

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Mehānikas institūts

Artūrs Mačanovskis

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve (virziens - Lietišķā mehānika)”
doktorants

**ĪSO ŠĶIEDRU KOMPOZĪTU IEKŠĒJĀS ĢEOMETRIJAS
IETEKME UZ MATERIĀLA NESTSPĒJU UN SABRUKŠANU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing. profesors
Andrejs KRASŅIKOVŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2014

UDK 691.328:620.17(043.2)

Ma 160 ī

Mačanovskis A. Īso ŗķiedru kompozītu iekŗējās ģeometrijas ietekme uz materiāla nestspēju un sabrukŗanu. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU Izdevniecība, 2014. – 29 lpp.



ŗis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenoŗanai».

ISBN 978-9934-10-549-4

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGUŠANAI RĪGAS
TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014.g. 30. maijā 14⁰⁰ Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, 302 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors Dr.sc.ing., Igors Tipāns
Ārzemju studiju departamenta vadītājs
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. sc. ing. Aleksandrs Korjakins
Būvmateriālu un būvizstrādājumu katedras vadītājs
Rīgas Tehniskā universitāte, Materiālu un Konstruksiju Institūts

Vadošais pētnieks PhD. Heiko Herrmann
Nelineāro studiju centrs, Mehānikas departaments un lietišķās matemātika
Kibernētikas institūts Tallinas Tehnoloģiju universitātē

APSTIPRINĀJUMS

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

Artūrs Mačanovskis(Paraksts)

Datums: 21.04.2014.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 165 attēlus un 7 tabulas, kopā 164 lappuse. Literatūras sarakstā ir 85 nosaukumi.

Satura rādītājs

DARBA VISPĀREJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķis.....	5
Pētījuma uzdevumi.....	5
Darba zinātniskā novitāte.....	6
Darba praktiskā vērtība.....	6
Aizstāvēšanai tiek izvirzīts.....	6
Darba aprobācija un publikācijas.....	7
Publikāciju saraksts.....	8
DARBA SATURS.....	9
Pirmā nodaļa.....	9
Otrā nodaļa.....	9
Trešā nodaļa.....	15
Ceturtnā nodaļa.....	21
Piektā nodaļa.....	23
SECINĀJUMI.....	28
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	28

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte:

Jaunu izturīgu un drošu konstrukciju izveidošana būvniecībā (debesskrāpji, tilti, tuneļi utt.) nav iespējama bez būvmateriāliem ar izcilām un pārākām īpašībām.

Pēdējos 20 gados būvindustrijā ir tapuši jauni materiāli, kam piemīt vēl nebijušas jaunas īpašības. Tie ir pašblīvējošie, augstās stiprības un augstās veiktspējas betoni. Materiāliem, kam piemīt augsta un ultra augsta spiedes stiprība, vienlaicīgi ir arī virkne trūkumu. No tiem vissvarīgākais ir trausluma palielināšanās, kā arī specifiska, eksplodējoša uzvedība augstu temperatūru un uguns ietekmē. Svarīgākā minēto problēmu pārvarēšanas metode un veids ir īsu disperso šķiedru pielietošana, aizstājot betona masu ar fibrobetonu.

Īsas tērauda (polimēra, nemetāla, sintētiskās utt.) fibras (īsu šķiedru) ievadīšana materiāla apjomā noved pie jaunu mehānisko īpašību rašanās. Palielinās triecienizturība, nodilumizturība, stiepes stiprība, kā arī ugunsizturība. Īsu šķiedru izmantošana betonā vidējās un augstās koncentrācijas var novest pie pilnīgas atteikšanās no tradicionālā stiegrojuma pielietošanas. Tādējādi tādu materiālu mikromehānikas, nanomehānikas un makromehānikas izpēte ir svarīga, nepieciešama un aktuāla.

Darba mērķis:

Izpētot īso šķiedru kompozīta (mūsu gadījumā fibrobetona ar tērauda vai polimēru šķiedrām) sabrukšanas mikromehāniku, izstrādāt rekomendācijas fibrobetona izgatavošanas tehnoloģiju uzlabošanai, iegūstot materiālus ar augstāku nestspēju un mehānisko īpašību prognozējamību plaisāšanas stadijā.

Pētījuma uzdevumi:

1. Izpētīt fibrobetona konstrukciju sabrukšanas mehāniku un mikromehāniku slogošanas procesā no plaisu veidošanās sākumā līdz konstrukcijas pilnīgai nestspējas zaudēšanai.
 - 1.1. Eksperimentāli izpētīt šķiedras izraušanas mikromehāniku:
 - 1.1.1. Tērauda šķiedras izraušanu no betona;
 - 1.1.2. Polimēra makro šķiedras izraušanu no betona;
 - 1.1.3. Polimēra mikro šķiedru izraušanu no betona.
2. Eksperimentāli izpētīt šķiedru sadalījumu (atbilstoši tilpumam un orientācijai) makroplaisas veidošanās vietā.
 - 2.1. Vizuāli noteikt izrauto šķiedru galu atrašanās vietas, izrautā gala garumu un orientāciju pret plaisas plakni.
 - 2.2. Veikt paraugu rentgenogrāfisko analīzi.
3. Teorētiski izpētīt šķiedru sadalījumu (atbilstoši tilpumam un orientācijai) makroplaisas veidošanās vietā.
 - 3.1. Izmantojot statistisko Monte-Karlo metodi, modelēt šķiedru izvietojumu un orientāciju fibrobetona paraugā.

4. Izstrādāt un izpētīt nehomogēna (slāņaina) fibrokompozīta (fibrobetona) izgatavošanas tehnoloģijas.
5. Izpētīt vienas makroplaisas attīstības procesu nehomogēna fibrobetona prizmā. Aplūkojot slāņaino fibrobetonu ar dažādu šķiedru koncentrācijas slāņos.
 - 5.1. Izgatavot un eksperimentāli izpētīt plaisas attīstību slāņainajos fibrobetonos (ar diviem un trijiem slāņiem) ar tērauda fibrām.
 - 5.2. Salīdzināt homogēnu un nehomogēnu prizmu nestspēju lieces gadījumā.

Darba zinātniskā novitāte:

Darbā tika veikta tērauda un polimēra šķiedru izraušanas no betona matricēs mikromehānikas izpēte. Eksperimentālā ceļā tika pētīts šķiedru sadalījums uz plaisas, kā arī to telpiskā orientācija mainīgo fibrobetona konstrukciju (siju) lieces gadījumā. Izmantojot rentgenogrāfijas analīzi tika iegūts apstiprinājums „vājo” zonu, proti, zonu ar samazinātu šķiedru saturu un to nevēlamu orientāciju pastāvēšanai. Tika veikta kanāla, kuru izveidoja no betona matricēs izrautā tērauda šķiedra, detalizēta makroskopiskā izpēte. Parādīta matricēs virsmas erozijas esamība izrautās šķiedras kanālā, kas noved pie smilts „korķu” veidošanās izraušanas procesā. Tika veikta skaitliskā modelēšana iepildot veidnē fibrobetona javu sijas liešanas gadījumā. Tika noteiktas vertikālā ātruma augsto gradientu zonas. Tika izveidotas sijas, kas sastāv no fibrobetonu slāņiem ar dažādu šķiedru koncentrāciju tajos. Tika parādīta iespēja palielināt nestspēju attiecībā uz izlieci gadījumā, kad šķiedras koncentrētas slāņos (nehomogēnie fibrobetoni) salīdzinājumā ar fibrobetona sijām, kas satur apjomā haotiski izvietotās šķiedras.

Darba praktiskā vērtība:

Darba rezultātiem ir praktiskā nozīme veidojot augsti izturīgas fibrobetona un dzelzsbetona konstrukcijas. Pamatojoties uz veikto modelēšanu, ir viegli prognozēt nepieciešamās šķiedru koncentrācijas konstrukciju atšķirīgas noslogošanas gadījumā. Tiek piedāvāts izmantot slāņainas fibrobetona konstrukcijas. Tika noteikti fibrobetonu ar dažādām šķiedru koncentrācijām nestspējas mehānismi.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts:

- A) Šķiedru izvietojuma (pēc vietas un orientācijas izliekamās sijas vātajā griezumā) šķērsgriezumā, kas pārgriež maģistrālo plaisu, eksperimentālās izpētes rezultāti.
- B) Skaitliskās modelēšanas („vājo” griezumu prognozēšana fibrobetona liešanas procesā, kurā pastāv vietas ar augstiem plūsmas ātruma gradientiem).
- C) Noslogoto fibrobetona siju uzvedības skaitliskās modelēšanas (nestspējas modelēšanas) rezultāti.
- D) Slāņaino fibrobetona siju nestspējas eksperimentālās izpētes rezultāti.

Darba aprobācija un publikācijas:

Par promocijas darba galvenajiem atzinumiem un rezultātiem sniegti ziņojumi sekojošās konferencēs:

- RTU 50. Studentu zinātniskās un tehniskās konferences (Rīga, Latvija, 2009)
- RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference: „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” „**Šķiedru sadalījums pa apjomu īso šķiedru kompozītos**” (Rīga, Latvija, 2010)
- RTU 51. Studentu zinātniskās un tehniskās konferences (Rīga, Latvija, 2010)
- Sixteenth international conference. Mechanics of composite materials. (Riga, Latvia, 2010)
- „Latvijas betona savienība” XX zinātniski tehniskajā konference. „**Nehomogēno fibrobetonu iekšējā struktūra un to slodzes nestspēja**” (Rīga, Latvija, 2010)
- World Academy of Science, Engineering and Technology „**Post – cracking behaviour of high strength fiber concrete prediction and validation**” (Venice, Italy, 2011)
- RTU 52. starptautiskā zinātniskā konference: „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” „**Īso šķiedru kompozītu sabrukšanas stohastiska modelēšana**” (Rīga, Latvija, 2011)
- RTU 52. starptautiskā zinātniskā konference: „Būvzinātne” „**Nehomogēna fibrobetona struktūra un stiprība**” (Rīga, Latvija, 2011)
- RTU 52. Studentu zinātniskās un tehniskās konferences. „**Mehānisko testu salīdzināšana. Prizmu četru punktu liece, plātņu saspiešana**” (Rīga, Latvija, 2011)
- RTU 52. Studentu zinātniskās un tehniskās konferences. „**Iekšējās struktūras analīze un modelēšana fibrobetonos**” (Rīga, Latvija, 2011)
- RTU 53. Studentu zinātniskās un tehniskās konferences. „**Nesimetriskas formas šķiedras orientēšana viskozā šķidrums plūsmā**” (Rīga, Latvija, 2011)
- RTU 53rd International Scientific Conference. Dedicated to the 150th anniversary and the 1st congress of world engineers and Riga polytechnical institute / RTU Alumni. A.Krasnikovs, A.Macanovskis, V.Lusis, E.Macanovskis. „**Stress distribution along the crack in cracked bended fiber concrete beam**” (Riga, Latvia, 2012)
- RTU 53rd International Scientific Conference. Dedicated to the 150th anniversary and the 1st congress of world engineers and Riga polytechnical institute / RTU Alumni. A.Krasnikovs, O.Kononova, A.Machanovskis, A.Losevs, A.Galushchaka. Presentation: „**About possibility to predict fibers orientation and distribution in viscous flow**” (Riga, Latvia, 2012)
- „Mechanics of composite materials”, Seventeenth international conference, (Riga, Latvia, 2012)
- „LATVIAN CONCRETE ASSOCIATION”, XXI scientific and technical conference of Latvian Concrete Association. „**Tensile strength dependance on fibers distribution in fiberconcrete**”. Riga, Latvia, 2012)
- RTU 54. starptautiskā zinātniskā konference, Sekcija: Transporta un mašīnzinību fakultātē. „**Fibru izvietošanas kārtība fibrobetonos**” (Rīga, Latvija, 2013)
- “Civil engineering `13” 4th International Scientific Conference „**Polymer fiber pull out experimental investigation**” (Jelgava, Latvia, 2013)
- „Latvijas betona savienība” XXII zinātniski tehniskajā konference. „**Fibrobetona iekšējās struktūras veidošana**”, (Rīga, Latvija, 2013)

Publikāciju saraksts:

- Krasnikovs A., Kononova O., Eiduks M., Kalinka J., Kharkova G., Galushchak A., Machanovsky A., *Fiber orientation in viscous fluid flow with and without vibration*. „Journal of Vibroengineering” Volume 12, Issue 4, ISSN 1392-8716, Kaunas, Lithuania, December 2010.g, pp. 523-532.
- Krasnikovs, A. Khabbaz, A. Galushchak, A. Machanovskis A. *“Fibre Reinforced Concrete (FRC) (with Glass, Steel and Carbon Fibres) Strength”*. Proceedings of XXI Nordic Concrete Research Symposium, no.43 1/2011, Hämeenlinna, Finland 2011, pp. 407-410
- Krasnikovs A., Khabbaz A., Telnova I., Machanovsky A., Klavinsh J.. *Numerical 3D Investigation of Non-Metallic (Glass, Carbon) Fiber Pull-out Micromechanics (in Concrete Matrix)*. Scientific Journal of Riga Technical University. “Transport and engineering”. Sērija 6, Sējums 33, Rīga 2010; pp. 103 – 108
- Krasnikovs A., Kononova O., Khabbaz A., Machanovsky E., Machanovsky A. *„Post – cracking behaviour of high strength fiber concrete prediction and validation”*. World Academy of Science, Engineering and Technology, ISSUE 59, pISSN 2010-376X, eISSN 2010-3778, Venice, Italy, November 2011.g. pp. 988 – 992
- Krasnikovs A., Kononova O., Khabbaz A., Machanovsky E., Machanovsky A. *„Post – Cracking Behavior of High Strength (Nano Level Designed) Fiber Concrete Prediction and Validation”*. Nanotechnology in Construction 4th International Symposium”, Agios Nikolaos, Crete, Greece, May 20-22, 2012, pp.1-6
- A.Krasnikovs, O.Kononova, A.Machanovsky, A.Khabbaz. *“Pull – out Micro-mechanism for Fibers in Concrete”*. Ecm15 - 15th european conference on composite materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012 - ISBN 978-88-88785-33-2, pp.1-8
- Krasnikovs A., Machanovskis A., Lūsis V., Lapsa V., Zaharevskis V. and Machanovskis E. *“Short fibers distribution investigation in fiber concrete”*. Mechanical Engineering and Mechanics. Scientific Works of Riga Technical University. ISBN 978-9984-9990-7-4. 2012.g. pp.54-62.
- Kononova O., Lūsis V., Galuščaka A., Krasnikovs A., Mačanovskis A., *“Numerical Modeling of Fiber Pull-Out Micromechanics in Concrete Matrix Composites”*. Journal of Vibroengineering, Vol.14, Iss.4, ISSN 13928716, 2012, pp.1852.-1861.
- Lūsis V., Harjkova G., Mačanovskis A., Kononova O., Krasnikovs A. *“Fracture of Layered Fiberconcrete with Non-Homogeneous Fiber Distribution”*. In: Proceedings of 12th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Latvia, Jelgava, 23-24 May, ISSN: 16913043, 2013. Jelgava: 2013, pp.273-277.
- Mačanovskis A., Zaharevskis V., Krasnikovs A., *„Non-destructive evaluation of fibers orientation in fiberconcrete prism”*, „Civilengineering`13” 4th International Scientific Conference, Volume 4, Part 1, ISSN 2255-7776 print, ISSN 2255-8861 online, pp. 233 – 239
- Mačanovskis A., Lūsis V., Krasnikovs A., *„Polymer fiber pull out experimental investigation”*, „Civilengineering`13” 4th International Scientific Conference, Volume 4, Part 1, ISSN 2255-7776 print, ISSN 2255-8861 online, pp. 104 - 111

DARBA SATURS

Pirmā nodaļa sākas ar literatūras apskatu, kurā tiek pamatota nepieciešamība pētīt atsevišķu šķiedru uzvedības mehāniku un mikromehāniku fibrobetonā kā arī uzskaitīt šķiedru izvietojumu un orientāciju ar izlieci noslogotās sijās to sagrūšanas procesā. Ar sagrūšanu tiek saprasta maģistrālas, šķēluma šķērsojošās plaisas (plaisu) rašanās un tās atvēršanās zem slodzes, lēni izvelkot šķiedras no plaisas malām. Uzskatīti tādas apakšdaļas kā: īss fibrobetona apraksts, iekšēja plaisas struktūras analīze. Dažādas metodes apskatītas kā noteikt šķiedras orientāciju; ar griešanas (pa daļām) metodi tika pētīta iekšēja struktūra pētāmajam paraugam tilpumā. Atrast šķiedru orientāciju izmantojot rentgenogrāfiju. Apskatīta modelēšana kā uzvedas viena šķiedra uz izvilkšanu no betona matricas.

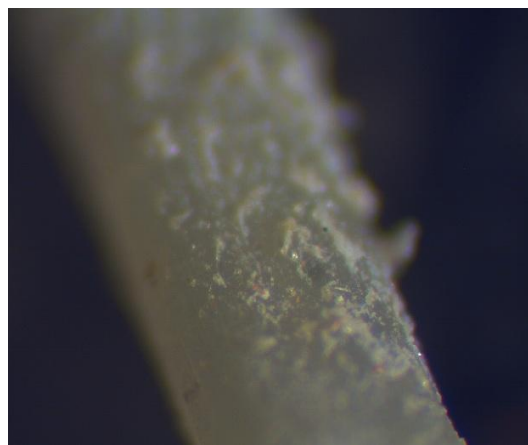
Otrajā nodaļā apkopoti eksperimentālie dati, kas tika iegūti izraujot no betona matricas atsevišķu šķiedru. Tika pētīta (mikroskopiski) šķiedras kanāla (ko betonā izveidoja izrautā šķiedra) iekšēja virsma, ar mērķi konstatēt tās erozijas pakāpi. Kanāla virsmas eroziju veido šķiedras berze pret to izvilkšanas laikā. Tālāk ir parādīti veikto „pull-out” eksperimentu rezultāti (līknes spēks – no betona matricas izrautās šķiedras garums). Rezultāti atbilst gadījumiem, kad šķiedra tika izrauta zem dažādiem leņķiem pret vilcējspēka virzienu. Eksperimenti tika veikti izmantojot dažāda garuma, diametra un materiāla šķiedras (tērauda šķiedras, polimēru šķiedras). Kā matrice tika izmantots betons.

Vienas sintētiskās polimēru šķiedras (SPŠ) ar 30 mm garumu un 0.55 mm diametru izraušanas no betona matricas mikromehānikas izpēte:

Aplūkojot SPŠ (1.1.att.) kas pavērsta 90° leņķī attiecībā pret plaisas virsmu, var redzēt, ka visā šķiedras garumā ir sīkas betona daļiņas (1.2.att.), kas turpmāk traucē šķiedras izraušanu. Šķiedru virsma ir nobrāzta. Šķiedras gals liecina par to, ka šķiedra tika pārrauta.

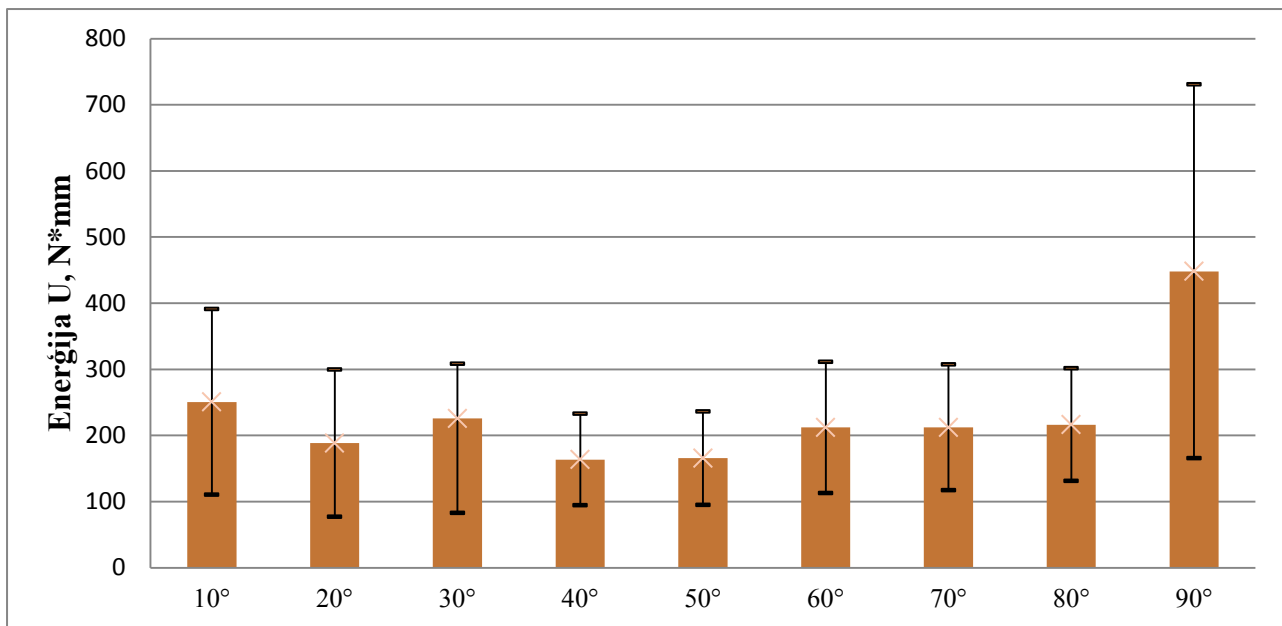


1.1.att. No betona izrautā sintētiskā polimēra šķiedra 90° leņķī (zem mikroskopa)



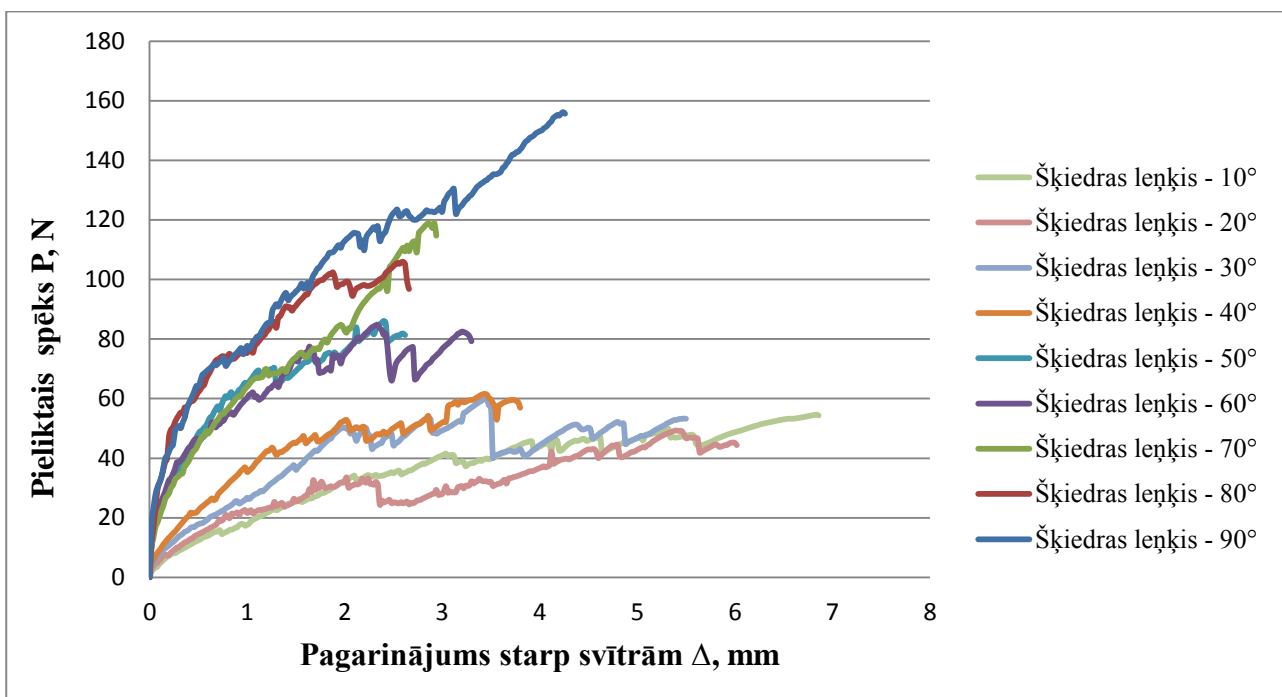
1.2.att. Šķiedras virsma 90° leņķī

1.3.att.diagrammā parādīta salīdzinājumā šķiedras izraušanai patērētās enerģijas videjotā vērtība (ieskaitot darbu šķiedras atslāņošanai no matricas, tās pārraušanai un šķiedras atrautās „astes” izvilkšanai no matricas, deformējot to) dažādos šķiedras slīpuma leņķos. Jāatzīmē, ka šķiedra, kas orientēta 90° leņķī, vislielāko enerģiju patērē izraušanas laikā, faktiski divreiz lielāku.



1.3.att. Vidējās vērtības enerģija no 10° līdz 90° leņķī

Makro SPŠ, kas atrodas betonā dažādos leņķos attiecībā pret raušanas spēka virzienu, izraušana parādīta 1.4.att.No betona matricē izrautās šķiedras „astes” garums visās orientācijās ir mazāks nekā puse šķiedras garuma (15mm). Tas liecina, ka visas šķiedras plīst.



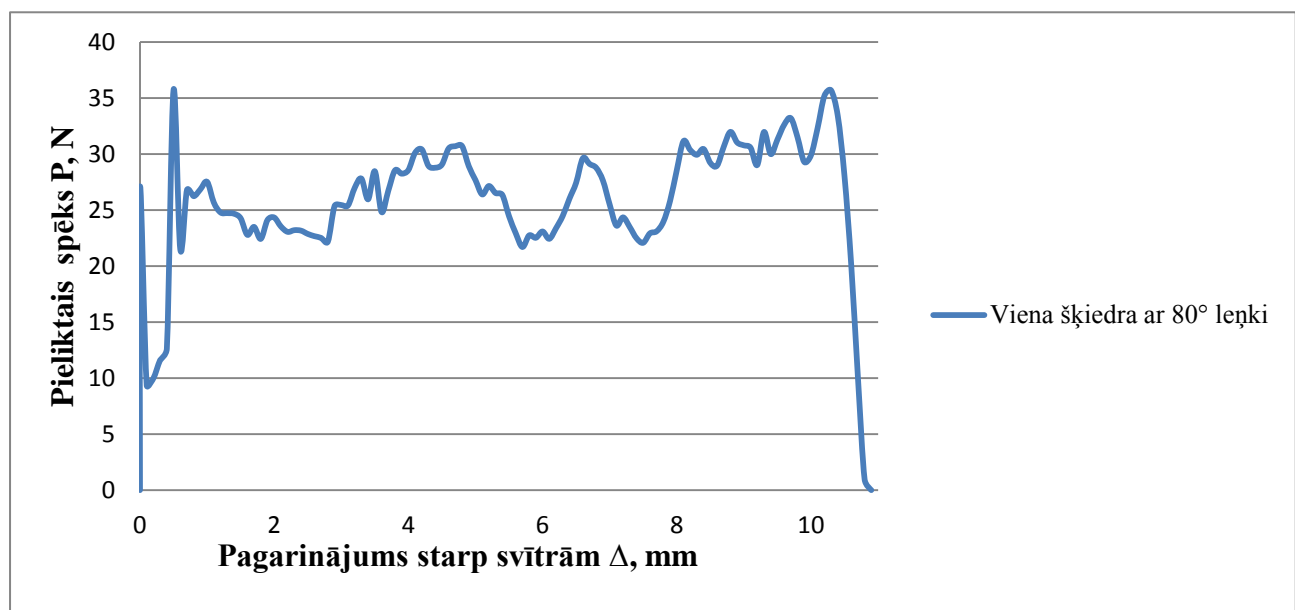
1.4.att. Vidējās vērtības katram leņķim, kur F – pieliktais spēks [N] un Δ - pagarinājums starp svītrām [mm]

Grafikos redzams, ka SPŠ, kas novietota perpendikulāri (90°), iztur lielāku slodzi (vienāda ar 155.620 N) nekā citos slīpuma leņķos. Visos grafikos attēlota pieliekamā spēka palielināšanās un samazināšanās. 90° leņķī spēka samazināšanās izskaidrojama ar to, ka no betona matricē izraujamā SPŠ ir pakļauta pakāpeniskai atslāņošanai un to pavada atslāņojošās daļas berze starp betonu un šķiedru. Tā kā SPŠ līdz ar katru nākamo atslāņojumu ir jāiztur maksimālā slodze, pienāk brīdis

izmēģināmās šķiedras pārstāj noslāņoties un sāk plastiski deformēties izmēģināmās fibras galā (1.1.att.). Deformācija noved pie šķiedras diametra samazināšanās un izmēģināmās SPŠ turpmākā plīsuma. Izbrīvējušās šķiedras daļas vidējais garums Δ (attālums starp svītrīnām) paraugiem 90° leņķī ir vienāds ar ≈ 4.1 mm. $40^\circ - 80^\circ$ leņķī vērojama pieliktā spēka samazināšanās. Tas izskaidrojams ar to, ka šķiedra ne tikai atslāņojas, bet arī grauj betona matricē sākotnējā izraušanas stadijā. Betona matricē saīsinās līdz ar šķiedras leņķa samazināšanos. Šķiedras $40^\circ - 80^\circ$ leņķu diapazonā iedala atbilstoši diviem dažādiem plīsuma veidiem: 1) kad šķiedrām veidojas deformācijas, kas noved pie šķiedras diametra samazināšanās, un šķiedra plīst; 2) kad SPŠ tiek pakļauta nogriešanai pret betona matrici saistībā ar lielu spriegumu rašanos starp izmēģināmo fibru un betonu (tajā brīdī šķiedra vairs nespēj atdrupināt betonu). Izbrīvējušās SPŠ vidējais garums paraugiem $40^\circ - 80^\circ$ leņķī ir vienāds ar $\approx 2.7 \div 3.6$ mm. Salīdzinot ar 90° leņķī orientēto paraugu vidējo garumu, zudumi ir vienādi ar $\approx 10 \div 35\%$. $10^\circ - 30^\circ$ leņķi iztur vismazākos pieliktos spēkus. Šādos leņķos ($10^\circ - 30^\circ$) SPŠ vērojams tikai tāds šķiedras pārrāvums, ko radījusi nogriešana pret betona matrici. Šādos leņķos novietotās SPŠ dod vislielākos no betona matricē izbrīvējušos šķiedru garumus. Tas saistīts ar to, ka izejas zonā šķiedras viegli sagrauj betona matrici. Izbrīvējušos šķiedru garums ir $\approx 5.5 \div 6.86$ mm. Tas ir par $25\% - 40\%$ vairāk salīdzinājumā ar 90° leņķi un par $35\% - 40\%$ vairāk salīdzinājumā ar $40^\circ - 80^\circ$ leņķu diapazonu. Lai panāktu vislielākās slodzes maģistrālajā plaisā, šķiedras ir jānovieto 90° leņķī, savukārt, ja nepieciešams panākt maksimālu plaisas atvērumu, SPŠ jāstiegro $10^\circ - 30^\circ$ leņķī.

Vienas 26 mm garas taisnas tērauda šķiedras (TTŠ) ar diametru $\approx 0.45 \div 0.5$ mm izraušanas no betona matricē mikromehānikas izpēte:

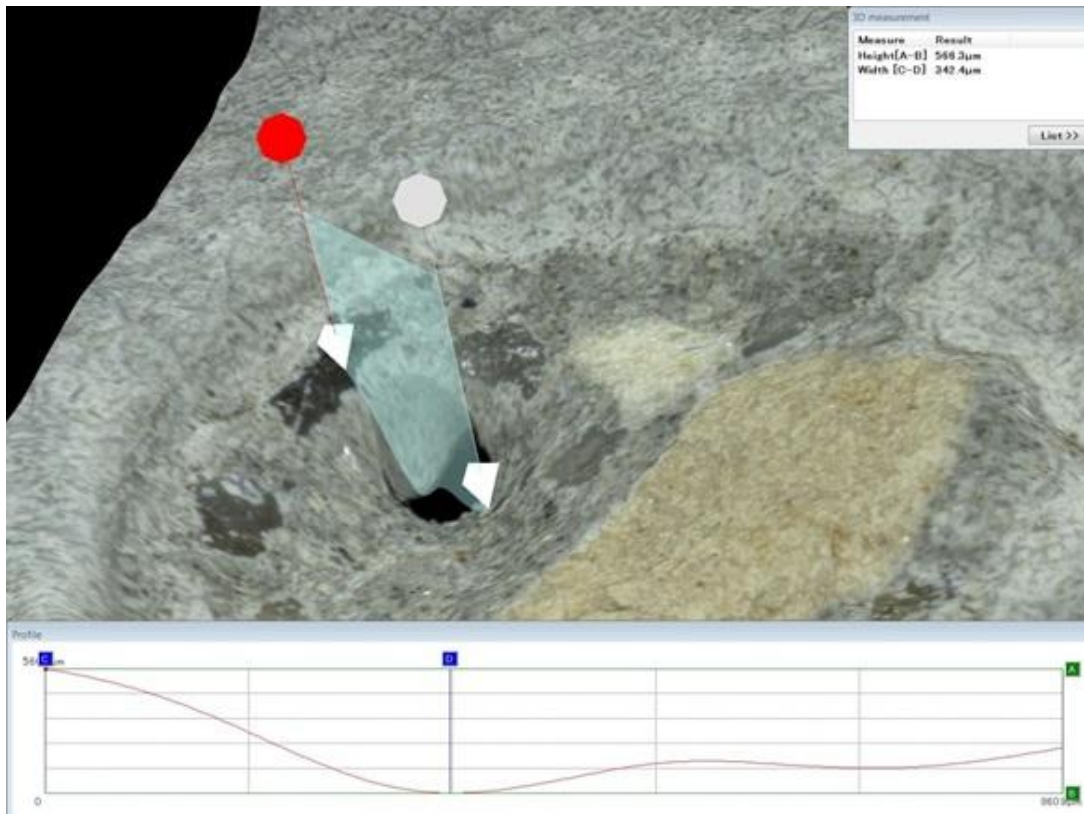
1.5.attēlā redzams 80° leņķī orientētas TTŠ izraušanas grafiks



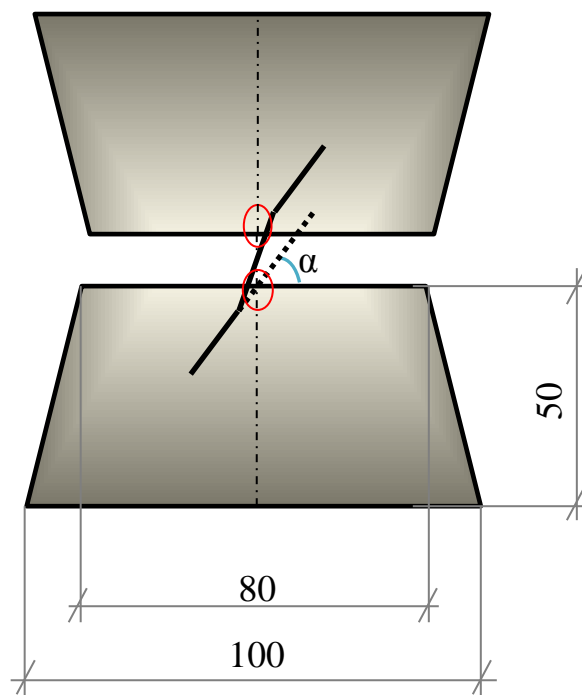
1.5.att. 80° leņķī orientētā TTŠ izraušana

Grafikā redzams, ka visā izraušanas procesā pieliktā spēka lielums mainās $\approx 22 \div 32$ N robežās. Veicot parauga virsmas mikroskopisko pētījumu, uz parauga virsmas (1.6.att.) redzamas no betona matricē izrautās šķiedras pēdas. Pēdas ir līdzena, nesabojāta virsma, kas nozīmē, ka sākotnēji noslogotā šķiedra grauj betona virsmu šķiedras izejas zonā (1.7.att.) un šajā vietā netiek novērota šķiedras berze (par to liecina eksperimenta laikā nolauztās daļiņas). Kanāla virsma ir viļņaina (1.6.att.) un ir zināms, ka šķiedras šajā paraugā bija orientēta zem 80° slīpuma leņķa.

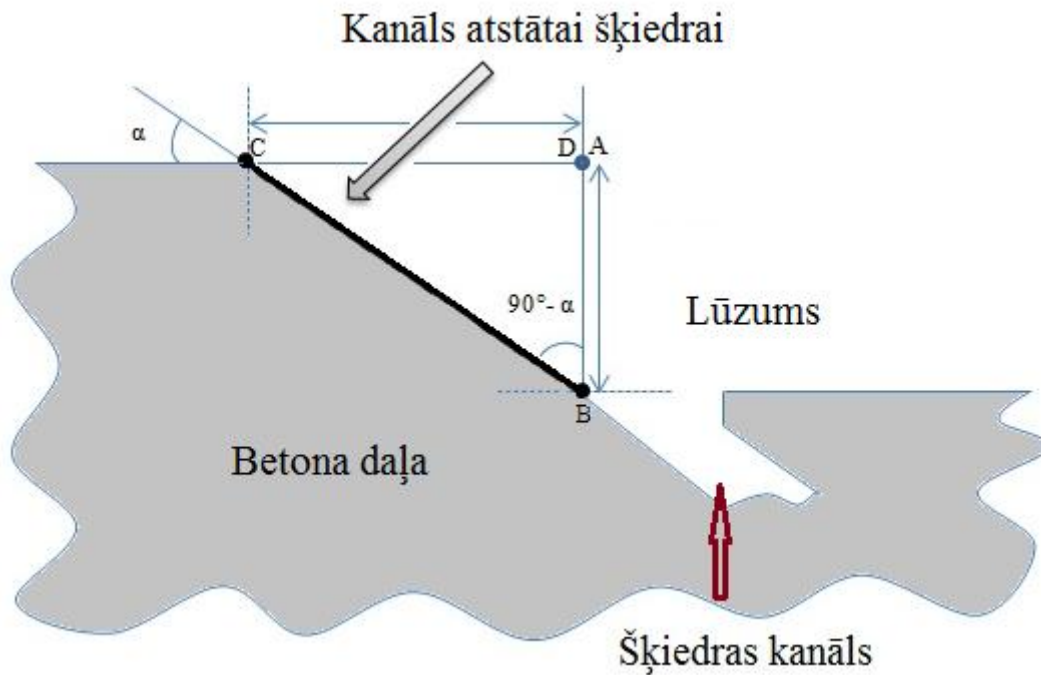
Pateicoties šim leņķim iespējams noteikt to pēdu (kanāla) garumu, kuru atstāja šķiedras pēc betona sagrūšanas. 1.6.att. redzams griezumam, kurā atspoguļots dziļums (AB = 566.3 μm) un garums (CD = 342.4 μm) (1.7.att.). Taču šajā gadījumā garums CD nav to pēdu garums, kuras atstājusi šķiedra pēc betona sagrūšanas. Pēdu garuma aprēķināšanai tika izmantota slīpuma leņķa (skat.1.8.att.) sinusa funkcija (1.1.).



1.6.att. ParaugaNr.38 (3D) kanāla virsmas analīze



1.7.att. Betona izdrupšanas zonas



1.8.att. Kanāla virsma betona izdrupšanas un šķiedru pagriešanas gadījumā

$$\sin(90^\circ - \alpha) = \frac{CD}{CB} \quad (1.1.)$$

kur α – šķiedras leņķis, °

CD – eksperimentos iegūtais garums, μm

CB – kanāla garums, ko atstāj šķiedra matricē lūzuma gadījumā, μm

No tā izriet formula (1.2.):

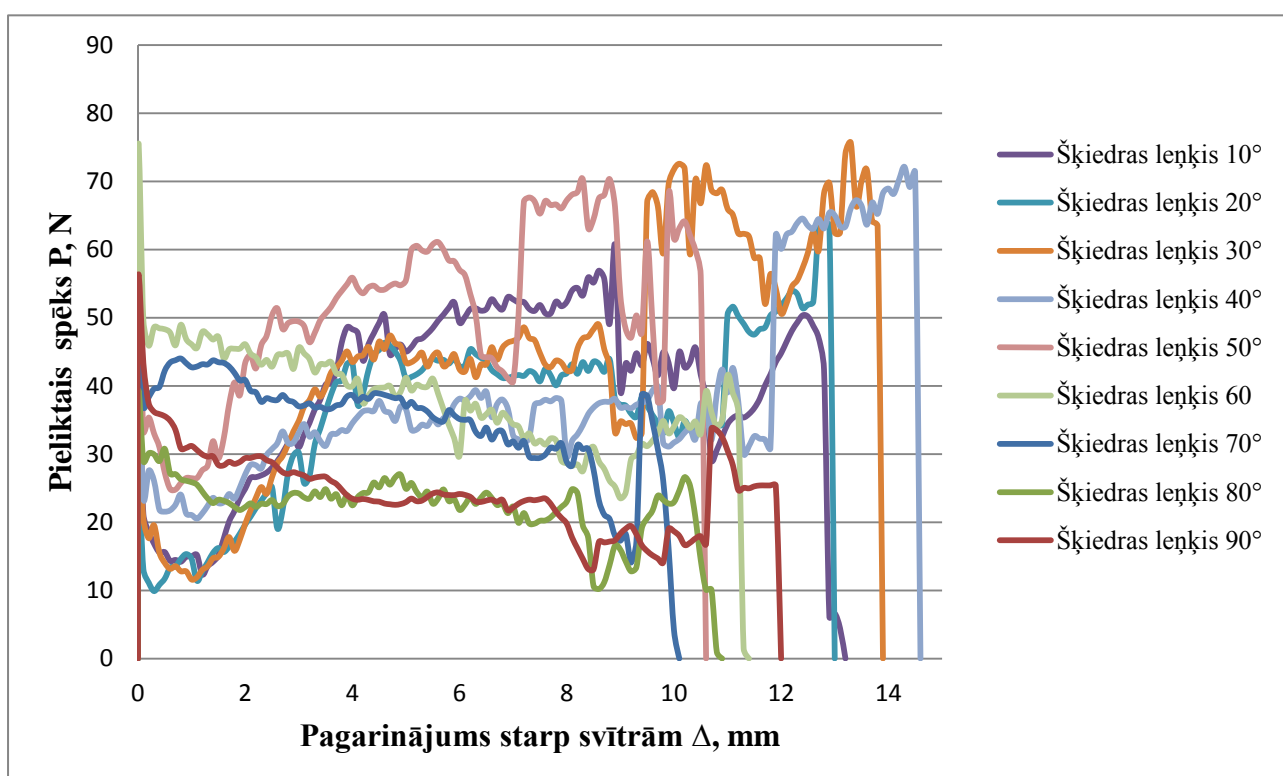
$$CB = \frac{CD}{\sin(90^\circ - \alpha)} \quad (1.2.)$$

Punkts C 1.6.att. atrodas virs pētāmā pēdas garuma \approx par 40% (1.6.att. diagrammā). Tātad $CD = 342.4 \cdot (100\% - 40\%) = 342.4 \cdot 0.6 = 205.44 \mu\text{m}$ vai 0.205 mm . Nosakām CB pēc formulas (1.2.): $CB = 0.205 / \sin(90^\circ - 80^\circ) = 0.205 / \sin(10^\circ) = 0.205 / 0.1736 = 1.18 \text{ mm}$. Tā kā punkts D paņemts no paša kanāla sākuma, tad noteiktais attālums 1.18 mm ietver sevī izraujamo šķiedru diametru un meklētā kanāla garumu betona lūzuma gadījumā. Nepieciešams no $1.18 - (0.45 \div 0.5) - 0.1 = 0.58 \div 0.63 \text{ mm}$ – patiesais garums, ko atstājusi šķiedra pēc matricē sairšanas. 0.1 mm – tas ir attālums, kas atdala šķiedru no to pēdu garuma, kuras tiek atstātas sairstot betona matricē. Grafikā (1.5.att.) redzams intensīvs pieliekamā spēka kritums līdz $\approx 0.5 \div 0.6 \text{ mm}$, kas atbilst noteiktajam, attālumam $CB = 0.58 \div 0.63 \text{ mm}$. Secinājums: sākotnējais kritums izskaidrojams ar to, ka izmēģināmā parauga matricē grauj šķiedras. Pēc matricē sagrūšanas notiek intensīva šķiedru atslāņošanās un šķiedru izraušana no betona matricē ar berzi.

1.9.att. parādīta pētāmā virsma, kur šķiedra pieņem maksimālo intensīvo virsmas nodilumu raujot šķiedras ārā no betona matricē. Jāatzīmē: a) virsma ir raupja, tajā veidojas kavernas; b) uz virsmas redzamas daļiņas, kas izraisa berzi, un uzkrājoties šķiedras izraušanas rezultātā, noved pie sastrēgumiem. 1.5.att. grafikā, ja izraujamo šķiedru garums ir 5.7 mm un 7.3 mm , ir vērojama sastrēgumu izraisīta spēka samazināšanās.

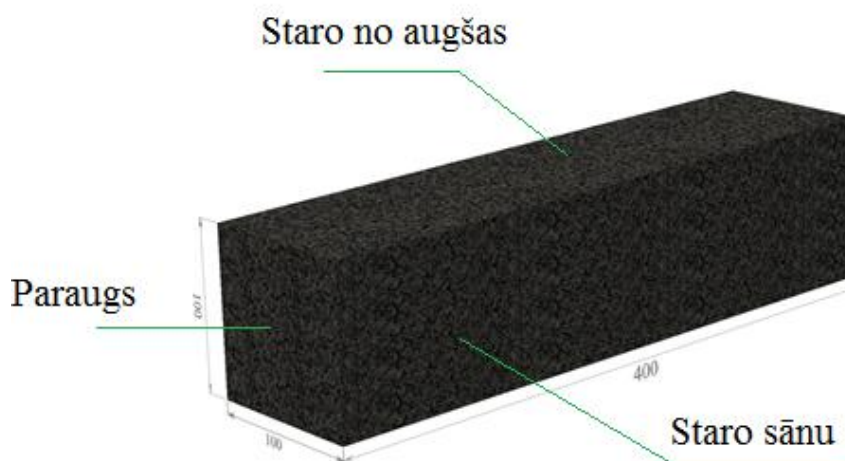


1.9.att.Kanāla, ko atstājušas 80° leņķī orientētās šķiedras, virsma



1.10.att. Dažādos slīpuma leņķos orientētas TŠ vidējotās līknes „pieliktais spēks –izvilktais garums”

Trešajā nodaļā aprakstīti fibrobeta prizmu lieces eksperimentu rezultāti. Prizmas tika slogotas uz 4 punktu lieci. Slodzes iedarbības rezultātā, prizmā radās pāršķeļošā šķēlumu maģistrālā plaisa, kuras atvēršana tika izsekota atkarībā no pieliktās slodzes. Plaisas atvēršanu kavē šķiedras, kuras savieno tās malas un zem slodzes lēni izvelkas no tās krastiem. Tika pētītas prizmas, kas satur dažādas ģeometrijas šķiedru, kas dispersi izkaisītas pa materiāla apjomu, atšķirīgas koncentrācijas. Prizmu testēšanas rezultāti, gadījumā kad šķiedras haotiski sadalītās apjomā, tika salīdzināti ar tādu prizmu testēšanas rezultātiem, kurām ir slāņaina struktūra. Vienlaicīgi tika mainīta slāņu ģeometrija un šķiedru procentuālais saturs tajās. Tālāk nodaļā tiek sniegti rezultāti veiktās rentgena analīzes attiecībā uz fibrobeta prizmu caurskatīšanu. Tika noteiktas „vājās” zonas (materiāla zonas, kas satur nelabvēlīgi orientētu (perpendikulāri sijas garenasij) šķiedru samazinātu koncentrāciju). Šajā nodaļā minēti polimēra šķiedras saturošo fibrobeta prizmu lieces eksperimentu rezultāti. Tika veikta to analīze un iegūtas kartes, kurās redzams šķiedras izvietojums uz plaisas virsmām. Tika eksperimentāli izmērīti katras šķiedras slīpuma leņķi attiecībā pret plaisas plakni un izveidoti grafiki.



1.11. att. Fibrobeta rentgena caurskatīšanas shēma

1.11.att. shematiski parādīts caurskatīšanas process. Tika caurskatītas divas paraugu šķautnes (no augšas un sāniem, 1.11.att.).

Katram markas D7 Pb caurskatītajam attēlam vidēji tiek patērētas 10 min.

Aplūkojot slāņainā parauga K2 rentģenuzņēmumu – 1.13.att, jāsecina, ka plaisa izveidosies norādītajā vietā, jo tajā ir vismazākais šķiedru noliekuma skaits, kas nav novietotas vertikāli attiecībā pret plaisas maģistrālo virsmu. Slāņaino fibrobeta rentģenuzņēmumi norāda uz to, ka mēģinājumi orientēt paraugos šķiedras ar ķemmju palīdzību nav vainagojušies ar panākumiem. Sakarā ar nevienmērīgo vibrāciju uz vibrogalda izveidojās vibrāciju blīvums, kas savukārt pagrieza vienu šķiedras galu un gremdē šķiedru betona matricēs dibenā. Ir jāņem vērā, ka betona pretestība un šķiedru nogremdēšana ir atšķirīga, līdz ar to šķiedras svārstoties pakāpeniski nogremdējas matricēs dibenā [15].

Rentgenuzņēmumi slāņainajā paraugā [7]:

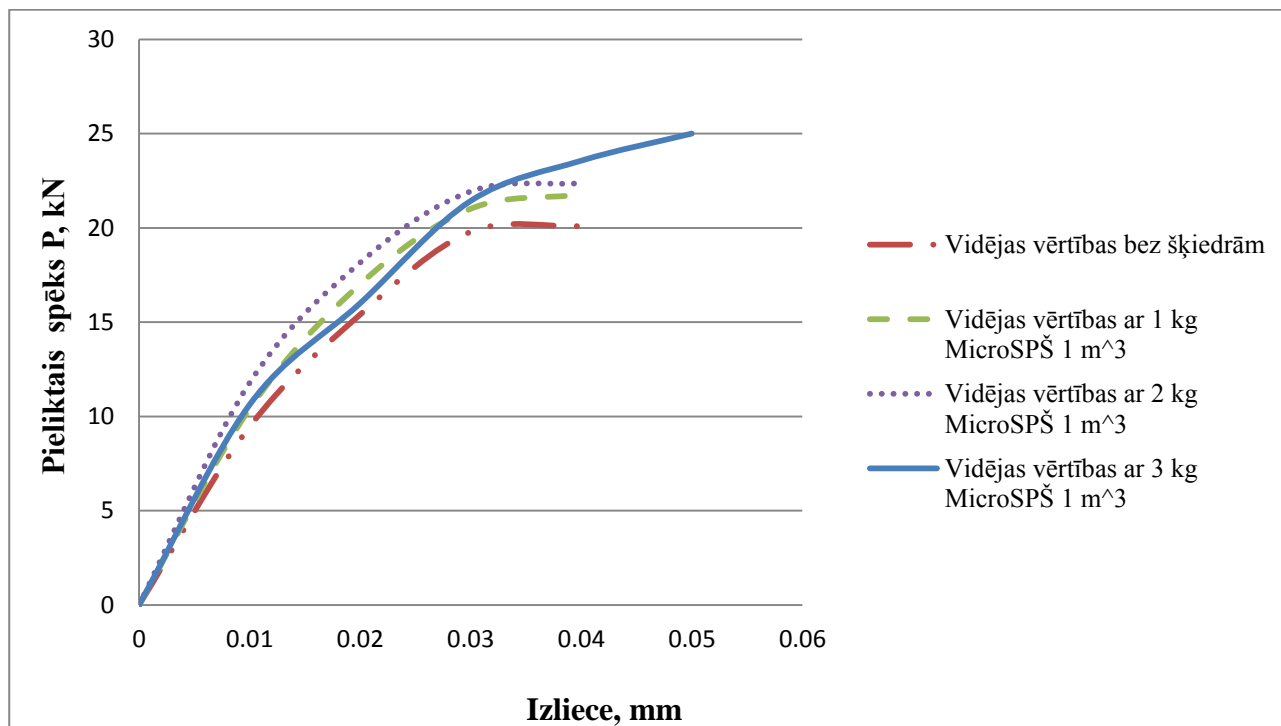


1.12. att. Fibrobetona K2 rentgenuzņēmums (caurskatīts no augšas)



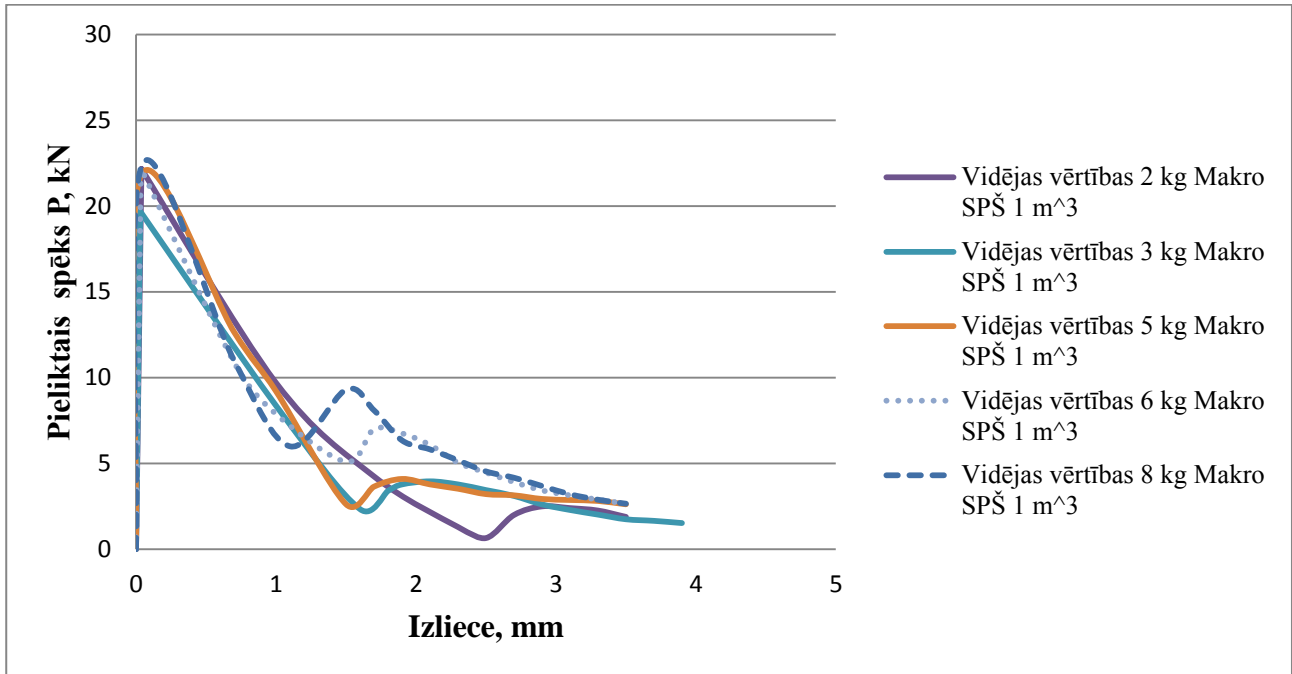
1.13.att. Fibrobetona K2 rentgenuzņēmums (caurskatīts no sāna)

Rezultāti uz 4 punktu lieci:



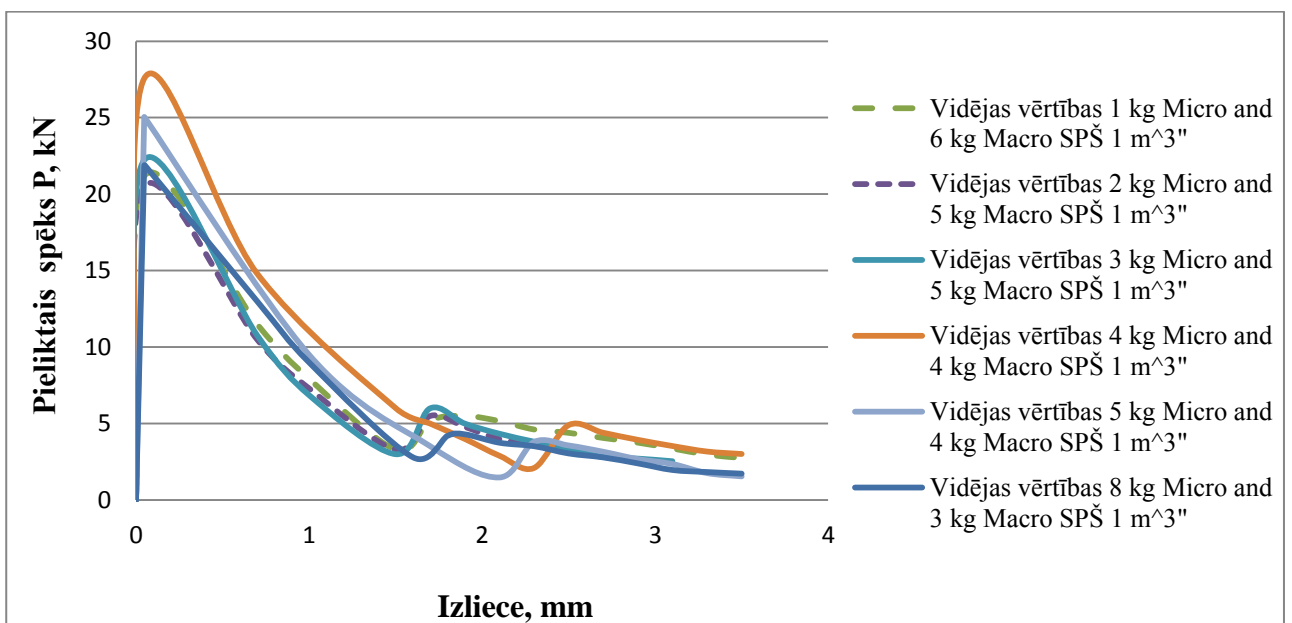
1.14.att. Vidējotās līknes spēks – fibrobetona prizmas ar sintētiskajām mikro šķiedrām vertikālā izliece testējot uz 4 punktu lieci

Iegūti grafiki spēks – prizmas vidusdaļas izliece 4 punktu lieces gadījumā. 1.14.att. parādīts, kā palielinās pieliekamais spēks un fibrobeta prizmas vidusdaļas liece atkarībā no sintētisko mikro šķiedru daudzuma uz 1 m³ palielināšanās. Paraugi, kas satur sintētiskās mikro šķiedras - 3 kg uz 1 m³, iztur lielu slodzi (šķiedras iztur pieliekamo spēku) lielā liecē (kas bija vienāda ar ≈0.052 mm).



1.15.att. Līkņu spēks – fibrobeta prizmas vidusdaļas vertikālā izliece vidējās vērtības fibrobetoniem ar Makro SPŠ pēc testēšanas attiecībā uz 4 punktu lieci

Tā kā sintētiskās mikro šķiedras ir relatīvi īsas un tām ir mazs diametrs, tad tādu šķiedru daudzums materiālā ir ievērojami lielāks salīdzinājumā ar betonu, kas satur tikpat kilogramu sintētisko makro šķiedru.



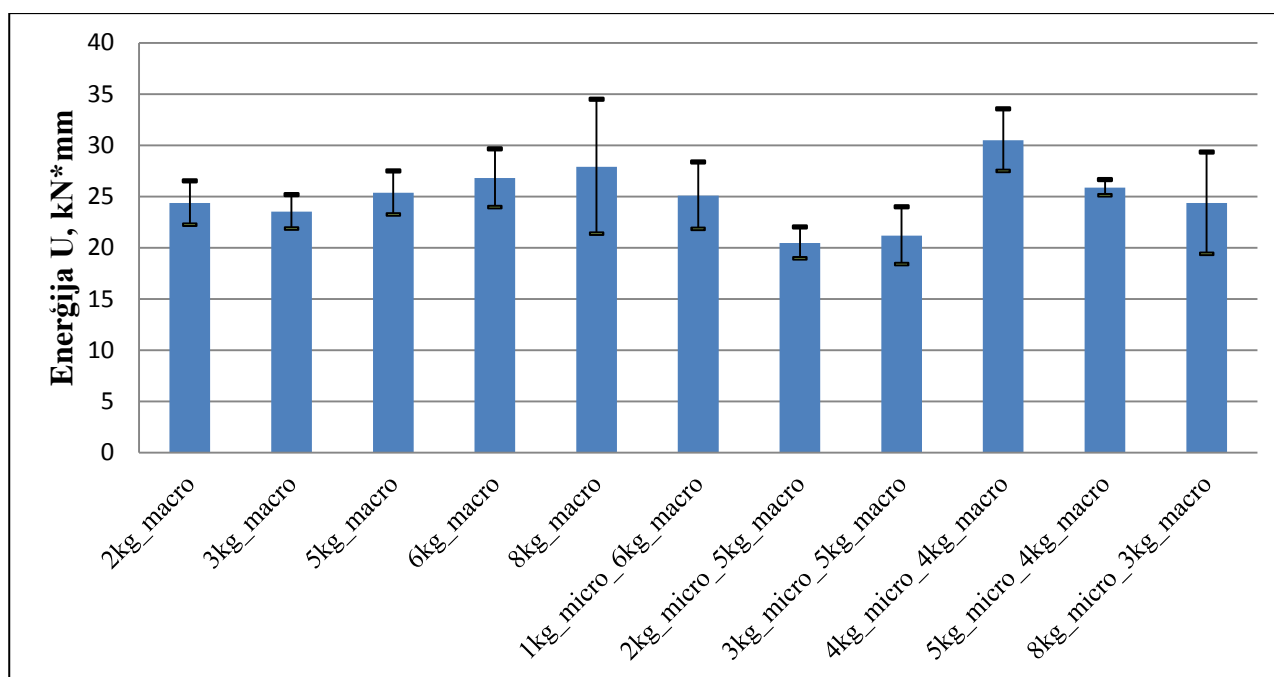
1.16.att.Fibrobeta ar sintētiskajām mikro un makro šķiedrām vidējās vērtības pēc testēšanas attiecībā uz 4 punktu lieci

Taču izraujamo šķiedru galu garumi sairšanas gadījumā sintētiskajām mikro šķiedrām ir īsāki nekā sintētiskajām makro šķiedrām. Sabrukšana notiek kvazi-trausli, pieļaujama plaisas atvērums (kurā šķiedras uzņem visu slodzi) ir ļoti mazs (1.14.att.) [1].

Atvērtās plaisas virsmas apskate (izmantojot mikroskopu) rāda sintētisko mikro šķiedru izvietojumu maģistrālajā plaisā. Šķiedras ir izvietotas visai haotiski pa visu virsmu ar mazu kūlīšu veidošanās pakāpi.

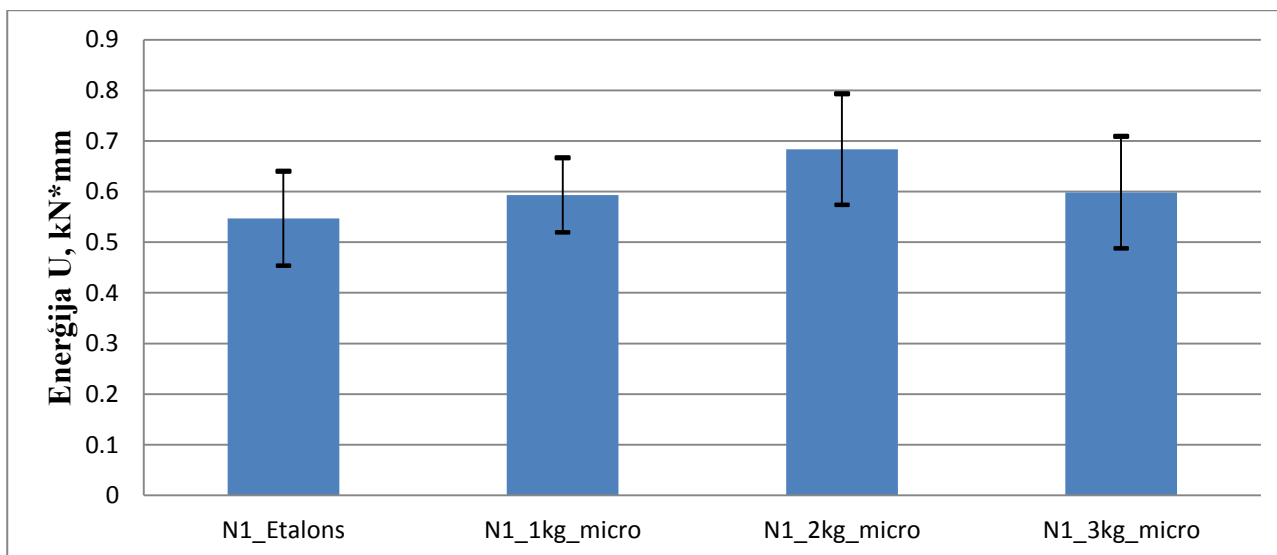
1.15.att. redzami iegūtie eksperimentālie dati (veicot izmēģinājumu uz 4 punktu lieci) fibrobetoniem, kas satur sintētiskās makro šķiedras. Līknēs var izdalīt 2 posmus. 1.posms – fibrobetons plaisas atvēršanās stadijā rāda krasu nestspējas samazināšanos, tas izskaidrojams tādējādi, ka sintētiskajām makro šķiedrām ir mazs elastīguma modulis un tikai daļa šķiedru plaisā ir noslogota. 2.posms – atkārtoto nestspējas palielināšanos var izskaidrot ar to, ka sintētiskās makro šķiedras pārstāj atslāņoties [11] un pāriet pašu šķiedru elastoplastiskās deformēšanās režīmā, izturot maksimālās slodzes.

1.16.att. redzami fibrobetonu ar fibro-kokteiļiem no sintētiskajām mikro un makro šķiedrām, kas tika izmēģināti attiecībā 4 punktu lieci, eksperimentālo datu grafiki. Pievienojot betonam sintētiskās mikro un makro šķiedras, novērojam fibrobetona nestspējas palielināšanos, stiprības palielināšanos, kā arī 2 sairšanas posmus, kā iepriekš aplūkotajos grafikos 1.15.att.



1.17.att. Lieci un siju ar makro SPŠ un fibro - kokteiļiem no mikro un makro SPŠ

No 1.17.att. esošajiem datiem redzams, ka palielinot betonā makro SPŠ [6] koncentrāciju, palielinās lieci patērētā enerģija un plaisas atvēršanās. Paraugiem ar 2 kg PS makro šķiedru vidējā lieces enerģija = $\approx 24.4 \text{ kN*mm}$, proti, par $\approx 13\%$ mazāka nekā paraugiem ar 8 kg/m^3 [2].

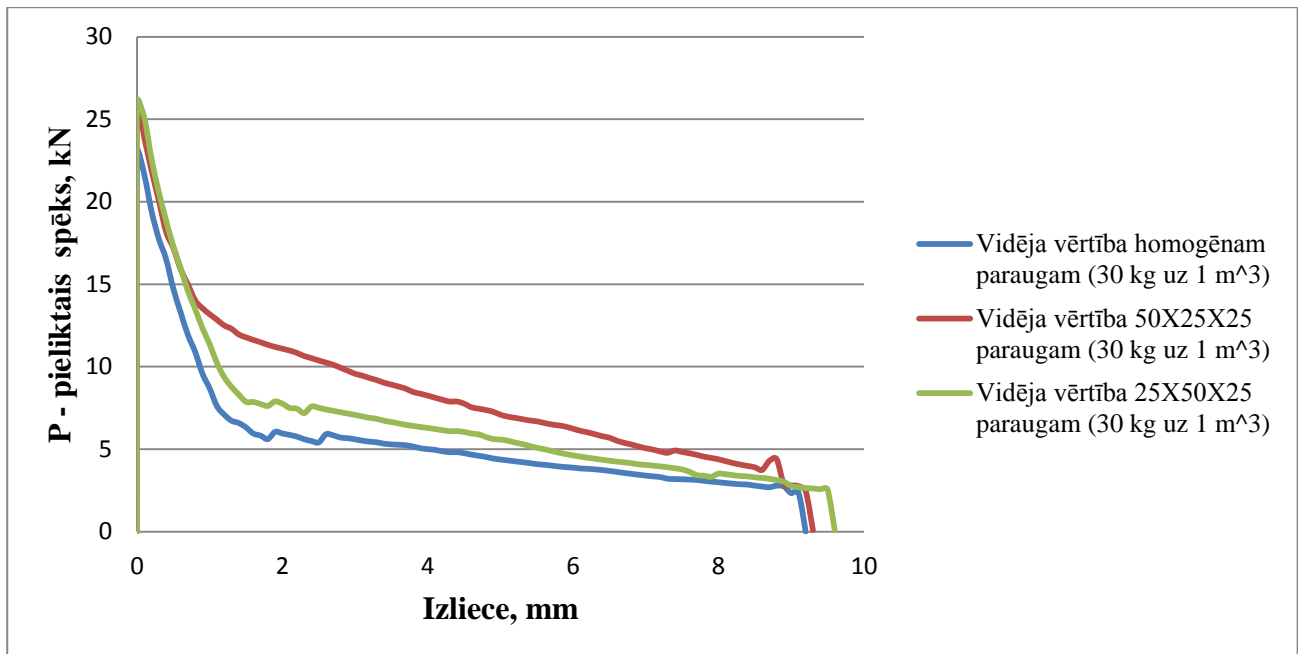


1.18.att. Liecei un siju ar mikro SPŠ plaisas atvēršanai patērētās enerģijas vidējās vērtības

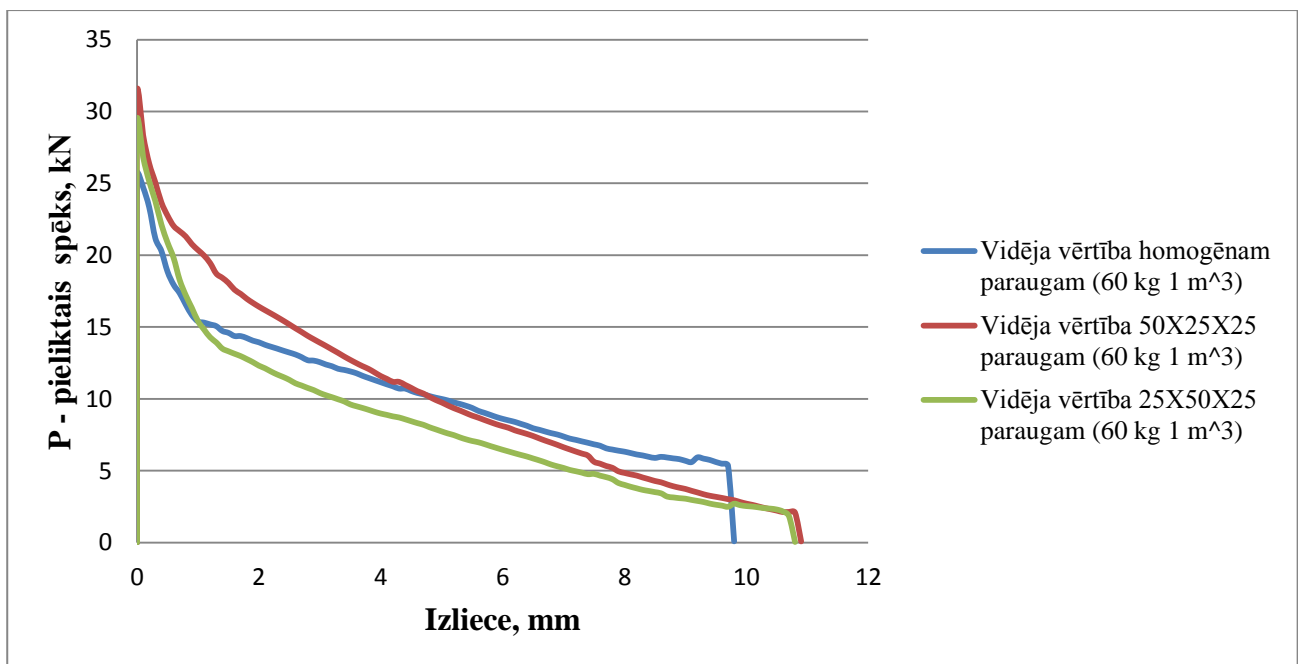
Mikro SPŠ, tās iejaucot kopā ar makro SPŠ, veicina makro šķiedras apspiešanu ar betonu (betons + mikro šķiedra) tās izraušanas laikā plaisas atvēršanās sākumstadijā un nespēj līdzvērtīgi aizstāt makro šķiedras (jo mikro šķiedras saturošās sijas nestspēja beidzas ar izliecēm (aptuveni vienādām plaisas atvērumam), kas ir vienādas ar 0,04mm). Paņemsim 3 kg makro SPŠ, kuru vidējā enerģija ir ≈ 23.5 kN*mm, tas ir par ≈ 4 % mazāk, salīdzinājumā ar kokteili no 8 kg mikro un 3 kg makro šķiedrām. Dabiski, ka no visiem iegūtajiem datiem 1.17.att. vislielākā slodze pienākas uz paraugiem ar 8 kg makro uz 1 m³.

No grafikiem (1.19.att.) izriet, ka mazas šķiedru koncentrācijas gadījumā fibrobetons ar viendabīgu šķiedru sadalījumu (šķiedras izvietotas haotiski apjomā) gan iztur vismazāko maksimālo slodzi, salīdzinājumā ar slāņainajiem paraugiem (šķiedras ir koncentrētas tikai noteiktā parauga slānī), tā arī rāda vismazāko nestspēju visā maģistrālās plaisas atvērumā. No tā izriet, ka veidojot fibrobetonus slāņos, var panākt lielāku lieces stiprību. Salīdzinot iegūto slāņaino fibrobetonu vidējās vērtības (1.19.att.), izriet secinājums: slāņa līmeņa atrašanās vietas izvēle ietekmē nestspēju, proti, slāņainajiem paraugiem 50X25X25 mm iegūtā vidējā lieces vērtība ir lielāka nekā 25X50X25 mm. 1.21.att. redzams, ka vidējā enerģija 50x25x25 mm paraugiem sasniedz ≈ 78 kN*mm, savukārt paraugam 25x50x25 mm ≈ 63 kN*mm. Tas ir par ≈ 19 % mazāk salīdzinājumā ar paraugiem, kuriem ir konfigurācija 50x25x25 mm. Ir svarīgi zināt arī to, kādās ekspluatācijas slodzēs paredzēts izmantot plātnes vai sijas [17], kas modelē šos izmēģinātos paraugus. Acīmredzot, ka vienpusējas izlieces gadījumā apakšējā slāņa stiegrošana noved pie lielākas nestspējas paaugstināšanās nekā apakšējā un augšējā slāņa vienlaicīga stiegrošana [13]. Lieces gadījumā augšējais slānis ir pakļauts saspiedēj slodzei un daļēji izstiepjošai slodzei (neitrālā līnija iet caur slāni [3]), līdz ar to tā ieguldījums sijas nestspējā ir ierobežots, jo izstiepjošie spriegumi prevalē apakšējā slānī. Savukārt šķiedru koncentrācija tajā nav liela. Vidējā iegūtā lieces enerģija viendabīgiem fibrobetoniem ir vienāda ar ≈ 51 kN*mm, tas ir par ≈ 19 % mazāk nekā orientētam slāņainam fibrobetonam 25x50x25 mm un par ≈ 35 % nekā slāņainam fibrobetonam 50x25x25 mm.

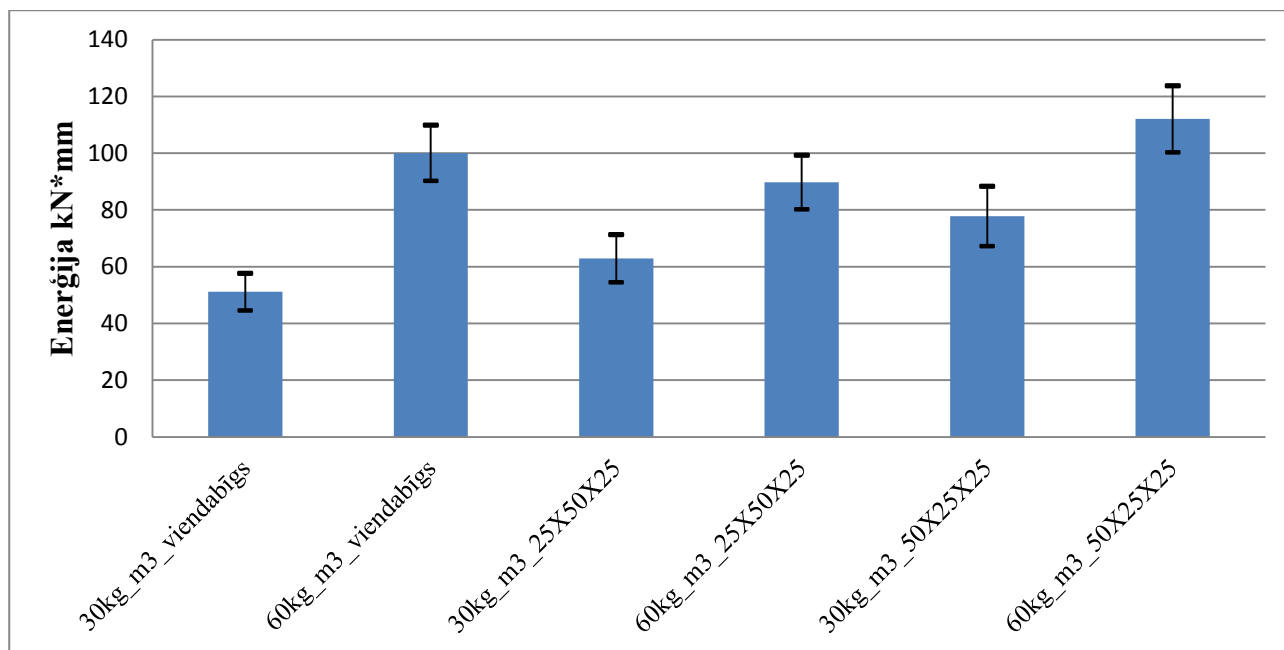
Tēsts uz 4 punktu lieci ar tērauda taisnām šķiedrām 26 mm garuma un $0.45 \div 0.5$ mm diametra.



1.19.att. Prizmas vidusdaļas izlieces vidējo vērtību līknes atkarībā no viendabīgiem un slāņainiem fibrobetoniem pieliktās izliecošās slodzes ar kopīgu (visam paraugam) šķiedru koncentrāciju 30 kg/m^3



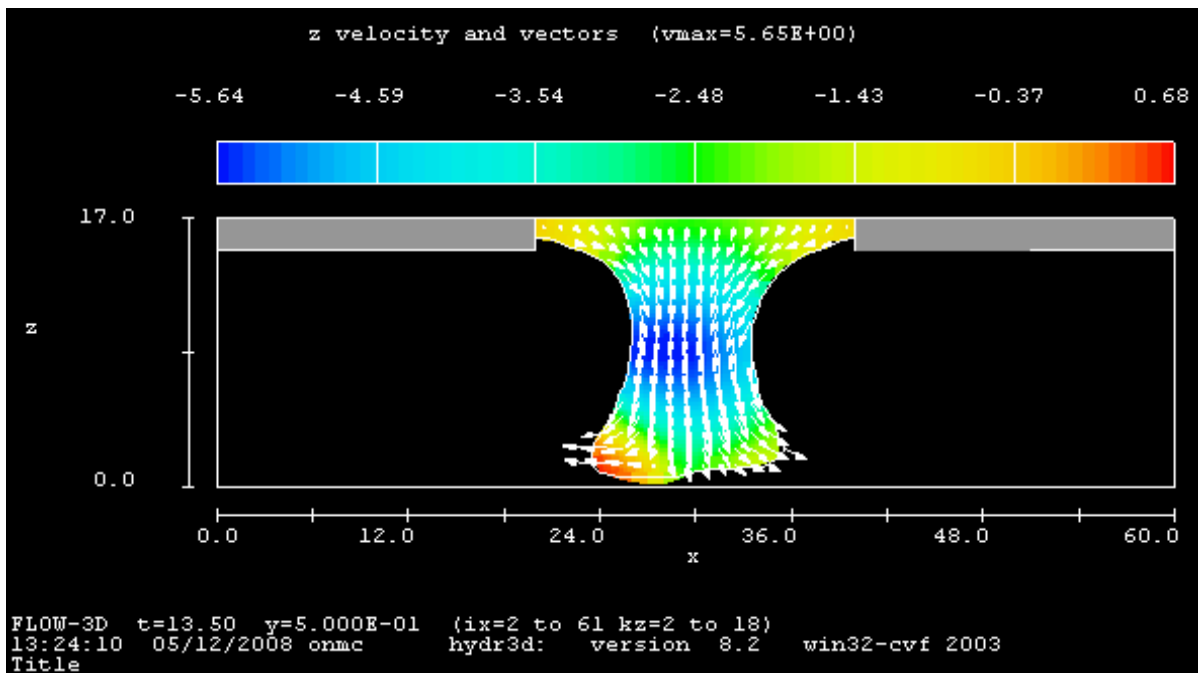
1.20.att. Prizmas vidusdaļas izlieces vidējo vērtību līknes atkarībā no pieliktās liecošās slodzes viendabīgiem un slāņainiem fibrobetoniem ar kopējo (visam paraugam) šķiedru koncentrāciju 60 kg/m^3



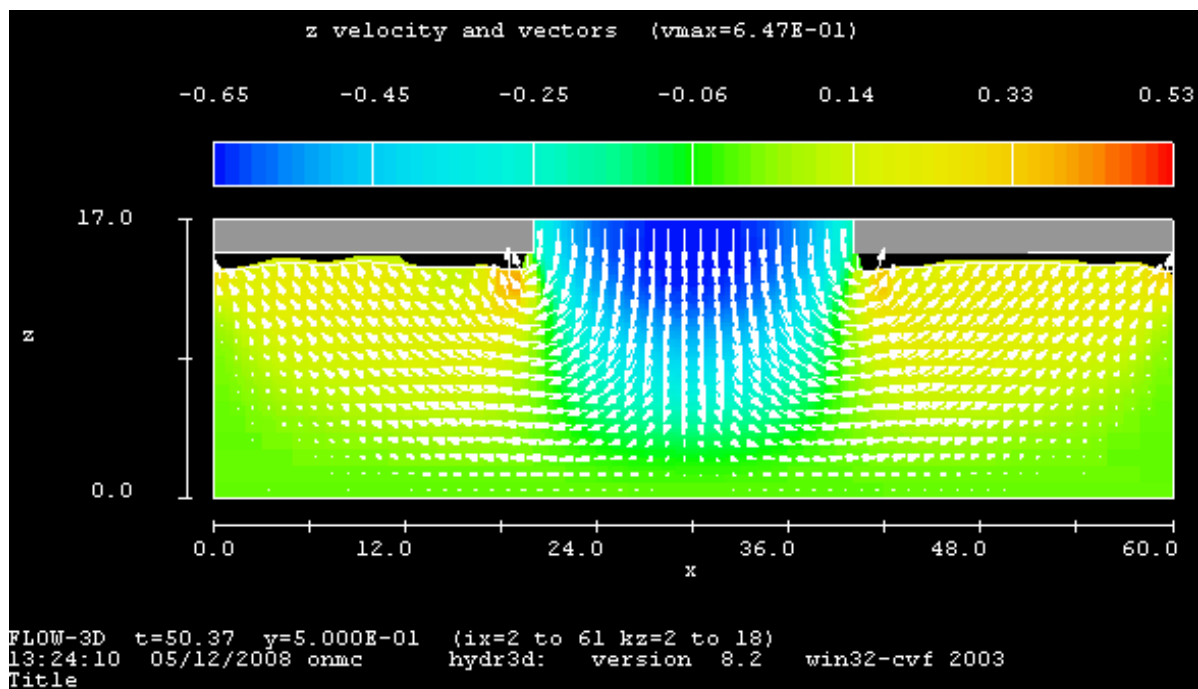
1.21.att. Izliecei ar SPŠ, kuru garums ir 26 mm un diametrs 0.45÷0.5 mm, patērētās enerģijas vidēja vērtība

1.21.att. līdz ar šķiedru koncentrācijas palielināšanos vidējo līknes uzvedas savādāk. Prizmas no viendabīgā fibrobetona, liecot, palielinoties šķiedru koncentrācijai uz m^3 , izturēja vismazāko slodzi, kad maģistrālā plaisa ≈ 1 mm. Pēc tam, kad plaisas atvērums sasnēgusi 1 mm lielu atvērumu, nepieciešamā pieliekamā spēka lielums pieaug salīdzinājumā ar slāņainajiem paraugiem 25x50x25 mm. Tas saistīts ar to, ka viendabīgos paraugos ārējās slodzes nešanas procesā iesaistās šķiedras, kas atrodas arvien augstāk gar sijas šķērsriezumu. Šī parādība kārtējo reizi pierāda, ka augšējais slānis lieces gadījumā maz piedalās sijas nestspējā (nedarbojas uz stiepi) [4]. Salīdzinot viendabīgās un slāņainās sijas, ir redzams, ka viendabīgais fibrobetons līdz sijas izliecei, kas vienāda ar $\approx 4,6$ mm, iztur mazāku lieces spēku, taču pēc tam līdz 9.5 mm tam ir lielāka nestspēja. Turpinot palielināties šķiedru koncentrācijai m^3 iestāsies brīdis, kad fibrobetona slāņos būs tik daudz šķiedru, ka slodzes nešanas mehānisms griezumā, izraujot individuālās šķiedras, mainīsies pret slodzes nešanas mehānismu griezumā, izstiepjot betona šķiedru blokus, kas var izraisīt atgriezenisku darbību: slāņainais fibrobetons izturēs mazāku pieliekamo spēku. No 1.21.att. redzams, ka vidējā enerģija viendabīgajam fibrobetonam ar šķiedru koncentrāciju $60 \text{ kg}/m^3 \approx 100 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, savukārt slāņainajam 25x50x25 mm ar koncentrāciju $60 \text{ kg}/m^3 \approx 90 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, tas ir par 10% mazāk nekā viendabīgajam. Slāņainā fibrobetona enerģija 50x25x25 mm, ja $60 \text{ kg}/m^3 \approx 112 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, par $\approx 20\%$ lielāka nekā 25x50x25 mm un par $\approx 11\%$ nekā viendabīgajam.

Ceturtnā nodaļā sniegti fibrobetona javas iepildīšanas veidnēs skaitliskās modelēšanas rezultāti. Īpaša uzmanība tiek veltīta zonām ar ātruma vertikālās komponentes augstu gradientu noteikšanai [10]. Tiek izvirzīts pieņēmums, ka šīs zonas novedīs pie orientēto šķiedru paaugstinātas koncentrācijas (sijas garenass perpendikulārajās plaknēs, pateicoties plūsmas ātruma vertikālās komponentes gradientam) [16].

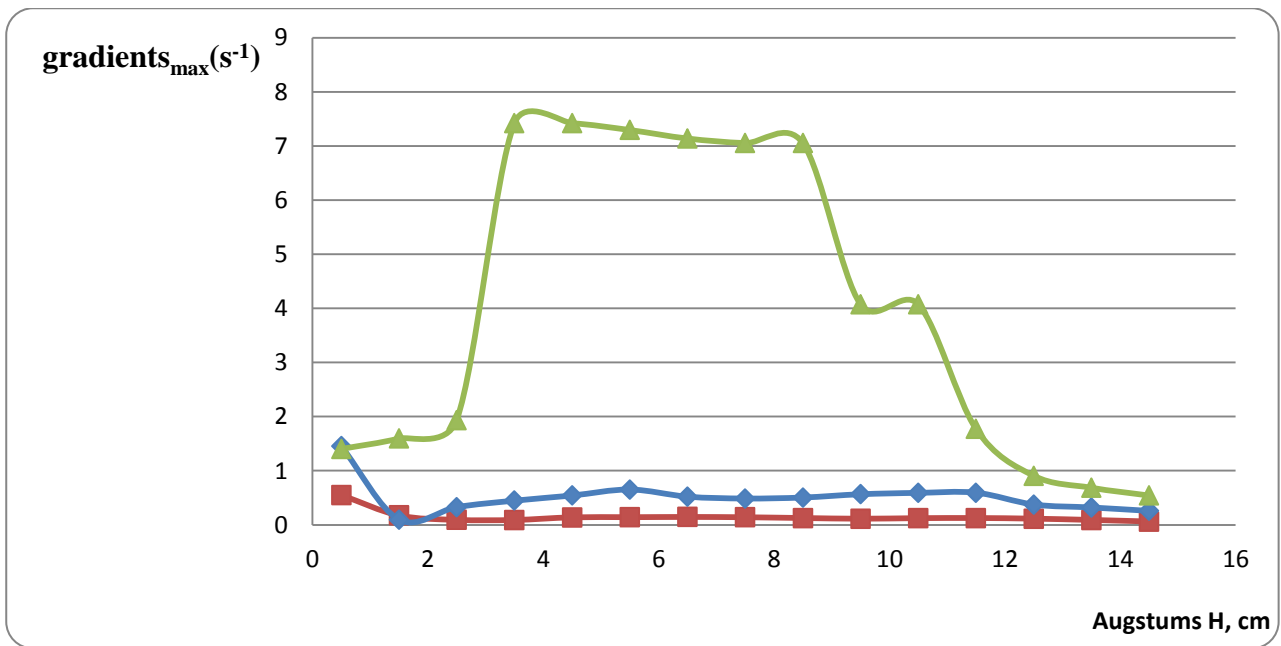


1.22.att. Fibrobetona šķidrums tecēšana pie t=13.5 s



1.23.att. Veidne, kuras izmēri ir 60×15×15, ir piepildīta ar viskozo šķidrumu

1.23.att. redzams, ka laikā t=50.37 s šķidrums piepilda veidni. Starp šķidrumu un veidnes vāku ir atstarpe, to var izskaidrot ar to, ka tur pastāv spiediens (1 atmosfēra), kas līdz ar to neļauj šķidrumam piepildīt visu tilpumu. Bultiņas 1.23. att. norāda viskozā šķidrums ātruma vektora virzienu [5].



1.24.att. Maksimālo gradientu attēls pēc absolūtā lieluma, kur ■ pie $V_{z_n}=29.5$ cm un $V_{z_{n+1}}=31.5$ cm ◆ pie $V_{z_n}=32.5$ cm un $V_{z_{n+1}}=33.5$ cm ▲ pie $V_{z_n}=35.5$ cm un $V_{z_{n+1}}=36.5$ cm

No 1.24. att. izriet, ka pie $V_{z_n}=35.5$ cm un $V_{z_{n+1}}=36.5$ cm ir vislielākā šķiedru vertikālās pagriešanās iespēja no trim izskatāmajām vertikālēm. To var izskaidrot ar to, ka ielejot šķidrumu, šķiedras (pie $V_{z_n}=35.5$ cm un $V_{z_{n+1}}=36.5$ cm) izvietojas tālāk no plūsmas centra un pagriežas biežāk, nekā šķiedras, kas atrodas tuvāk šķidrums plūsmas centram. Tur, kur $\text{Gradients}_{\text{max}}$, ir liela iespēja, ka būs vertikāli orientētas šķiedras, kas pasliktina fibrobetona izturību pret lieci. Pie $V_{z_n}=29.5$ cm un $V_{z_{n+1}}=31.5$ cm šķiedras praktiski nepagriežas, jo maksimālie gradienti ir mazi salīdzinājumā ar diviem citiem gadījumiem, un apskatāmā plūsma atrodas visa šķidrums plūsmas centrā. No trim izskatāmajām vertikālēm var izdarīt secinājumu, ka pie augstuma no 0 cm līdz 5 cm ir maza iespēja, ka šķiedras pagriezīsies vertikāli, jo šķiedras skar formas dibenu un līdz ar to nav iespējama šķiedru pagriešanās vertikāli. Pie augstuma no 5 cm līdz 11 cm novērojama vislielākā iespēja, ka šķiedras pagriezīsies vertikāli, jo nav nekādas saskares ar formu un ir vislielākais plūsmas ātrums, kas līdz ar to cenšas iztaisnot šķiedras vertikāli. Augstumā no 11 cm līdz 15 cm ir vismazākā iespēja, ka šķiedras pagriezīsies vertikāli, jo maisījums tikko tiek ieliets veidnē un īsā laika sprīdī nespēj izlīdzināties vertikāli, ja vien šķiedra uzreiz nenovietojas vertikāli vai novietojas platā leņķī pret formas apakšējo virsmu.

Secinājums: iepildot veidnēs fibrobetonu, lejojot to vertikāli veidnes vidusdaļā, pastāv liela varbūtība, ka prizmas vidusdaļā veidojas joslas ar nevēlamu šķiedru orientāciju (šķiedras pagriežas perpendikulāri prizmas garenasij, samazinot dotā šķēluma nestspēju). Šajās joslās šķiedru orientāciju nevar uzskatīt par haotisku.

Piektā nodaļā aprakstīti 4 skaitlisko modeļu algoritmi zem lieces slodzes esošās fibrobetona sijas nestspējas prognozēšanai. Modeļi tika realizēti un prognozes atbilst makroplaisas atvēršanās posmam un šķiedru izraušanai no tās malām. Dati par atsevišķas šķiedras izraušanas mehāniku no betona plaisas malām tiek ņemti no iepriekšējām nodaļām.

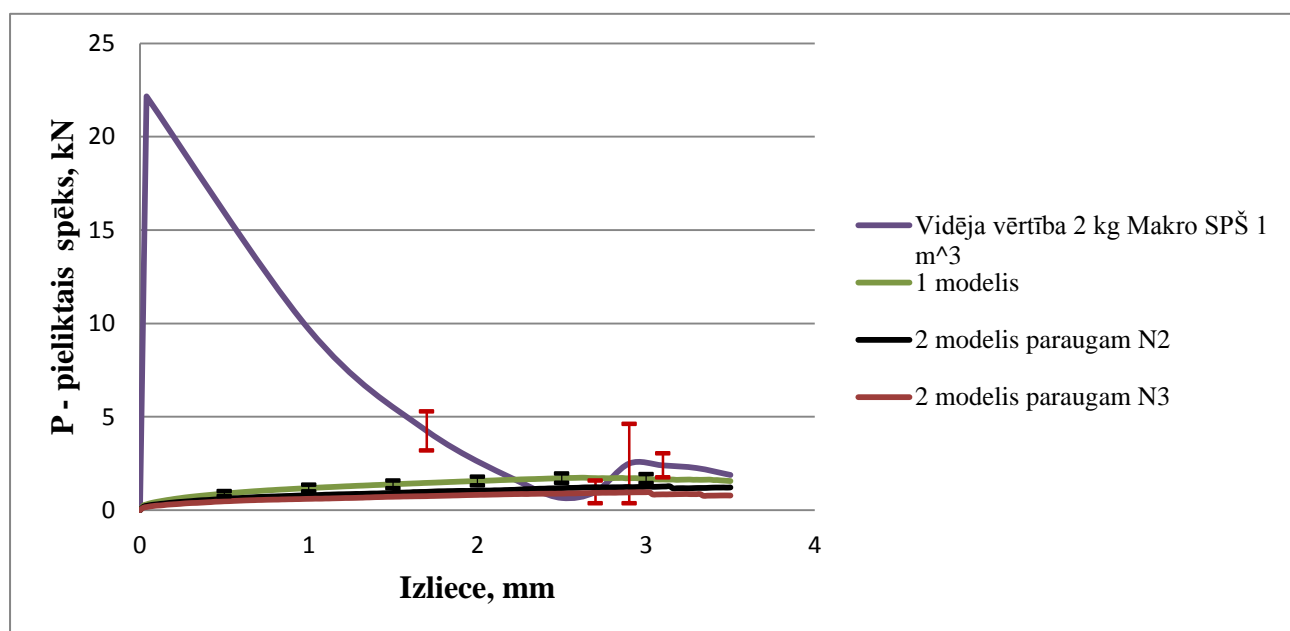
1.modelis paredz, ka visas šķiedras novietotas apjomā haotiski.

2.modelis izmanto eksperimentālos datus par šķiedru izvietojumu plaisas malās un to orientāciju.

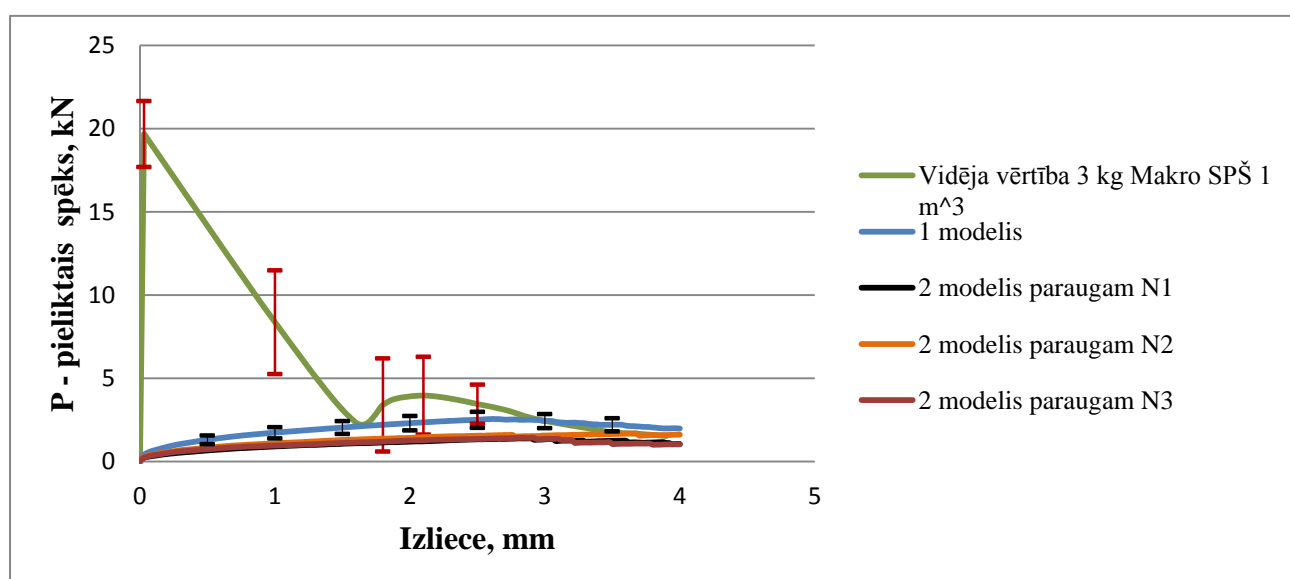
3.modelis balstās uz pieņēmumu, ka visas šķiedras, kas šķērsro plaisu, atrodas stingri perpendikulāri attiecībā pret tās plakni.

4.modelis tiek izmantots fibrobeta siju ar dažādu šķiedru koncentrāciju paraugos nestspējas aprakstīšanai.

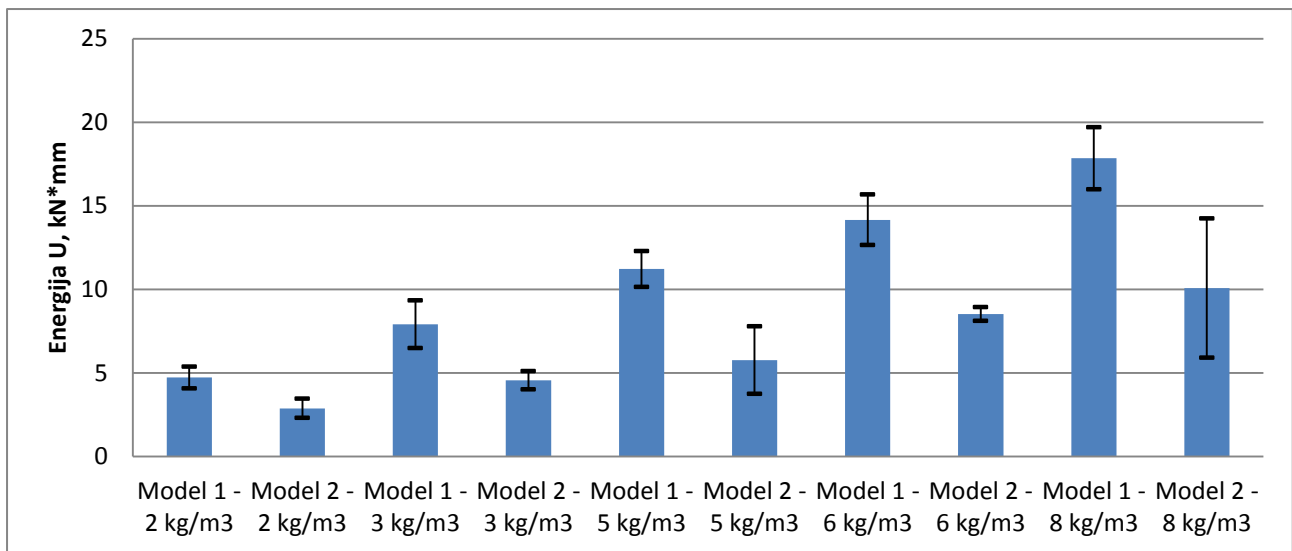
Tika iegūtas šādas līknes ar 30 mm garām SPŠ, kuru diametrs ir 0.55 mm. 1.modelī atspoguļotas prizmas vidējās daļas izlieces vidējo vērtību līknes atkarībā no pieliktās lieces slodzes (katra līkne tika iegūta vidējotot 10 paraugu datus katrai šķiedru koncentrācijai 1 m^3).



1.25.att. Vidējo līknes spēks – vertikālā liece viendabīgiem fibrobeta ar makro šķiedru koncentrāciju 2 kg/m^3 pēc testēšanas attiecībā uz 4 punktu lieci un modelēšana



1.26.att. Vidējo līknes spēks – vertikālā liece viendabīgiem fibrobeta ar makro šķiedru koncentrāciju 3 kg/m^3 pēc testēšanas attiecībā uz 4 punktu lieci un modelēšana



1.27.att. Šķiedru darba enerģija 4 punktu liecei – ņemot vērā tikai plastiskā deformācijas un šķiedru berzi

Aplūkosim līknes spēks – plaisas atvēršanās prizmu ar SPŠ liešanas gadījumā (skat. 1.25.-1.26.att.). 1. un 2.modelis nav iegūto eksperimentālo datu apraksts, jo šie modeļi satur ierobežotu mikromehānismu skaitu, kuri savukārt atspoguļo starpību starp īstenību un modelēšanu. Eksperimentālos datus satur tādi mikromehānismi kā darbs plaisas atvēršanai betonā, darbs noslogojot šķiedras plaisas atvēršanās sākumstadijā, plastiskās deformēšanas darbs un berze, šķiedras pārraušanas darbs.

1.modelis ņem vērā:

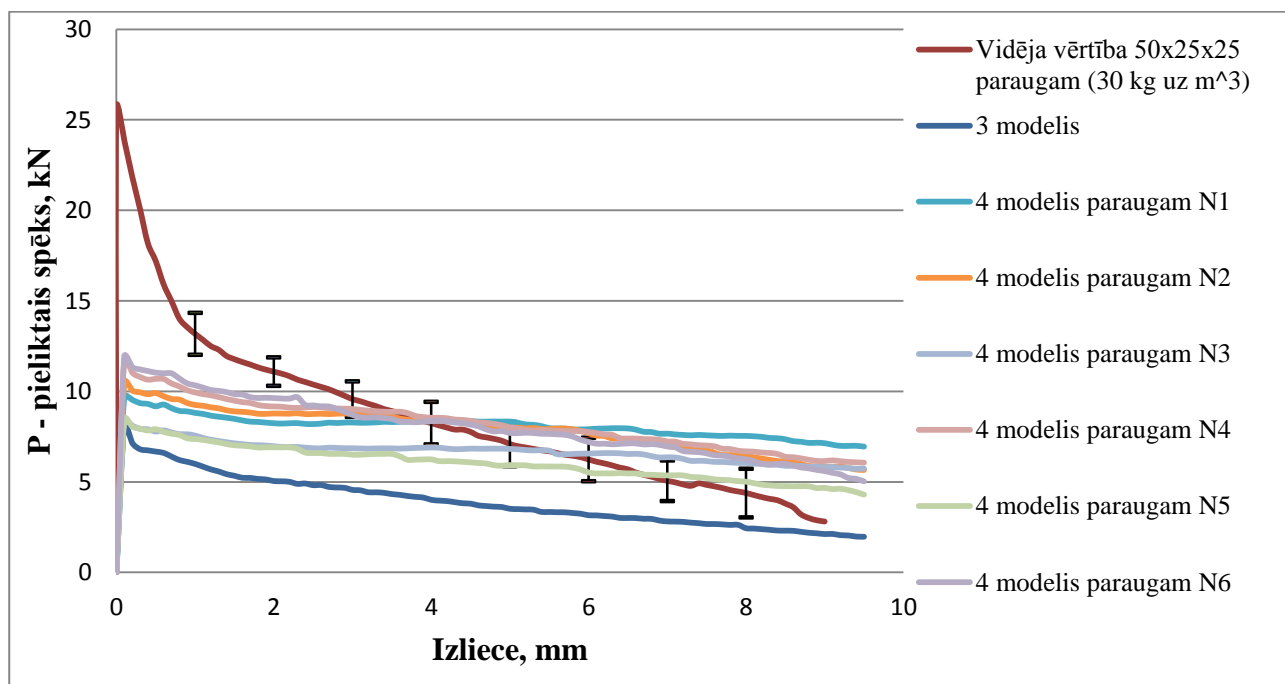
- imitē šķiedru nejaušo izvietojumu materiāla apjomā un atbilstoši plaisai;
- stohastiski vienmērīgu (vidēji) šķiedru sadalījumu visā apjomā, gan pēc slīpuma leņķiem, gan pēc izstieptajiem garumiem.

2.modelis ņem vērā:

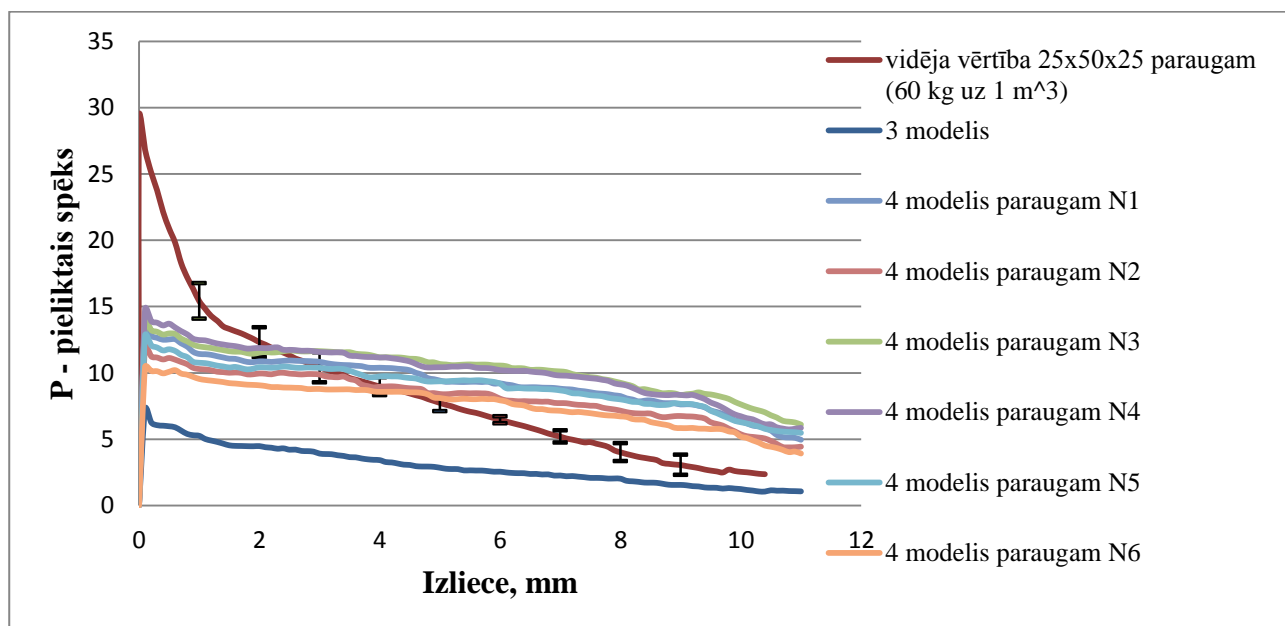
- šķiedru reālo daudzumu plaisā (tika aprēķināti pēc paraugu salūšanas);
- šķiedru reālo izvietojumu uz plaisas virsmas un katras šķiedras stāvokli augstuma ziņā (y);
- vismazāko leņķi attiecībā pret plaisas virsmu (α).

Salīdzinot divus modeļus, pirmā modeļa nesošā slodze ir lielāka, jo šķiedras izvietotas vienmērīgi un aprēķina šķiedru daudzums ir lielāks nekā 2.modelī, kurā tiek ņemts vērā patiesais šķiedru daudzums un haotiskais sadalījums. Nevienmērīgais sadalījums saistīts ar to, ka aktuālais slānis ir plāns (šķiedras garuma un parauga augstuma attiecība $\approx 1 \text{ κ } 3$) un lejot betonu no betona maisītāja veidojas šķiedru orientēšana un pavēršana pret horizontu. Mazāk dod konkrēta realizācija ar nevienmērīgu izvietojumu un šķiedru orientācija sakarā ar gradientu esamību plūsmas ātrumā (piepildot veidnes ar fibrobetonu (lejot fibrobetonu no augšas veidnes vidējā daļā) var atrasties zemāk (dot zemāku prizmas nestspēju lieces gadījumā), jo prizmā rodas „vājie” griezumi). Vājš griezums ir raksturīgs liels tādu šķiedru daudzums, kas orientētas zem leņķa tuvu 0° sakarā ar lielām nobīdes deformācijām šķidrā fibrobetonā liešanas laikā. Vājš griezums neveidojas 1.modelī ar vienmērīgu un haotisku šķiedru izkliedi pa koordinātēm un stūriem prizmas apjomā. Tā liecina, ka nestspēja ir minimāla, kas absolūti nav acīmredzams.

Tika iegūtas šādas līknes 26 mm garām taisnām tērauda šķiedrām, kuru diametrs ir 0.45 ± 0.5 mm [14]



1.28.att.Vidējo līknes spēks – vertikālā liece slāņainajiem fibrobetoniem ar taisno tērauda šķiedru koncentrāciju 30 kg/m^3 pēc testēšanas attiecībā uz 4 punktu lieci un modelēšana



1.29.att.Vidējo līknes spēks – vertikālā liece slāņainajiem fibrobetoniem ar taisno tērauda šķiedru koncentrāciju 60 kg/m^3 pēc testēšanas attiecībā uz 4 punktu lieci un modelēšana

Teorētiskie un eksperimentālie dati liecina, ka ir teorētisko datu sakritība ar eksperimentālo datu ticamības intervālu. Teorētiskie dati apraksta šķiedras paveikto darbu 4 punktu lieces gadījumā. Ir redzams, ka grafiku sākumā notiek pieliekamo spēku palielināšanās, bet pēc tam nestspējas samazināšanās pēc maģistrālās plaisas atvēršanās par $\approx 2.7 - 3$ mm. Turpmākā spēka piemērošana noved pie tā, ka šajā paraugā visas šķiedras tiks pārrautas un notiks parauga sabrukšana.

1.27.att. attēlota šķiedru darba 4 punktu liecei enerģija. Līdz ar šķiedru koncentrācijas palielināšanos palielinās darbs 4 punktu lieces gadījumā. Paraugiem ar 2kg/m^3 enerģija $\approx 2.88\text{ kN}\cdot\text{mm}$, tas ir par 71% mazāk nekā paraugiem ar 8kg/m^3 . Salīdzināsim vidējos eksperimentālos datus ar 3.modelī iegūtajiem datiem:

- a) 2kg/m^3 vidējā eksperimentālo datu enerģija $\approx 24.38\text{ kN}\cdot\text{mm}$, tas ir par $\approx 88\%$ mazāk nekā teorētiskajiem.
- b) 3kg/m^3 vidējā eksperimentālo datu enerģija $\approx 23.5\text{ kN}\cdot\text{mm}$, tas ir par $\approx 80\%$ mazāk nekā teorētiskajiem.
- c) 5kg/m^3 vidējā eksperimentālo datu enerģija $\approx 25.35\text{ kN}\cdot\text{mm}$, tas ir par $\approx 77\%$ mazāk nekā teorētiskajiem.
- d) 6kg/m^3 vidējā eksperimentālo datu enerģija $\approx 26.79\text{ kN}\cdot\text{mm}$, tas ir par $\approx 68\%$ mazāk nekā teorētiskajiem.
- e) 8kg/m^3 vidējā eksperimentālo datu enerģija $\approx 27.90\text{ kN}\cdot\text{mm}$, tas ir par $\approx 64\%$ mazāk nekā teorētiskajiem.

No a-e redzams, ka palielinoties šķiedru koncentrācijai palielinās šķiedru darbs un samazinās citu neuzskaitīto mehānismu darbs.

Atveroties plaisai $\approx 2.5\text{ mm}$ tiek novērota teorētisko datu sakrītība ar vidējiem eksperimentālajiem datiem [14]. Secinājums: ar 1. un 2.modelļa palīdzību var prognozēt, kāda nestspēja būs 30 mm garām polimēra makro šķiedrām ar diametru 0.55 mm 2.5 – 4 mm lieces gadījumā ar šķiedru koncentrāciju 2 kg/m^3 , 3 kg/m^3 , 5 kg/m^3 , 6 kg/m^3 , 8 kg/m^3 .

1.28.-1.29. grafikā aplūkoti slāņaino fibrobetonu ar taisno tērauda šķiedru 30 kg/m^3 un 60 kg/m^3 eksperimentālie un teorētiskie dati. 3.modelis attēlo mazāku prognozējamo fibrobetona nestspēju nekā 4.modelis. Salīdzinot ar eksperimentālajiem datiem, 3.modelī var redzēt, ka notiek tikai tuvošanās eksperimentālajiem datiem visā plaisas atvēršanās procesā. Tas saistīts ar to, ka 3.modelī nestspēja pull-out šķiedrām, kas atrodas perpendikulāri plaisas virsmai, ir mazāka (90° leņķī, skat. uz pull-out), nekā šķiedrām, kuras atrodas leņķī no 10° līdz 50° . Tātad modeļa, kas izmanto hipotēzi par to, ka visas šķiedras plaisas griezumā ir perpendikulāras tās malām, prognoze dod zemākas nestspējas, skat. 3.modelļa grafiku.

4.modelis apraksta šķiedru uzvedību plaisā, ņemot vērā slīpuma leņķi (α), šķiedras augstumu (y), kā arī izrautās šķiedras garumu (c). 4.modelis un eksperimentālie dati atrodas tuvāk cits citam, nekā 3.modelī. Tas saistīts ar to, ka eksperimentālā ceļā iegūtie dati attiecībā uz šķiedras orientāciju maģistrālajā plaisā ir tuvi reālajiem (patiesajiem) datiem. Secinājums: ar 3. un 4.modelļa palīdzību var paredzēt, kāda nestspēja būs 26 mm garām taisnajām tērauda šķiedrām, kuru diametrs ir 0.45 mm liecē no $\approx 1.5\text{ mm}$ (atkarībā no šķiedru koncentrācijas). Lai maksimāli precīzi pietuvotos eksperimentālajiem (patiesajiem) datiem, ir jāizanalizēto mehānismu darbību, kas nav iekļauti modeļos (darbs plaisas atvēršanai betonā, darbs šķiedru noslogojuma apstākļos plaisas atvēršanās sākumstadijā, darbs, kas saistīts ar šķiedras izraušanu (modelī ņemts vērā daļēji, nav ņemts vērā tas, kā uzvedas šķiedras, kas tika izrautas no betona garumā, kas pārsniedz pusi no pašas šķiedras garuma)).

SECINĀJUMI

1. Tika veikta makro un mikro polimēru un taisno tērauda šķiedru izraušanas no betona matricēs vispusīga izpēte. Tika noskaidrots, ka visas sintētiskās polimēra šķiedras plīst betonā, savukārt norautās „astes” tiek izvilktas ārā ar berzi, runājot par taisnām tērauda šķiedrām jāatzīmē, ka tās tiek izrautas no betona pilnībā (neviens šķiedra netika sarauta), tādējādi radot lielāku efektivitāti salīdzinājumā ar polimēra šķiedrām.
2. Tika parādīts, ka šķiedru izraušanas no betona matricēs rezultātā betonā novērojama šķiedras kanāla virsmas erozija, kas noved pie lielas šķiedras izraušanas spēka rādītāju izkliedes, gadījumā, kad šķiedras ir orientētas lielos slīpuma leņķos pret izvilšanas spēka virzienu.
3. Skaitliskās modelēšanas rezultātā tika parādīta vājo zonu rašanās iespēja (satur mazāku to šķiedru koncentrāciju, kā arī vairāk šķiedras ir orientētas perpendikulāri sijas garenasij). Skaitliskās modelēšanas rezultāti apstiprināti ar veikto rentgena analīzi.
4. Tika veikta plaisas virsmas analīze. Tika noteiktas katras šķiedras koordinātes uz plaisas virsmas un izveidoti grafiki, kuros atspoguļota izrauto šķiedru galu garumu un leņķu, attiecībā pret plaisas virsmu, sadales.
5. Eksperimentu rezultāti tika izmantoti noslogotu siju uzvedības modelēšanai maģistrālās plaisas atvēršanās režīmā.
6. Tika izstrādāti 4 skaitliskie modeļi, kas modelē sijas nestspēju maģistrālās plaisas atvēršanās režīmā. Tika iegūta eksperimentālo un teorētisko datu laba atbilstība lielas plaisas atvēršanās stadijā.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Habel K., Viviani M., Denarie E., Bruhwiler E. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), *Cement and Concrete Research* – 36 (2006), pp.1362-1370.
2. Sekhon JS (2010) Matching: multivariate and propensity score matching with balance optimization, R package version 4.7-11. <http://CRAN.R-project.org/package=Matching>. Accessed 5 April 2012
3. Krasnikovs A., Kononova O., Khabbaz A., Machanovsky E., Machanovsky A. „*Post – Cracking Behavior of High Strength (Nano Level Designed) Fiber Concrete Prediction and Validation*”. Nanotechnology in Construction 4th International Symposium”, Agios Nikolaos, Crete, Greece, May 20-22, 2012, pp.1-6
4. Kooiman A. (2000) Modelling Steel Fiber Reinforced Concrete for Structural Design. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, CN Delft, Netherlands.
5. Toutanji, H. and Bayasi, Z., 'Effect of manufacturing techniques on the flexural behaviour of steel fiber-reinforced concrete', *Cem. Concr. Res.* 28 (1), 1998, pp. 115-124.

6. R. Gettu*, D.R. Gardner, H. Saldivar and B.E. Barragfin Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens *Materials and Structures* January–February 2005, Volume 38, Issue 1, pp 31-37
7. Edgington, J. and Hannant, D.J., 'Steel fibre reinforced concrete. The effect on fibre orientation of compaction by vibration', *Mater. Struct.* 5 (25) (1972) 41-44.
8. Г. И. Гончаков, Ю. М. Баженов Строительные материалы М.Стройиздат, 1986. 688.стр.
9. Heiko Herrmann, Marika Eik Some Comments on The Theory of Short Fibre Reinforced Materials. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2011, 60, 3, 179–183
10. А. Н. Зайдель Элементарные оценки ошибок измерений Ленинград, 1968. 25-40 стр.
11. Neville A.M. (1981) *Properties of Concrete*. 3rd ed. New York: Pitman Publishing. 779 p.
12. Виктор Мещерин. Предупреждение трещинообразования в бетоне с помощью фиброармирования. Бетонные изделия. Бетон и железобетон'12 N1 (6) 2012.г.
13. Kononova O., Krasnikovs A., Pupurs A. High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Strength. Prediction and Experimental Investigation, 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, (2008), pp.543-548.
14. MATLAB Release 7.9, (2009).
15. Fischer G. Structural Applications of Engineered Cementitious Composites (ECC). In: *Ultra-ductile concrete with short fibres: Development, Testing, Applications*, V. Mechtcherine (ed.), ibidem Verlag, pp. 2005, 121 – 133.
16. Krasnikovs A., Kononova O., Eiduks M., Kalinka J., Kharkova G., Galushchak A., Machanovsky A. „*Fiber orientation in viscous fluid flow with and without vibration*”. „*Journal of Vibroengineering*” Volume12, Issue 4, ISSN 1392-8716, Kaunas, Lithuania, December 2010.g, pp. 523-532.
17. Lappa, E. S. High Strength Fibre Reinforced Concrete: Static and Fatigue Behaviour in Bending. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2007.

Artūrs Mačanovskis

**ĪSO ŠĶIEDRU KOMPOZĪTU IEKŠĒJĀS ĢEOMETRIJAS IETEKME UZ
MATERIĀLA NESTSPĒJU UN SABRUKŠANU**

Promocijas darba kopsavilkums

Parakstīts iespiešanai 2014.25.04. Reģ. apl. Nr. 2-0282.
Formāts 60x84/16. Ofseta papīrs. Ofseta papīrs. 2,00 iesp.l.,
1,32 uzsk.izd.l. Metiens 30 eks. Pasūt. Nr. 29.
Iespiests RTU tipogrāfijā, Rīga LV-1658, Kaļķu ielā 1.