parasti iespējams noteikt materiāla T_g , TIK, izmēru izmaiņas ātrumu un izmaiņas notiekot ķīmiskām reakcijām, blīvuma izmaiņu u.c. parametrus [65]. Pie materiāla stiklošanās temperatūras materiālam ir raksturīgas struktūras pārkārtošanās, kas notiek amorfā stāvoklī un, nosakot TIK, koeficientam ir raksturīgas nehomogenitātes. Analizējot iegūtos datus, parasti dilatometrijas līknes, šīs TIK izmaiņas (redzamas līknēs), ļauj noteikt T_g , kad polimērs pāriet no stiklveida stāvokļa elastīgajā [66].

Polimērmateriāla mehāniskās īpašības

Materiāla elastīgās īpašības

Materiāla mehāniskās [17, 67] īpašības ir ļoti nozīmīgas būvniecībā, konstrukciju projektēšanā u.c. inženierpielietojumos, tāpēc tie ir svarīgi raksturlielumi, kas ir savlaicīgi jāizpēta laboratorijas apstākļos, materiāla pielietojumu prognozēšanai, jo materiāli ekspluatācijā ir pakļauti ārējiem spēkiem jeb slodzēm (spriegumiem). Tādēļ ir nepieciešams zināt materiālu raksturlielumu skaitliskās vērtības un izgatavoto detaļu ģeometriskos izmērus, no kuriem aprēķinu ceļā iegūst materiālu īpatnību skaitliskās vērtības un deformācijas.

Pieliekot mehānisko spēku paraugam, tā deformācija tiek raksturota ar spriegumudeformācijas uzvedības līkumsakarībām. Spriegumudeformācijas uzvedība raksturo pielikto spriegumu (mehāniskās slodzes) σ noteiktas deformācijas (pārvietojuma) ϵ sasniegšanai, kā funkciju no ϵ , kas ir atkarīga no temperatūras un deformācijas ātruma. Polimēru mehāniskās īpašības ietver to uzvedību, pieliekot spriegumu, un to novērtēšanai var tikt izmantotas dažādas testēšanas metodes, piemēram, vienkārša stiepe, spiede, bīde u.c. Katra metode veido dažādus sprieguma stāvokļus gar 3 parauga asīm, atkarībā no materiāla raksturlielumiem, paraugu izgatavošanas un testēšanas nosacījumiem. Viena no testēšanas metodēm ir stiepe, kuras rezultātā no sprieguma-deformācijas līknēm var noteikt vairākus svarīgus raksturlielumus, tādus kā elastības moduli, stiprību stiepē (*tensile strength*), maksimālo deformāciju jeb deformāciju pie sabrukšanas (*strain at break*), proporcionalitātes robežu spriegumam un deformācijai, Puassona koeficientu u.c.

Svarīgs mehānisko īpašību raksturlielums ir elastības jeb Junga modulis E , kas ļauj spriest par parauga stiprību un stingrību. Tas raksturo parauga pretstību pret mehānisko deformāciju bezgalīgi mazas deformācijas ϵ robežās, pieliekot stiepes spriegumu σ . Elastības moduli var definēt no vienādojuma, kad attiecīgā deformācija $\epsilon \rightarrow 0$, un to sauc par Huka vispārīgo likumu. Tas parāda, ka spriegums σ , kas ir pielikts mazas deformācijas ϵ sasniegšanai vienkāršā stiepē, ir proporcionāls E .

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (0.3)$$

Polimēriem moduļa skaitliskā vērtība ir zemāka nekā metāliem un ir starp 0.007 un 4 GPa, pie tam E vērtība polimēriem ir atkarīga no apkārtējās vides temperatūras un tabu-

lās bieži tiek dotas intervālos, piemēram, polivinilhlorīdam $E = 2.41-4.14 \text{ GPa}$, polipropilēnam $E = 1.14-1.5 \text{ GPa}$ vai pie istabas temperatūras. Epoksīda sveķiem E ir stipri atkarīgs arī no sacietēšanas apstākļiem, kā arī cietinātāja veida. Polimēru elastības modulis E parasti palielinās, pieaugot polimēru ķēžu cietībai un kohēzijas enerģijas blīvumam. Pieliekot spriegumu, vājākas saites (kas ir nesaistīta ar starpkēžu mijiedarbību) deformējas daudz vieglāk nekā stiprās kovalentās saites gar katru polimēra ķēdi. Tāpēc polimēros moduļa lieluma vērtību stipri ietekmē tieši starpkēžu vājās saites.

7. tabula. Junga moduļa vērtības dažādiem polimēriem pie istabas temperatūras [17]

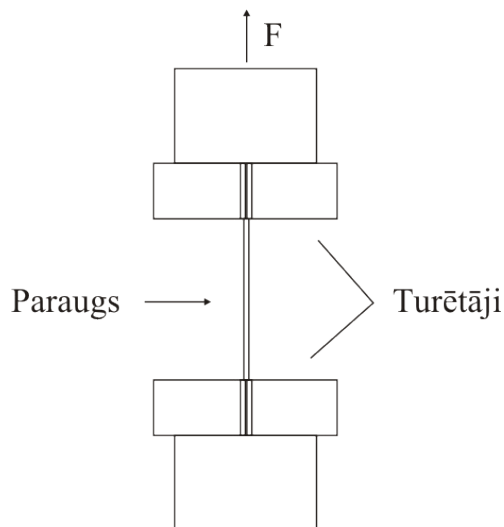
Polimērs	E , GPa
Bisphenol-A polycarbonate	2.1
Poly[oxy(2,6-dimethyl-1,4-phenylene)]	2.3
Poly(vinyl chloride)	2.6
Poly(ethylene terephthalate)	3.0
Poly(o-methyl styrene)	3.1
Poly(methyl methacrylate)	3.2
Polystyrene	3.3

Deformācija pie sabrukšanas parāda parauga pagarinājumu līdz tas salūst. Stiprība stiepē ir spriegums, kas nepieciešams, lai salauztu paraugu. Spriegums parāda pielikto spēku uz laukuma vienību un to biežāk mēra paskālos [Pa], bet deformācija ir bezdimensionāls lielums. Stiepes deformācija ir definēta kā mazas parauga garuma izmaiņas deformācijas rezultātā.

Daudzi faktori ietekmē polimēra paraugu sabrukšanas uzvedību: ķīmiskā struktūra, molekulu veidi, organizācija, orientācija, sašūšanas apstākļi, parauga ģeometrija, temperatūras un deformācijas režīms, defektu klātbūtne u.c. Ir zināms, ka defekti materiālā darbojas kā sprieguma koncentratori, un šajās vietās materiāls ir vairāk pakļauts sabrukšanai. Tāpēc defekti ir svarīgs nosacījums, kuru nevajadzētu pieļaut materiāla izgatavošanas vai ekspluatācijas laikā. Materiālu mehāniskās īpašības tiek noteiktas laboratorijas eksperimentos pie noteiktiem nosacījumiem (eksperimentu veikšanas standarti), kur svarīgi parametri ir ne tikai pieliktās slodzes un to darbības laiks, bet arī apkārtējās vides temperatūra.

Eksperimenti stiepē

Tas ir viens no izplatītākajiem materiālu mehānisko īpašību noteikšanas eksperimentiem [67, 68]. Materiāla paraugs tiek deformēts parasti līdz sabrukšanai ar stiepes spēku F , kas pielikts parauga garenasī. Eksperimentos pielietotie materiāla paraugi ir standartizēti pēc to ģeometriskās formas un izmēriem, eksperimenta atkārtojamībai. Parauga stiepšanu veic ar speciālām stiepes eksperimentu veikšanas mašīnām (15. attēls).



15. attēls. Stiepes eksperimentu aprīkojuma shematiskais attēlojums

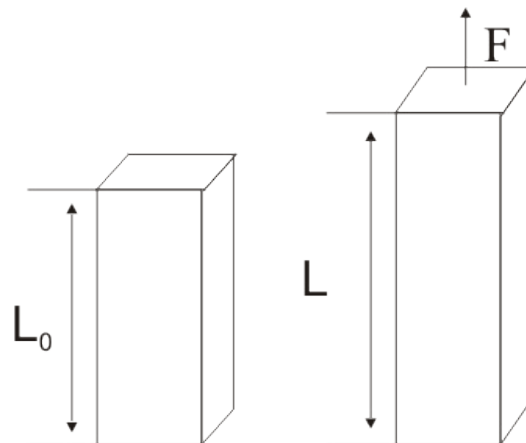
Eksperimenta rezultātā, pierakstot pielikto spēku un parauga pagarinājumu, iegūst slodzes-deformācijas likni, no kuras iespējams iegūt vairākas materiāla īpašības. Mehānisko spriegumu σ un relatīvo deformāciju ϵ definē:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{0.4}$$

kur F – perpendikulāri materiāla parauga šķērsgriezuma laukumam pieliktais spēks [N], A_0 parauga šķērsgriezuma laukums pirms spēka pielikšanas [mm²].

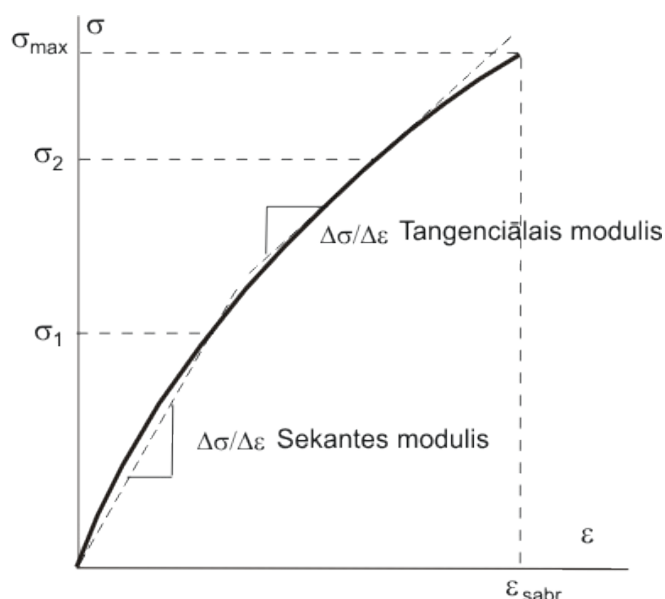
$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{0.5}$$

kur L_0 - parauga sākotnējais garums pirms slodzes pielikšanas, L - momentānais garums. Deformācija ϵ ir lielums, kas parāda parauga garuma izmaiņu. Tas ir bezizmēra lielums, bet ϵ pareizinot ar 100, tā tiek izteikta procentos.



16. attēls. Shematiskais relatīvās deformācijas attēlojums

Deformācijas, pie kurām spriegumi un deformācijas ir proporcionāli, sauc par elastīgām deformācijām. Taisnās līnijas slīpums (slodzes-deformācijas attiecība) atbilst materiāla elastības moduļim. Šis modulis parāda materiāla pretestību elastīgām deformācijām. Jo lielāks ir modulis, jo stingāks ir materiāls, jeb mazākas elastīgās deformācijas pie pieliktām slodzēm. Modulis ir svarīgs parametrs projektēšanā pie elastīgās izlieces aprēķina. Daudziem materiāliem elastīgās attiecības starp spriegumu un deformāciju ir nelineāras (17. attēls.).



17. attēls. Shematisks spriegumu-deformāciju diagrammas attēlojums materiāliem ar nelineārām elastības īpašībām; moduļu, stiepes stiprības s_{max} un sabrukšanas deformācijas e_{sabr} noteikšana

Materiāliem ar nelineārām elastības īpašībām eksperimentāli nosaka un praksē pielieto divus elastības moduļus. Tangenciālais modulis dod spriegumu-deformāciju līknes slīpumu pie kaut kāda specifiska sprieguma lieluma, sekantes modulis dod diagrammas slīpumu starp tās sākumpunktu un kādu citu punktu uz spriegumu-deformācijas līknes. Stiepes stiprība jeb izturības robeža ir slodze pie spriegumdeformāciju līknes maksimuma. Redzams (17. attēls.), ka deformācija (parauga garums) palielinās, palielinot pielikto slodzi (spēku), savukārt, stiepjot paraugu maksimāli, tas galu galā salūst. Visas deformācijas virs šī punkta notiek tikai materiāla parauga lokālā apgabalā, tā saucamajā parauga kakliņā (sašaurinājumā). Pie lielākiem spriegumiem notiek materiāla sabrukšana. Deformācija pie sabrukšanas raksturo maksimālo parauga pagarinājumu stiepšanas rezultātā, līdz tas salūst. Mehāniskie raksturlielumi ir atkarīgi arī no nanokompozīta pildvielas daudzuma (8. tabula.).

8. tabula. Mehāniskās īpašības atkarībā no pildvielas daudzuma [69]

ONC saturs,% pēc masas	Junga modulis, GPa	Stiepes izturības s MPa	Stiepes spriegums e, %
0	2.88 ± 0.15	63.8 ± 3.1	9.3 ± 2.3
0.05	2.89 ± 0.22	67.0 ± 4.2	9.9 ± 1.2
0.1	2.94 ± 0.08	65.1 ± 1.8	10.6 ± 0.5
0.3	2.91 ± 0.3	70.5 ± 1.4	7.7 ± 0.7
0.5	2.74 ± 0.2	65.4 ± 5.0	8.4 ± 2.4
1.0	2.97 ± 0.14	69.0 ± 4.2	9.2 ± 2

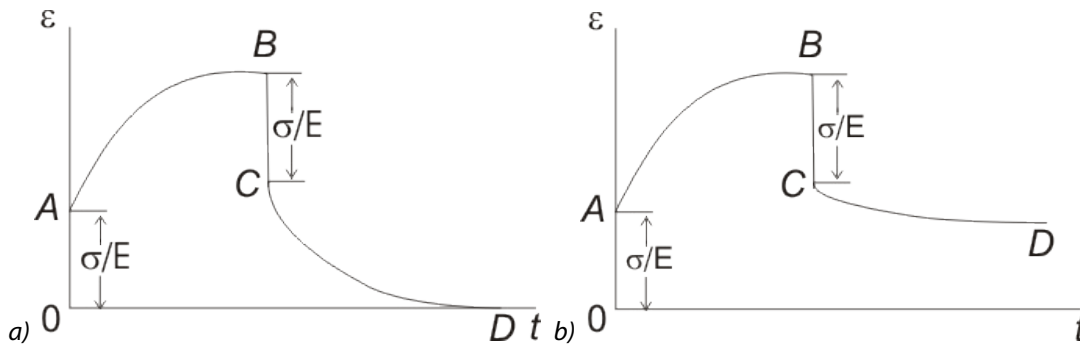
Materiāla viskoelastīgās īpašības

Šļūdes izpēte vienass stiepē

Materiāli, kas tiek izmantoti dažādās konstrukcijās, tiek noslogoti ar laikā nemainīgu spriegumu un pakļauti augstām temperatūrām. Deformācijas, kas radušās slodzes rezultātā, pie augstām temperatūrām ar laiku pieaug, ja ir pielikts laikā nemainīgs spriegums. Tas bieži vien nosaka detaļu ekspluatācijas ilgumu. Šļūdes eksperimenti parasti tiek veikti materiāla paraugiem pie konstantas slodzes un laikā konstantas temperatūras, mērot deformācijas izmaiņu laikā [67]. Relaksācijas eksperimentos ir pielikta momentānā deformācija un paraugs tiek noturēts tādā stāvoklī, kamēr mēra sprieguma izmaiņu kā funkciju no laika, ko sauc par relaksāciju.

Šļūde – parādība, kad deformācijas, kas radušās detaļas slogojot, mainās laikā, ja slodze ir laikā nemainīga [70]. Šļūde mēdz būt elastīga vai plastiska. Elastīgās deformācijas, kas radušās šļūdes laikā, pēc atslodzes ar laiku pavisam izzūd. Plastiskās (paliekošās) deformācijas pamatā ir neatgriezeniskas, pēc atslodzes tās samazinās lēni un nenozīmīgi. Parasti notiek abu deformāciju veidi. Grafiski ir attēloti (18. attēls.) elastīgās un plastiskās pēcdarbības procesi, pastāvīga sprieguma gadījumā, kas ir mazāks nekā materiāla proporcionalitātes robeža attiecīgajā temperatūrā, kur redzamas paliekošas deformācijas (18. attēls. b). Deformācija, kas radusies pieliekot slodzi apgabalā OA ir vienāda ar σ/E . Apgabalu raksturo neprtraukti pieaugoša šļūdes deformācija, kad materiāls pretojas šļūdes deformācijām. Tad deformācijas ar laiku palielinās (līkne AB). Šis ir ilgākais šļūdes apgabals. Paraugu atslogojot, deformācijas samazinājums (BC), līdzīgi kā īslaicīgos stiepes eksperimentos, ir vienāds ar elastīgo deformāciju σ/E . Pēc atslodzes deformācijas samazinās (CD), kas atbilst atgriezeniskai pēcdarbībai jeb šļūdei. Praksē vissvarīgākais šļūdes parametrs ir otrā apgabala slī-

puma lielums, t.i. šļūdes ātrums $\frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$ [67, 70].



18. attēls. Elastīgās (a) un plastiskās (b) pēcdarbības ilustrācija

Pilnā deformācija, kas laikā paliek pastāvīga, ir elastīgās ϵ_e un plastiskās ϵ_p deformācijas summa, kas radušās šļūdes procesā:

$\epsilon(t) = \epsilon_e(t) + \epsilon_c(t)$	(0.6)
---	-------

Plastiskā deformācija ar laiku pieaug savukārt elastīgā ϵ_e samazinās. Tādēļ pilnas deformācijas sastāvdaļas pārkārtojas, laikam ritot. Balstoties uz Huka likumu:

$\epsilon_e(t) = \frac{\sigma}{E}$	(0.7)
------------------------------------	-------

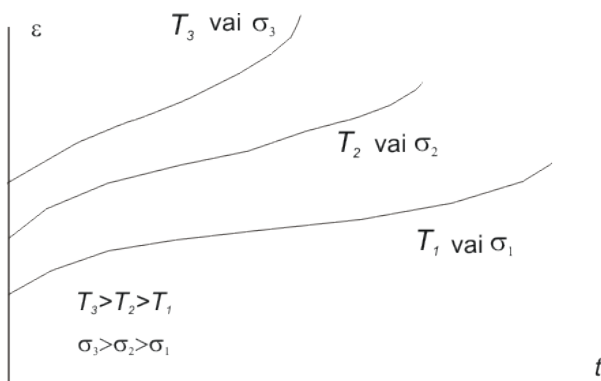
Sakarā ar to, ka pilnā deformācija laikā nemainās un ir vienāda ar $\epsilon(0)$ sākuma vērtību, un sākuma momentā darbojas Huka likums, tad

$\epsilon(t) = \epsilon(0) = \frac{\sigma(0)}{E}$	(0.8)
---	-------

kur $\sigma(0)$ - spriegums laika sākuma momentā. Iegūstam

$\frac{\sigma(0)}{E} = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_c(t)$	(0.9)
--	-------

No šī vienādojuma seko, ka palielinoties plastiskai deformācijai, spriegums nepārtraukti samazināsies. Ir jāpiebilst, ka relaksācijas laikā plastiskā deformācija nevar palielināties bezgalīgi [70].



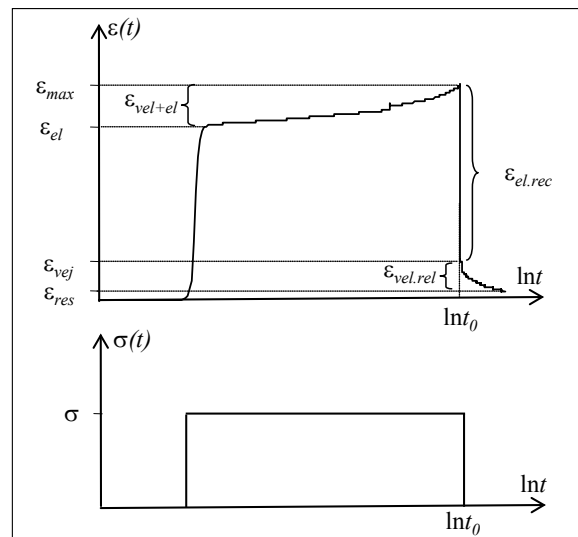
19. attēls. Sprieguma un temperatūras ietekme uz šļūdes deformācijām

Šļūdes procesā plastiskā deformācija pieaug līdz vērtībai, pie kuras paraugs pārlūst. Relaksācijas procesā plastiskā deformācija nepārsniedz tās deformācijas vērtības, kas radušās slodzes rezultātā. Cietākiem (liels elastības modulis) un trauzlākiem materiāliem būs lielāka pretestība pret deformācijām [17]. Pieaugot eksploataācijas temperatūrai vai slodzei, pieaug arī šļūdes deformācijas (19. attēls.).

Šļūdes izpēte polimēru materiāliem

Sakarā ar plašu polimēru pielietojumu inženierkonstrukcijās, ir nepieciešama šo materiālu izpēte un uzlabojumu ieviešana ilgtermiņa izturībā. Pieliekot polimēram slodzi, laikā mainās materiāla struktūra un īpašības. Efektīvi un kvalitatīvi pievienojot polimēram optimālu daudzumu ONC, ir iespējams ievērojami palielināt tā šļūdes pretestību [23, 24] un tādā veidā uzlabot materiāla ilgmūžību.

Piemēram, mitruma ietekmes noteikšanai uz ilgtermiņa NK deformējamību, ir jābūt skaidri noteiktiem šļūdes parametriem. (20. attēls.) parāda standarta šļūdes-atgriezeniskās šļūdes deformācijas testēšanu atkarībā no laika [47]. No šļūdes līknes var noteikt maksimālo deformāciju e_{max} , elastīgo deformāciju e_{el} , viskoelastīgo lecienu e_{vej} un paliekošo deformāciju e_{res} pēc atgriezeniskās šļūdes testiem.



20. attēls. Standarta šļūdes-atgriezeniskās šļūdes testēšanas līkne [47]

Tālākos aprēķinus iespējams veikt, izmantojot no liknes iegūtos datus, kur viskoelastīgā un plastiskā deformācija $\epsilon_{vel+pl} = \epsilon_{max} - \epsilon_{el}$, elastīgā atgriezeniskā šļūde $\epsilon_{el.rec} = \epsilon_{max} - \epsilon_{vej}$, viskoelastīgā relaksācija

$\epsilon_{vel.rel} = \epsilon_{vep} - \epsilon_{res}$, kompozīta elastības modulis, to slogojot,

$$E_l = \frac{\sigma}{\epsilon_{el}} \text{ un atslodējot } E_{ul} = \frac{\sigma}{\epsilon_{el.rec}} \quad [47].$$

Lielākai daļai polimēru pamatmetodes, kas balstās uz polimēru viskoelastību, varētu būt viegli pielietojamas precīzākai ilgtermiņa izturības un deformējamības prognozēšanai, izmantojot analogiju (superpozīcijas) principu [25-27]. Šī metode balstās uz faktoru, kas palielina relaksācijas procesus, izmantošanu. Viens no visbiežāk apskatāmiem faktoriem ir temperatūra. Temperatūras paātrināšana apskatāmajos šļūdes procesos ir formulēta kā temperatūras-laika analogijas princips. Saskaņā ar šo principu deformācijas temperatūra un laiks ir savstarpēji saistīti un ekvivalenti. Līdzīga relaksācijas procesu paātrināšanās varētu būt izraisīta atmosfēras mitruma, slodzes vai citu faktoru palielināšanās rezultātā. Apvienojot dažus faktorus, ar analogijas principu, iespējams tos pielietot [25].

Mainot faktorus, kas palielina relaksācijas procesus, un pielietojot īstermiņa eksperimentus, kas atbilst materiāla izmantošanas apstākļiem, iespējams iegūt pamatliknes šļūdes aprakstam. Pēc iegūtajām liknēm var modelēt ilgtermiņa deformējamību noteiktos apstākļos. Dažādu faktoru vienlaicīga ietekme var tikt ņemta vērā, izmantojot tālāko likņu transformēšanu. Tādēļ viskoelastīgo un viskoplastisko īpašību izpēti pie mazliet paaugstinātām temperatūrām un spriegumiem var būt izmantota ilgtermiņa izturības prognozēšanai. Savukārt, izmantojot Bolcmana superpozīcijas principu kopā ar laika-temperatūras-deformācijas analogijas principiem, ir iespējams analītiski modelēt šļūdes un atgriezeniskās šļūdes uzvedību NK, tādā veidā nosakot pildvielas efektu šļūdē pie dažādām temperatūrām un spriegumiem.

Šļūdes likņu aproksimācijas [28]

Šļūde un atgriezeniskā šļūde raksturo polimērmateriālu galvenās viskoelastoplastiskās īpašības. Ja pieņem, ka starp dažādiem deformācijas mehānismiem nav mijiedarbības, tad ir iespējams atdalīt viskoplastiskās un viskoelastīgās komponentes. Atšķirībā no atgriezeniskās šļūdes, kas var iekļaut arī no laika neatkarīgās viskoplastiskās komponentes, šļūdes deformācija var saturēt no laika atkarīgās komponentes. Epoksīda sveķu NK, kas satur ONC viskoplastiskā uzvedība var būt nosacīta ar ONC izkļūšanu no epoksīda sveķiem [5].

Viskoplastiskā deformācija var būt lineāra funkcija no sprieguma vai nelineāra, piemēram, spēka funkcija no sprieguma [71]. Viskoplastisko komponentu nelinearitāte, tāpat kā laika atkarība, var tikt iegūta no šļūdes testu rezultātu analīzes, aprēķinot daļēju procesa atgriezeniskumu, t.i., viskoelastiskās komponentes novērtējumu no atgriezeniskās šļūdes testiem. Var tikt izdarīta, noteiktos apstākļos, pētāmā materiāla kopējās šļūdes deformācijas sadalīšana

viskoplastiskajā un viskoelastīgajā komponentēs, šļūdes un atgriezeniskās šļūdes testu rezultātiem.

Pastāv sīki izstrādāta pieeja šļūdes un atgriezeniskās šļūdes aprakstam lineārās viskoelastības apgabalā, kas ir balstīta uz Bolcmana superpozīcijas principu, kas ir izteikts kā lineārs integrālais vienādojums starp deformāciju ϵ , spriegumu σ un laiku t :

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t K(t-s)\sigma(s)ds \quad (8.10)$$

kur E ir materiāla elastības modulis. Šļūdes kodolfunkcija $K(t)$ ir attēlota komponentu sērijā formā

$$K(t) = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\tau_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (8.11)$$

kur τ_i ir relaksācijas laiks, b_i ($i = 1, \dots, n$) ir diskrets retardācijas jeb aiztures laika sadalījuma spektrs. Funkcija $K(t)$ ir summa, jo polimērmateriālā ir daudz dažādu polimēra ķēžu grupas, kam raksturīgi savi τ_i un b_i parametri. Tā ir noderīga ilglaicīgu šļūdes procesu prognozēšanā, kas tiek balstīta uz īstermiņa šļūdes testiem dažādos apkārtējās vides faktoru, kas paātrina šļūdi. Integrālais vienādojums ļauj aprēķināt deformāciju attīstīšanos laikā atkarībā no pieliktās slodzes.

Šļūdes-atgriezeniskās šļūdes gadījumā $\sigma(t) = \sigma_0 H(t) - \sigma_0 H(t - t_0)$, kur t_0 ir atslodzes sākuma moments, materiāla kompliance (padevīgums) $I(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0}$ būs:

$$I(t) = \frac{1}{E} + \sum_{i=1}^n b_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right), \text{ ja } t < t_0, \quad (8.12)$$

kur $\frac{1}{E}$ raksturo momentāni elastīgās, bet vienādojuma otrā daļa raksturo lokālās viskoelastīgās deformācijas. Un

$$I(t) = \sum_i b_i e^{-\frac{t-t_0}{\tau_i}} \left(e^{\frac{t_0}{\tau_i}} - 1 \right), \text{ ja } t > t_0. \quad (8.13)$$

Modeļa parametri, kas iegūti, piemērojot tos šļūdes liknēm, var tikt izmantoti atgriezeniskās šļūdes aprakstam un otrādi [43]. Lineārais modelis ir piemērots viskoelastīgās polimērmateriāla uzvedības aprakstam, kad ir pielikti mazi spriegumi vai temperatūras.

Atbilstoši brīvā tilpuma pieejai

$$\ln a_{T\epsilon} = \frac{1}{f_0^2} \frac{\alpha_v^T \Delta T + \Delta \epsilon_v}{1 + \frac{1}{f_0} (\alpha_v^T \Delta T + \Delta \epsilon_v)} \quad (8.14)$$

kur f_0 ir relatīvs brīvais tilpums, kas raksturo materiāla sākotnējo stāvokli, α_v^T ir tilpuma termiskās izplešanās koeficients, $\Delta\varepsilon_v$ ir starpība starp tilpuma deformācijām, kas izraisīta ar dažādu spriegumu σ_0, σ_1 pielietošanu. Tādējādi tiek iegūta laika-temperatūras-deformācijas redukcijas (nobīdes) funkcija, kas ir atkarīga no tilpuma deformāciju pieauguma. Ja rela-

tīvā tilpuma izmaiņa ir maza $\frac{1}{f_0}(\alpha_v^T \Delta T + \Delta\varepsilon_v) \ll 1$, tad

$\frac{1}{1 + \frac{1}{f_0}(\alpha_v^T \Delta T + \Delta\varepsilon_v)} \approx 1 - \frac{1}{f_0}(\alpha_v^T \Delta T + \Delta\varepsilon_v)$ <p>un vienādojums tiek pārrakstīts</p> $\ln a_{T\varepsilon} = \frac{1}{f_0^2} \left(\alpha_v^T \Delta T + \Delta\varepsilon_v - \frac{1}{f_0} (\alpha_v^T \Delta T)^2 - 2 \frac{1}{f_0} \alpha_v^T \Delta T \Delta\varepsilon_v - \frac{1}{f_0} (\Delta\varepsilon_v)^2 \right)$	(0.15)
--	--------

Šļūdes gadījumā, starpība starp tilpuma deformāciju $\Delta\varepsilon_v$ ir izsaukta dažādu spriegumu σ_0, σ_1 pielikšanas dēļ un var būt aproksimēta ar elastīgo tilpuma deformāciju izmaiņu

$\Delta\varepsilon_v \approx \frac{\sigma_1}{E_1}(1 - 2\nu_1) - \frac{\sigma_0}{E_0}(1 - 2\nu_0)$	(0.16)
---	--------

kur E_0, E_1 un ν_0, ν_1 ir materiāla elastības modulis un Puasona koeficients spriegumiem σ_0 un σ_1 attiecīgi.

Ja elastības spriegumi vai deformācijas ir neatkarīgi lielumi, $E_0 = E_1 = E$ un $\nu_0 = \nu_1 = \nu$, tad

$\Delta\varepsilon_v \approx \frac{1 - 2\nu}{E} \Delta\sigma$	(0.17)
---	--------

un vienādojums pārveidojas par sekojošu:

$\ln a_{T\varepsilon} = \frac{1}{f_0^2} \left(\alpha_v^T \Delta T + \beta_2 \Delta\sigma - \frac{1}{f_0} (\alpha_v^T \Delta T)^2 - \frac{2}{f_0} \alpha_v^T \beta \Delta T \Delta\sigma - \frac{1}{f_0} \beta^2 (\Delta\sigma)^2 \right)$	(0.18)
--	--------

kuram ir trīs parametri f_0 vai $\frac{1}{f_0}$, α_v^T , un $\beta = \frac{1 - 2\nu}{E}$.

Iepriekš aplūkotā brīvā tilpuma pieeja dod laika-temperatūras-deformācijas redukcijas funkciju, kur no deformācijas atkarīgā daļa atgriezeniskai šļūdei paliek kā tilpuma deformācijas un to starpība, pārejai no viena šļūdes-atgriezeniskās šļūdes testa ar spriegumu σ_0 otrā ar spriegumu σ_1

$\Delta\varepsilon_v = (1 - 2\nu_1)\varepsilon^{(1)} - (1 - 2\nu_0)\varepsilon^{(0)}$	(0.19)
---	--------

un tā nav vienāda ar nulli. Var pieņemt, ka laika-temperatūras-deformācijas redukcijas funkcija ir tā pati šļūdes un atgriezeniskās šļūdes funkcija, bet tās argumentam (deformācijai) ir dažādas vērtības šļūdei un atgriezeniskai šļūdei. Kā pirmo šļūdes aproksimāciju elastīgās tilpuma deformācijas vietā iespējams paņemt sākuma, no laika atkarīgo tilpuma deformācijas vērtību, kas ir viskoelastīgo un viskoplastisko komponentu summa. Tā var tikt izmantota kā pirmā aproksimācija atgriezeniskai šļūdei. Laika-temperatūras-deformācijas redukcijas funkcija var tikt pārveidota

$\ln a_{T\varepsilon} \approx \frac{1}{f_0^2} (\alpha_v^T \Delta T + \Delta\varepsilon_v) = \frac{1 - 2\nu_0}{f_0^2} \left(\frac{\alpha_v^T \Delta T}{1 - 2\nu_0} + \frac{1 - 2\nu_1}{1 - 2\nu_0} \varepsilon^{(1)} - \varepsilon^{(0)} \right)$	(0.20)
---	--------

kur $\varepsilon^{(0)}$ un $\varepsilon^{(1)}$ ir elastīgā deformācija šļūdei un no laika atkarīgā sākuma deformācija atgriezeniskai šļūdei. Aizvietojojot vienādojuma konstantus koeficientus, tas tiek pārveidots

$\ln a_{T\varepsilon} = \alpha_{1\varepsilon} \cdot \Delta T + \alpha_{2\varepsilon} \cdot \varepsilon^{(1)} - \varepsilon^{(0)}$	(0.21)
---	--------

kur $\alpha_{1\varepsilon} = \frac{\alpha_v^T}{f_0^2}$ un $\alpha_{2\varepsilon} = \frac{1 - 2\nu_1}{f_0^2}$.

Nemot vērā redukcijas funkcijas, kas ir atkarīgas no temperatūras un deformācijas, tiek iegūti vienādojumi šļūdei un atgriezeniskai šļūdei,

$I(t) = \frac{1}{E} + \sum_{i=1}^n b_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i a_{T\varepsilon}}} \right), \text{ ja } t < t_0$	(0.22)
--	--------

un

$I(t) = \sum_i^n b_i e^{-\frac{t - t_0}{\tau_i a_{T\varepsilon}}} \left(e^{-\frac{t_0}{\tau_i a_{T\varepsilon}}} - 1 \right), \text{ ja } t < t_0$	(0.23)
---	--------

Aplūkojot viskoplastiskās deformācijas attīstību šļūdes laikā, var tikt izvirzīti šādi pieņēmumi:

a) tā ir daļa no nelineārās viskoelastības, kas atbilst retardācijas laika bezgalībai;

b) tā var būt aprēķināta kā starpība no kopējās šļūdes deformācijas un viskoelastīgās deformācijas.

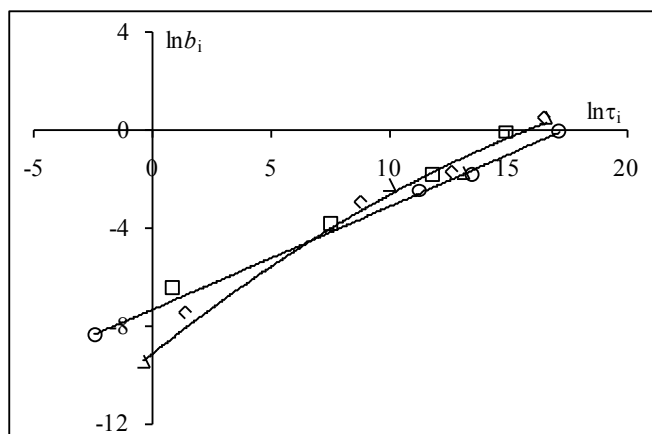
Pēdējais var tikt aprēķināts, pamatojoties uz vienādoju-

mu, izmantojot parametrus $\tau_i, b_i (i = 1, \dots, n), f_0, \alpha_v^T, \frac{1 - 2\nu_1}{1 - 2\nu_0}$,

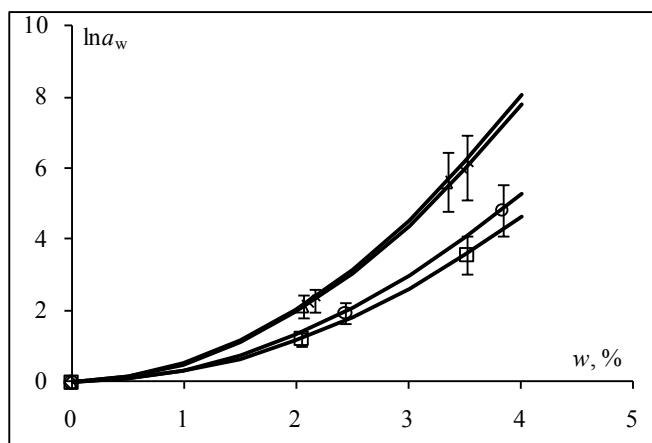
kas tiek iegūti no atgriezeniskās šļūdes testu rezultātiem ar vienādojuma starpniecību.

Optimizācijas problēmas risināšana, kas balstīta uz vienādojumu, ir vieglāka. Tādēļ šļūdes līkņu aproksimāciju rezultāti var tikt izmantoti kā aproksimācijas parametru sākuma vērtības atgriezeniskās šļūdes testu rezultātu aproksimāci-

jām. Piemēram, aiztures laika spektru atkarība no pildvielas satura ir attēlota 21. attēlā, bet redukcijas funkcijas 22. attēlā.



21. attēls. Aiztures laika spektri NK ar nanomāla pildvielas saturu $c = 0$ (\diamond), 2 (\square), 4 (Δ), 6 (\circ)% pēc masas [43]



22. attēls. Mitruma-laika redukcijas funkcijas NK ar nanomāla pildvielas saturu $c = 0$ (\diamond), 2 (\square), 4 (Δ), 6 (\circ)% pēc masas [43]

Viskoelastīgo īpašību atkarība no mitruma NK, tāpat kā parastam polimēram, ir aprakstāma ar mitruma-laika analogijas principu. Aiztures laiku spektri NK ar nanomāla pildvielas saturu $<6\%$ praktiski sakrīt, bet kad tas ir 6% , tad ir redzamas atšķirības salīdzinot ar nepildītu polimēru. Redukcijas funkcija apraksta mitruma ietekmes efektu materiāla uz viskoelastīgām īpašībām, tās vērtības ir minimālas, kad pildvielas saturs ir 2% . Palielinot pildvielas daudzumu, palielinās redukcijas funkcijas parametru vērtības, un pie pildvielas satura 6% vērtības praktiski sakrīt ar nepildītā polimēra redukcijas funkcijas vērtībām.

Izmantotā literatūra un avoti

1. Iijima, S., "Nature", London, 1991, 354, p.56-8.
2. Ryszkowska J., "Quantitative image analysis of polyurethane/carbon nanotube composite microstructures", *Materials Characterization*, 2009, p. 1127-1133.
3. Vera-Agullo I., Gloria-Pereira A., Varela-Rizo H., Gonzales J. L., Martin-Gullon I., "Comparative study of the dispersion and functional properties of multiwall carbon nanotubes and helical-ribbon carbon nanofibers in polyester nanocomposites", *Composites Science and Technology*, 69, 2009, p. 1521-1532.
4. Paul D. R., Robeson L. M., "Polymer Nanotechnology: Nanocomposites", *Polymer*, 2008, Vol. 49, No. 15, p. 3187-3204.
5. Chen Z. K., Yang J. P., Ni Q.Q., Fu S. Y., Huang Y. G., "Reinforcement of epoxy resins with multi-walled carbon nanotubes for enhancing cryogenic mechanical properties", *Polymer*, 50, 2009, p. 4753-4759.
6. Abdalla M., Dean D., Theodore M., Fielding J., Nyairo E., Price G., "Magnetically processed carbon nanotube/epoxy nanocomposites: Morphology, thermal, and mechanical properties", *Polymer*, 51, 2010, p. 1614-1620.
7. Ma P.C., Mo S.Y., Tang B.Z., Kim, J.K., "Dispersion, interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites", *Carbon*, 48, 2010, p. 1824-1834.
8. Yoon D., Choi J.-B., Han Ch.-S., Kim Y.-J., Baik S., "The quantitative characterization of the dispersion state of single-walled carbon nanotubes using Raman spectroscopy and atomic force microscopy", *Carbon*, 2008, Vol. 46, p. 1530-1534.
9. Mueller T., "Quantitative nanoscale characterization" *Materials today*, 2009, Vol.48, p.40-43.
10. Luo Z. P., Koo J. H., "Quantitative the dispersion of mixture microstructures", *Journal of Microscopy*, Vol. 225, Pt 2 February 2007, p. 118-125.
11. Khare H.S., Burris D.L., "A quantitative method for measuring nanocomposite dispersion", *Polymer*, 51, 2010, p. 719-729.
12. Tsai J., Sun T., "Effect of platelet dispersion on the load transfer efficiency in nanoclay composites", *Journal of Composite Materials*, 2004, Vol. 38, p. 567-579.
13. Glaskova T., Zarrelli M., Borisova A., Timchenko K., Aniskevich A., Giordano M., "Method of quantitative analysis of filler dispersion in composite systems with spherical inclusions", *Composites Science and Technology*, 2011, Vol. 71, p. 1543 – 1549.
14. Wang H. W., Zhou H. W., Peng R. D., Leon Mishnoevsky Jr., "Nanoreinforced polymer composites: 3D FEM modeling with effective interface concept", *Composites Science and Technology*, 71, 2011, p. 980-988.
15. Fu S.Y., Feng X.Q., Lauke B., Mai Y.W., "Effect of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate composites", *Composites: Part B* 39, 2008, p. 933-961.

16. Moniruzzaman M., Winey K. I., "Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes", Review, *Macromolecules*, 2006, Vol. 39, p. 5194-5205.
17. Bicerano, J., "Prediction of polymer properties", New York: *Marcel Dekker*, 2002. 756 p.
18. Warriar A., Godara A., Rochez O., Mezzo L., Luizi F., Gorbatiikh L., Lomov S., VanVuure A. W., Verpoest I., "The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fiber sizing and/or the matrix", *Composites: Part A*, 41, 2010, p.532-538.
19. Ci L, Bai J. B., "The reinforcement role of carbon nanotubes in epoxy composites with different matrix stiffness", *Composites Science and Technology*, 66, 2006, p. 599-603.
20. Bokobza L., "Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review", *Polymer*, 48, 2007, p. 719-729.
21. Prolongo S.G., Campo M., Gude M.R., Chaos-Moran R., Urena A., "Thermo-physical characterization of epoxy resin reinforced by amino-functionalized carbon nanofibers", *Composites Science and Technology*, 69, 2009, p. 349-357.
22. Maksimov R. D., Bitenijs J., Plume E., Zicans J., Merijs Meri R., "The effect of introduction of carbon nanotubes on the physicomaterial properties of poly vinylacetate", *Mechanics of Composite Materials*, No.3., 46, 2010, p. 237-242.
23. Tehrani M., Safdari M., Al-Haik M.S., "Nanocharacterization of creep behavior of multiwall carbon nanotubes/epoxy nanocomposite", *Int. J. Plasticity* 27, 2011, p. 887-901.
24. Soliman E., Kandil U.F., Taha M.R., "Limitting shear creep of epoxy adhesive at the FRP-concrete interface using multi-walled carbon nanotubes", *Int. J. Adhesion&Adhesives* 33, 2012, p. 36-44.
25. Urzhumcev Y. "Prediction of long-term resistivity of polymer materials", *Nauka*, Moscow, 1982, 223 p.
26. Goertzen W. K., Kessler M. R., "Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites", *Materials Science and Engineering A* 421 (2006), p. 217-225.
27. Feng C.-W., Keong C.-W., Hsueh Y.-P., Wang Y.-Y., Sue H.-J., "Modeling of long-term creep behavior of structural epoxy adhesives", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 25, 2005, p. 427-436.
28. Aniskevich, K., Starkova, O., Jansons, J., Aniskevich, A. "Long-Term Deformability and Aging of Polymer Matrix Composites", New York: *Nova Science Publishers, Inc.*, ISBN: 978-1-61470-291-7, 2012, 250 p.
29. Живых В. В., «Структура и адгезионные свойства отверждённых эпоксидных смол», 2001, 46 стр.
30. В.А. Кабанов, «Энциклопедия полимеров», том 3, Советская энциклопедия, 1977, 1150 стр. 998-1000 стр.
31. Parrish D., Emulsion Polymerization, [atsauce 29.03.2012]. Pieejams: <http://pslc.ws/russian/emulsion.htm>.
32. Суздаев И. П., Физико химия нанокластеров, наноструктур и нанокомпозитов, Москва, 2005, 589 с.
33. М.Б. Лачинов, Е. В. Черникова „Методические разработки к практическим работам по синтезу высокомолекулярных соединений», часть 1, Москва, 2002, 58 с. Pieejams: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/lachinov/15a.pdf>
34. Энциклопедия (ультразвук). Культура в Вологодской области, [atsauce 29.03.2012]. Pieejams: <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/114/006.htm>.
35. Пласт эксперт, Вальцевание и каландрование, [atsauce 01.04.2012]. Pieejams: <http://www.e-plastic.ru/main/articles/r7/pd09>.
36. Полимерный бум - путеводитель по полимерным технологиям и оборудованию, [atsauce 20.03.2012]. Pieejams: <http://www.poly.turkavkaz.ru/equipment/extruder/istory/>.
37. Бобринецкий И.И., "Формирование и исследование электрофизических свойств планарных структур на основе углеродных нанотрубок", Диссертация на соискании ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2004, 145 с.
38. Kürti J., Zólyomi V., "Science of fullerenes and carbon nanotubes", 2002, [atsauce 01.04.2012]. Pieejams: <http://virag.elte.hu/kurti/science.html>.
39. George A., "Carbon Nanotubes and the Space Elevator", [atsauce 29.03.2010] Pieejams: <http://sciencelay.com/physics/carbon-nanotubes-and-the-space-elevator>.
40. Thostenson E., Ren Z., Chou T., Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review, *Composites Science and Technology*, 2001, Vol. 61, p. 1899-1912.
41. Козлов Г.И., Ассовский И.Г., "Синтез одностенных углеродных нанотрубок в расширяющемся парогазовом потоке продуктов лазерной абляции графита с катализатором", Журнал технической физики, 2003, том 73, вып. 11.
42. Binger D, "MEMS Thin Film Deposition Processes", Reston, Virginia, [atsauce 29.03.2010]. Pieejams: <http://www.memsexchange.org/MEMS/processes/deposition.html>.
43. Aniskevich K. K., Glaskova T. I., Aniskevich A. N., and Faitelson Ye. A., "Effect of moisture on viscoelastic properties of epoxy-clay nanocomposite", *Mechanics of Composite Materials*, 46, No. 6, 2010, p. 573-582.
44. Glaskova T., Aniskevich A., Aniskevich K., Faitelson Ye., Korkhov V. "Experimental and theoretical investigation of thermophysical and mechanical properties of the epoxy-clay nanocomposite", *Proceedings of Risoe International Symposium of Material Science*, ISBN 978-87-550-3925-4, 2011, p. 283-290.
45. Glaskova, T., Aniskevich, A., "Moisture effect on deformability of epoxy/montmorillonite nanocomposite", *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, Vol. 116, No. 1, pp. 493 - 498.
46. Faitelson, E. A., Glaskova, T. I., Korkhov, V. P., and Aniskevich, A. N., "Structural changes in a clay-containing

- nanocomposite with a different moisture content caused by its deformation”, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 83, No. 3, 2010, pp. 433-451.
47. Glaskova, T., Aniskevich, A., “Creep behaviour of epoxy/clay nanocomposite”, *Proceeding of the 17th International Conference on Composite Materials (ICCM-17)*, Edinburgh, UK, 2009, CD F1.14.
48. Aniskevich, K., Starkova, O., Aniskevich, A., ‘Deformational properties of filled rubber under quasistatic loading.’ *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, No. 3, 2011, pp. 1621-1629.
49. Aniskevich, K., Starkova, O., Jansons, J., and Aniskevich, A., ‘Deformational properties of silica filled styrene-butadiene rubber under uniaxial tension.’ Nova Science Publishers, Inc., N.Y., Open Access item. ISBN: 978-1-61324-414-2, 2011, 52 p.
50. Kazina, E., Starkova, O., Aniskevich, A., ‘Volume changes in filled rubber under uniaxial cyclic loading.’ *Materials Science (Medžiagotyra)*, 2011, Vol. 17, No. 3, p. 271-275.
51. Aniskevich, K., Starkova, O., Jansons, J., and Aniskevich, A., ‘Deformational properties of silica filled styrene-butadiene rubber under uniaxial tension.’ *Rubber: Types, Properties and Uses*, Ed. by G.A. Popa, New York: Novapublishers, Inc., ISBN: 978-1-61761-464-4, 2011, pp. 455-476.
52. Aniskevich, K., Starkova, O., Jansons, J. and Aniskevich, A., ‘Viscoelastic properties of silica-filled styrene-butadiene rubber under uniaxial tension’, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 46, No. 4, 2010, pp. 375–386.
53. Cho J., Daniel I. M., “Reinforcement of carbon/epoxy composites with multi-wall carbon nanotubes and dispersion enhancing block copolymers”, *Scripta Materialia*, 58, 2008, p. 533-536.
54. Ogasawara T., Ishida Y, Ishikawa T., Yokota R., “Characterization of multi-walled carbon nanotube/phenylethynyl terminated polyimide composites”, *Composites Part A*, 2004, 35 (1), p. 67-74.
55. Song Y. S., Youn J. R., “Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites”, *Carbon* 43, 2005, p. 1378-1385.
56. Lingaiah S., Sadler R., Ibeh C., Shivakumar K, “A method of visualization of inorganic nanoparticles dispersion in nanocomposites”, *Composites: Part B*, Vol. 39, 2008, p. 196-201.
57. Ryan K.P., Cadek M., Nicolosi V., Blond D., Ruether M., Armstrong G., Swan H., Fonseca A., Nagy J. B., Maser W. K., Blau W. J., Coleman J. N., “Carbon nanotube for reinforcement of plastics? A case study with polyvinyl alcohol”, *Composites Science and Technology* 67, 2007, p. 1640-1649.
58. Zauls V., Krutuhvostovs R., “Skenējošā elektronu mikroskopija”, Latvijas Universitāte, Cietvielu un materiālu fizikas laboratorija, Laboratorijas darba apraksts, 2005, 40 lpp.
59. Glaskova T., Zarrelli M., Aniskevich A., Giordano M., Trinkler L., Berzina B., “Quantitative optical analysis of filler dispersion degree in MWCNT-epoxy nanocomposite”, *Composites Science and Technology*, 2012, Vol. 72, p. 477 – 481.
60. Borisova A., “Daudzsienu oglekļa nanocaurulišu dispersitātes izpēte polimēru nanokompozītiem”, Baka-laura darbs, Rīga, 2010, 41 lpp.
61. Allaoui A., El Bounia N., “How carbo nanotubes affect the cure kinetics and glass transition temperature of their epoxy composites? – A review”, *Express Polymer Letters*, Vol. 3, No.9, 2009, p. 73
62. Montazeri A., Pourshamsian K., Riazian M., “Viscoelastic properties and determination of free volume fraction of multi-walled carbon nanotube/epoxy composite using dynamic mechanical thermal analysis”, *Materials and Design*, 36, 2012, p. 408-414.
63. Coefficient of thermal expansion, [atsauce 02.05.2012.], Pieejams: http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0197_TIK/index.html.
64. Varshneya A. K., “Fundamentals of inorganic glasses”, Sheffield: *Society of Glass Technology*, 2006, 570 p.
65. Термоанализ, [atsauce 29.04.2012], Pieejams: <http://labtest.su/equipment/list-thermo-analysis/folder-dilatometer.html>.
66. Ojovan, M. I., “Configurons: thermodynamic parameters and symmetry changes at glass transition”. *Entropy* 10, 2008, p. 334–364.
67. Čate A., Popovs A., “Mūsdienu materiāli konstrukciju projektēšanā”, lekciju konspekts, RTU Materiālu un Konstrukciju institūts, Rīga, 2008, 89 lpp.
68. Polymer chemistry, experimental methods [atsauce 29.04.2012.], Pieejams: <http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/DSC.htm>.
69. Starkova, O., Buschhorn, S., Mannov, E., Schulte, K., Aniskevich, A. ‘Creep and creep-recovery of epoxy/MWCNT nanocomposites.’ *Composites: Part A*, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.03.015, Vol. 43, No. 8, pp. 1212–1218.
70. Малинин Н. Н., «Прикладная теория пластичности и ползучести», Машиностроение, 1968, 333-339 стр. из 399.
71. Megnis M., Varna J., “Nonlinear viscoelastic, viscoplastic characterization of unidirectional GF/EP composite”, *Mechanics Time-Dependent Mater.* 7, 2003, p. 269-290.

II. Nelineāri viskoelastīgā polimēra deformēšanas modelis šļūdes gadījumā

Polimēru kompozītu materiālu specifiskās īpašības

Polimēru industrijas attīstība un jaunu sintētisko polimēru izstrāde strauji izauga pēdējos 70 gados. Polimēru izstrādājumi tik veiksmīgi iekaroja tirgu, ka to saražotu daudzumu var salīdzināt pēc apjoma ar 20 gadu laikā pasaulē no visiem metāliem saražotu produkciju. Bez polimēru materiāliem un uz polimēru bāzes kompozītu materiāliem šodien nav iedomājami nedz kosmiskie aparāti, nedz lidmašīnas, ātrgaitas vilcieni un automašīnas, nedz rekordus nesošais sporta inventārs. Polimēru kompozītu konstrukciju un izstrādājumu priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionāliem materiāliem ir acīmredzamas – vispirms tās ir: mazs svars, stiprība, antikorozija, ilgdarbība u.c.

Taču šādiem materiāliem piemīt ļoti sarežģītas un specifiskas fizikālās un mehāniskās īpašības, kas savā laikā deva spēcīgu impulsu jauno zinātnes nozaru – polimēru un kompozītu fizika un mehānika – attīstībai. Kopš 20.g.60-iem gadiem šīs zinātnes ir guvušas izcilus panākumus polimēru un polimēru kompozītu īpašību izpētē, aprakstā un modelēšanā. Taču joprojām šo sarežģītu vielu izpētē ir daudz neskaidru jautājumu un problēmu. Viena no tām būtu – tipisku procesu aprakstošo vienādojumu sarežģītība, kas apgrūtina reālo konstrukciju aprēķinu un modelēšanu.

Šādu „tipisku procesu” rindā vispirms būtu nosauicama šļūde.

Ka zināms, šļūde ir viena, no būtiskām polimēru materiālu īpašībām – deformāciju attīstības laikā parādība konstanta sprieguma ietekmē. Šļūde piemīt visiem polimēru materiāliem bez izņēmuma, no materiāla īpašībām un slodzes lieluma atkarīgas tikai tās ieguldījums kopējā spriegoti deformētā stāvoklī. Vairākos materiālos šļūde sāk attīstīties pie nosacīti zemiem spriegumu lielumiem. Papildus, daudzos no tiem sakars starp deformācijām un spriegumiem ir izteikti nelineārs. Šādu procesu analītisks apraksts ir sarežģīts uzdevums.

Nelineārās šļūdes teorijas

Dažādu nelineāro šļūdes teoriju izstrādei ir veltīti daudzi darbi. Vispirms to rindā būtu jānosauca [1] - [8]. Vispārējā veidā visas teorijas var sadalīt divās daļās: vienā daļā atradīsies teorijas, kas, vēsturiski, paplašināja klasisko Bolcmaņa-Voltera [8] lineārās šļūdes teoriju uz nelineāro gadījumu. Lineārās teorijas ietvaros deformācijas atkarība no sprieguma tiek izteikta sekojošā formā:

$$\varepsilon(t) = D_0 \sigma(t) + \int_0^t \sigma(\tau) K(t - \tau) d\tau$$

Šīs teorijas nelineārā variantā pamata vienādojumu risinājumus iegūst pieaugošās kārtas Voltera integrāļu formā:

$$\varepsilon(t) = C_1 \int_0^t \sigma(\tau) K_{11}(t - \tau) d\tau + C_2 \int_0^t \int_0^t \sigma(\tau_1) \sigma(\tau_2) K_{22}(t - \tau_1, t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + C_3 \int_0^t \int_0^t \int_0^t \sigma(\tau_1) \sigma(\tau_2) \sigma(\tau_3) K_{33}(t - \tau_1, t - \tau_2, t - \tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3$$

Šādu integrāļu kodolu noteikšana vispārējā veidā nav iespējama. Tāpēc tiek pieņemti vairāki vienkāršojumi: tiek izmantoti t.s. modificētie kodoli, pieņem, ka visi sprieguma impulsi tiek pielikti vienlaicīgi u.t.t. Nelineārā deformāciju atkarība no spriegumiem tiek ievērota ar dažādām funkcijām. Bieži vien izmanto pakāpes rinda. Daudzos gadījumos rezultāta sasniegšanai pietiek noturēt pirmās un trešās pakāpes locekļus (kubiska nelinearitāte [6]). Dažreiz precīzāk izdodas aproksimēt nelineāro šļūdi, izmantojot hiperboliskā sīnusa funkciju [9].

Otro teoriju grupu sastāda teorijas, kas ir formulētas, izejot no termodinamikas pamatprincipiem. Šeit par noteicošiem jānosauca R.Šeperi darbi [1], [10]. Tajos tiešās šļūdes atkarība no laika tiek aprakstīta sekojošā veidā:

$$\varepsilon(t, \sigma) = g_0 D_0 \sigma(t) + g_1 \int_0^t D(\psi - \psi') \left\{ \frac{d[g_2 \sigma(\tau)]}{d\tau} \right\} d\tau \quad (1)$$

kur

$$\psi(t, \sigma) = \int_0^t \frac{dt}{a_\sigma(t)}; \quad \psi'(\tau, \sigma) = \int_0^\tau \frac{d\tau}{a_\sigma(\tau)}$$

g_0, g_1, g_2, a_σ - ir no sprieguma lieluma atkarīgie materiāla parametri.

[5], [4] detalizēti apraksta šo parametru noteikšanas metodiku, analizējot tiešās un atgriezeniskās šļūdes eksperimentālus datus.

Atgriezeniskās šļūdes aprakstam R.Šeperi iegūst sekojošu formulu:

$$\varepsilon_r = \left[\Delta D \left(\frac{t_0}{a_\sigma} + t - t_0 \right) - \Delta D(t - t_0) \right] g_2 \quad (2)$$

kur t_0 - slodzes noņemšanas laika moments.

R.Šeperi teorija apraksta nelineāro šļūdi visvispārīgākā veidā. Pie dažādiem g_0, g_1, g_2, a_σ parametru lielumiem no šiem vienādojumiem var iegūt citu pazīstamu teoriju [3], [12], [7] sakarības. Teorija izmanto vairākus materiāla parametrus. To noteikšana nav vienkārša.

Šeperi piegājienu veiksmīgi izmantoja [13], [14] autori, aprakstot dažādu nelineāri viskoelastīgu materiālu deformēšanos. Šo autoru metodes būtība ir tas, ka tiešās šļūdes konstantes tiek noteiktas no atgriezeniskās šļūdes eksperimentāliem datiem.

Katrai teorijai piemīt savas stiprās un vājās puses. Bet tām kopīgs ir tas, ka visas izmanto vairākus pieņēmumus un hipotēzes, kas atvieglo vai padara iespējamu pamatvie-

nādojumu risinājumu, kā arī operē ar lielu materiālu parametru daudzumu, kas ir nosakāmi katram materiālam pie katra konkrēta slodzes. Tāpēc, veicot šādu materiālu šļūdes analītisko aprakstu, pētnieka primārais uzdevums ir izvēlēties optimālo materiāla deformēšanas modeli, kas, no vienas puses, atspoguļotu visus analīzei nepieciešamus procesus, bet, no otras puses, - būtu pēc iespējas vienkārša realizācijā. Šis uzdevums ir īpaši aktuāls, ņemot vērā arvien vairāk pieaugošais pieprasījums pēc nelineāri viskoelastīgu materiālu aprēķiniem konkrētās inženieru konstrukcijās un izstrādājumos.

Laika – sprieguma analogija

Līdzās minētiem nelineārās šļūdes aprakstiem ir pazīstami arī „ekonomi” paņēmieni fiziskās nelinearitātes ievērošanai. Piemēram, tādi, kas izriet no analogiju teorijas. Mūsu gadījumā tā ir laika-spieguma analogija (LSA) [7]. Šī metode labi darbojas, modelējot šļūdes procesus tādiem polimēriem, kuriem pietiekami plašā diapazonā piemīt tuvas lineārām deformēšanas diagrammas pie nosacījuma, ka visas deformācijas ir atgriezeniskās, jeb neatgriezeniskās deformācijas ir neievērojami mazas.

Metodes būtība pastāv pieņēmumā, ka, pieaugot spriegumam, relaksācijas procesi paātrinās, un starp laiku un pielikto spriegumu intensitāti var būt noteikta ekvivalenta saite, ko nosaka redukcijas funkcija $a(\sigma)$. Pārvietojot atsevišķas eksperimentālās līknes $J_{ve} = \epsilon_{ve}/\sigma$ gar logaritmisku laiku skalu par $a(\sigma_i)$ attiecībā pret kādu „bāzes” likni, iegūst šļūdes pamatlīkni („master curve”), kas dod viskoelastīgu deformāciju attīstības prognozi materiālā zem „bāzes” sprieguma attālinātos laika posmos. Funkcija, kas apraksta visu pamatlīkni, apraksta arī tās atsevišķas sastāvdaļas, proti, atsevišķiem sprieguma līmeņiem atbilstošās deformācijas līknes. Visbiežāk par pamatlīknes aprakstošo funkciju izvēlās eksponenciālo rindu. Nelineāro sakarību starp spriegumiem un deformācijām nodrošina redukcijas funkcija, kas atrodas eksponentos pakāpē.

Šķiet loģiski paplašināt šo paņēmieni uz materiāliem, kuros veidojas manāmi lielas neatgriezeniskās deformācijas. Taču šim gadījumam ir nepieciešama atsevišķa metodes pārbaude un pamatošana.

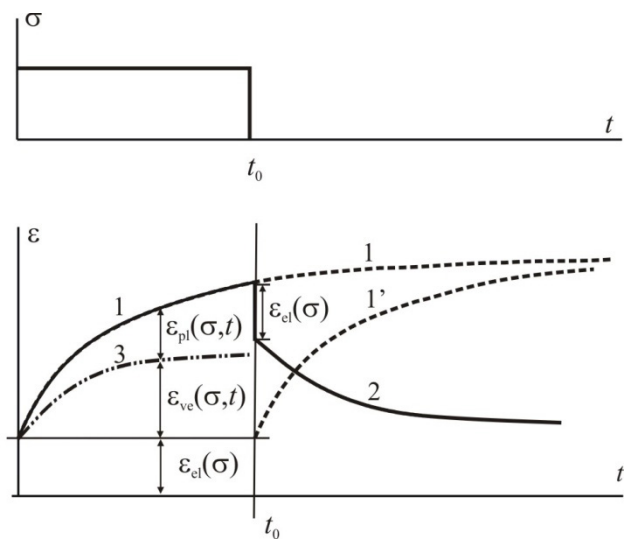
Darbojoties LSA metodes ietvaros tradicionāli tiek pieņemtas vairākas hipotēzes [5]- [7], kas palīdz vienkāršot risinājumu. Šādu hipotēžu pielietojamība nelineāri viskoelastīgam materiālam ar neatgriezeniskām deformācijām arī ir jāpamato un jāpārbauda.

Veikto pētījumu mērķis bija uz polimēra plēves Upilex-S, kas atrodas šļūdes procesā zem stiepes slodzes, piemēra izstrādāt nelineāro viskoelastīgo deformāciju attīstības modeli, kas ļautu izdalīt atgriezeniskās un neatgriezeniskās deformācijas, un aprakstīt tiešās un atgriezeniskās šļūdes līknes ar vienādiem atgriezeniskās šļūdes eksperimentos noteiktiem parametriem. Modelis tika pārbaudīts uz eksperimentāliem datiem, kas aprakstīti šī darba 3. sadaļā.

Nelineārās šļūdes analītiskais modelis

Tiešā šļūde

Tiek analizēts viendabīgs polimēru materiāls stiepē un atslodzē. Materiāls ir viskoelastīgs, fiziski nelineārs, un slodzes diapazonā tas sāk uzkrāt neatgriezeniskās deformācijas,



Zīm. 1. Nelineāri viskoelastīgā materiāla deformācijas un deformāciju komponentes: 1 — šļūdes līkne $\epsilon^{cr}(\sigma, t)$; 1' — $\epsilon^{cr}(\sigma, t-t_0)$; 2 — atgriezeniskās šļūdes līkne $\epsilon^{rec}(\sigma, t-t_0)$; 3 — šļūdes viskoelastīga komponente.

Ir pieņemtas sekojošas hipotēzes:

Pilna šļūdes deformācija $\epsilon^{cr}(\sigma, t)$ ir triju savstarpēji neatkarīgu komponentu summa, šīs komponentes ir: lineāra elastīga deformācija $\epsilon_{el}(\sigma)$, nelineāra viskoelastīga deformācija $\epsilon_{ve}(\sigma, t)$, un slodzes laikā uzkrātā neatgriezeniska deformācija $\epsilon_{pl}(\sigma, t)$ (Zīm. 1.):

$\epsilon^{cr}(\sigma, t) = \epsilon_{el}(\sigma) + \epsilon_{ve}(\sigma, t) + \epsilon_{pl}(\sigma, t)$	(3)
--	-----

kur

$\epsilon_{el}(\sigma) = \sigma / E$	(4)
--------------------------------------	-----

$\epsilon_{ve} = \frac{\sigma}{E} \sum_i^n \left[A_i \left(1 - \exp\left(\frac{-a(\sigma)t}{\tau_i} \right) \right) \right]$	(5)
---	-----

$$a(\sigma) = \exp(\alpha_1 \sigma + \alpha_2)$$

$\epsilon_{pl}(\sigma, t) = \left(\sum_j^m c_j \sigma^j \right) t^b$	(6)
---	-----

Bolcmaņa superpozīcijas princips. Materiāla reakcija uz konkrēto slodzi nav atkarīga no tā reakcijas uz iepriekšējām slodzēm. Tiek pieņemts, ka visas slodzes ir pieliktas vienlaicīgi un to ieguldījums vienkārši summējās. Elastības modulis paliek nemainīgs visā slogojuma diapazonā. Neatgriezeniskās deformācijas neiespaido šļūdes procesu.

Atgriezeniskā šļūde

Pēc slodzes noņemšanas (laika moments t_0), elastīgā deformācijas komponente praktiski momentā izzūd, neatgriezeniskā deformācija, uzkrāta slogojuma laikā līdz momentam t_0 paliek konstanta, un deformēšanas process ir viskoelastīgs.

Saskaņā ar Bolcmaņa superpozīcijas principu par dažādos laikos pieliktu sprieguma impulsu neatkarīgu iedarbību [5], atgriezeniskās šļūdes likne 2 (Zīm. 1) tiek aprakstīta sekojošā formā:

$\begin{aligned} \varepsilon^{rec}(\sigma, t - t_0) &= \varepsilon_{ve}(\sigma, t) - \varepsilon_{ve}(\sigma, t - t_0) + \\ + \varepsilon_{pl}(\sigma, t_0) &= \varepsilon_{ve}^{rec}(\sigma, t - t_0) + \varepsilon_{pl}(\sigma, t_0) \end{aligned} \quad (7)$	
---	--

vai

$\begin{aligned} \varepsilon^{rec}(\sigma, t - t_0) &= \frac{\sigma}{E} \sum_{i=1}^N A_i \cdot \\ &\cdot \left[\exp\left(-\frac{a(\sigma)(t - t_0)}{\tau_i}\right) - \exp\left(-\frac{a(\sigma)t}{\tau_i}\right) \right] + \varepsilon_{pl}(\sigma, t_0) \end{aligned} \quad (8)$	
--	--

Formulas (7) forma prasa atsevišķu paskaidrojumu, jo sākumā var šķist, ka tā atrodas pretrunā ar R.Šeperei formulām (2). Neskatoties uz to, ka (4) var iegūt, ja R.Šeperei formulā

(1) noteikt $g_0 = g_1 = g_2 = 1$ un $D = \sum_i^n A_i \exp\left(-\frac{a(\sigma)t}{\tau_i}\right)$, starp

R.Šeperei un LSA formulām pastāv būtiska atšķirība. Tā ir saistīta ar pamatlīknes veidošanu un relaksāciju laiku fiksēšanu aprēķinos pēc LSA. Pamatlīknes veidošanas gaitā tiešās šļūdes eksperimentālā likne tiek pārvietota gar laika skalu. Līdz ar to tās turpinājums - atgriezeniskās šļūdes likne - tiek aprakstīta ar relaksāciju spektra daļu, kas atrodas uz laika ass bīdes faktora attālumā no sākotnējā stāvokļa. Tieši šis apstāklis nosaka redukcijas funkcijas esamību abos formulas (7) saskaitāmos.

Pakāpienveida slogojums

Formulas (3) – (8) var būt paplašinātas uz vispārīgo gadījumu, kad materiālam dažādos laika intervālos tiek pielikti un noņemti dažāda lieluma un ilguma spriegumu impulsi (kopsummā – K impulsi):

$\begin{aligned} \varepsilon &= \sum_{k=1}^L H(t - t_{k-1}) f_L(\Delta\sigma_k, t - t_{k-1}) + \\ + \sum_{k=L+1}^K H(t - t_{k-1}) [f(\sigma_k, t - t_{k-1}) - f(\sigma_{k-1}, t - t_{k-1})] \end{aligned} \quad (9)$	
--	--

kur

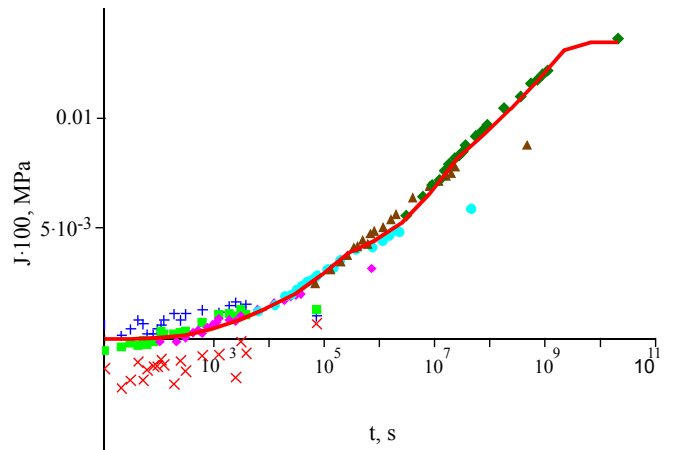
$$f(\sigma_k, t) = \frac{\sigma_k}{E} \sum_{i=1}^N A_i [1 - \exp(-\frac{a(\sigma_k)t}{\tau_i})];$$

$$f_L(\sigma_k, t) = f(\sigma_k, t), \text{ gadījumam, kad } a(\sigma_k) = 1; \\ \Delta\sigma_k = \sigma_k - \sigma_{k-1}$$

Materiālam deformēšanas nelineārā posmā ir pielietots modificēts Bolcmaņa princips, saskaņā ar kuru tiek uzskatīts, ka laika momentā t_i (i -tais slodzes pakāpiens) $i-1$ sprieguma impulss tiek noņemts un tajā pašā momenta i -tais impulss tiek pielikts. Abu notikumu iedarbība skaitās neatkarīga.

Deformāciju aprēķina metodika

Aprēķinos tika realizēta sekojošā, uz LSA principiem balstīta, metodika. Eksperimentālās deformāciju līknes tika pārbīdītas gar logaritmisku laiku skalu līdz izveidoja pamatlīkni (Zīm.2.). No bīdes faktoriem noteikti redukcijas funkcijas nezināmie parametri.



Zīm. 2. Pamatlīknes veidošana

Tika fiksēti relaksācijas laiki τ_i - pa vienam katrā decimālā intervālā. Minimizējot starpību starp teorētisko līkni un eksperimentāliem punktiem (Zīm. 2.), tika noteiktas deformāciju amplitūdas A_i no (5). Aprēķinu gaitā noteiktie parametri vienlaicīgi apraksta pamatlīkni un katru atsevišķu eksperimentālo līkni. Tagad ir iespējams izdalīt no eksperimentāliem datiem viskoelastīgo komponenti.

$$\varepsilon_{ve}^{exp}(\sigma, t) = \varepsilon_{exp}^{cr}(\sigma, t) - \varepsilon_{el}(\sigma) - \varepsilon_{pl}(\sigma, t)$$

Modeļa verificēšana ar eksperimentāliem datiem

Vispārēja informācija par veiktiem eksperimentiem

Augstāk aprakstītais modelis tika izmantots Upilex-S plēves šļūdes aprakstam. Materiāla raksturlielumi tika noteikti kvazistatisko eksperimentu stiepē un tiešās un atgriezeniskās šļūdes gaitā istabas temperatūrā (20 ± 2 °C). Stiepes kvazistatiskie pētījumi realizēti uz mašīnas Zwick 2.5. ar de-

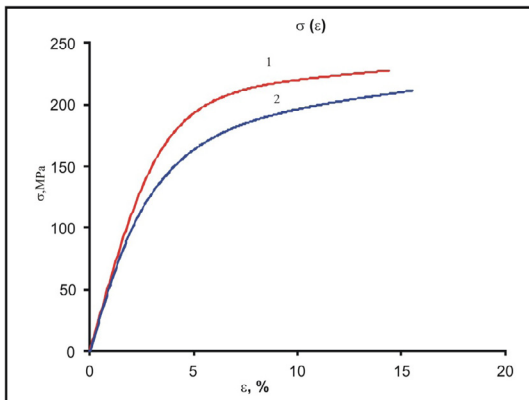
formēšanas ātrumiem $3,3 \cdot 10^{-5}$ un $6,7 \cdot 10^{-2}$ s⁻¹ (respektīvi - 0,4 un 800 mm/min). Deformācijas noteica pēc stiprinājumu pārvietojumiem, tāpēc paraugi bija samērā lieli (virs 20 cm), 30 cm platu joslu formā. Plēves biezums $0,13 \pm 0,01$ mm. Visi paraugi izgriezti no ruļļa vienādā virzienā.

Šļūdes eksperimentiem izmantots oriģināls galds stends. Deformācijas tika mērītas ar optisko katometru un ar ciparu fotoaparāta palīdzību [15]. Abas metodes nodrošina nepieciešamu mērījumu stabilitāti ilgstošu eksperimentu gaitā. Mērījumu bāze – 50 mm šķersdeformācijām un 30 mm gareniskām deformācijām. Attālums starp stiprinājumiem 75 mm. Ģeometrisko izmēru ietekme uz mērāmām deformācijām tika novērtēta uz paraugiem ar dažādiem malu garumiem. Tā nebija būtiska.

Materiāla atbilstības modelim pārbaude

Nelinearitāte

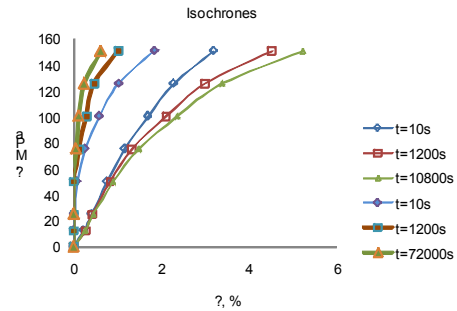
Zīm. 3. demonstrē tipiskās deformēšanas diagrammas, iegūtas kvazistatisko eksperimentu rezultātā divu atšķirīgu deformēšanas ātrumu gadījumos.



Zīm. 3. Tipiskas Upilex-S plēves stiepes diagrammas. Deformēšanas ātrumi 800 (1) un 0,4 mm/min (2)

Zīmējumā var izdalīt linearitātes apgabalu, kurā $\sigma - \epsilon$ līkne ir lineāra un tiek raksturota ar elastības moduli E , kas paliek nemainīgs pie visiem pētāmiem deformēšanas ātrumiem. Deformācijai (vai spriegumam) pieaugot, līkņu raksturs mainās atkarībā no deformēšanas ātruma un starpība starp līknēm sasniedz aptuveni 10%. Spriegumu intervālā no 210 līdz 230 MPa paraugi sabrūk.

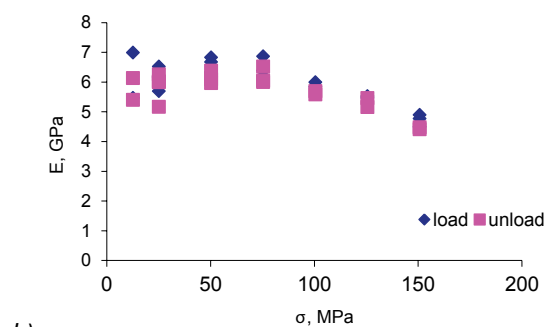
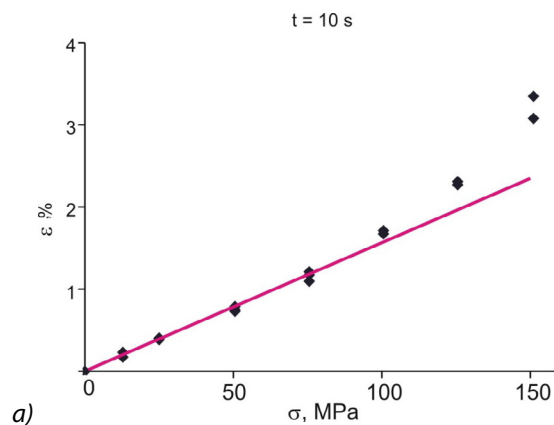
Zīm.4 ir attēlotas šļūdes izohronas dažādos laika momentos. To nelineārs raksturs vēlreiz apstiprina materiāla deformēšana nelinearitāti.



Zīm. 4. Upilex-S plēves tiešās (gaiši punkti) un atgriezeniskās (tumši punkti) šļūdes izohronas

Elastīgā moduļa lielums un nemainīgums

Zīmējumos 3. un 4. attēlotu izohronu raksturs liecina par to, ka zemo un vidējo spriegumu diapazonā (aptuveni līdz 75 MPa) $\sigma - \epsilon$ sakarība ir praktiski lineāra. Turpmākajos aprēķinos pieņemts elastīgā moduļa lielums $E = 6,4$ GPa. Tas ir noteikts pēc eksperimentālām izohronām pie dažādām slodzes līmeņiem un samērā labi sakrīt ar publiski pieejamiem plēves ražotāja publicētiem materiāla datiem (plēvēm ar biezumiem 25 un 75 mkm atbilst moduļa vērtības $E = 9121$ un 6967 MPa. Par eksperimentos pētītās plēves ar biezumu 125 mkm datu nav).



Zīm. 5. Elastības moduļa noteikšana: a) šļūdes izohrona $t = 10$ s (nosacīti momentāna deformācija), b) nosacīti momentāns $t = 10$ s elastības modulis slodzē (tumši punkti) un atslodzē (gaiši punkti), katrs punkts – atsevišķs eksperiments

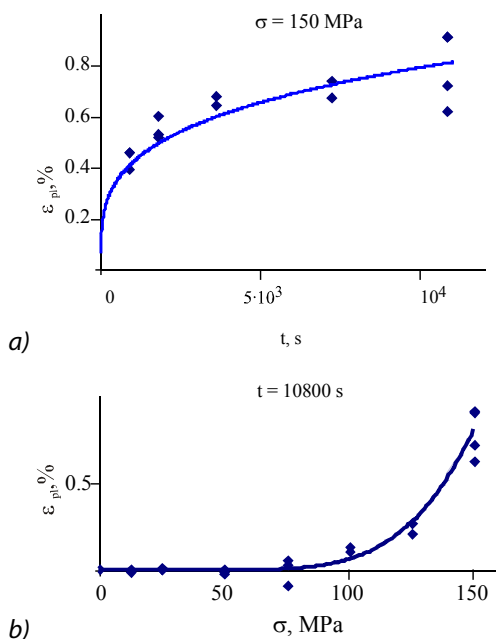
Zīm. 5a) attēlotā eksperimentālā izohrona laika momentam $t = 10$ s (punkti) spriegumu intervālā no 0 līdz 75 MPa praktiski sakrīt ar pēc formulas (4) aprēķinātu taisni. Atslodzes gaitā nosacīti momentāns modulis paliek praktiski nemainīgs visā slodzes izmaiņas diapazonā un ir vienāds ar tiešās šļūdes moduli (Zīm. 5 b).

Neatgriezenisko deformāciju uzkrāšanās

Eksperimentos konstatēts, ka šļūdes gaitā uzkrājas neatgriezeniskās deformācijas, kuras pieaug, pieaugot spriegumam, un sasniedz aptuveni 1/5 daļu no šļūdes deformācijas.

Par neatgriezeniskām tika uzskatītas deformācijas, kas pastāvēja paraugā pēc 20 atslodzes stundām. Pamatojums tādām pieņēmumam ir eksperimentu sērija ilgstošā (1 mēnesis) atgriezeniskā šļūdē (pēc 3 stundu aktīvās slodzes pie vislielākā – 150 MPa – sprieguma līmeņa). Sērijas rezultātā konstatēts, ka pirmo 20 stundu laikā relaksējošā deformācija ir aptuveni 10 reizes lielāka, nekā deformācija, kas relaksē nākamo 160 stundu laikā. Pēc 160 stundām (1 nedēļa) process praktiski apstājas un deformāciju izmaiņas nākamo 3 nedēļu laikā nav būtiskas. Teiktais jāva secināt, ka šāda pieņēmuma kļūda deformāciju noteikšanā nepārsniedz 10% vislielākajam spriegumu līmenim, bet citiem spriegumu līmeņiem tā bija vēl mazāka.

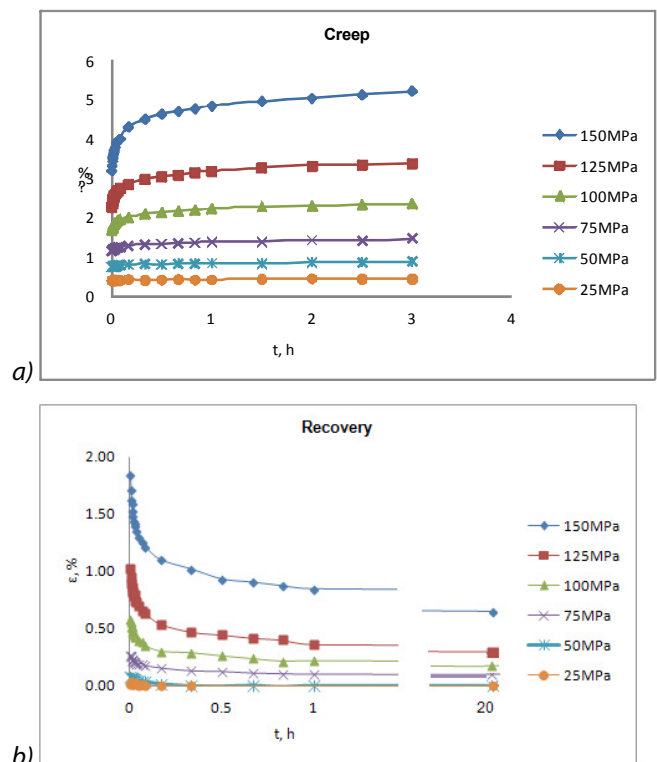
Atsevišķā eksperimentu sērijā (no 15 eksperimentiem) tika novērtēts neatgriezenisku deformāciju ieguldījums deformētajā stāvoklī (Zīm. 6., katrs punkts – atsevišķs eksperiments.) Dati liecina par to, ka pie slodzēm zem 75 MPa neatgriezeniskās deformācijas ir neievērojami mazas, tās pieaug, palielinoties slodzei un sasniedz 0,7% pie maksimālā sprieguma lieluma 150 MPa.



Zīm. 6. Neatgriezenisku deformāciju uzkrāšanās atkarībā no slodzes ilguma (atslodzes laiks 20 st.) (a) un no laika momenta $t = 10800$ s (pēdējais šļūdes punkts) pieliktā sprieguma (b). Punkti eksperiments, līnijas – aprēķins pēc formulas (4)

Šļūdes aproksimācija

Tiešās un atgriezeniskās šļūdes eksperimenti ir veikti pie septiņiem spriegumu līmeņiem (līdz 150 MPa, kas sastāda aptuveni 0,7 no maksimālās slodzes, pie kuras notiek parauga sabrukums) (Zīm. 7.). Tiešās šļūdes eksperimentu ilgums ir 10800 s (3 st.) un atgriezeniskās šļūdes eksperimentiem – aptuveni 20 st.



Zīm. 7. Upilex-S tiešās (a) un atgriezeniskās (b) šļūdes eksperimentālie dati

Pēc sadaļā 2.4. aprakstītās metodikas tika veikta šo eksperimentālo datu aproksimācija. Aprēķini veikti MathCad vidē.

Rezultātā ir noteikti nezināmie lielumi:

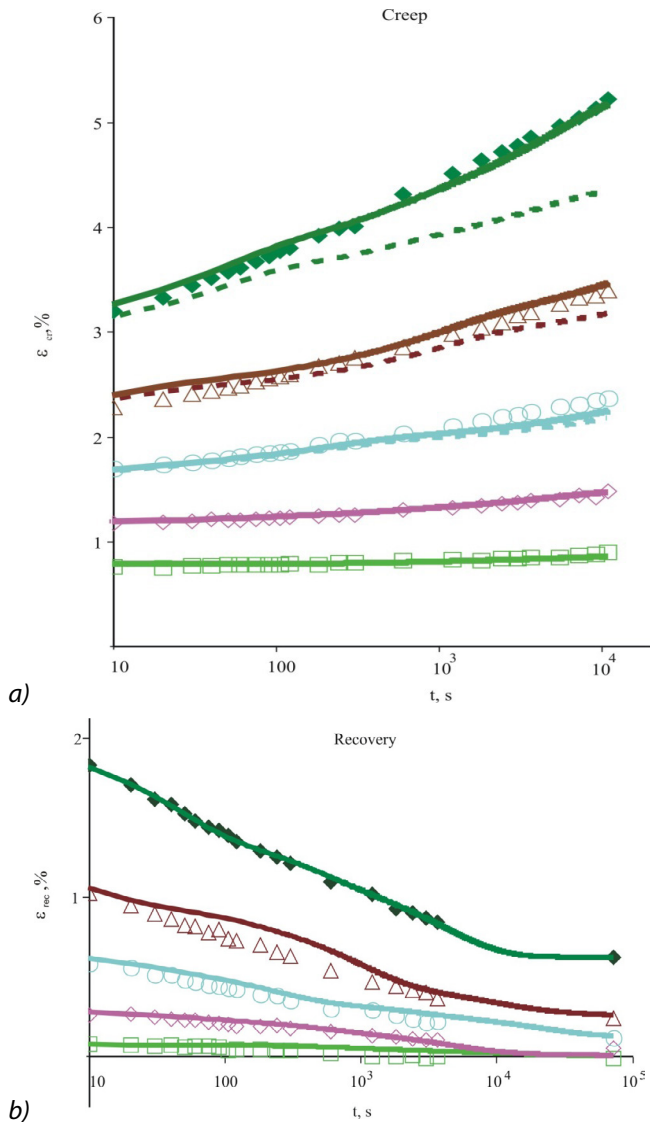
$m = 4; c_j = \{-0,1 \cdot 10^{-3}; 5,24 \cdot 10^{-6}; -8,71 \cdot 10^{-8}; 5,05 \cdot 10^{-10}\}; b = 0,274$	(10)
--	------

neatgriezenisko deformāciju aproksimācijai pēc (4) un viskoelastīgās šļūdes parametri $a(\sigma), A_i$ un $\tau_i (i = 1, \dots, 11)$:

$a_1 = 0,0827; a_2 = 6,2, \tau = \{10; 100; 1000; \dots; 1011\}$,	(11)
--	------

$A = \{0; 0; 0,05; 0,09; 0,1; 0,2; 0,12; 0,24; 0,1; 0,30; 0\}$.

Uz šo datu pamata izveidotas teorētiskas tiešās un atgriezeniskās šļūdes līknes (Zīm. 8.)



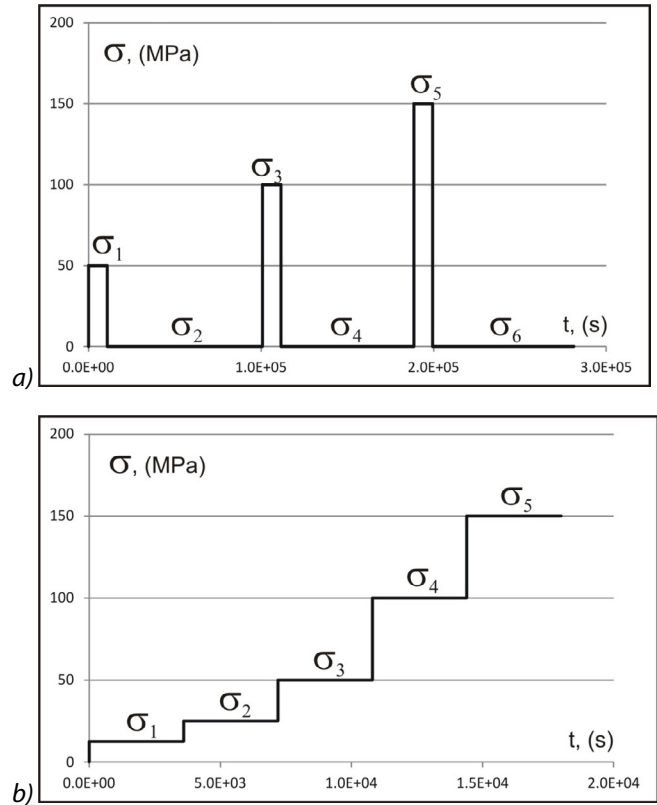
Zīm. 8. Tiešās (a) un atgriezeniskās (b) šļūdes teorētiskas līknes (nepārtrauktas līnijas). Punkti – eksperiments, svītru līnijas – atgriezeniskās deformācijas (elastīgā un viskoelastīgā komponentes)

Ka redzams, teorētiskas līknes pietiekami precīzi apraksta kā tiešās, tā arī atgriezeniskās šļūdes eksperimentālos datus. Tas ļauj secināt, ka 2. sadaļā noformulētās hipotēzes ir pamatotas, un piedāvātais modelis dod iespēju aprakstīt nelineāri viskoelastīgā materiāla tiešās un atgriezeniskās šļūdes eksperimentālos datus (Zīm. 7.) ar vienu parametru kopu.

Impulsa un pakāpienveida slogojums. Eksperimentālo datu aproksimācija

Eksperimentu apraksts

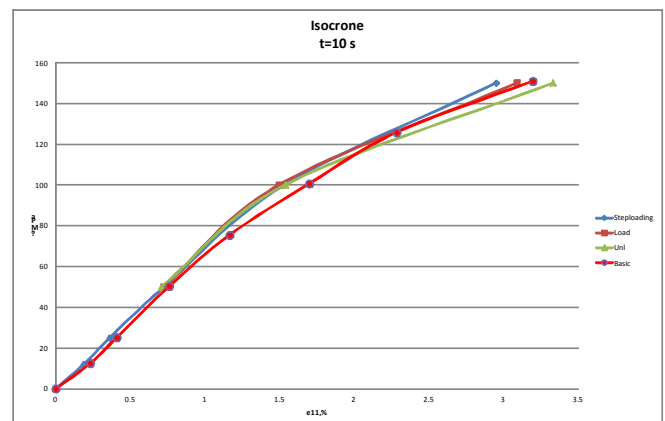
Kā modeļa kontroles eksperimenti uz Uplex-S plēves paraugiem tika veikti arī deformāciju pētījumi pie sarežģītiem slodzes veidiem (Zīm. 9).



Zīm. 9. Slogojuma veidi a) - vairākkārtējā slogošana pēc atslodzes ar lielāku sprieguma impulsu („impulsa slogojums”); b) pakāpienveida slogojums

Pirmajā gadījumā paraugs tika slogots 3 reizes ar slodzēm 50, 100 un 150 MPa ar atslodzēm pēc katra etapa. Slogojuma ilgums katrā posmā – 3 stundas, atslodzes ilgums – 24 stundas.

Otrā gadījumā paraugs tika slogots šādi: 3 stundu laikā tas atrodas minimālās slodzes (12 MPa) iedarbībā, tad slodzi palielina līdz nākamam spriegumu līmenim, ko uztur atkal 3 stundas. Realizēti 5 slogojuma posmi: 12, 25, 50, 100 un 150 MPa. Zīmējumā 10. ir salīdzinātas šo eksperimentu 10 sekunžu izohronas ar „bāzes” pētījumu izohronām (Zīm.3.)

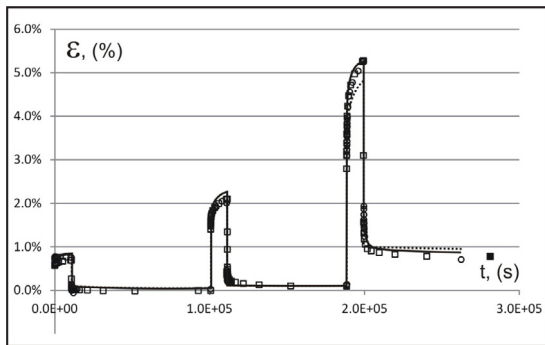


Zīm. 10. Uplex-S plēves izohronas vienkāršās stiepes, impulsa un pakāpienveida slogojumu gadījumos

Šo likņu raksturs ļauj secināt, ka tās apraksta līdzīgu procesus. Tādēļ var gaidīt, ka arī šļūdes deformācijas visos šajos gadījumos var aprakstīt ar vienādiem parametriem.

„Impulsa” slogojums

Formula (9) ir pielietojama kā monotonam, tā arī impulsu veida slogojumam.

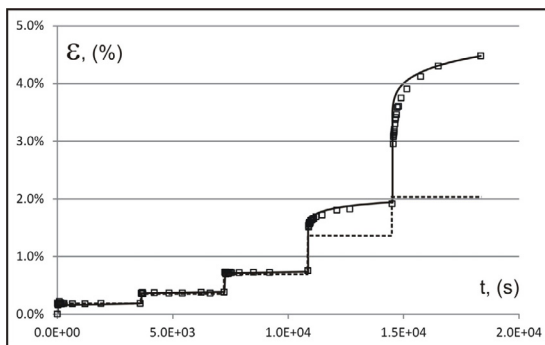


Zīm. 11. Upilex-S plēves deformācijas pie impulsa veida slogojuma. Tumšie un gaišie punkti – dažādu autoru rezultāti, nepārtrauktā līkne – aprēķins pēc formulas (9), svītru līnija – bez iepriekšējā slogojuma vēstures ievērošanas

Zīmējumā 11. ir attēloti eksperimentālie rezultāti un to aproksimācija. Ir izmantoti divu autoru eksperimentālie dati, iegūti dažādā laikā. Aproksimācijai tika izmantoti šļūdes parametru lielumi, noteikti „bāzes” eksperimentu aproksimācijas rezultātā (10) un (11). No zīmējuma var secināt, ka impulsa veida slogojuma gadījumā atslodzes periodi bija izvēlēti pietiekami lieli, lai viskoelastīgā komponente būtu kļuvusi neievērojami maza, un katrs no slogojuma etapiem var būt pietiekoši precīzi aprakstīti ar formulām (3)-(8), neievērojot materiāla iepriekšējo slogojumu vēsturi.

Pakāpienveida slodze

Zīm.12. ir attēlotas deformācijas, kas veidojas Upilex-S plēves paraugā pakāpienveida slogojuma iedarbībā. Datu aproksimācija ir veikta pēc formulām (9), izmantojot (10)-(11).



Zīm.12. Šļūdes deformāciju attīstība laikā Upilex-S plēves pakāpienveida slogojuma gaitā

Attēlotie dati apstiprina iepriekš noformulētus secinājumus, par piedāvātā modeļa pielietojamību nelineāri viskoelastīgās plēves Upilex-S deformēšanas aprakstam.

Modeļa izmantošana modificētajā aprēķinu metodikā

Modificētās metodikas apraksts

Praktiskajos gadījumos bieži vien trūkst eksperimentālo datu par neatgriezenisku deformāciju $\epsilon_{pl}(\sigma, t)$ atkarību no laika un pieliktā sprieguma. Šim gadījumam tiek piedāvāta zemāk izklāstītā aprēķinu metodika.

Analizējot Upilex-S plēves šļūdes eksperimentālus datus, tika konstatēts, ka pamatlikni var izveidot arī no pilnām tiešās šļūdes līknēm, pie tam viskoelastīgo un pilnās šļūdes likņu raksturs ir līdzīgs - bīdes faktori abām līknēm ir vienādi. Tādā gadījumā aprēķinu var vienkāršot.

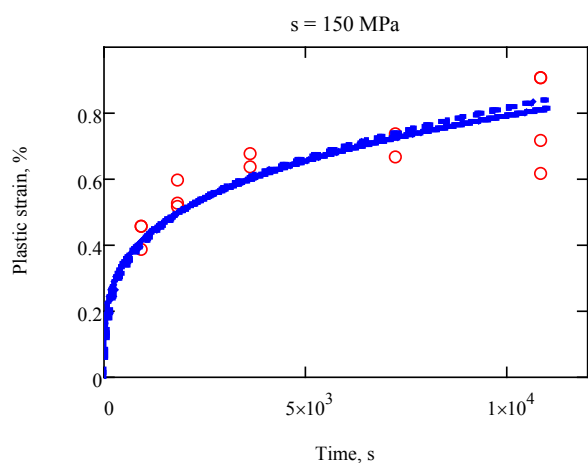
Tas ir realizējams sekojoši. Vispirms pamatlikne tiek izveidota no pilnās šļūdes eksperimentālām līknēm. Līdz ar to tiek noteikts relaksācijas laiku izmaiņas intervāls un aprēķināti bīdes faktori. Metodikas vienkāršošanai nepārtrauktās redukcijas funkcijas vietā šajos aprēķinos tiek izmantotas konkrētam slodzes līmenim atbilstošas bīdes faktoru vērtības. Tas ļauj izvairīties no redukcijas funkcijas aproksimācijas, kas savukārt samazina nezināmo parametru skaitu un palielina aprēķinu rezultātu precizitāti.

Izmantojot atgriezeniskās šļūdes aproksimējošo formulu (8) deformācijas amplitūdas (A_i formulās (5) un (8)) nosaka, minimizējot starpību starp atgriezeniskās šļūdes eksperimentālām un teorētiskām līknēm. Iegūtus parametru lielumus izmanto aprēķinā pēc formulas (5). Tādā veidā atrod viskoelastīgo deformācijas komponenti tiešās šļūdes laikā.

Formulas (6) vietā tiek izmantota sekojoša neatgriezenisko deformāciju aproksimācija:

$$\epsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} \sum_i^n \left[b_i \left(1 - \exp\left(\frac{-a_i(\sigma)t}{\tau_i} \right) \right) \right] \quad (12)$$

Nezināmie lielumi b_i tiek noteikti, minimizējot atšķirību starp eksperimentālām un teorētiskām tiešās šļūdes līknēm. Zīm. 13.demonstrē nebūtisku atšķirību aprēķinos pēc formulām (6) un (12).



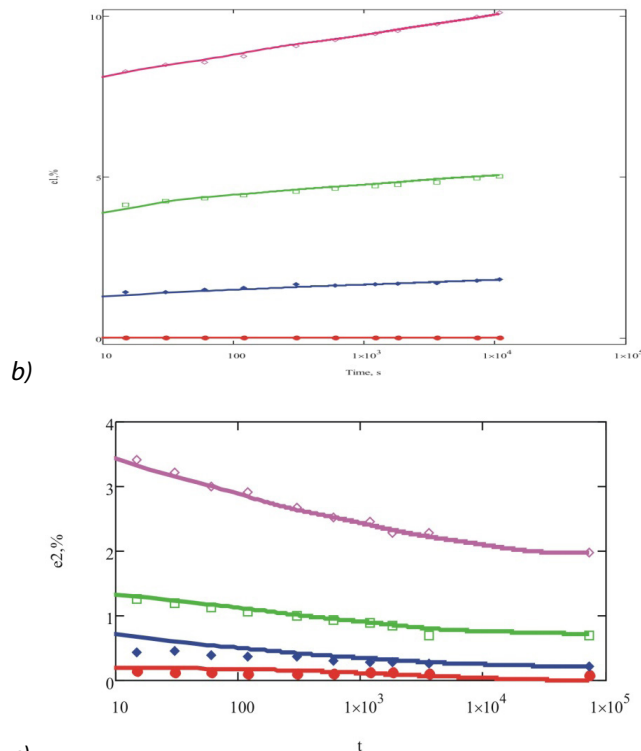
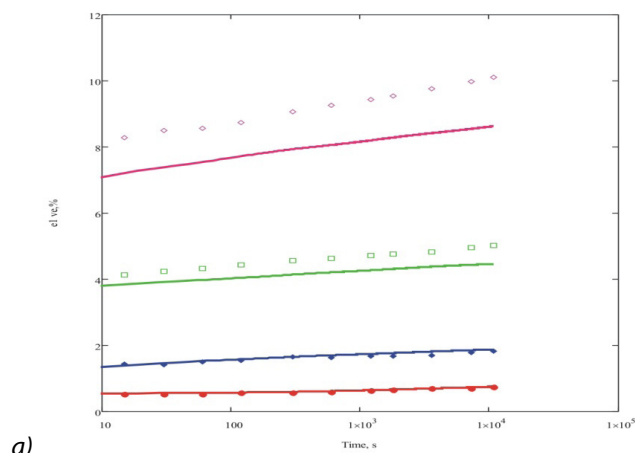
Zīm. 13. Neatgriezenisko deformāciju aproksimācija ar formulu (6) – nepārtrauktā linija un ar eksponenciālo rindu (12) – svītru linija

Metodika tika pārbaudīta uz 3.3. aprakstītiem („bāzes”) eksperimentiem. Iegūti Zīm.8. attēlotiem identiski rezultāti.

Modificētās metodikas pielietojšanas piemērs

Ar modificētās metodikas palīdzību tika aprakstīti Kapton plēves deformēšanās eksperimentālie rezultāti. Plēves īslaicīgās šļūdes eksperimenti tika veikti pēc 3. sadaļā aprakstītās metodikas. Iegūtas eksperimentālās tiešās un atgriezeniskās šļūdes līknes pie 4 slodzes līmeņiem: 20, 40, 80 un 120 MPa.

Kvazistatiskajos eksperimentos noteikts elastības moduļa lielums $E = 4400$ MPa, no šļūdes eksperimentiem – līnearitātes robeža $\sigma = 25$ MPa.



Zīm. 14. Kapton plēves šļūdes deformāciju aproksimācija ar modificētās metodikas palīdzību: a – viskoelastīgās deformācijas, b – pilnas tiešās šļūdes deformācijas, c – atgriezeniskās deformācijas

Kā redzams, izmantojot augstāk aprakstīto deformēšanas modeli un aprēķinu modificēto metodiku, izdodas pieņemt precīzi aprakstīt nelineāri viskoelastīgu polimēru materiālu deformēšanos šļūdē un izdalīt no kopējā deformētā stāvokļa viskoelastīgo komponenti.

Secinājumi

Izstrādāts ērti pielietojams aprēķinos nelineāri viskoelastīgā polimēru materiāla ar deformēšanas modelis šļūdes gadījumā. Modelis balstās uz pieņēmumiem, ka pilna deformācija ir savstarpēji neatkarīgu komponentu summa un neatgriezenisko deformāciju uzkrāšanās neiespaido viskoelastīgās deformēšanos raksturu, ka elastības modulis paliek nemainīgs visa šļūdes laikā un uz Bolcmaņa superpozīcijas principa. Aprēķiniem tiek izvēlēta metode, kas izriet no laika-spieguma analogijas. Modelis ļauj izdalīt no materiāla deformētā stāvokļa elastīgo, viskoelastīgo un neatgriezenisko komponentes. Novērtēta modeļa precizitāte un tā sakars ar pazīstamām nelineārās šļūdes teorijām un materiālu deformēšanas modeļiem.

Modeļa darbības un pielietojamības pārbaudei tika veikti eksperimentālie poliimīda plēvju pētījumi.

Kvazistatisko eksperimentu gaitā noteikts nosacīti momentāna elastības moduļa lielums un sloģojuma robežlielums, kuru sasniedzot, materiāls sabrūk.

Šļūdes eksperimentos noteikta materiāla nosacīta lineā-

ritātes robeža (slodzes lielums 75 MPa) un iegūtas materiāla ilglaicīgas šķūdes un atgriezeniskās šķūdes līknes.

Izstrādātas un realizētas MathCad vidē divas šķūdes parametru aprēķinu metodikas.

Modelis un aprēķinu metodikas tika pārbaudītas uz vairākiem materiāliem un pie dažādu veidu stiepes slogojumiem (impulsa veida un pakāpienu veida).

Aprēķinu rezultātu salīdzinājums ar eksperimentāliem datiem liecina par to, ka viskoelastīgi plastisko polimēru deformatīvo īpašību inženieru aprēķinos un prognozēšanā piedāvātais modelis ir pielietojams ar precizitāti, salīdzināmu ar eksperimentālo datu uzticamību.

Pēc darbu rezultātiem ir publicēts viens raksts:

Ю. О. Янсон, А. Н. Анискевич, Л. А. Паже, „Анализ обратимых и необратимых деформаций при ползучести нелинейно-вязкоупругого полимера”, *Механика композитных материалов*, Vol. 48, No. 2 – pp. 303-314, 2012.

J. Jansons, A. Aniskevich, and L. Pazhe, “Analysis of reversible and irreversible strains in the creep of a nonlinear viscoelastic polymer”, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 48, No. 2, pp. 209-216, 2012. <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s11029-012-9266-6>.

Literatūra

- Shapery R.A., “Nonlinear viscoelastic and viscoplastic constitutive equations based on thermodynamics,” *Mech. Time-Depend. Mater*, Vol. 1, pp. 209-40, 1997.
- W.N.Findley, J.S.Lai, K.Onaran, *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials.*: Dover Publications, 1976, 370 p.
- W.G.Knauss, I.J.Emri, “Nonlinear Viscoelasticity Based on Free Volume Consideration”, *Computers and Structures*, 13, p.123-128, 1981.
- E.Kontou, “Creep Analysis of Polymer Matrix Composite Using Viscoplastic Models”, *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*, Rui Miranda Guedes, Woodhead Publishing, 2011., pp.273-301.
- Hal F. Brinson and L.Catherine Brinson, *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity.*: Springer, 2008.
- А.К.Малмейстер, В.П.Тамуж, and Г.А.Тетерс, *Сопротивление полимерных и композитных материалов*. Рига: Зинатне, 1980.
- Ю. С. Уржумцев and Р. Д. Максимов, *Прогностика деформативности полимерных материалов*. Рига: Зинатне, 1975.
- И.И.Бугаков, *Ползучесть полимерных материалов*. Москва: Наука, 1973.
- Э.З.Плуме, Ю.О.Янсонс, Р.Д.Максимов, «Сравнительное исследование механических свойств термореактивного полимера при растяжении и сжатии.» *Механика композитных материалов*, Vol. 41, no. 5, pp. 633-650, 2005.
- R.A.Shapery, “On the Characterization of Nonlinear Viscoelastic Materials,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 9, no. 4, pp. 295-310, July 1969.
- M.Levesque, K.Derrien, D.Baptiste, M.D.Gilchrist, “On the Development and Parameter Identification of Shapery-Type Constitutive Theories”, *Mech.Time-Depend. Mater*, 12, 2008, p.p.95-127.
- H.Leaderman, *Elastic and Creep Properties of Filamentous Materials and Other High Polymers*, The Textile Foundation, 1943.
- M.Megnis and J.Varna, “Nonlinear Viscoelastic, Viscoplastic Characterization of Unidirectional GF/EP Composite,” *Mechanics of Time-Dependent Materials*, no. 7, pp. 269-290, 2003.
- M.Megnis and J.Varna, “Micromechanics based modeling of nonlinear viscoplastic response of unidirectional composite,” *Composites Science and Technology*, no. 63, pp. 19-31, 2003.
- А. Н. Анискевич and З. В. Калнрозе, «Методика измерения двухосных деформаций при растяжении тонких пленок,» *Материалы, технологии, инструменты*, Vol. 13, pp. 105-110, 2008.

III. Pildīta elastomēra viskoelastiskas deformācijas prognozēšanas modelis

Ievads

Pildītie elastomēri tiek plaši izmantoti tehnikā, pateicoties tām īpašībām, proti, lielām atgriezeniskām deformācijām, nesaspiežamībai, ka arī nelineārām sprieguma-deformācijas sakarībām. Nepildīto elastomēru [1-4], kā arī ar sīkākām kvēpu, kvarca u.c. daļiņām pildīto elastomēru [5-7] eksperimentālie pētījumi pierāda to deformatīvo īpašību atkarību no laika, kas izpaužas kā šļūde un atgriezeniskā šļūde [1, 2], sprieguma relaksācija [3-6], deformācijas diagrammas atkarība no ātruma un histerēzes cilpas pie cikliskās slodzes [3, 4, 6-7]. Pie pildītā elastomēra cikliskās slodzes, histerēzes cilpas laukums ir atkarīgs no pieliktās slodzes maksimālās vērtības. Pie pastāvīgas maksimālās slodzes, histerēzes cilpa ar katru nākamo ciklu samazinās, tomēr nepazūd pilnīgi, proti, neveido vienotu līniju. Ir pieņemts uzskatīt, ka pirmajā ciklā histerēzes cilpa ir atkarīga galvenokārt no materiāla mikstināšanas jeb Mullinsa efekta [8]. Līdz ar to, novērtējot materiāla viskoelastīgas īpašības, histerēzes cilpa pirmajā ciklā bieži netiek ņemta vērā. Viskoelastības efekts tiešajā veidā ir novērojams pēc 1-2 iepriekšējiem slodzes cikliem līdz uzdotajam deformācijas līmenim.

Polimēru materiāla viskoelastīgās īpašības parasti tiek noteiktas ar šļūdes eksperimentiem. Tomēr, elastomēriem tāds pētījuma veids praktiski nav izmantojams tāpēc, ka vienasīgas stiepes vai spiedes gadījumā ir grūti uzturēt pastāvīgu spriegumu. Lielā gareniskā deformācija noved pie nozīmīga parauga šķēsgriezuma laukuma samazinājuma, kas savukārt izraisa īstā sprieguma nepārtrauktu pieaugumu. Tomēr materiāls ekspluatācijas laikā ir bieži pakļauts pastāvīgai stiepes vai spiedes slodzei, pie kuras īstais spriegums var manāmi mainīties. Līdz ar to slodzes un deformācijas savstarpējās sakarības noteikšanai, proti, deformēšanas modeļa izveidei tiek izmantotas īstā sprieguma (Koši sprieguma) un logaritmiskās deformācijas (Henkī deformācija) vērtības.

Kā pētāmais materiāls tika izvēlēts stirola-butadiēna elastomērs ar dažādiem silīcija dioksīda daļiņu tilpuma pildījuma koeficientiem $c = 0; 0,09; 0,14; 0,21$.

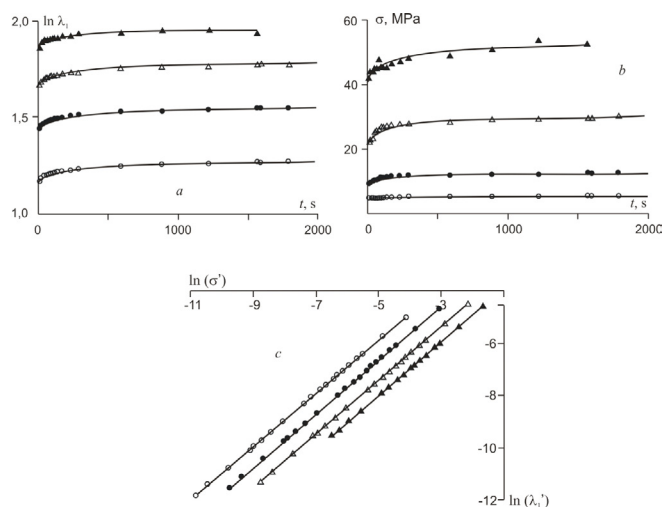
Modeļa izveide

Šļūde

Šļūdes pārbaude bija veikta uz plakaniem materiāla paraugiem pie četriem slodzes P līmeņiem (līdz 0,5 no stiprības), t.i. nomināliem spriegumiem $\sigma_{nom} = \frac{P}{l_{02}l_{03}}$ (1. tab.),

kur l_{02} un l_{03} ir parauga platums un biezums nedeformētā

stāvoklī. Gareniskais pagarinājums $\lambda_1 = \frac{l_1}{l_{01}}$, kur l_{01} ir parauga garums nedeformētā stāvoklī un šķēsgriezuma sašaurinājums parauga plaknē $\lambda_2 = \frac{l_2}{l_{02}}$, tika mērīti pielietojot fotometodi [9]. Īstais spriegums $\sigma = \frac{\sigma_{nom}}{\lambda_2\lambda_3}$ tika aprēķināts ar pieņēmumu $\lambda_2 = \lambda_3$, kur λ_3 ir šķēsgriezuma sašaurinājums parauga biezumā.



1. attēls. Elastomēra ar pildījuma koeficientu $c = 0,14$ a) deformācijas un b) sprieguma atkarības no laika, pie pastāvīga nomināla sprieguma $\sigma_{nom} = 1,92$ (o), $3,34$ (●), $5,24$ (Δ) un $7,81$ (▲) MPa; c) tie paši dati logaritmiskajās koordinātēs

Šļūdes rezultātu analīze parādīja, ka deformācija, arī spriegums, palielinās laikā (1.a, b att.). Sakarību analītiskajam aprakstam var būt izmantotas elementārās funkcijas – logaritmiskā un pakāpes. Aproximāciju salīdzinājums parādīja, ka abas funkcijas ir lietojamas. Tika izmantota pakāpes funkcija:

$$\sigma = a_{\sigma} t^{b_{\sigma}} \tag{1}$$

un

$$\lambda_1 = a_{\lambda} t^{b_{\lambda}} \tag{2}$$

Līdz ar to no laika atkarīgās sprieguma un relatīvā pagarinājuma sakarības ir izteiktas vienā veidā. Parametri a_{σ}, b_{σ} un a_{λ}, b_{λ} elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem pie dažādiem nomināla sprieguma līmeņiem ir parādīti 1. tabulā.

1. tabula. Vērtības σ_{nom} un parametri a_σ , b_σ un a_λ , b_λ no sakarībām (1), (2), kas apraksta sprieguma un relatīvo pagarinājumu izmaiņas laikā šļūdes izpētnes elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem c

c	σ_{nom} , MPa	Sprieguma aprakstam (1)		Rel. pagarinājuma aprakstam (2)	
		a_σ	$b_\sigma \cdot 10^2$	a_λ	$b_\lambda \cdot 10^2$
0	0,23	0,298	0,73	1,274	0,247
	0,31	0,403	1,30	1,415	0,375
	0,40	0,605	0,93	1,632	0,445
	0,47	0,786	2,08	1,882	0,479
0,09	0,65	1,070	2,02	1,832	1,28
	1,31	3,621	1,90	2,939	1,87
	1,34	3,154	2,58	2,765	1,92
	1,60	4,404	2,46	3,056	1,92
0,14	1,92	4,150	3,65	3,038	2,09
	3,34	8,674	4,75	3,997	2,19
	5,24	20,718	5,01	5,046	2,16
	7,81	37,638	4,47	6,285	1,59
0,21	2,31	5,444	4,17	2,820	2,26
	4,71	15,260	3,11	3,830	2,58
	7,44	31,619	4,20	5,066	2,41
	10,19	35,328	14,4	5,755	2,67

Izmantojot laika pakāpes funkciju, bija iespējams aprakstīt spriegumu un relatīvo pagarinājumu. Dotais apraksts jāva analītiski aprēķināt to atvasinājumus un salīdzināt vērtības katrā laikā momentā. Katra eksperimenta relatīvā pagarinājuma atvasinājums atkarībā no īsta sprieguma logaritmiskās koordinātēs veido taisno līniju (1.c att.), proti,

$$\ln \lambda_1' = d \ln \sigma' + \ln F,$$

vai

$\lambda_1' = F \sigma'^d$	(3)
----------------------------	-----

kur F un d ir parametri.

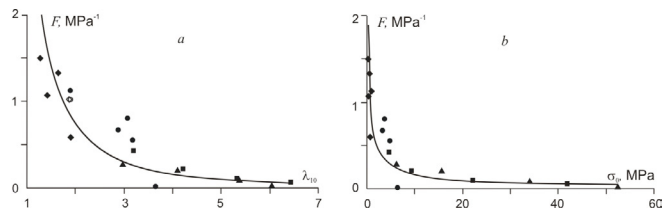
Kā ir redzams attēlā, līnijas, kas atbilst dažādiem slodzes vai nomināla sprieguma līmeņiem, ir paralēlas un to slīpums ir vienāds 1, līdz ar ko $d = 1$. Raksturs ir vienāds elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem c . F parametrs raksturo materiāla padevīgumu un to vērtību daudzums elastomēram ar dažādiem c veido kopīgas atkarības no momentāna relatīva pagarinājuma λ_{10} vai momentāna sprieguma σ_0 (2.a, b att.). Atkarības $F(\sigma_0)$ un $F(\lambda_{10})$ var būt aprakstītas, izmantojot sekojošas funkcijas:

$F = F_\sigma \sigma_0^{-f_\sigma}$	(4)
-------------------------------------	-----

$F = F_\lambda \exp^{-f_\lambda \lambda_{10}}$	(5)
--	-----

Aproksimācijas parametriem ir sekojošas vērtības:

$$F_\sigma = 0,807; f_\sigma = 0,7; F_\lambda = 3,23; f_\lambda = 0,712.$$



2. attēls. Vienādojuma (3) parametra F atkarības no momentāna a) relatīva pagarinājuma, b) sprieguma elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem: $c = 0,09$ (●); $0,14$ (■); $0,21$ (▲) un to apraksts, izmantojot vienādojumus (4) un (5) (līnijas)

1. secinājums. Funkcijas $F(\sigma_0)$ un $F(\lambda_{10})$ ir kopīgas elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem, pie tam argumentu λ_{10} un σ_0 izmaiņas apgabali ir atšķirīgi.

Diferenciālvienādojums (3) ar parametru $F(\sigma_0)$ (4) vai $F(\lambda_{10})$ (5) raksturo šļūdes procesu elastomēram ar patvaļīgo pildījuma koeficientu pie pastāvīgas slodzes. Tipiskas sprieguma-deformācijas liknes, kas atbilst dažādiem slodzes līmeņiem pie $c = 0,21$, minētajam šļūdes režīmam ir parādītas 3. attēlā. Katra likne veido nelielu atkāpi no īstā sprieguma – logaritmiskā deformācija liknes, kas tika iegūta pie materiāla kvazistatiskās slodzes pie deformācijas ātruma $3,33 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ [9]. Apkāpums pieaug pie šļūdes laika palielinājuma un samazinās līdz ar pieliktās slodzes pieaugumu.

Šļūdes liknes kopa dažādiem sākuma punktiem σ_0 , λ_{10} var tikt iegūta, risinot vienādojumu (3) ar parametru $F(\sigma_0)$ (4) vai $F(\lambda_{10})$ (5). Atbilstošais vienādojums var tikt iegūts divos veidos:

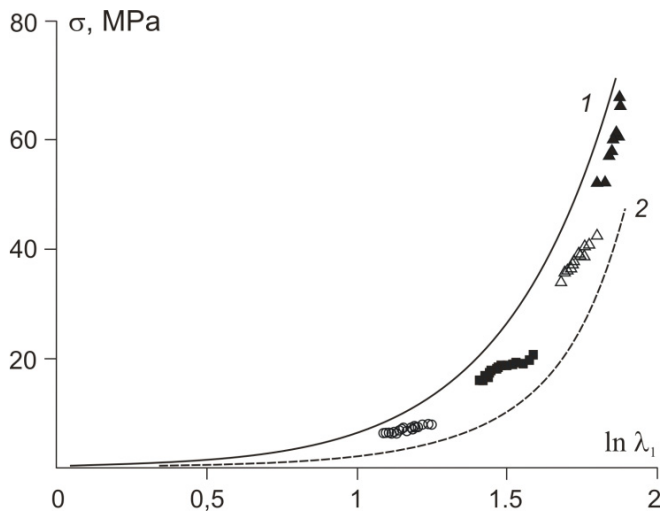
$\sigma = \left[\frac{1 - f_\sigma}{F_\sigma} (\lambda_1 - 1) + \sigma_0^{1 - f_\sigma} \right]^{\frac{1}{f_\sigma}}$	(6)
--	-----

vai

$\sigma = \sigma_0 + F_\lambda f_\lambda \left(e^{f_\lambda \lambda_1} - e^{f_\lambda \lambda_{10}} \right)$	(7)
---	-----

2. secinājums. Vienādojumi (6) un (7) nesatur laiku. Tās ir nelineāras attiecības starp relatīvu pagarinājumu un īsto spriegumu, kas ir atkarīgas no σ_0 un λ_{10} sākuma vērtībām. Gadījumā, kad $\sigma_0 = 0$, $\lambda_{10} = 1$, iegūstam līdzsvarotās deformēšanas likni; tā ir kopīga elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem.

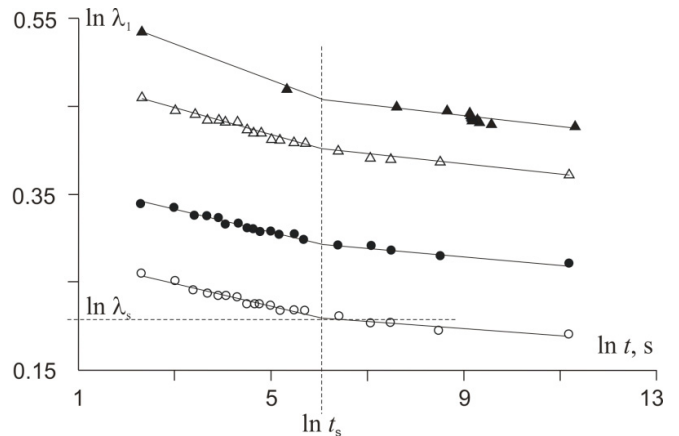
Līdzsvarotās deformēšanas likne ir parādīta 3. attēlā (2. līnija) salīdzināšanai ar dažādām šļūdes liknēm, kas atbilst dažādiem slodzes līmeņiem, kā arī salīdzināšanai ar deformēšanas likni, kas iegūta ar pastāvīgo deformēšanas ātrumu [9]. Līdzsvarotās deformēšanas liknes eksistence, kas tika iegūta šļūdes rezultātu analīzes gaitā (pastāvīgas slodzes darbības režīmā), ir jāpārbauda, izmantojot eksperimenta rezultātus citā režīmā. Eksperimentālie rezultāti, kas iegūti cikliskās slodzes režīmā, tiks apskatīti 3. nodaļā.



3. attēls. Elastomēra ar pildījuma koeficientu $c = 0,21$ sprieguma atkarība no deformācijas pie kvazistatiskās složošanas ar deformācijas ātrumu $0,00333 \text{ s}^{-1}$ [9] (līnija 1), šļūdes pie dažādiem σ_{nom} (sk. 1. tab.), un līdzsvarotās deformēšanas līkne (2. līnija), kas ir aprēķināta izmantojot vienādojumu (7)

Atgriezeniskā šļūde

Pēc materiāla šļūdes eksperimenta, noņemot slodzi, tiek iegūta paliekoša deformācija, kas samazinās laikā (4. att.). Atgriezeniskā šļūde ir divu stadiju process: ātrs sākuma posmā, kas mainās uz lēnāku pie liela novērošanas laika. Pāreja no vienas stadijas uz otru ir raksturojama ar laiku t_s un deformāciju $\ln \lambda_s$.



4. attēls. Atgriezeniskās šļūdes eksperimentu rezultāti elastomēram ar pildījuma koeficientu

$c = 0,14$. Tie paši apzīmējumi, kā 1. attēlā.

Deformācijas atkarības no laika aprakstam pie atgriezeniskās šļūdes, tiek izmantotas sekojošas sakarības:

$$\text{gadījumā } t \leq t_s, \ln \lambda_1 = \ln \lambda_{10}^{\text{unload}} - k_1 \ln t,$$

$t > t_s, \ln \lambda_1 = \ln \lambda_s - k_2 (\ln t - \ln t_s),$	(8)
---	-----

kur $\ln \lambda_{10}^{\text{unload}}$ ir atgriezeniskās šļūdes deformācijas sākuma vērtība, k_1 un k_2 ir procesa ātruma vērtības pirmajā un otrajā stadijās. Parametri $\ln \lambda_{10}^{\text{unload}}, k_1$ un k_2 , kā arī t_s un $\ln \lambda_s$ ir atkarīgi no slodzes līmeņa pie šļūdes, kas savukārt nosaka maksimālās sprieguma σ_{max} un deformācijas $\ln \lambda_{1\text{max}}$ vērtības kuras ir iegūtas šļūdes procesā līdz atslogošanas momentam. Parametru vērtības elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem ir parādītas 2. tabulā.

2. tabula. Vienādojuma (9) parametri, kas tika iegūti no atgriezeniskās šļūdes eksperimenta elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem c

c	$\sigma_{\text{nom}}, \text{MPa}$	$\sigma_{\text{max}}, \text{MPa}$	$\ln \lambda_{1\text{max}}$	$\ln \lambda_{10}^{\text{unload}}$	$k_1 * 10^3$	$k_2 * 10^3$	t_s, s	$\ln \lambda_s$
0	0,31	0,46	0,379	0,260	1,5	0,2	745	-0,250
	0,40	0,66	0,531	0,276	2,7	0,4	262	-0,260
	0,47	0,94	0,676	0,260	3,0	0,5	270	-0,243
0,09	0,65	1,27	0,726	0,082	5,7	1,0	488	-0,047
	1,31	4,29	0,726	0,222	8,0	4,1	424	-0,174
0,14	1,92	6,13	1,311	0,287	13	4,0	376	-0,210
	3,34	12,84	1,597	0,370	13	5,0	380	-0,295
	5,24	32,26	1,827	0,494	15	5,3	508	-0,400
	7,81	52,80	1,939	0,585	22	7,5	226	-0,469
	2,31	7,88	1,251	0,392	16	7,3	407	-0,293
0,21	4,71	20,52	1,595	0,535	20	9,3	330	-0,419
	7,44	42,70	1,799	0,586	11			
	10,19	91,85	1,871	0,558	3,4			

Sakarībām (8) var būt arī cita forma:

Priekš $t \leq t_s$, $\lambda_1(t) = \lambda_{10}^{unload} t^{-k_1}$,

Priekš $t > t_s$, $\lambda_1(t) = \lambda_s \left(\frac{t}{t_s} \right)^{-k_2}$	(9)
---	-----

Pāreja no pirmās (ātrās) atgriezeniskās šļūdes stadijas uz otru (lēno) stadiju ir raksturojama ar laiku t_s un deformāciju $\ln \lambda_s$, kuras lielums ir atkarīgs no sākuma deformācijas, jo laika momenta $t = t_s$

$$\ln \lambda_s = \ln \lambda_{10}^{unload} - k_1 \ln t_s$$

vai

$\lambda_s = \lambda_{10}^{unload} t_s^{-k_1}$	(10)
--	------

Atbilstoši, atgriezeniskās šļūdes otrās stadijas relatīvā pagarinājuma - laika sakarības ir parādītas sekojošā veidā:

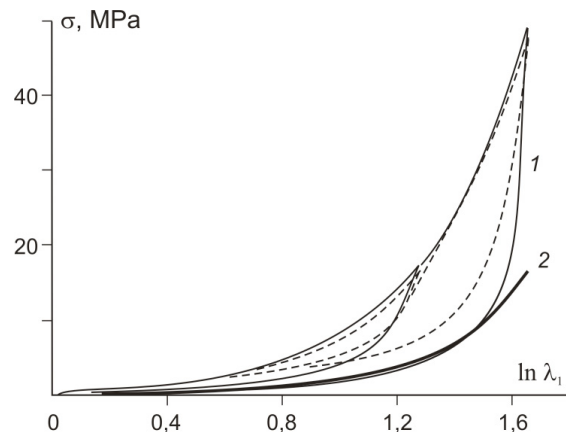
$\lambda_1(t) = \lambda_{10}^{unload} t_s^{k_2 - k_1} t^{-k_2}$	(11)
---	------

Modeļa pārbaude: cikliskās slogošanas pie pastāvīga deformēšanas ātruma $\dot{\epsilon} = 3,33 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Ar augošo deformāciju ciklā

Ir zināms [10], ka aprakstot deformācijas likni pie atslogošanas, izmantojot Kluppela-Šramma modeli [11] ar parametriem, kas tika iegūti deformācijas liknes pie slodzes aproksimācijas veidā, var iegūt precīzu aprakstu atslogošanas procesa sākuma stadijai. Bet samazinoties deformācijai pie atslodzes, sistemātiskā kļūda palielinās (5. attēls). Sprieguma aprēķinātās vērtības ir lielākas nekā eksperimentālās.

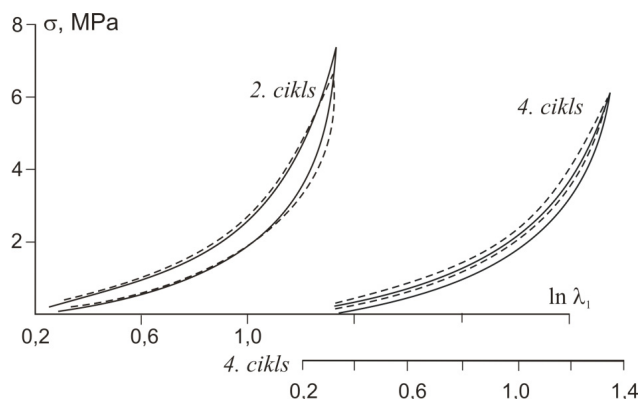
Uzkonstruētā 2.1. punktā līdzsvarotās deformēšanas likne praktiski sakrīt ar eksperimentāli iegūto deformācijas likni pie atslogošanas (5. attēls). Deformācijas liknes pie atslogošanas elastomēram ar dažādiem pildījuma koeficientiem veido kopīgu līniju. Palielinoties pildījuma daudzumam, līdzsvarotās deformēšanas likne izplešas lielās deformācijas vērtības apgabalā.



5. attēls. Cikliskās slogošanas eksperimentālie rezultāti elastomēram ar pildījuma koeficientu $c = 0,21$ (nepārtrauktās līnijas) un to apraksts, izmantojot Kluppela-Šramma modeli [11] (punktveida līnijas) ar parametriem, kas tika iegūtas no deformācijas liknes pie slodzes [10], un līdzsvarotās deformēšanas likne (trekna līnija), kas ir iegūta izmantojot izstrādāto modeli

Ar pastāvīgu maksimālu deformāciju ciklā

Ņemot vērā pirmo ciklu ar lielu histerēzes cilpu, kuras raksturs ir atkarīgs gan no viskoelastīgas deformācijas, gan no materiāla mīkstināšanās, kas ir aprakstams ar Kluppela-Šramma modeli [10], ir redzams, ka parējās histerēzes cilpas visos ciklos praktiski sakrīt. Atslogošanas likne, kas ir kopīga visiem cikliem, sakrīt ar līdzsvarotās deformēšanas likni, kura ir aprakstāma ar (7) sakarību, t.i. izstrādāto modeli. Tādā veidā sakarība (7) ir bāzes sakarība slodzes-atslodzes ciklu aprakstam, sākot ar otru ciklu. Kā ir redzams pēc eksperimenta, pēc pirmā cikla paliekošā deformācija nav vienāda ar nulli. Tā vērtība var samazināties laikā relaksācijas procesu dēļ. Balstoties uz atgriezeniskās šļūdes eksperimentu rezultātu analīzi, sakarību (9) un parametriem λ_{10}^{unload} , k_1 un k_2 , kā arī λ_s , (2. tab.), paliekošā deformācija λ_{10} ir atkārtīga no laika un maksimālas deformācijas ciklā. Viskoelastīgās deformācijas virziens vienmēr ir pretējs pieliktas slodzes darbībai: tā ir negatīva pie slodzes un pozitīva pie atslodzes. Kā piemērs, 6. attēlā ir parādīts histerēzes cilpas aprēķina rezultāts otrajā un ceturtajā ciklā pildītajam elastomēram ar pildījuma koeficientu $c = 0,14$. Salīdzinot ar eksperimentāliem datiem, ir iegūts pietiekami apmierinošs rezultāts.



6. attēls. Histerēzes cilpas otrajam un ceturtajam slodzes ciklam ar pastāvīgo maksimālo pagarinājumu elastomēram ar pildījuma koeficientu $c = 0,14$

3. Secinājums. Darbā izstrādātais modelis, t.i., fenomenoloģiskās sakarības, kas tika iegūtas atgriezeniskās šļūdes eksperimentu rezultātu analīzes gaitā, var būt veiksmīgi izmantotas histerēzes cilpas aprakstam cikliskajos izmēģinājumos ar pastāvīgu maksimālu relatīvu pagarinājumu, sākot ar otro ciklu.

Izmantotā literatūra

- Osanaiye G. J., Adewale K. P. Creep and creep recovery of EPDM elastomer using a modified sandwich rheometer // *Polymer Testing*. – 2001. – Vol. 20. – P. 363-370.
- Martin G., Barres C., Cassagnau P., Sonntag P., Garois N. Viscoelasticity of randomly crosslinked EPDM networks // *Polymer*. – 2008. – Vol. 49. – P. 1892-1901.
- Amin A.F.M.S., Alam M.S., Okui Y. An improved hyperelasticity relation in modeling viscoelasticity response of natural and high damping rubbers in compression: experiments, parameter identification and numerical verification // *Mechanics of Materials*. – 2002. – Vol. 34. – P. 75-95.
- Castagnet S. High-temperature mechanical behaviour of semi-crystalline polymers and relationship to a rubber-like “relaxed” state // *Mechanics of Materials*. – 2009. – Vol. 41. – P. 75-86.
- Le H.H., Ilisch S., Radusch H.-J. Characterization of the filler dispersion on the stress relaxation behaviour of carbon black filler rubber composites // *Polymer*. – 2009. – Vol. 50. – P. 2294-2303.
- Bergstrom J.S., Boyce M.C. Constitutive modeling of the large strain time-dependent behaviour of elastomers // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1998. – No 5. – P. 931-954.
- Bergstrom J.S., Boyce M.C. Large strain time-dependent behaviour of filled elastomers // *Mechanics of Materials*. – 2000. – Vol. 32. – P. 627-644.
- Mullins L., Tobin N. Theoretical model for the elastic behaviour of filler reinforced vulcanized rubbers // *Rubber Chem Tech.* – 1953. – Vol. 30. – P. 551-571.
- Анискевич А., Калнрозе З. Методика измерения двухосных деформаций при растяжении тонких пленок // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2008. – Т. 13. – С. 105-110.
- Aniskevich K., Starkova O., Aniskevich A. Deformational properties of filled rubber under quasistatic loading // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2012. – Vol. 123, Iss 3. – P. 1621-.
- Klueppel M., Schramm J. A generalized tube model of rubber elasticity and stress softening of filler reinforced elastomer systems // *Macromol. Theory Simul.* – 2000. – Vol. 9. – P. 742-754.

Kontakinformācija:

Latvijas Universitātes aģentūra „Latvijas Universitātes
Polimēru mehānikas institūts”

Aizkraukles iela 23, Rīga, LV – 1006

Tālrunis +371 67551145

Fakss +371 67820467

www.pmi.lv