

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Būvražošanas katedra

Vitālijs LŪSIS

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorants

**NEHOMOĢĒNĀ UN ORIENTĒTĀ FIBROBETONA
MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

**Promocijas padome “RTU P-03”
Mehānikas nozares polimēru un
kompozītmateriālu mehānikas apakšnozarē**

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing.
V. Ā. LAPSA

**RTU Izdevniecība
Rīga 2015**

Lūsis V. Nehomogēnā un orientētā fibrobeta mehānisko īpašību izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015. — 34 lpp.



*Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā
«Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».*

ISBN 978-9934-10-677-4

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
(mehānikas nozares polimēru un
kompozītmateriālu mehānikas apakšnozarē)
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu (mehānikas nozares polimēru un kompozītmateriālu mehānikas apakšnozarē) doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. g. 15. maijā 14.00, Kaļķu ielā 1, 119. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Inženierzinātņu doktors, Igors Tipāns
Rīgas Tehniskā universitāte (RTU), Latvija

LZA īstenais loceklis, Dr.habil.sc.ing. Juris Jansons
Latvijas Universitātes Polimēru mehānikas institūts (LU PMI), Latvija

Materiālzinātņu doktors, Rimvydas Stonys
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte (VGTU), Lietuva

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.

Vitālijs Lūsis _____ (Paraksts)

Datums: _____

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 5 pielikumus un 245 attēlus, kopā 195 lappuses. Literatūras sarakstā ir 190 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

SATURA RĀDĪTĀJS	4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Promocijas darba pamatojums	5
Tēmas aktualitāte	5
Praktiskais pielietojums	6
Darba mērķi	6
Pētījuma uzdevumi	6
Aizstāvēšanai tiek izvirzīts	7
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	8
Zinātniskās konferences	8
Zinātnisko publikāciju saraksts	10
Izgudrojuma patenti	13
PROMOCIJAS DARBA SATURS	14
SECINĀJUMI	29
TEHNOLOĢISKIE IETEIKUMI	31
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	34

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Promocijas darba pamatojums

Šodien galvenais betona attīstības virziens pasaulē ir tā spiedes stiprības straujš pieaugums, kas ļauj no betona veidot jaunas plānsieniņu konstrukcijas ar daudz mazāku tā patēriņu, vieglākas un lētākas nekā no tradicionāla betona. Ir vērts atzīmēt, ka reizē ar šādu stiprības pieaugumu mainās arī citas betona deformatīvās īpašības — pieaug tā elastības modulis (virs 45 GPa), samazinās Puasona koeficients (zem 0,15) — samazinās robeždeformācija zem 0,25–0,35 %. Pieaug pieprasījums pēc betona ar augstu stiepes stiprību un augstu nestspēju plaisāšanas posmā. Viens no efektīviem paņēmieniem, kurš ļauj apmierināt augšminētās prasības, ir īso šķiedru jeb šķiedru iekļaušana betonā, iegūstot fibrobetonu. Dispersi iekļautas šķiedras var būt pielietotas kombinējot tās ar tradicionālo stiegrojumu, kā arī lietojot bez tā.

Tēmas aktualitāte

Esošā fibrobetona lietošanas tehnoloģija ir vienkārša — šķiedras samaisa ar visām pārējām betona komponentēm, iekļāj konstrukcijas veidnī un sagaida sacietēšanu. Tādu konstrukciju projektēšana, tāpat kā to zinātniskā izpēte, bāzējas uz kļūdainas hipotēzes, ka maisījumā šķiedras ar vienādu varbūtību ir vērstas katrā no trim savstarpēji perpendikulāriem virzieniem telpā, respektīvi, ka fibrobetons ir mehāniski izotrops. Un otrais — nevajadzīgs mērķis ir, kad maisīšanas rezultātā cenšas panākt homogēnu šķiedru sadalījumu maisījuma tilpumā. Realitāte reizēm būtiski atšķirās no pieņemtās hipotēzes un mērķiem. Pēc samaisīšanas ar maisījumu tiek veiktas vairākas ar lielām bīdes deformācijām saistītas operācijas — sūknēšana, transportēšana, izplūde no cauruļvada veidnī radiālā orientācija, noblīvēšana ar vibratoru, kura svārstību amplitūda parasti ir aploces veidā un izraisa betona maisījuma cirkulāru plūsmu ap to. Šie procesi izraisa nekontrolējamu un nevadāmu šķiedru pārvietošanos betonā un to orientāciju maisījuma noteiktajās vietās. Šo procesu lokalizācijai ir gadījuma raksturs, atbilstoši tam, kur atrodas betona padošanas caurules atvere konstrukcijas veidnī. Skatoties no otras puses, konstrukcijas lieces gadījumā, stiepes spriegumu sadalījums konstrukcijā arī nav viendabīgs, tādēļ prasība pēc stiegrojošo elementu vienmērīga sadalījuma konstrukcijā ar haotisku šo elementu telpisku orientāciju, ir apriori neracionāla un neekonomiska, jo paredz dārgo šķiedru ieslēgumus tādās konstrukcijas joslās, kur tās nepilda slodzi nesošo funkciju.

Praktiskais pielietojums

Ir zināmi daži mēģinājumi izveidot šķiedru struktūru atbilstošu stiepes spriegumu orientācijai un to sadalījumam betonā. Taču RTU Betona mehānikas laboratorijā veiktie teorētiskie un eksperimentālie pētījumi un RTU izgudrojumu patenti apliecina, ka ar ekonomiski konkurētspējīgām metodēm ir iespējams panākt šķiedru sadalījumu betonā, piemēram: LV14257, šķiedru orientāciju jebkurā iepriekš noteiktā virzienā (šķiedru 1D orientāciju) LV14540, LV14684, LV14667, LV14849, šķiedru 2D orientāciju plānsieniņu konstrukcijās: LV14308, LV14408. Nehomogēnā fibrobeta būtiski lielāku lieces stiprību apliecina atbilstošu slāņainu paraugu lieces testi. Tie parāda arī pretēju pozitīvu efektu — priekš vienas un tās pašas lieces stiprības sasniegšanas nehomogēnā fibrobeta ir nepieciešams būtiski mazāks šķiedru patēriņš un otrādi — pie viena šķiedru patēriņa var ievērojami pacelt konstrukcijas slodzes nestspēju.

Zinātniskā novitāte

Eksperimentāli un veicot skaitlisko modelēšanu, izpētīts plaisāšanas process nehomogēnās (ar šķiedru sadalījumu slāņos) fibrobeta prizmās pie lieces un noteikts to racionālais izvietojums.

Eksperimentāli izpētīts nestspējas mehānisms fibrobeta ar paralēlo šķiedru orientāciju un tā plaisāšanas process pie lieces. Eksperimentā tika pierādīta nehomogēno fibrobeta augstāka nestspēja salīdzinājumā ar tradicionāliem fibrobeta (ar šķiedru haotisko izvietojumu un orientāciju).

Darba mērķi

Izpētīt nehomogēno fibrobeta nestspēju pie lieces un salīdzināt to ar homogēno fibrobeta līdzīgo īpašību.

Radīt tehnoloģijas un ierīces nehomogēno fibrobeta ar augsto nestspēju pie lieces izgatavošanu.

Izmantot fibrobeta plānsieniņu konstrukcijās un radīt plānsieniņu konstrukciju izgatavošanas tehnoloģiju.

Pētījuma uzdevumi

Salīdzināt nehomogēno fibrobeta konstrukciju (siju) nestspēju ar konstrukciju nestspēju no tradicionāla fibrobeta (ar haotisko šķiedru sadalījumu konstrukcijas tilpumā), izgatavojot un eksperimentāli testējot sijas uz lieci līdz sagraušanai;

Izpētīt mehāniskās īpašības fibrobetonam ar nehomogēno tērauda šķiedru sadalījumu konstrukcijas tilpumā pie lieces, to plaisāšanas stadijā, eksperimentāli un veicot datormodelēšanu;

Izstrādāt būvelementu ar nehomogēno šķiedru sadalījumu un orientāciju fibrobetonā izgatavošanas tehnoloģijas;

Izstrādāt jaunu fibrobetona čaulu izveidošanas tehnoloģiju.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts

- Homogēnu un nehomogēnu fibrobetonu eksperimentālo pārbaužu rezultāti, kuri pierādīja nehomogēno fibrobetonu augstāko nestspēju pie lieces, gadījumos ar vienādu šķiedru daudzumu.
- Izstrādātais skaitliskais modelis un tā realizācijas rezultāti modelējot homogēno un nehomogēno fibrobetonu nestspēju plaisāšanas stadijā.
- Divas jaunas nehomogēno fibrobetonu izgatavošanas tehnoloģijas, kā arī jaunas ierīces to realizēšanai.
- Plānsieniņu fibrobetonu čaulu izgatavošanas tehnoloģija.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Zinātniskās konferences

1. **Lūsis, V.**, Dimants, S., Berziņš, R., Zaleskis, J. Plānsieniņu čaulu tehnoloģija veidņos ar maināmu ģeometriju. XX Scientific and Technical Conference of the Latvian Concrete Association. 26. May, 2011, Riga, Latvia.
2. **Lūsis, V.**, Lapsa, V. Betona čaulu izgatavošanas tehnoloģija pneimatiskos veidņos ar maināmu pacēlumu. Riga Technical University 52rd International Scientific Conference. 13. October, 2011, Riga, Latvia.
3. Krasņikovs, A., **Lūsis, V.**, Mačanovskis, E., Zaleskis, J., Pupurs, A., Mačanovskis, A., Galusčaka, A., Zaharevskis, V., Lapsa, V., Kononova, O., Khabaz, A. Plānsieniņu konstruktīvie elementi no fibrobetona. Izgatavošanas tehnoloģija un mehāniskās īpašības. Inovāciju un jauno tehnoloģiju konference. 3. April, 2012, Riga, Latvia.
4. Krasņikovs, A., Lapsa, V., **Lūsis, V.**, Zaharevsky, V., Machanovsky, E. Harjkova, G. Mechanical Properties of Layered Fiberconcrete Structure. Seventeenth International Conference Mechanics of Composite Materials. May 28 – June 1, 2012, Riga, Latvia.
5. Krasņikovs, A., Lapsa, V., **Lūsis, V.**, Zaharevsky, V., Machanovsky, E. Thin Concrete Shells Reinforced with Glass Fibers. Manufacturing Technology and Mechanical Properties. Seventeenth International Conference Mechanics of Composite Materials. May 28 – June 1, 2012, Riga, Latvia.
6. **Lūsis, V.**, Macanovskis, A., Galuscaka, A., Losevs, A., Krasņikovs, A. About Possibility to Predict Fibers Orientation and Distribution in Viscous Flow. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference. 11–12 October, 2012, Riga, Latvia.
7. **Lūsis, V.**, Machanovskis, A., Harjkova, G., Kononova, O., Krasņikovs, A. Fiberconcrete with Non-Homogeneous Fibers Distribution. 55th International Scientific Conference of Daugavpils University. April 10–12, 2013, Daugavpils, Latvia.
8. **Lūsis, V.** Technology for concrete shells fabrication reinforced by glass fibers. 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13". 16–17 May 2013, Jelgava, Latvia.
9. **Lūsis, V.**, Krasņikovs, A. Bending strength of layered fiberconcrete prisms. 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13". 16–17 May 2013, Jelgava, Latvia.

10. **Lusis, V.**, Harjkova, G., Machanovskis, A., Kononova, O., Krasnikovs, A. Fracture of layered fiberconcrete with non-homogeneous fiber distribution. 12th International Scientific Conference Engineering for rural development. May 23–24, 2013, Jelgava, Latvia.
11. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Layered fiberconcrete with non-homogeneous fibers distribution. 8th International Conference MET-2013 “Materials, Environment, Technology”. June 19–20, 2013, Riga, Latvia.
12. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Concrete thin-walled shells production technology. 8th International Conference MET-2013 “Materials, Environment, Technology”. June 19–20, 2013, Riga, Latvia.
13. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Fiberconcrete with non-homogeneous fibers distribution. 9th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources.” June 20–22, 2013, Rezekne, Latvia.
14. **Lusis, V.** Formwork with variable geometry for concrete shells production technology. 9th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources.” June 20–22, 2013, Rezekne, Latvia.
15. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Mechanical Properties of Layered Fiberconcrete. 15th International Conference-School "Advanced Materials and Technologies". 27–31 August, 2013, Palanga, Lithuania.
16. **Lūsis, V.**, Krasņikovs, A. Nehomogēna fibrobetona būvnieciskās īpašības. XXII Scientific and Technical Conference of the Latvian Concrete Association. 26 September, 2013, Riga, Latvia.
17. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Failure of fiberconcrete beam having layered structure. International Conference Innovative Materials, Structures and Technologies. November 8, 2013, Riga, Latvia.
18. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Non-Homogeneous Layered Fiberconcrete. International Science Conference — International Science Conference "International Research and Innovation". April 28–29, 2014, Paris, France,
19. **Lusis, V.**, Macanovskis, A., Kononova, O., Krasnikovs, A. Layered fiberconcrete element strength. Eighteenth international conference on Mechanics of Composite Materials. June 2–6, 2014, Riga, Latvia.
20. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. High Efficiency Nano Concrete with polymer fiber in thin Wall Shell Structures. 16th International Conference — School "Advanced Materials and Technologies". 27–31 August, 2014, Palanga, Lithuania.

21. **Lusis, V.**, Lapsa, V., Krasnikovs, A. Non-homogeneous fiber reinforced concrete with steel fiber. Riga Technical University 55 International Scientific Conference. 7 October, 2014, Riga, Latvia.
22. **Lusis, V.**, Lapsa, V., Krasnikovs, A. Fiber orientation method in fiberconcrete. Riga Technical University 55 International Scientific Conference. 7 October, 2014, Riga, Latvia.

Zinātnisko publikāciju saraksts

1. **Lusis, V.**, Harjkova, G., Machanovskis, A., Kononova, O., Krasnikovs, A. Fracture of layered fiberconcrete with non-homogeneous fiber distribution. In: 12th International Scientific Conference Engineering for rural development, Jelgava, Latvia, May 23–24, 2013. pp. 273–277. ISSN 1691-5976. (Indexed by SCOPUS and EBSCO data bases).
2. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Fiberconcrete with non-homogeneous fibers distribution. In: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources.”, Volume II, Rezekne higher education institution, Faculty of engineering, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2013, pp. 67–71. ISSN 1691-5402. (Indexed by SCOPUS and AGRIS data bases).
3. **Lusis, V.** Formwork with variable geometry for concrete shells production technology. In: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources.”, Volume II, Rezekne higher education institution, Faculty of engineering, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2013, pp. 63–66. ISSN 1691-5402. (Indexed by SCOPUS and AGRIS data bases).
4. Krasnikovs, A., Zaharevskis, V., Kononova, O., **Lusis, V.**, Galushchak, A., Zaleskis, E. Fiber Concrete Properties Control by Fibers Motion Investigation in Fresh Concrete During Casting. In: Proceedings of 8th International Conference of DAAAM Baltic industrial engineering, Estonia, Tallinn, April 19–21, 2012, pp. 657–662. ISBN 978-9949-23-265-9. (Indexed by SCOPUS and ISI Web of Science data bases).
5. Krasnikovs, A., Kononova, O., Kharkova, G., Zalesskis, J., **Lusis, V.**, Zaharevskis, V., Rucevskis, S. Mechanical Properties Characterization of Composites Reinforced by Knitted Fabrics. In: ICEM15: CD — Conference Proceedings of 15th International Conference on Experimental Mechanics ICEM15, Portugal, Porto, July 22–27, 2012, 17 p. ISBN 978-972-8826-26-0.

6. **Lusis, V.** Technology for concrete shells fabrication reinforced by glass fibers. In: 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13" Proceeding Part I, Latvia, Jelgava, 16 and 17 May 2013. pp.112–116. ISSN 2255-7776, e-ISSN 2255-8861. (Indexed by AGRIS data base).
7. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Bending strength of layered fiberconcrete prisms. In: 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13" Proceeding Part I, Latvia, Jelgava, 16 and 17 May 2013. pp.117–121. ISSN 2255-7776, e-ISSN 2255-8861. (Indexed by AGRIS data base).
8. Machanovskis, A., **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Polymer fiber pull out experimental investigation. In: 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13" Proceeding Part I, Latvia, Jelgava, 16 and 17 May. 2013, pp. 104–111. ISSN 2255-7776, e-ISSN 2255-8861. (Indexed by AGRIS data base).
9. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Failure of fiberconcrete beam having layered structure. In: Proceedings of the International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. Latvia, Riga, November 8, 2013, pp. 94–100. RTU Press, Riga 2014. ISBN 978-9934-10-584-5 (online), doi: 10.7250/iscconstrs.2014.10.
10. Harjkova, G., **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Experimental investigation of weft knitted fabric layered reinforcement efficiency in fiberconcrete. In: Proceedings of the International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. Latvia, Riga, November 8, 2013, pp. 59–63. RTU Press, Riga 2014. ISBN 978-9934-10-584-5 (online), doi: 10.7250/iscconstrs.2014.10.
11. Krasnikovs, A., Kononova, O., **Lusis, V.** Mechanical properties of fiberconcrete having layered structure. In: Concrete and Reinforced Concrete — Glance at Future III All — Russia (International), Conference on Concrete and Reinforced Concrete. Moscow, Russia, 12–16 May 2014. pp. 218–227. ISBN 978-5-72-64-0809-5.
12. Kononova, O., Krasnikovs, A., Harjkova, G., **Lusis, V.** Numerical simulation of mechanical properties for composite reinforced by knitted fabric. In: Ebook Congreso Mundial TOMO IV, 5th. European Conference on Computational Mechanics (ECCM V). Spain, Barcelona, 20–25 July, 2014. Barcelona, Spain: July 20–25. 2014, pp. 2925–2932. ISBN 978-84-942844-7-2. (Indexed by SCOPUS data base).
13. Kononova, O., **Lusis, V.**, Galushchak, A., Krasnikovs, A., Macanovskis, A. Numerical modeling of fiber pull-out micromechanics in concrete matrix composites. Journal of Vibroengineering. 2012, vol. 14, issue 4. pp. 1852–1861. ISSN 1392-8716. (Indexed by SCOPUS and EBSCO data bases).

14. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Non-Homogeneous Layered Fiber Reinforced Concrete. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 88, International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering, Vol: 8, No: 4, 2014, pp. 92–97. ISSN 1307-6892.
15. Macanovskis, A., **Lusis, V.**, Krasnikovs, A. Crack Opening Investigation in Fiberconcrete. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 88, International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering, Vol: 8, No: 4, 2014, pp. 102–109. ISSN 1307-6892.
16. **Lusis, V.** Production Technology for Concrete Shells Using Pneumatic Formwork with Variable Elevation. Scientific Journal of Riga Technical University. Construction Science, Volume II, Part 12. 2011, pp. 35–39. ISSN 1407-7329. (Indexed by EBSCO and AGRIS data bases).
17. Krasnikovs, A., Machanovskis, A., **Lusis, V.**, Lapsa, V., Zaharevskis, V., Machanovskis, E. Short fibers distribution investigation in fiber concrete. Scientific Works of Riga Technical University. Mechanical Engineering and Mechanics. 2012, pp. 54–62. ISBN 978-9984-9990-7-4.
18. Krasnikovs, A., **Lusis, V.**, Lapsa, V., Zaleskis, J., Zaharevskis, V., Machanovskis, E. Concrete shells reinforced by glass fibers. Scientific Works of Riga Technical University. Mechanical Engineering and Mechanics. 2012, pp. 63–69. ISBN 978-9984-9990-7-4.
19. **Lusis, V.**, Krasnikovs, A., Boiko, I., Gerina-Ancane, A. Concrete with Nano-Additives in thin Wall Shell Structures. RTU Zinātniskie raksti: Mašīnzinātne un transports/Ražošanas tehnoloģija, 6. sērija, 2013, pp. 46–52. ISSN 1407-8015.

Iesniegtās publikācijas (pieņemtas publicēšanai)

20. Kononova, O., Galuščaka, A., **Lūsis, V.**, Mačanovskis, A., Teļnova, I., Krasņikovs, A. Skaitliskā modelēšana elastīgi-plastiskās šķiedras izraušanai no elastīgas matricas. RTU Zinātniskie raksti: Mehānika. Mašīnzinātne un transports, 6. lpp. ISSN 1407-8015. Pieņemts publicēšanai.
21. Zaleskis, J., Krasņikovs, A., **Lūsis, V.**, Zaharevskis, V., Harjkova, G., Teļnova, I., Mačanovskis, A. Telpiski stiegroti kompozīta materiāli ar trauslu matricu. RTU Zinātniskie raksti: Mehānika. Mašīnzinātne un transports, 5. lpp. ISSN 1407-8015. Pieņemts publicēšanai.

22. Kononova, O., Krasņikovs, Harjkova, G., A., **Lūsis, V.**, Macanovskis, A. Strength of composite materials reinforced by 3 D knitted fabrics. Journal of Vibroengineering. 11 p. ISSN 1392-8716. (Indexed by SCOPUS and EBSCO data bases). Pieņemts publicēšanai.

Recenzētas starptautisko konferenču tēzes (kopsavilkumi) — 31

Izgudrojuma patenti

1. Lapsa, V., Žviriņš, A., **Lūsis, V.**, Krasņikovs, A., Mačanovskis, A. Betona plānsienu čaulu veidošanas tehnoloģiskais paņēmieni. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14308, 20.06.2011.
2. **Lūsis, V.**, Lapsa, V., Krasņikovs, A. Betona sedlveida čaulas veidošanas tehnoloģiskais process. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14408, 20.01.2012.
3. Lapsa, V., Krasņikovs, A., **Lūsis, V.** Pastveidīgu materiālu reoloģiskās testēšanas paņēmieni. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14530, 20.07.2012.
4. Lapsa, V., Krasņikovs, A., **Lūsis, V.** Fibrobeta orientētas stiegrošanas paņēmieni un ierīce. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14540, 20.09.2012.
5. Lapsa, V., Krasņikovs, A., **Lūsis, V.**, Koltuškins, V. Fibrobeta konstrukciju slodzes nestspējas atjaunošanas paņēmieni. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14544, 20.09.2012.
6. **Lūsis, V.**, Lapsa, V., Krasņikovs, A. Fibrobeta konstrukciju orientētas stiegrošanas paņēmieni. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14667, 20.06.2013.
7. Harjkova, G., **Lūsis, V.**, Kononova, O., Krasņikovs, A. Betona un fibrobeta konstrukciju stiegrošanas paņēmieni. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14679, 20.07.2013.
8. **Lūsis, V.**, Krasņikovs, A. Ierīce šķiedru orientēšanai fibrobeta. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14684, 20.07.2013.
9. **Lūsis, V.**, Krasņikovs, A., Lapsa, V. Ierīce šķiedru ieklāšanai fibrobeta un tās lietošanas paņēmieni. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14849, 20.06.2014.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darbs sastāv no 4 galvenajām nodaļām.

Pirmā nodaļa sākas ar literatūras apskatu, kurā tiek pamatota nepieciešamība veikt nehomogēnā un orientētā fibrobetona mehānisko īpašību izpēti.

Otrajā nodaļā tika aprakstītas pētījumu metodes, materiāli un pētījumos izmantotās ierīces.

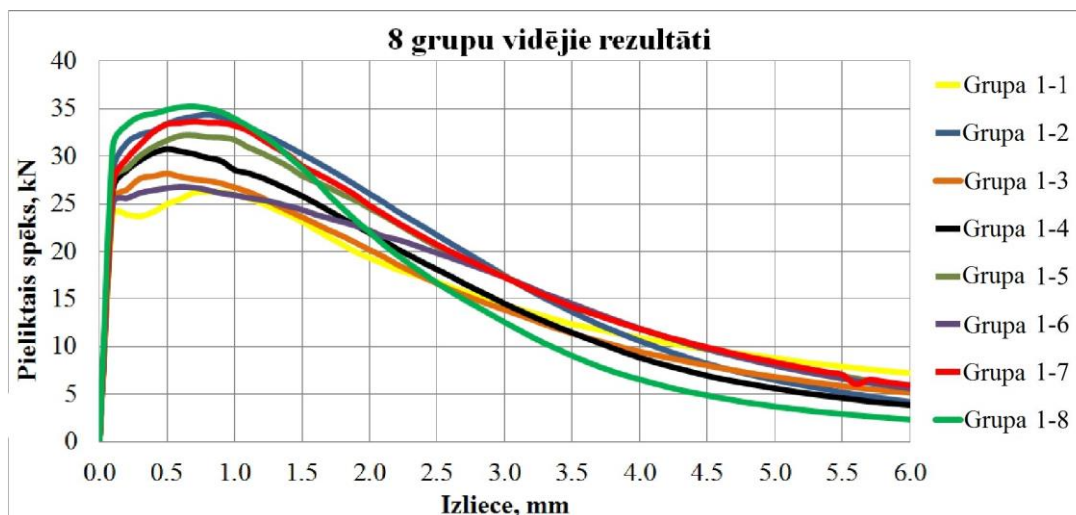
Trešajā nodaļā tika veikta nehomogēnā un orientētā fibrobetona testēšana, veicot rezultātu analizēšanu un salīdzināšanu, kā arī mehānisko īpašību izpēti. Eksperimentos tika mainīta fibrobetona paraugu slāņu ģeometrija un šķiedru procentuālais saturs slāņos (eksperimentos tika izmantotas dažādas ģeometrijas šķiedras). Aprakstīti fibrobetona prizmu četru punktu lieces testu rezultāti. Tika veikts eksperiments ar orientēta fibrobetona rentgena caurstarošanu un attēlu analīzi. Tika noteiktas orientēta fibrobetona „vājās” zonas, kuras radās vibrāciju ietekmē. Veikta eksperimentāla programma, tika aprobēti četri dažādu veidu jauni paņēmieni šķiedru sadalījumam un šķiedru orientācijai. Tika aprobētas arī jaunas šķiedru sadalījuma un šķiedru orientācijas ierīces.

Ceturtajā nodaļā tika veikta eksperimentālo čaulu modelēšana programmā SOLIDWORKS. Tika izstrādāts skaitliskais algoritms MATLAB programmā liektu fibrobetona siju nestspējas prognozēšanai.

Fibrobetona ar iepriekš organizētu šķiedru struktūru izveidošana, balstoties uz izgudrojumu „Nehomogēna fibrobetona konstrukciju veidošanas tehnoloģiskais process un ierīce tā īstenošanai”

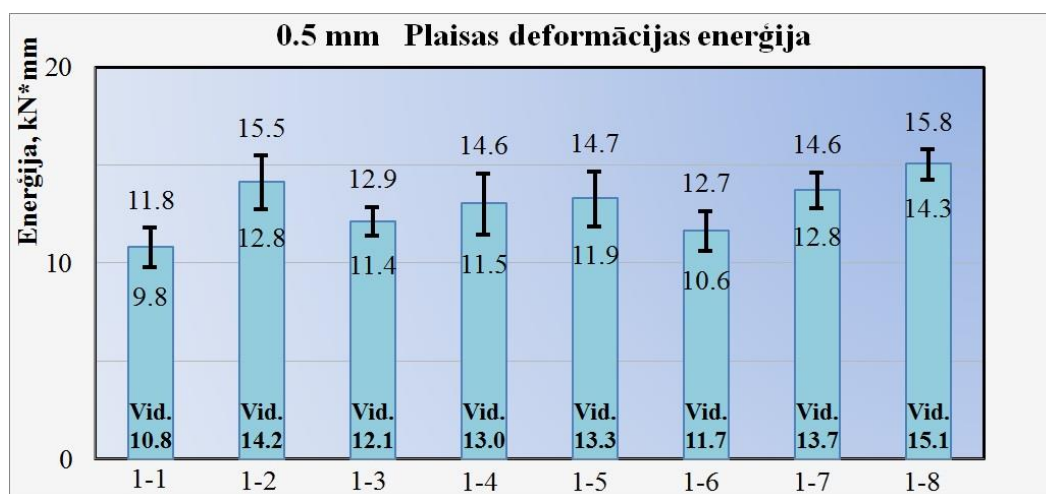
Tika veikta fibrobetona ar iepriekš organizētu šķiedru struktūru izveidošana, balstoties uz LR izgudrojumu LV14257 „Nehomogēna fibrobetona konstrukciju veidošanas tehnoloģiskais process un ierīce tā īstenošanai” [5]. Eksperimenta ietvaros betona maisījumu iepilda veidnī līdz nepieciešamajam līmenim, tad seko šķiedru dozēta un vienmērīga uzkaisīšana uz betona augšējās virsmas, pēc tam veic šķiedru iespiešanu betona maisījumā līdz uzdotam līmenim. Šo operāciju veic ar režģi, kurš satur vertikālas šūnas un kuru lielākais izmērs ir mazāks par šķiedru garumu, bet to mazākais izmērs ir lielāks par betona pildvielu graudu lielāko izmēru. Režģis šķiedru iespiešanas laikā tika vibrēts. Šķiedras tika iestrādātas 8 dažādos veidos (grupās), kopējais šķiedru daudzums visās grupās ir identisks 60 kg/m^3 .

Paraugi tika notestēti 4-punktu liecē. Paraugi, kuri saturēja lielāko šķiedru koncentrāciju, prizmu stiepes zonā uzrādīja augstāku nestspēju (sk. 1. att.).



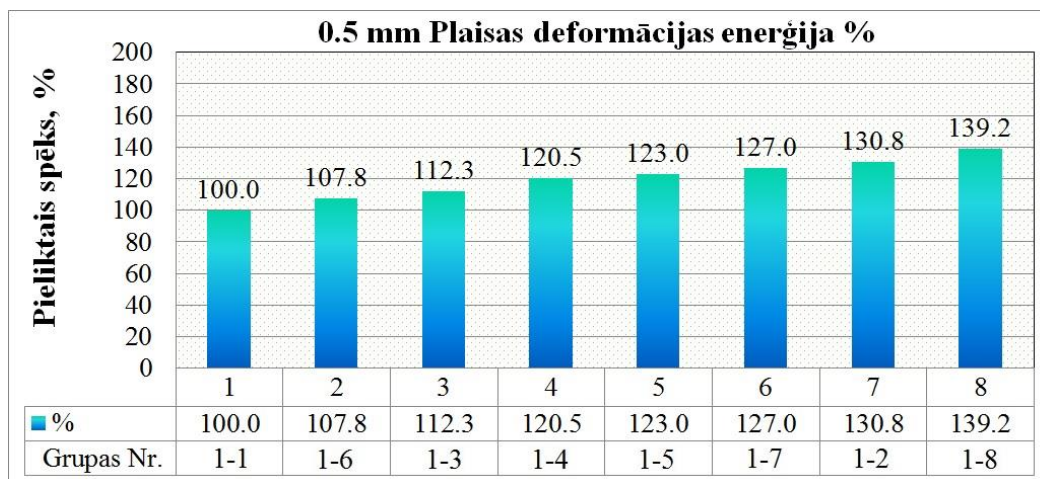
1. att. Spēka un pārvietojuma vidējās līknes Grupām no 1-1 līdz 1-8

Tika noteikta fibrobeta deformācijas enerģija $F-\epsilon$ un izkliede (sk. 1. un 2. att.). No diagrammām redzams, ka paraugi ar haotisku šķiedru sadalījumu no Grupas 1-1 uzrāda viszemāko maksimālo slodzi un viszemāko deformācijas enerģijas patēriņu plaisu atvēršanas stadijā, salīdzinot ar slāņainiem paraugiem no Grupām 1-2–1-8, kur šķiedras tika sadalītas noteiktajos parauga slāņos.



2. att. Deformācijas enerģija un ticamības robežas (plaisas atvēršanai patērētās enerģijas vidējās vērtības) Grupām 1-1–1-8

Diagrammā 3. att. procentuāli vidējā deformācijas enerģija Grupas 1-1 pie izlieces 0,5 mm tika pieņemta kā 100 %, tad attiecīgi Grupām 1-2–1-8 paraugi sasniedz no 107,8 % līdz 139,2 % no homogēno paraugu lieces stiprības rādītājiem.



3. att. Deformācijas enerģija procentos

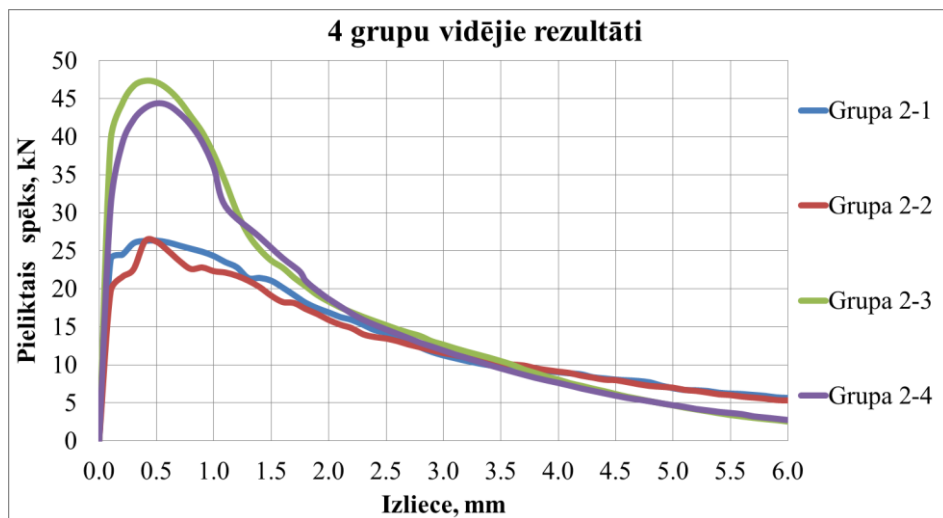
Fibrobetona ar iepriekš organizētu šķiedru struktūru izveidošana, balstoties uz izgudrojumu „Fibrobetona konstrukciju orientētas stiegrošanas paņēmieni” un „Ierīce šķiedru orientēšanai fibrobetonā”

Tika veikta fibrobetona ar iepriekš organizētu šķiedru struktūru izveidošana, balstoties uz LR izgudrojumu LV14667 „Fibrobetona konstrukciju orientētas stiegrošanas paņēmieni” [9] un LR izgudrojumu LV14684 „Ierīce šķiedru orientēšanai fibrobetonā” [10]. Eksperimenta ietvaros ārpus fibrobetona konstrukcijas tika veikta šķiedru orientācija, izveidoti paraugi ar šķiedrām, ievadītām iepriekš noteiktā paraugu stieptajā zonā, galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā, maksimāli tuvu lielāko stiepes spriegumu atrašanās līmenim.

Šķiedras tika iestrādātas četros dažādos veidos (grupās), kopējais šķiedru daudzums visās grupās ir identisks $54,4 \text{ kg/m}^3$. Katrā grupā 6 paraugi. Kopā tika izveidoti 24 paraugi ar tērauda šķiedrām. Fibrobetona paraugu izgatavošanai tika sagatavoti šķiedru fiksatori. Kopā tika sagatavoti 72 „šķiedru fiksatori” ar noteiktajā leņķī iestrādātām šķiedrām, katrā paraugā tika iestrādāti 4 šādi fiksatori. Fiksatoros ar šķiedrām tika iestrādātas 140 šķiedras: 24 gb. fiksatori ar šķiedru orientāciju 90° pret paredzamo plaisu virzienu (stiepes spēku virzienā), 24 gb. fiksatori ar šķiedru orientāciju 75° pret paredzamo plaisu virzienu (stiepes spēku virzienā), 24 gb. fiksatori bez šķiedrām. Šķiedras fiksatoros tika iestrādātas pamīšus ar pārsegumu.

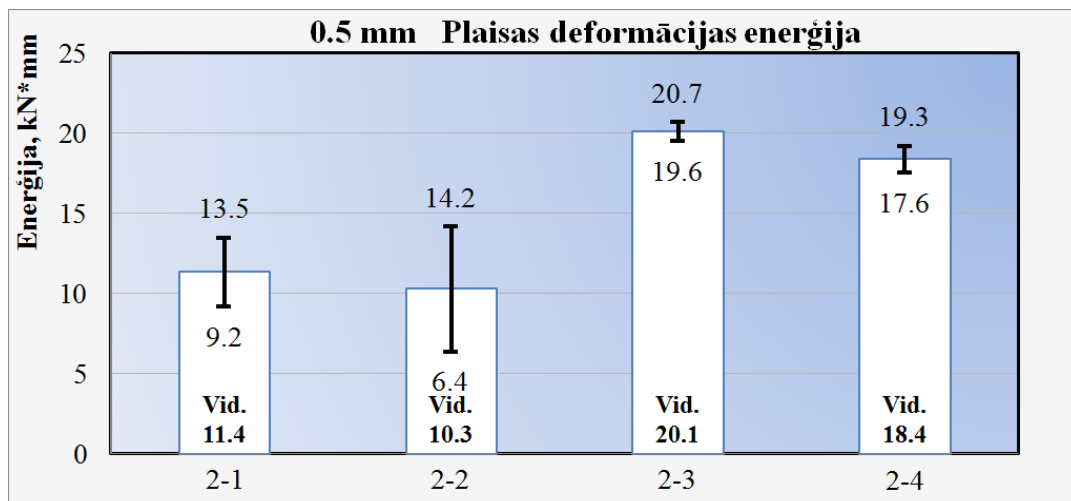
Paraugi tika notestēti 4-punktu liecē, orientētu fibrobetona prizmu paraugi Grupas 2-3 un 2-4 testu rezultāti tika salīdzināti ar tradicionālu neorientētu fibrobetonu no Grupas 2-1 un

2-2. Paraugi, kuri saturēja lielāko šķiedru koncentrāciju prizmu stiepes zonā galveno stiepes spriegumu trajektorijā vērsta virzienā, uzrādīja augstāku nestspēju (sk. 4. att.).

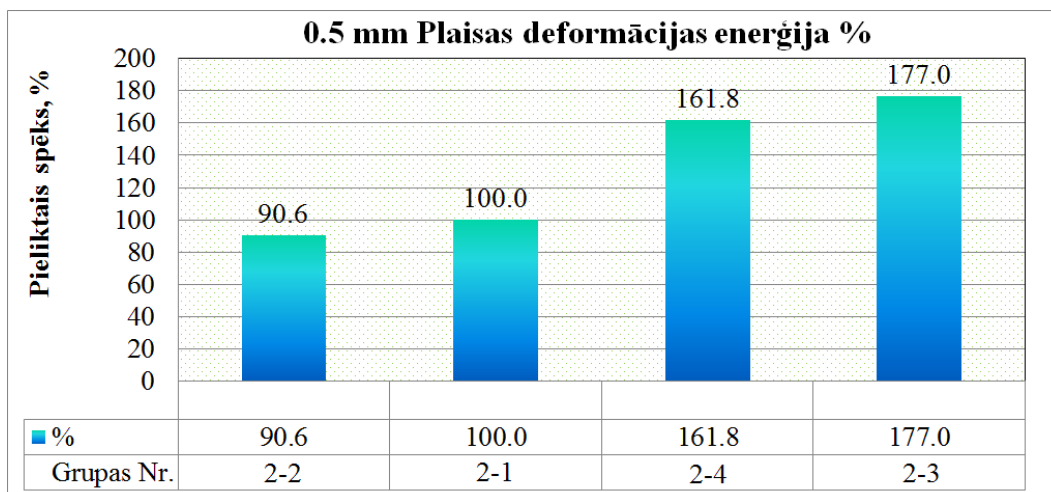


4. att. Spēka un pārvietojuma vidējās līknes Grupām no 2-1 līdz 2-4

Tika noteikta fibrobeta deformācijas enerģija un izkliede (sk. 5. att.). No diagrammām redzams, ka paraugi ar haotisku šķiedru sadalījumu no Grupas 2-1 un 2-2 uzrāda viszemāko maksimālo slodzi un viszemāko deformācijas enerģijas patēriņu plaisu atvēršanas stadijā, salīdzinot ar slāņainiem paraugiem no Grupām 2-3–2-4, kur šķiedras tika sadalītas noteiktajos parauga slāņos un orientētas.



5. att. Deformācijas enerģija un ticamības robežas līdz 0,5 mm



6. att. Deformācijas enerģija procentos

6. att. procentuāli vidējā deformācijas enerģija Grupas 2-2 pie izlieces 0,5 mm tika pieņemta kā 100 %, tad attiecīgi Grupām 2-4 un 2-3 paraugos deformācijas enerģija sasniedz no 161,8 % līdz 177,0 % no homogēno paraugu lieces stiprības rādītājiem. Augstākos rezultātus uzrādīja paraugi no Grupas 2-3.

Grupu 2-1 un 2-2 paraugi uzrādīja zemāku nestspēju plaisāšanas stadijā salīdzinājumā ar paraugiem saturošiem orientētas un sadalītas pa parauga apjomu šķiedrām.

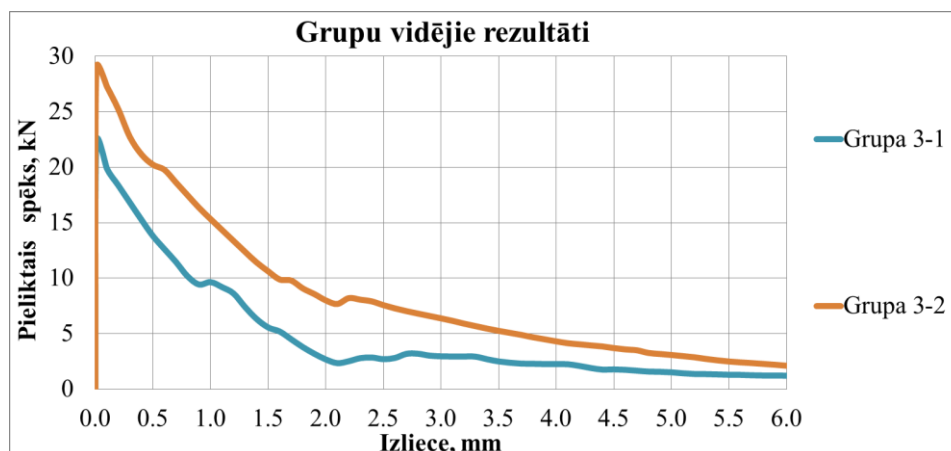
Fibrobetona ar iepriekš organizētu šķiedru struktūru izveidošana, balstoties uz izgudrojumu „Fibrobetona orientētas stiegrošanas paņēmieni un ierīce”

Tika veikta fibrobetona ar iepriekš organizētu šķiedru struktūru izveidošana, balstoties uz LR izgudrojumu LV14540 „Fibrobetona orientētas stiegrošanas paņēmieni un ierīce” [4]. Eksperimenta ietvaros tika izveidoti fibrobetona paraugi ar šķiedru orientāciju galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā, maksimāli tuvu lielāko stiepes spriegumu atrašanās līmenim.

Šķiedras tika iestrādātas divos dažādos veidos (grupās), kopējais šķiedru daudzums visās grupās ir identisks 10 kg/m^3 . Fibrobetona paraugu izgatavošanai šķiedru plūsma tika ievadīta uz iepriekš ieklātiem betona slāņiem ar noteiktu biezumu divos konstrukcijas slāņos. Lai ieklāšanas procesā šķiedras nepazaudētu iepriekš iegūto orientāciju, veidni šajā laikā pārvieto plūsmas virzienā ar ātrumu vienādu ar šķiedru plūsmas ātrumu attiecībā pret orientācijas plāksni.

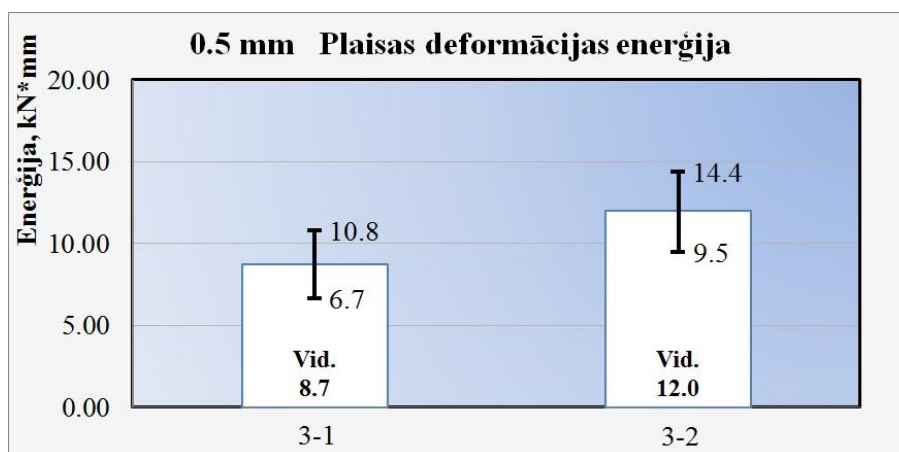
Paraugi tika notestēti 4-punktu liecē, orientētu fibrobetona prizmu paraugi no Grupas 3-2 testu rezultāti tika salīdzināti ar tradicionālu neorientētu fibrobetonu no Grupas 3-1.

Paraugi, kuri saturēja lielāko šķiedru koncentrāciju prizmu stiepes zonā galveno stiepes spriegumu trajektorijā vērsta virzienā, uzrādīja augstāku nestspēju (sk. 7. att.)



7. att. Spēka un pārvietojuma vidējās līknes Grupām 3-1 un 3-2

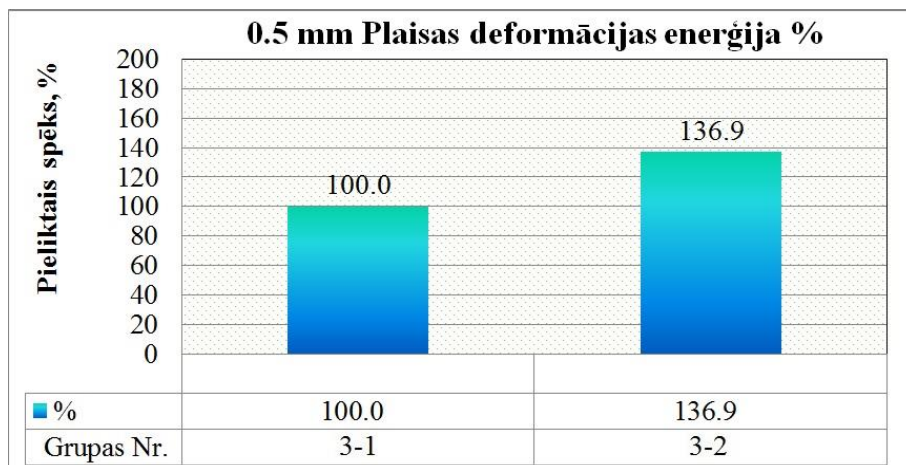
Tika noteikta fibrobeta deformācijas enerģija un izkliede (sk. 8. att.). No diagrammām redzams, ka paraugi ar haotisku šķiedru sadalījumu no Grupas 3-1 uzrāda viszemāko maksimālo slodzi un viszemāko deformācijas enerģijas patēriņu plaisu atvēršanas stadijā, salīdzinot ar paraugiem ar šķiedru orientāciju no Grupas 3-2, kur šķiedras tika iestrādātas noteiktajos parauga slāņos un orientētas galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā.



8. att. Deformācijas enerģija un ticamības robežas līdz 0,5 mm

9. att. var redzēt, ka procentuāli vidējā deformācijas enerģija Grupai 3-1 pie izlieces 0,5 mm tika pieņemta kā 100 %, tad attiecīgi Grupas 3-2 paraugos deformācijas enerģija sasniedz 136,9 % no homogēno paraugu lieces stiprības rādītājiem. Grupas 3-1 paraugi

uzrādīja zemāku nestspēju plaisāšanas stadijā salīdzinājumā ar paraugiem saturošiem orientētas un sadalītas pa parauga apjomu šķiedrām no Grupas 3-2.



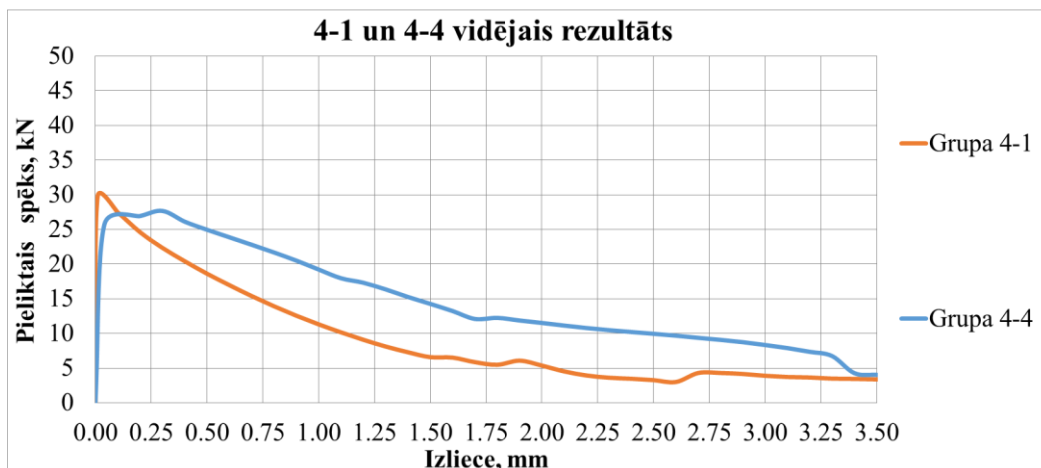
9. att. Deformācijas enerģija procentos

Šķiedru orientācijas tehnoloģiskais process fibrobetonā atbilstoši izgudrojumam „Fibrobetona šķiedru orientācijas tehnoloģiskais process”

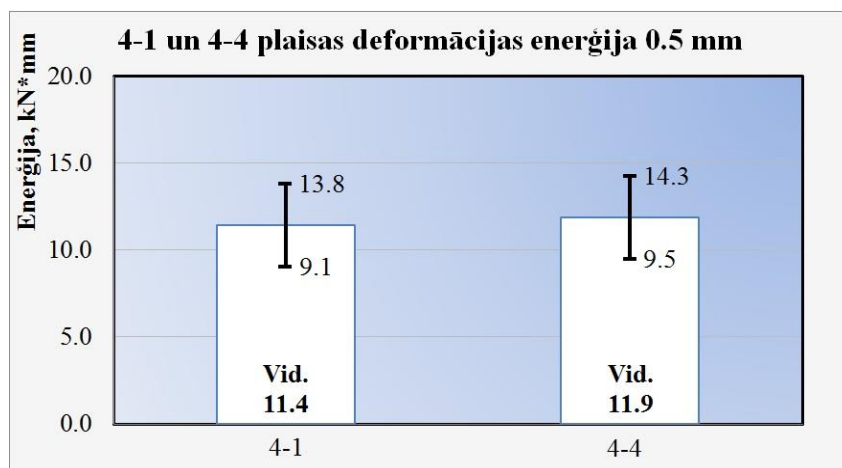
Tika veikta fibrobetona ar iepriekš organizētu šķiedru struktūru izveidošana, balstoties uz LR izgudrojumu LV14325 „Fibrobetona šķiedru orientācijas tehnoloģiskais process” [6]. Eksperimenta ietvaros tika izveidoti fibrobetona paraugi ar šķiedru orientāciju galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā (orientējot šķiedras gatavā fibrobetona maisījumā), maksimāli tuvu lielāko stiepes spriegumu atrašanās līmenim, salīdzināt testu rezultātus ar tradicionālu neorientētu fibrobetonu.

Trīs šķiedru veidi tika iestrādāti prizmās divos veidos (grupās), kopējais šķiedru daudzums visās grupās ir identisks $31,25 \text{ kg/m}^3$. Fibrobetona paraugu izgatavošanai eksperimentos tika izmantots inovatīvs šķiedru orientēšanas paņēmiens, saskaņā ar kuru šķiedras saturošam betona maisījumam divos savstarpēji pretējos virzienos vienlaicīgi tika virzītas divas „ķemmes”, kuras satur paralēlus stieņus, kuru savstarpējie attālumi pārsniedz atsevišķu šķiedru garumu [6]. Rezultātā šķiedras tika pagrieztas „ķemmes” kustības garenvirzienā t. i. šķiedras tika noorientētas stiepes spriegumu virzienā. Lai atvieglotu šķiedru orientāciju, fibrobetona maisījums tika vibrēts ar vibrogalda palīdzību.

No diagrammām (sk. 10. un 11. att.), redzams, ka paraugi ar haotisku šķiedru orientāciju no Grupas 4-1 uzrāda zemāku maksimālo slodzi un zemāku deformācijas enerģijas patēriņu plaisu atvēršanas stadijā, salīdzinot ar paraugiem ar šķiedru orientāciju no Grupas 4-4, kur šķiedras tika orientētas galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā.

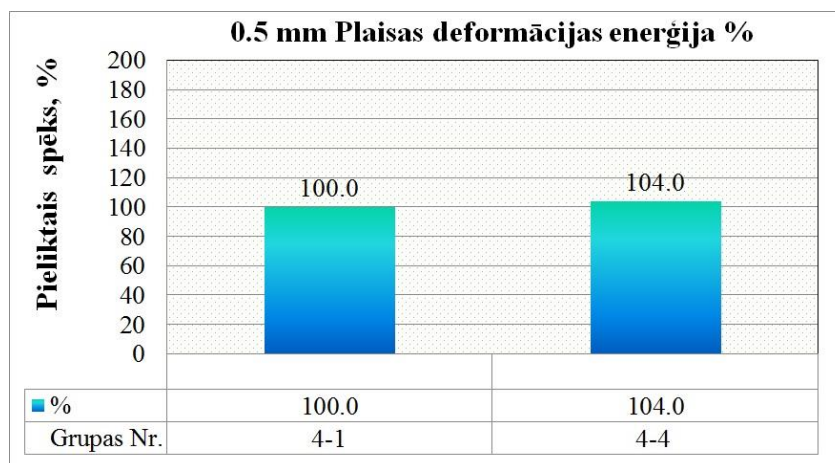


10. att. Spēka un pārvietojuma vidējās līknes Grupām 4-1 un 4-4



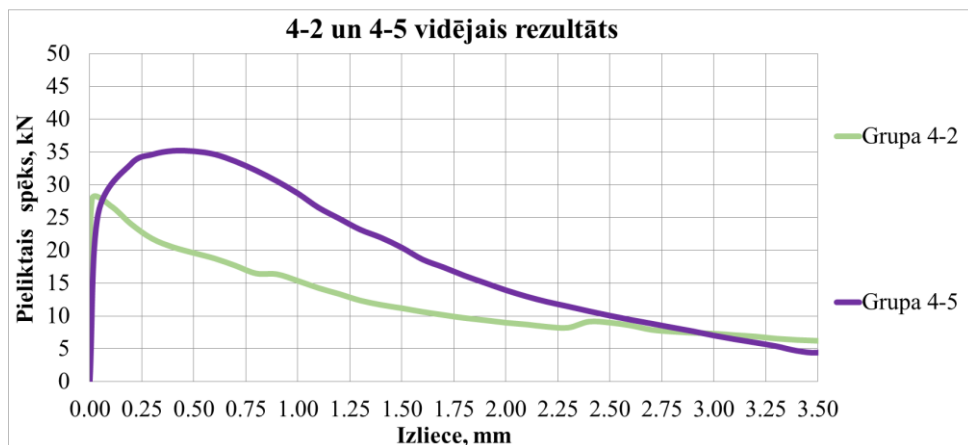
11. att. Deformācijas enerģija un ticamības robežas līdz 0,5 mm

Diagrammā (sk. 12. att.) procentuāli vidējā deformācijas enerģija Grupas 4-1 pie izlieces 0,5 mm tika pieņemta kā 100 %, tad attiecīgi Grupas 4-4 paraugos deformācijas enerģija sasniedz 104 % no homogēno paraugu lieces stiprības rādītājiem.

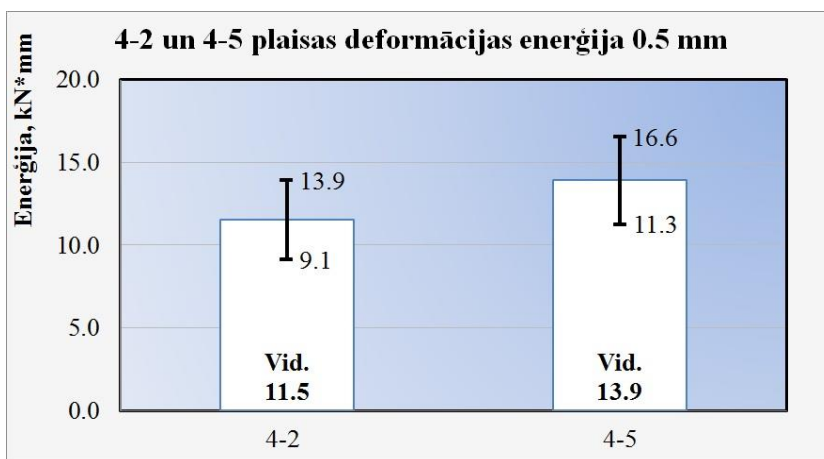


12. att. Deformācijas enerģija procentos

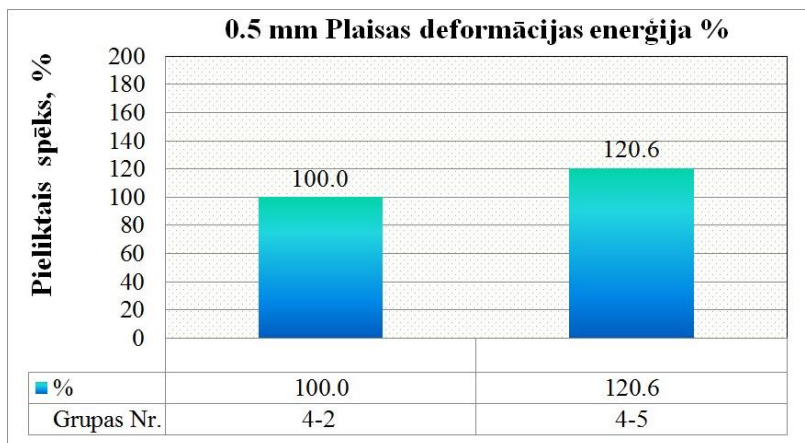
Paraugi ar haotisku šķiedru orientāciju no Grupas 4-2 uzrāda zemāku maksimālo slodzi un zemāku deformācijas enerģijas patēriņu plaisu atvēršanas stadijā, salīdzinot ar paraugiem ar šķiedru orientāciju no Grupas 4-5, kur šķiedras tika orientētas galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā (sk. 13., 14. un 15. att.).



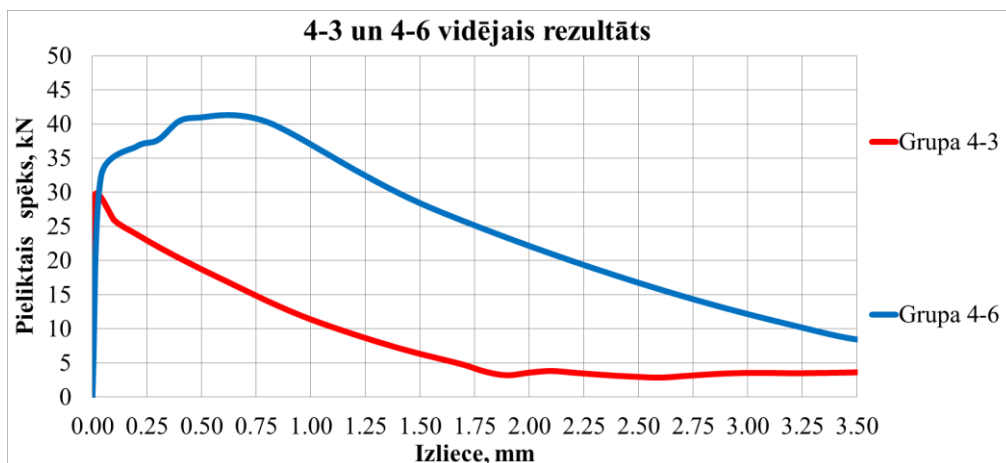
13. att. Spēka un pārvietojuma vidējās līknes Grupām 4-2 un 4-5



14. att. Deformācijas enerģija un ticamības robežas līdz 0,5 mm

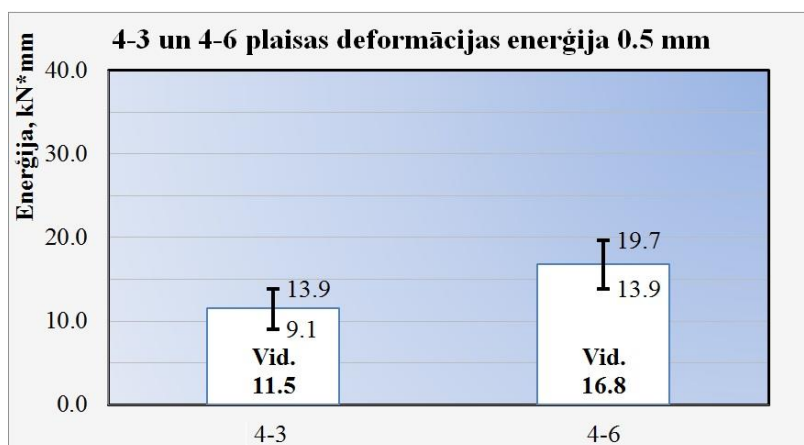


15. att. Deformācijas enerģija procentos

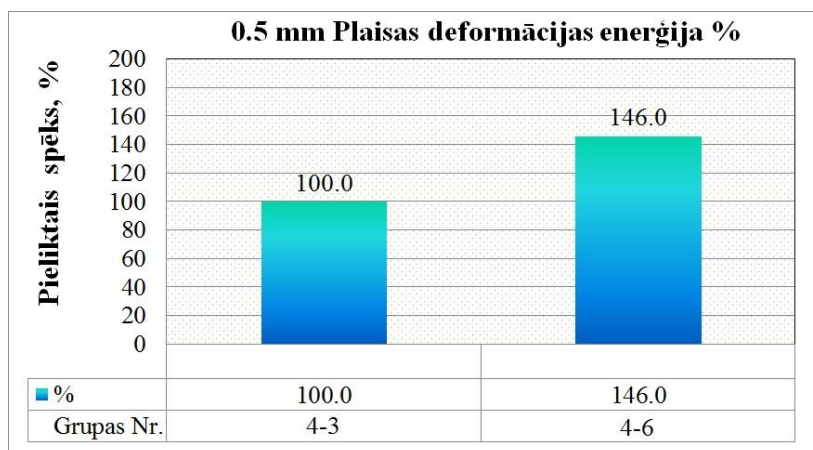


16. att. Spēka un pārvietojuma vidējās līknes Grupām 4-3 un 4-6

Paraugi ar haotisku šķiedru orientāciju no Grupas 4-3 uzrāda zemāku maksimālo slodzi un zemāku deformācijas enerģijas patēriņu plaisu atvēršanas stadijā, salīdzinot ar paraugiem ar šķiedru orientāciju no Grupas 4-6, kur šķiedras tika orientētas galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā (sk. 16., 17. un 18. att.).



17. att. Deformācijas enerģija un ticamības robežas līdz 0,5 mm



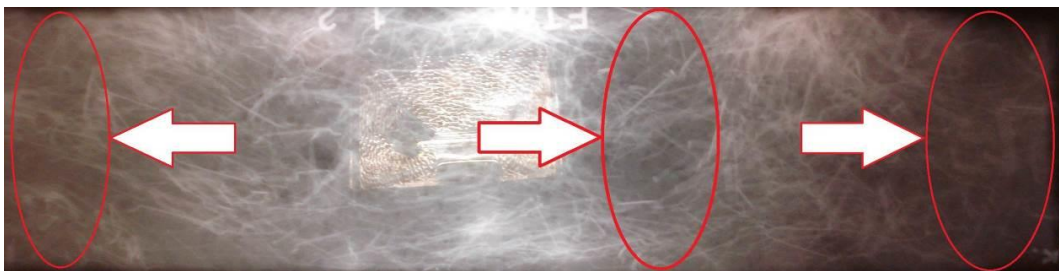
18. att. Deformācijas enerģija procentos

Diagrammā (sk. 18. att.) procentuāli vidējā deformācijas enerģija Grupas 4-3 pie izlieces 0,5 mm tika pieņemta kā 100 %, tad attiecīgi Grupas 4-6 paraugos deformācijas enerģija sasniedz 146 % no homogēno paraugu lieces stiprības rādītājiem.

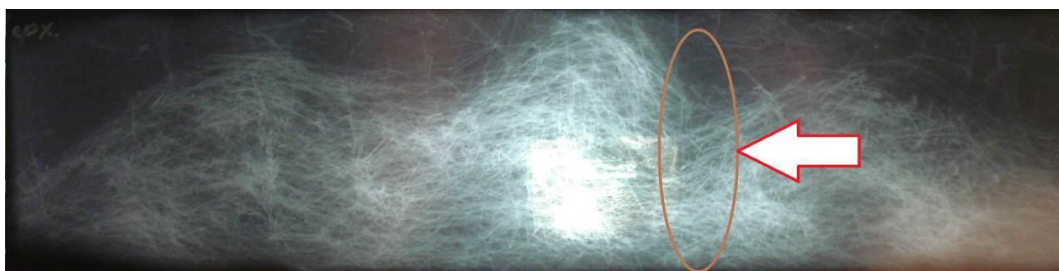
Fibrobetona ar šķiedru orientāciju eksperimentālo rentgenuzņēmumu izpēte

Tika izpētīta iepriekš organizēta šķiedru uzvedība fibrobetona paraugos vibrobļvēšanas ietekmē, kura tika izmantota pēc šķiedru orientācijas pabeigšanas.

Eksperimenta ietvaros tika izveidoti divi fibrobetona paraugi ar šķiedru orientāciju galveno stiepes spriegumu trajektoriju vērsta virzienā, paraugs 5-2 un 5-3 (LV14325 „Fibrobetona šķiedru orientācijas tehnoloģiskais process” [6]) un viens paraugs 5-1 ar tradicionālu neorientētu fibrobetonu. Pēc paraugu izveidošanas tie tika vibrēti uz vibrogalda vienu minūti jau pēc šķiedru iestrādāšanas pabeigšanas. Paraugi tika pakļauti rentgena caurstarošanai un tika notestēti 4-punktu liecē, rezultāti un iegūtie attēli tika izanalizēti.

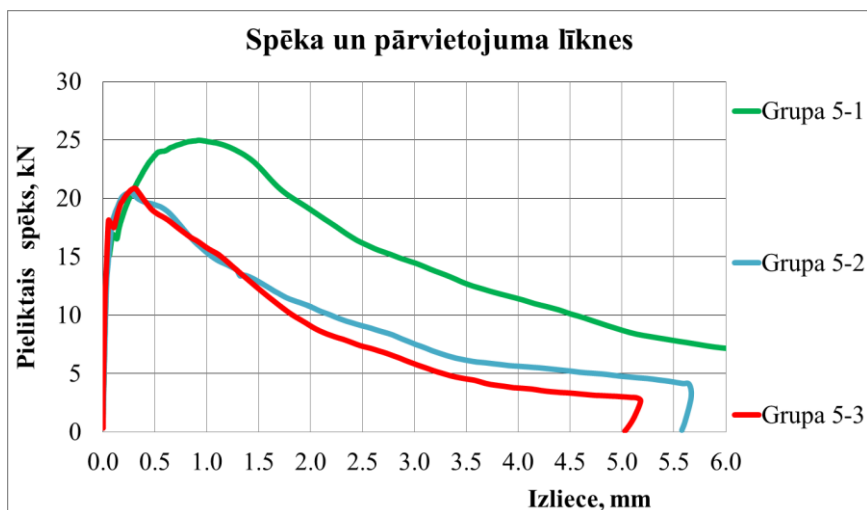


19. att. Fibrobetona parauga 5-1 rentgenuzņēmums, skats no sāna [2,3]



20. att. Fibrobetona parauga 5-2 rentgenuzņēmums, skats no sāna [2,3]

Rentgena attēli skaidri parāda, kurās vietās parādījās paraugu „vājās” zonas ar minimālo šķiedru saturu vibrāciju ietekmē (sk. 19. un 20. att.). 4-punktu lieces testi apliecināja, ka paraugu vibrēšana pēc šķiedru iestrādāšanas negatīvi ietekmē šķiedru sadalījumu paraugā (sk. 21. att.). Vibrāciju radīto un atstaroto no veidņa galiem viļņu interference (stāvvilnis) un tās izraisītā maisījuma turbulence.



21. att. Paraugu spēka un pārvietojuma līknes 0–6 mm

Fibrobeta plānsieniņu čaulu izveidošanas paņēmiens atbilstoši izgudrojumam „Betona čaulu veidošanas tehnoloģiskais process”

Tika izveidots pneimatiska tipa veidnis čaulu konstrukciju izveidošanai. Tika aprobēts jauns paņēmiens plānsieniņu čaulu ar 2D šķiedru orientāciju izveidošanas paņēmiens, kurš atbilst LR izgudrojumam Nr. 14277 „Betona čaulu veidošanas tehnoloģiskais process” [7].



22. att. Čaulu izveidošanas tehnoloģiskais process izmantojot pneimatisko veidni

Eksperimentos izmantotā veidņa augstums 9 mm ļauj iegūt fibrobeta konstrukciju ar 2D šķiedru orientāciju, jo čaulu izveidošanai tika izvēlētas 12 mm garas stiklašķiedras.

Pneimatiska veidņa konstrukcija: finieris $1000 \times 1000 \times 9$ mm, gumijas loksne 1000×1000 mm, rāmja malu augstums 9 mm un platums 30 mm, gaisa vārsts.

Uz plakanas virsmas tika uzklāta gumijas loksne. Gumija tika nostiprināta pa malām, pa nākamās čaulas perimetru. Malu savienojums ar veidņa pamatnes virsmu tika hermetizēts. Veidņa iekšējais izmērs 940×940 mm, augstums 9 mm.

Uz sagatavotās veidņa plakanās virsmas tika uzklāts fibrobeta slānis un nolīdzināts. Ar gaisa pumpja palīdzību pneimatiskajā veidnī tika iesūknēts gaiss līdz uzdotajiem čaulas izmēriem (augstumam) 110 mm (sk. 22. att.). Lai novērstu betona ātro sacietēšanu, čaulas virsma uzreiz pēc projektējamā augstuma sasniegšanas tika apsmidzināta ar ūdenī šķīstošo polimēru emulsijas aizsargslāni kurš neļāva intensīvi iztvaikot ūdenim. Čaula tika nocietināta, nepieļaujot veidņa deformācijas, betona cietēšanas laikā kontrolējot pastāvīgu gaisa spiedienu veidnī. Pēc 24 stundām nepieciešamā fibrobeta tehnoloģiskā stiprība tika sasniegta, čaula tika atveidnota, izlaižot no pneimatiskā veidņa gaisu.

Pneimatisko veidņu izmantošana lielā mērā ļauj industrializēt telpisko struktūru būvniecību no betona, to izmantošanai ir vairākas priekšrocības:

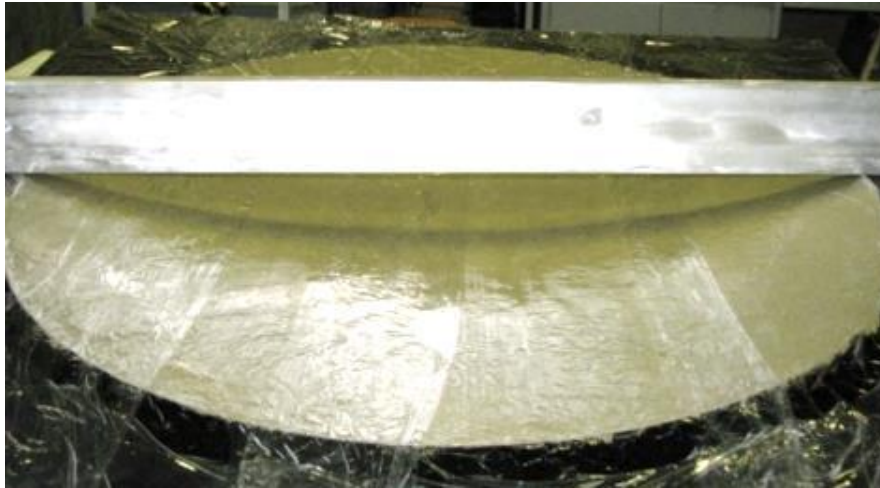
1. Veidni var izmantot atkārtoti vairākkārt;
2. Formas elastīgums (izliecoties tiek izveidotas virsmas ar arhitektūri un tehnoloģiski sarežģītām formām);
3. Ļauj iegūt čaulu ar gludu iekšējo un gludu ārējo virsmu;
4. Transportēšana: veidņu svars un auduma tilpums ir mazs salīdzinājumā ar koka vai tērauda veidņiem.

Fibrobeta plānsieniņu čaulu izveidošanas paņēmieni atbilstoši izgudrojumam „Beta plānsieniņu čaulu izveidošanas tehnoloģiskais paņēmieni”

Tika izstrādāts gravitācijas tipa veidnis čaulu konstrukciju izveidošanai. Tika aprobēts jauns paņēmieni plānsieniņu čaulu ar 2D šķiedru orientāciju izveidošanas paņēmieni, kurš atbilst LR izgudrojumam Nr. 14308 „Beta plānsieniņu čaulu izveidošanas tehnoloģiskais paņēmieni” [8]. Tika izstrādāta un aprobēta jauna fibrobeta čaulu stiegrošanas tehnoloģija „Beta un fibrobeta konstrukciju stiegrošanas paņēmieni”, LR izgudrojuma patents Nr. LV14679 [1].

Eksperimenta ietvaros fibrobeta čaulas stiegrošanai tika izgatavots adīts no E-stikla šķeterēta diega trikotāžas auduma stiegrojums. Tika sagatavoti divi rāmji ar centrā izzāģētu apli 900 mm diametrā (veidņa iekšējais diametrs). Rāmju malu augstums atbilst veidojamās čaulas biezumam 12 mm. Rāmis kopā ar tam piestiprināto elastīgā materiāla loksni tika novietots uz galda (apakšējā rāmī tika ievietots atbilstoša diametra t. i. 900 mm finiera 12 mm

biezs saplāksnis — izzāgētais aplis). Betons veidnī tika ieklāts, trikotāžas auduma stiegrojums tika ievietots divos slāņos. Betona augšējā virsma tika izlīdzināta un tikai pēc tam veidnis tika izcelts darba pozīcijā atbilstoši tehnoloģijai (sk. 23. att.).



23. att. Gravitācijas veidnis

Atšķirībā no pneimatisko veidņu lietošanas, kuru virsmu ģeometriju nosaka iesūknētā gaisa radiālais spiediens, piedāvātais paņēmieni ļauj čaulai piešķirt ģeometriju, kura atbilst vertikālas, pa čaulas virsmu vienmērīgi sadalītas slodzes (galvenokārt, pašsvara) radīto galveno spiedes/stiepes spriegumu trajektorijām un sadalījumam. Tas daudz tuvāk atbilst reālo konstruktīvo slodžu radītajai galveno spriegumu orientācijai bez lieces momentiem un ļauj čaulas veidot plānākas, vieglākas un līdz ar to arī lētākas. Izliecot veidni uz leju, maisījums tajā tiek nedaudz saspiests un šis apstāklis samazina maisījuma agrās plaisāšanas varbūtību.

Ceturtajā nodaļā tika veikta eksperimentālo čaulu modelēšana programmā SOLIDWORKS [11]. Čaula tika modelēta ar iespīlētu pa perimetru pamatni un tika slogota ar izkliedētu vertikāli pieliktu slodzi.

Rezultātu starpība, atkarībā no čaulas ģeometrijas ar kvadrātu vai apli pamatnē, ir ievērojama, čaulai ar apli pamatnē maksimālais ekvivalentais spriegums ir 2,35 reizes mazāks nekā čaulai ar kvadrātu pamatnē.

Modelēšanas rezultātā sanāca, ka čaulai ar apli pamatnē maksimālie stiepes spriegumi ir 0,015 MPa (pret 6,7 MPa čaulai ar kvadrātu pamatnē), t. i. stiepes spriegumi ir ievērojami mazāki par spiedes spriegumiem, kas ir ļoti labvēlīgi tādām materiālam kā fibrobetons, kurš lieliski strādā spiedē un slikti strādā stiepē. Spiedes spriegumi ir 2,3 MPa, kas ir 12,6 reizes mazāk nekā čaulai ar kvadrātu pamatnē.

Čaulas kupols strādā bezmomentu spriegumu stāvokļos, uz balstu darbojas divu veidu piepūles — vertikālā un horizontālā balstbīde. Tas nozīmē, ka ir jāveido speciāla konstrukcija — atbalsta gredzens, kurš strādās stiepē. Lai nodrošinātu kupola bezmomenta darbību ar atbalsta gredzenu, nepieciešams, lai vidējās čaulas virsmas pagrieziņa leņķu normāles pie atbalsta gredzena un diametrālās plaknes pagrieziņa leņķi, tai pašā plaknē atbalsta gredzena šķēlumā, sakristu.

Tika izstrādāts skaitliskais algoritms MATLAB [12] programmā liektu fibrobeta siju nestspējas prognozēšanai, homogēno fibrobeta elementu un fibrobeta elementu ar šķiedru sadalījumu nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā. Ir parādīts, ka skaitliskā modelēšana labi apraksta nehomogēno fibrobeta nestspēju plaisāšanas stadijā. Skaitliskās modelēšanas rezultāti veiksmīgi aproksimē eksperimentālus datus. Modelis var tikt praktiski izmantots fibrobeta konstruktīvo elementu projektēšanā.

SECINĀJUMI

Ir izpētīta nehomogēno fibrobetonu nestspēja pie lieces un salīdzināta ar homogēnā fibrobetona nestspēju.

Radītas tehnoloģijas un ierīces nehomogēno fibrobetonu ar augsto nestspēju pie lieces izgatavošanai.

Tika izstrādāti divi jauni nehomogēno fibrobetonu izgatavošanas paņēmieni un trīs fibrobetonu izgatavošanas ierīces.

Tika izstrādāta jauna fibrobetona plānsieniņu čaulu izgatavošanas tehnoloģija.

Tika atrisināti šādi uzdevumi:

Mērķa sasniegšanai tika atrisināti šādi uzdevumi:

Tika aprobēta jauna šķiedru sadalījuma tehnoloģija slāņainajās fibrobetona konstrukcijās — „Nehomogēna fibrobetona konstrukciju veidošanas tehnoloģiskais process un ierīce tā īstenošanai”, LR izgudrojuma patents Nr. LV14257, tika parādīta slāņainā fibrobetona mehāniska efektivitāte.

Tika izstrādāts jauns šķiedru ieklāšanas un orientācijas paņemiens slāņainajās fibrobetona konstrukcijās (lokanu pamatni ar šķiedru orientāciju uzklāj uz ieklāta betona maisījuma iepriekš uzdotā līmenī un uzdotajā virzienā), par ko ir saņemts LR izgudrojuma patents Nr. LV14667, „Fibrobetona konstrukciju orientētā stiegrošana”. Paņemiens tika aprobēts, parādīta tehnoloģijas efektivitāte un konstrukciju mehāniskas nestspējas paaugstināšana.

Tika izstrādātas jaunas šķiedru orientācijas ierīces (orientāciju veic ārpus fibrobetona konstrukcijas, fibras orientē noteiktā virzienā un piestiprina uz lokana materiāla pamatnes), par ko ir saņemti LR izgudrojuma patenti: Nr. LV14684, „Ierīce šķiedru orientēšanai fibrobetonā” un Nr. LV14849, „Ierīce šķiedru ieklāšanai fibrobetonā un tās lietošanas paņemiens”.

Tika aprobēta jauna orientācijas ierīce „Ierīce šķiedru orientēšanai fibrobetonā” un parādīta efektivitāte un konstrukciju mehāniskas nestspējas paaugstināšana, izmantojot jauno ierīci.

Tika izstrādāts šķiedru ieklāšanas un orientācijas paņemiens un ierīce slāņainajās fibrobetona konstrukcijās (šķiedru orientāciju veic ārpus veidņa un šķiedras orientē virzot tās vibrētas plūsmas veidā pāri garenvirzienā ribotai orientācijas plāksnei, noorientētās šķiedras plūsmas betona maisījumā ievada iepriekš uzdotā līmenī un pa iepriekš uzdotām trajektorijām), par ko ir saņemts LR izgudrojuma patents Nr. LV14540, „Fibrobetona

orientētas stiegrošanas paņēmiens un ierīce”. Paņēmiens un ierīce tika aprobēti, parādīta tehnoloģijas efektivitāte un konstrukciju mehāniskas nestspējas paaugstināšana.

Tika aprobēts jauns šķiedru orientācijas paņēmiens fibrobeta konstrukcijās (fibras saturošam beta maisījumam divos savstarpēji pretējos virzienos vienlaicīgi virza cauri divus režģus, pie tam minētos režģus virza tā, lai viena režģa stieņi ietu cauri starp otra režģa stieņu spraugām), par ko ir saņemts LR izgudrojuma patents Nr. LV14325 „Fibrobeta šķiedru orientācijas tehnoloģiskais process”. Tika parādīta fibrobeta ar orientētām šķiedrām mehāniska efektivitāte.

Tika izstrādātas jaunas fibrobeta čaulu izveidošanas tehnoloģijas ar gravitācijas veidņu palīdzību un šķiedru 2D orientāciju — „Beta plānsienu čaulu veidošanas tehnoloģiskais paņēmiens”, LR izgudrojuma patents Nr. LV14308 un „Beta sedlveida čaulas veidošanas tehnoloģiskais process”, LR izgudrojuma patents Nr. LV14408.

Tika aprobētas jaunas fibrobeta čaulu izveidošanas tehnoloģijas ar gravitācijas veidņu palīdzību un šķiedru 2D orientāciju — „Beta plānsienu čaulu veidošanas tehnoloģiskais paņēmiens” un „Beta čaulu veidošanas tehnoloģiskais process”, LR izgudrojuma patents Nr. LV14277. Tika veikts tehnoloģiju efektivitātes novērtējums.

Tika izstrādāta jauna fibrobeta čaulu stiegrošanas tehnoloģija — „Beta un fibrobeta konstrukciju stiegrošanas paņēmiens”, LR izgudrojuma patents Nr. LV14679.

Tika aprobēta jauna fibrobeta čaulu stiegrošanas tehnoloģija — „Beta un fibrobeta konstrukciju stiegrošanas paņēmiens”.

Izstrādātais skaitliskais modelis homogēno fibrobeta elementu un fibrobeta elementu ar šķiedru sadalījumu nestspējas prognozēšanai, plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā, ir parādīts, ka skaitliskā modelēšana labi apraksta nehomogēno fibrobeta nestspēju plaisāšanas stadijā.

Izstrādāts jauno tehnoloģiju efektivitātes novērtējums un pielietošanas rekomendācijas.

TEHNOLOĢISKIE IETEIKUMI

Liektām konstrukcijām ir izteikti neviendabīgs spriegumu lauks — no maksimālajiem stiepes spriegumiem stieptajā zonā līdz maksimālajiem spiedes spriegumiem spiestajā zonā, bet neitrālās ass tuvumā materiāls nav noslogots. Lielākajai daļai no statistiski noslogotām stiegrotā betona konstrukcijām galveno stiepes spriegumu trajektorijas ir viegli nosakāmas un jau iepriekš zināmas. Ir lietderīgi koncentrēt tērauda šķiedras būvelementā stieptajā zonā, kurā ir maksimālie stiepes spriegumi. Līdz ar to ar vienādu šķiedras daudzumu viendabīgam un neviendabīgam fibrobetonam var sasniegt labākus rezultātus būvelementa lieces stiprībā.

Nehomogēnā fibrobetona būtiski lielāku lieces stiprību apliecināja atbilstošu paraugu lieces testi. Tie parāda arī pretēju pozitīvu efektu — priekš vienas un tās pašas lieces stiprības sasniegšanas nehomogēnā fibrobetonā ir nepieciešams mazāks šķiedru patēriņš.

Veicot rezultātu analizēšanu un salīdzināšanu, ir iegūts pozitīvs priekšstats par neviendabīga fibrobetona pielietojumu būvniecībā un dažādu šķiedru iestrādāšanas paņēmieniem. Veicot eksperimentus un izvērtējot visu iegūto informāciju, var apgalvot, ka izmantojot jaunākās fibrobetona izbūves tehnoloģijas — orientējot, sadalot šķiedras noteiktos slāņos, var panākt vēlamo efektu, tas ir, šķiedru orientācijai un sadalījumam ir būtiska nozīme uz fibrobetona lieces stiprību. Ņemot vērā, ka tika izmantots vienāds tērauda šķiedru daudzums uz 1 m³ betonmasas, orientējot un/vai sadalot šķiedras, var sasniegt ekonomiski izdevīgu risinājumu celtniecības konstrukcijai.

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, secināts, ka, neviendabīgo fibrobetonu var izveidot ar dažādiem jauniem paņēmieniem.

Salīdzinot ar šodienas fibrobetona lietošanas praksi, no piedāvāto izgudrojumu praktiskās izmantošanas būvniecībā ir sagaidāmi pozitīvi tehnoloģiskie ieguvumi, kas ļaus:

1. Izveidot betona izstrādājumus ar projektēto orientētu un/vai sadalītu pa slāņiem šķiedru stiegrojumu;
2. Rodas iespēja slīpēt un pulēt ieklātā betona augšējo virsmu, bez iespējamās šķiedru izraušanas un līdz ar to virsmas bojāšanu;
3. Vienkāršojot tērauda stiegrojumu, var samazināt tērauda stiegru daudzumu, vai ļaus pilnībā atteikties no tā;
4. Plaisu parādīšanās gadījumā betonā, šķiedras sāk strādāt uz stiepi un izvilkšanu, līdz ar to, var droši prognozēt pēcplaisāšanas posmu, ko nevar regulēt ievietojot vienkāršu sietu;

5. Sabrukuma enerģijas palielinājums ir sevišķi svarīgs militāram būvēm, kurām ir jā saglabā savas funkcijas arī pēc plaisu atvēršanās.
6. Vadīt pēc plaisāšanas fibrobeta mehāniskās uzvedības posmu, panākot tā vēlamu kvazi-plastisko uzvedību;
7. Celt mehānizācijas līmeni (ir iespēja izmantot modernos betonēšanas kompleksus t.sk. lāzera betona ieklājējus);
8. Palielināt fibrobeta būvkonstrukciju kvalitāti un to garantētās mehāniskās īpašības (samazinot īpašību izkliedi un samazinot projektēšanā izmantojamu drošības koeficientu lielumus).

No paņēmieni praktiskās izmantošanas ir sagaidāmi pozitīvi efekti:

1. Pie viena un tā paša dārgo šķiedru izlietojuma pieaugs betona stiepes pretestība un kā rezultātā pieaugs arī konstrukciju slodzes nestspēja;
2. Rodas iespēja palielināt fibrobeta būvkonstrukciju kvalitāti un to garantētās būvnieciskās īpašības;
3. Pie vienādas betona stiprības un vienādas konstrukciju nestspējas nodrošināšanai tiks izmantots mazāks šķiedru patēriņš, kas ļaus:
 - a) samazināt darbu izmaksas un darbietilpību;
 - b) palielināt darbinieku produktivitāti;
 - c) uzlabot stiegrošanas darbu kvalitāti;
 - d) samazināt betona patēriņu,
 - e) samazinās konstrukciju svārs un arī slodze uz zemāk esošām konstrukcijām (tās varēs taisīt vieglākas un lētākas).
 - f) samazināt būvniecības laiku.

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, secināts, ka, plānsieniņu čaulu veidošanu ar šķiedru 2D orientāciju var veikt ar dažādiem jauniem paņēmieniem.

Ekspertimēntu gaitā pierādījās fibrobeta čaulu veidošanas tehnoloģisko procesu pozitīvās īpašības un to efektivitāte:

1. Nav nepieciešami stiegrošanas darbi būvlaukumā, kuri ievērojami pagarina būvniecības laiku un samazina darba izmaksas;
2. Šādi veidņi ir vairākkārt izmantojami, kas samazina konstrukcijas izmaksas;
3. Ar viena veidņa palīdzību var izveidot dažādas formas konstrukcijas;
4. Veidņu uzstādīšanas laiks nesalīdzināmi samazinās, kas samazina būvniecības laiku;

5. Betonēšanas procesa laikā iespējams kontrolēt un nodrošināt uzklājamā betona maisījuma slāņa biezumu;
6. Pabeidzot betonēšanu nav nepieciešams līdzināt un slīpēt konstrukcijas virsmas, jo tās ir gludas;
7. Ir iespējams veidot jumtus vai ūdens necaurlaidīgus pārsegumus tādām konstrukcijām, kuras veidot ar tradicionālām metodēm ir ļoti sarežģīti un tas prasa nesalīdzināmi lielāku laiku, cilvēku resursu un materiālu patēriņu;
8. Tehnoloģiskus paņēmienus ir iespējams ieviest rūpnieciskajā ražošanā, kas palielina konstrukcijas kvalitāti un atvieglo tehnoloģisko procesu kontroli;
9. Veidņi ir mobili un salīdzinoši viegli.

Piedāvātās tehnoloģijas ir arī plastiskas, jo viegli mainot elastīgo veidņu formu ir iespējams iegūt betona čaulas ar visdažādākām formām — dažādu veidu kupolus un velves, kuru ģeometriju var izveidot arī tā, lai lieces momenti čaulas abos virzienos būtu minimizēti vai pavisam izslēgti, kas ļauj čaulas izveidot ar minimālu biezumu, daudz vieglākas un lētākas, nekā to atļauj tradicionālās būvtehnoloģijas.

Faktors, kas veicina betona attīstību, ir ekonomija. Piedāvātās tehnoloģijas samazina darbietilpību un būvdarbu laiku, samazina betona un tērauda patēriņu, būvniecības izdevumus, pateicoties konstruktīvā risinājuma vienkāršībai.

Visbeidzot, apvienojot atkārtoti lietojamas veidņu tehnoloģijas, kupolveidīgas betona čaulas kļūst par ekonomiski izdevīgu alternatīvu tradicionālajiem paņēmieniem un veidņiem.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Harjkova, G., Lūsis, V., Kononova, O., et al. *Betona un fibrobetona konstrukciju stiegrošanas paņēmiens. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14679, 2013.*
2. Krasnikovs, A., Macanovskis, A., Lūsis, V., et al. *Short fibers distribution investigation in fiber concrete. Sci. Work. Riga Tech. Univ. Mech. Eng. Mech., 2012. pp. 54–62.*
3. Krasnikovs, A., Zaharevskis, V., Kononova, O., et al. *Fiber Concrete Properties Control by Fibers Motion Investigation in Fresh Concrete During Casting. In: 8th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING." Tallin, 2012. pp. 657–662.*
4. Lapsa, V., Krasņikovs, A., Lūsis, V. *Fibrobetona orientētas stiegrošanas paņēmiens un ierīce. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14540, 2012.*
5. Lapsa, V., Krasņikovs, A., Strauts, K. *Nehomogēna fibrobetona konstrukciju veidošanas tehnoloģiskais process un ierīce tā īstenošanai. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14257, 2011.*
6. Lapsa, V., Krasņikovs, A., Strauts, K. *Fibrobetona šķiedru orientācijas tehnoloģiskais process. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14325, 2011.*
7. Lapsa, V., Krasņikovs, A. *Betona čaulu veidošanas tehnoloģiskais process. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14277, 2011.*
8. Lapsa, V., Žviriņš, A., Lūsis, V., et al. *Betona plānsienu čaulu veidošanas tehnoloģiskais paņēmiens. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14308, 2011.*
9. Lūsis, V., Krasņikovs, A. *Fibrobetona konstrukciju orientētas stiegrošanas paņēmiens. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14667, 2013.*
10. Lūsis, V., Krasņikovs, A. *Ierīce šķiedru orientēšanai fibrobetonā. RTU LR izgudrojuma patents Nr. LV14684, 2013.*
11. *SolidWorks, 2014.*
12. *MATLAB, 2013.*