

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Mehānikas institūts

Galina HARJKOVA

Doktora studiju programmas «Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve» doktorante

**STIKLA ŠĶIEDRU
ADĪTAIS STIEGROJUMS KOMPOZĪTMATERIĀLOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Dr. sc. ing., profesore

O. KONONOVA

Dr. sc. ing., profesors

A. KRASŅIKOVŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2015

Harjkova G. Stikla šķiedru adītais stiegrojums kompozītmateriālos. Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015, 22 lpp.

Iespiests saskaņā ar Mehānikas institūta 2015. gada 24. februāra lēmumu, protokols Nr. 15300/04



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai» 2011./2012. studiju gadā.

ISBN 978-9934-10-686-6

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 8. jūnijā plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6k, 302. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Jānis Auziņš
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *PhD* Janis Varna
Luleå University of Technology, Zviedrija

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Jānis Andersons
LU Polimēru mehānikas institūts, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Gaļina Harjkova(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 4 pielikumi, 115 attēli, kopā — 160 lappuses. Literatūras sarakstā ir 192 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Promocijas darba mērķis un uzdevumi.....	5
Pētījuma metodes un izmantotā aparatūra.....	5
Aizstāvēšanai izvirzīts.....	5
Zinātniskā novitāte.....	6
Praktiskā nozīme.....	6
Darba aprobācija.....	6
Publikāciju saraksts.....	7
Promocijas darba struktūra un apjoms.....	9
DARBA SATURS.....	9
Pirmā nodaļa.....	9
Otrā nodaļa.....	9
Trešā nodaļa.....	13
Ceturtnā nodaļa.....	16
SECINĀJUMI.....	19
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS.....	20

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pēdējos gados pieaug interese par kompozītmateriālu trikotāžas stiegrojuma izmantošanu dažādās nozarēs. Salīdzinot ar klasiskajiem slāņainiem kompozītmateriāliem, adītam karkasam ir labāka pretošanās starpslāņu bīdei, un labās elastības dēļ tas ir piemērots sarežģītas formas detaļu izgatavošanai. Lielākas grūtības sagādā šādu materiālu mehānisko īpašību — stiprības un elastības konstanšu aprēķināšana un deformācijas mehānisma analīze. Šajā darbā ir analizēti polimērmatrixas un cementmatrixas kompozītmateriāli ar trikotāžas stiegrojumu.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Galvenais darba **mērķis** ir apskatīt kompozītmateriālus ar trikotāžas stiegrojumu;

- izpētīt adīta stiegrojuma specifiku, mikromehāniku un deformācijas mehānismu;
- aprēķināt un analizēt mehāniskās īpašības (elastības konstantes un stiprību);
- analizēt izmantoto metožu precizitāti un atbilstību materiāla eksperimentālajai uzvedībai.

Promocijas darbā mērķu sasniegšanai izvirzīti šādi **uzdevumi**:

- apskatīt literatūras avotus par pētāmo tēmu, analizēt izmantojamās pieejas, modeļus un metodes;
- izgatavot paraugus;
- eksperimentāli noteikt materiāla (polimērkompozīta un cementmatrixas kompozīta) īpašības;
- atrast efektīvākos paņēmienus pētāmo materiālu mehānisko īpašību modelēšanai;
- izveidot modeli un analītiski aprēķināt materiāla īpašības;
- modelēt kompozītmateriālu, kas stiegrots ar trikotāžu;
- salīdzināt eksperimentālos un teorētiskos rezultātus;
- apkopot iegūtos rezultātus un izdarīt secinājumus.

Pētījuma metodes un izmantotā aparatūra

Eksperimentālās metodes:

- «klasiskie» stiepes un četru punktu lieces testi;
- mikrorentģentomogrāfs *Skyscan 1172*.

Skaitliskās metodes un datorprogrammas:

- *Mathcad*, *MatLab*
- *GEM* programma — *SolidWorks*

Aizstāvēšanai izvirzīts

1. Elastības moduļu prognozēšanas metodika ar vienvirziena plānas trikotāžas slāņiem stiegrotiem polimērmatrixas kompozītiem.
2. Adīta stiegrojuma kompozītu modeļi ar eliptisku šķērsriezumu.
3. Stiprības modelēšanas metode polimērmatrixas un cementmatrixas kompozītiem.
4. Plānas trikotāžas izmantošana betona un fibrobeta stiegrošanai.
5. Rentģenmikrotomogrāfijas tehnikas izmantošana reāla adīta auduma ģeometrijas noteikšanai.

Zinātniskā novitāte

1. Tiek izmantota modelēšana, izmantojot galīgo elementu metodi ar nespēcīfisku plaši lietojamu programmatūru.
2. Adīts stiegrojums lietots fibrobetona stiegrošanai.
3. Piedāvāta stiprības modelēšanas metode.
4. Reālas plānas trikotāžas ģeometrijas noteikšana ar mikrorentģentomogrāfijas tehniku.

Praktiskā nozīme

Pētāmais stiegrojuma veids var tikt plaši izmantots detaļās ar sarežģītu formu — čaulās, kupolos utt. Izmantojot aprakstīto modelēšanu, var prognozēt pamata mehāniskās īpašības (elastības modulū un stiprību) ar trikotāžu stiegrotiem kompozītmateriāliem. Ir pierādīts, ka plānas trikotāžas stiegrojums palielina fibrobetona bloku nestspēju.

Darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti ziņoti šādās starptautiskās konferencēs:

1. Kononova O., Krasnikovs A., Kharkova G., Zalesky J., Machanovsky E. Mechanical properties characterization by inverse technique for composite reinforced by knitted fabric. Part 1. Material modeling and direct experimental mechanical properties evaluation. «10th International Conference «Vibroengineering — 2011»», Kaunas, Lithuania, October 13–14, 2011.
2. Krasnikovs A., Kononova O., Kharkova G., Zaharevsky V., Akishin P., Rucevskis S. Mechanical properties characterization for composite reinforced by knitted fabric using inverse technique. Part 2. Mechanical properties experimental evaluation by eigen frequency method. «10th International Conference «Vibroengineering — 2011»», Kaunas, Lithuania, October 13–14, 2011.
3. Krasņikovs A., Kononova O., Harjkova G., Machanovskis E. Telpiski stiegroti kompozīti. «RTU 52. starptautiskā zinātniskā konference», Rīgā, 2011. gada 13. oktobrī.
4. Kononova O., Harjkova G. Kompozītmateriālu uz audumu bāzes datormodelēšana. «RTU 52. starptautiskā zinātniskā konference», Rīgā, 2011. gada 13. oktobrī.
5. Krasņikovs A., Kononova O., Harjkova G., Zaļeskis J., A. Losevs, V. Lūsis. Viskožo šķidrums reoloģija. «Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress», Rīga, 2011. gada 24.–27. oktobrī.
6. Krasnikovs A., Kononova O., Harjkova G., Zaharevsky V., Machanovsky E., Rucevskis S., and Akishins P. Composite material reinforced by knitted fabric. Prediction of its strength and elastic properties and experimental validation. «Mechanics of Composite materials (MCM)», Riga, Latvia, May 28 — June 1, 2012.
7. Krasnikovs A., V. Lapsa, V. Lūsis, V. Zaharevsky, E. Machanovsky, and G. Harjkova. Mechanical properties of a layered fiberconcrete structure. «Mechanics of Composite materials (MCM)», Riga, Latvia, May 28 — June 1, 2012.
8. Krasnikovs A., Kononova O., Harjkova G., Zaharevskis V. and Galushchak A. Mechanical properties characterization by inverse technique for composite reinforced by knitted fabric. «15th European Conference on Composite Materials (ECCM-15)», Venice, June 24–28, 2012.
9. Harjkova G., Barburski M., Lomov S., Kononova O. Micro-CT analysis of glass knitted fabric structure. 12th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development», Latvia, Jelgava, May 23–24, 2013.

10. Harjkova G., Lusiš V., Akišins P., Krasnikovs A., Kononova O. Finite Element Analysis of Weft Knitted Composites. 4th International Conference «Civil Engineering'13», Latvija, Jelgava, May 16–17, 2013.
11. Harjkova G., Barburski M., Lomov S., Kononova O., Verpoest, I. Analysis of Knitted Fabric Geometrical Parameters Using X-ray Microtomography. The 13th Autex World Textile Conference 2013, Germany, Dresden, May 22–24, 2013.
12. Harjkova G., Barburski M., Lomov S., Verpoest I., Kononova O. Micro-CT based geometry recognition of glass knitted fabric reinforced polymer laminates. TexComp-11, Leuven, Belgium, September 19, 2013.
13. Harjkova G., Lusiš V., Krasnikovs A. Experimental investigation of weft knitted fabric layered reinforcement efficiency in fiberconcrete. International Conference «Innovative Materials, Structures and Technologies», Riga, Latvia, November 8, 2013.
14. Harjkova G., Kononova O. Analysis of knitted composite reinforcement with variable cross-section shape. 18th International Conference «Mechanics of Composite Materials», Riga, Latvia, June 2–6, 2014.

Publikāciju saraksts

Raksti zinātniskos žurnālos:

1. Harjkova, G., Barburski, M., Lomov, S., Kononova, O., Verpoest, I. Weft Knitted Loop Geometry of Glass and Steel Fibre Fabrics Measured with X-Ray Micro-Computer Tomography. *Textile Research Journal*, 2014, Vol. 84, Iss. 5, 500. — 512. lpp. ISSN 0040-5175. e-ISSN 1746-7748. Pieejams: doi:10.1177/0040517513503730.
2. Kononova, O., Krasnikovs, A., Harjkova, G., Zaleskis, J., Machanovskis, E. Characterization of Mechanical Properties by Inverse Technique for Composite Reinforced by Knitted Fabric. Part 1. Material Modeling and Direct Experimental Evaluation of Mechanical Properties. *Journal of Vibroengineering*, 2012, Vol. 14, Iss. 2, 681.–690. lpp. ISSN 1392-8716.
3. Kononova, O., Krasnikovs, A., Dzelzitis, K., Harjkova, G., Vagele, A., Eiduks, M. Modelling and Experimental Verification of Mechanical Properties of Cotton Knitted Fabric Composites. *Estonian Journal of Engineering*, 2011, Vol. 17, Iss. 1, pp. 39–50. e-ISSN 1736-7522. ISSN 1736-6038. Available from: doi: 10.3176/eng. 2011.1.05.

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumā:

1. Harjkova, G., Lusiš, V., Krasnikovs, A. Experimental investigation of weft knitted fabric layered reinforcement efficiency in fiberconcrete. No: Innovative Materials, Structures and Technologies, Latvija, Riga, 8. novembris, 2013. Riga: 2014, 59.–63. lpp. e-ISBN 978-9934-10-584-5. Pieejams: doi: 10.7250/isconstrs. 2014.10
2. Kononova, O., Krasnikovs, A., Harjkova, G., Lusiš, V. Numerical simulation of mechanical properties for composite reinforced by knitted fabric. No: Ebook Congreso Mundial TOMO IV, Spānija, Barcelona, 20.–25. jūlijs, 2014. Barcelona, Spain: 2014, 2925.–2932. lpp. ISBN 978-84-942844-7-2.
3. Harjkova, G., Barburski, M., Lomov, S., Kononova, O. Micro-CT Analysis of Glass Knitted Fabric Structure. In: Proceedings of 12th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development», Latvia, Jelgava, 23–24 May, 2013. Jelgava: 2013, pp. 223–227. ISSN 1691-5976.

4. Harjkova, G., Barburiski, M., Lomov, S., Kononova, O., Verpoest, I. Analysis of Knitted Fabric Geometrical Parameters Using X-ray Microtomography. No: Proceedings of 13th Autex 2013 Conference, Vācija, Dresden, 22.–24. maijs, 2013. Dresden: 2013, 1.–6. lpp.
5. Lusiš, V., Harjkova, G., Machanovskis, A., Kononova, O., Krasnikovs, A. Fracture of Layered Fiberconcrete with Non-Homogeneous Fiber Distribution. No: Proceedings of 12th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development», Latvija, Jelgava, 23.–24. maijs, 2013. Jelgava: 2013, 273.–277. lpp.
6. Harjkova, G., Barburiski, M., Lomov, S., Kononova, O., Krasnikovs, A., Verpoest, I. Micro-CT Usage for Knitted Fabric Structure Recognition. No: Tomography of Materials and Structures: 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures, Beļģija, Ghent, 1.–5. jūlijs, 2013. Ghent: 2013, 159.–162. lpp. ISBN 9789461971302.
7. Harjkova, G., Akishins, P., Kononova, O. Finite Element Analysis of Weft Knitted Composites. No: Civil Engineering '13: 4th International Scientific Conference: Proceedings. Vol. 4, Part 1, Latvija, Jelgava, 16.–17. maijs, 2013. Jelgava: 2013, 82.–85. lpp. ISSN 2255-7776. e-ISSN 2255-8861.
8. Vagele, A., Kononova, O., Krasnikovs, A., Harjkova, G., Polukoshko, S. Нелинейное моделирование вытаскивания волокна при разрушении фибробетона. In: Международная школа молодых ученых «Нелинейная динамика машин» (School-NDM). XVII симпозиум «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» (DYVIS-2012): сборник трудов, Russia, Москва, 20–26 May, 2012. Москва: ОНТИПиВ ИМАШ РАН, 2012, pp. 39–42. ISBN 9785904282035.
9. Krasnikovs A., Kononova O., Harjkova G., Zaharevskis V., Galuscaka A. Mechanical Properties Characterization by Inverse Technique for Composite Reinforced by Knitted Fabric // Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials (ECCM15), Italy, Venice, 24. June — 28. July, 2012. pp. 42–45.
10. Krasnikovs, A., Kononova, O., Harjkova, G., Zaleskis, J., Lusiš, V., Zaharevskis, V., Rucevskis, S. Mechanical Properties Characterization of Composites Reinforced by Knitted Fabrics. In: 15th International Conference on Experimental Mechanics: Conference Proceedings, Portugal, Porto, 22–27 July, 2012. Porto: Institute of Mechanical Engineering and Industrial Management (INEGI), 2012, pp. 1–17. ISBN 9789728826253.
11. Harjkova, G., Kononova, O., Krasnikovs, A., Eiduks, M., Machanovskis, E., Dzelzitis, K. Elastic Properties of Cotton Fabric Based Polymer Composites. In: 10th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development»: Proceedings, Latvia, Jelgava, 26–27 May, 2011. Jelgava: Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering, 2011, pp. 402–407. ISSN 1691-5976.
12. Kononova, O., Krasnikovs, A., Lapsa, V., Harjkova, G. Strength of Concrete Structural Element Reinforced by Glass Fiber Knitted Fabric. In: 3rd All-Russia (International) Conference «Concrete and Reinforced Concrete — Glance at Future», Russia, Moscow, 12–16 May, 2014. Moscow: 2014, pp. 82–86. ISBN 9785726408095.
13. Kononova, O., Krasnikovs, A., Dzelzitis, K., Eiduks, M., Harjkova, G., Vagele, A. Mechanical Properties of Composites Reinforced by Cotton Knitted Fabric. No: Proceedings of 7th International DAAAM Baltic Conference «Industrial Engineering», Igaunija, Tallinn, 20.–23. aprīlis, 2010. Tallinn: Tallinn University of Technology, 2010, 423.–429. lpp. ISBN 9789985599822.

14. Harjkova, G., Barburski, M., Lomov, S., Verpoest, I., Kononova, O. Micro-CT based geometry recognition of glass knitted fabric reinforced polymer laminates. No: TexComp-11 Conference proceedings, Beļģija, Leuven, 19.–20. septembris, 2013. Leuven, Belgium: 2013, 1.–5. lpp.

Patents:

LV patents: 14679 BETONA UN FIBROBETONA KONSTRUKCIJU STIEGROŠANAS PAŅĒMIENS. Autori: Gaļina Harjkova, Vitālijs Lūsis, Olga Kononova, Andrejs Krasņikovs

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 4 pielikumi, 115 attēlus, 8 tabulas, kopā — 160 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 192 nosaukumi.

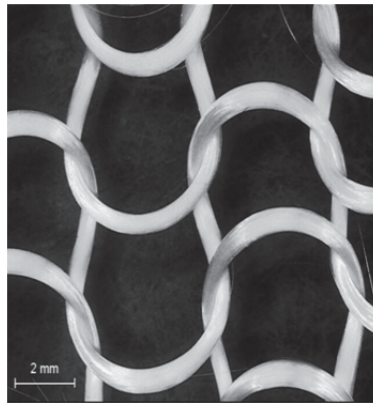
DARBA SATURS

Pirmā nodaļa. Šajā nodaļā ir literatūras apskats. Galvenā uzmanība veltīta adīta stiegrojuma (plānas kulirētas trikotāžas) kompozītmateriālu īpašību un specifikas izpētei, izmantojamo adīta stiegrojuma veidu un modeļu analīzei, kā arī veikta eksperimentālo tehniku un lietojuma apskats. Apskatīti esošie trikotāžas ģeometrijas modeļi [13, 14, 19–21 u. c.] un kompozītu mehānisku īpašību modelēšanas pieejas.

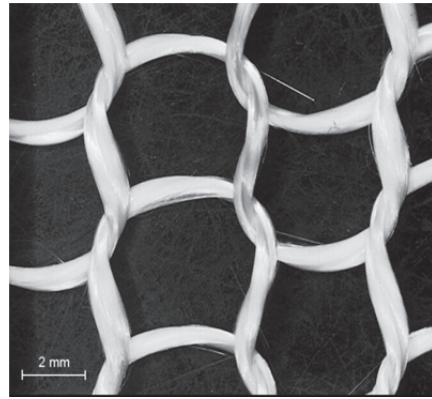
Plāna trikotāžas stiegrojuma kompozītu mehāniskās īpašības pētījuši vairāki zinātnieki [2–10, 15–18, 24] un eksistē dažādi teorētiski modeļi šādu materiālu īpašību noteikšanai [piem., 5, 6, 23], tomēr ir novērojams visaptverošas izpratnes trūkums par to uzvedību. Izpratnes trūkums ir šķērslis plašākai materiāla izmantošanai [12]. Pieņēmums par diega apaļu šķērsriezumu, kas izmantojams lielākajā daļā modeļu, ir diezgan nereālistisks, jo diegi ir viegli saspiežami ar sānspēkiem, kas darbojas diegu mijiedarbības punktos. Šo pieņēmumu nevar izmantot stiepes slogojuma gadījumā, jo kompresijas spēki pagarinātājā audumā būtiski pieaug un tas noved pie ievērojama pārvietojuma, kas rodas no savstarpējas diegu saspiešanas [16].

Var secināt, ka nav viennozīmīga trikotāžas vispārināta modeļa un nav esošu modeļu validācijas, izmantojot mūsdienīgas *GEM* programmas, kā arī trūkst teorētisko modeļu rezultātu salīdzināšana ar eksperimentāliem datiem un modelēšanas (simulēšanas) rezultātiem. Šķērsadītas trikotāžas izmantošana cementkompozītu (betonu un fibrobetonu) stiegrošanai un stiprības prognozēšana gan cementkompozītiem, gan polimērkompozītiem ir gandrīz neizpētīti.

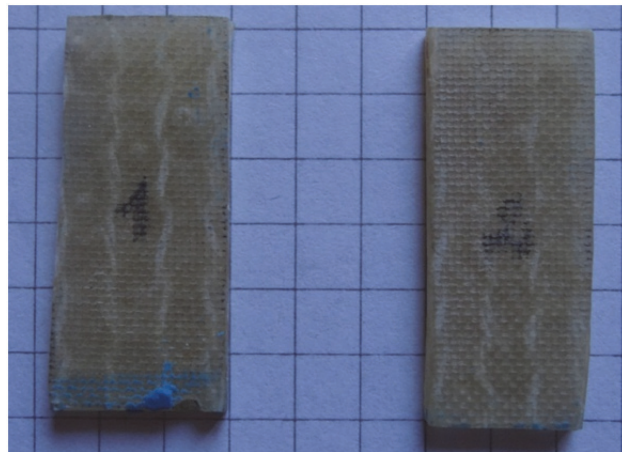
Otrā nodaļa ir veltīta eksperimentālam pētījumam; aprakstīts paraugu izgatavošanas process un divas eksperimentālas testēšanas metodes — stiepes testi, kas ir klasiska eksperimentālu pētījumu metode, un mikrorengentomogrāfija, kas ir salīdzinoši jauna materiālu iekšējās struktūras izpētes nesagraujoša metode. Tomogrāfijas izmantošanai materiālzinātnē ir liels potenciāls, jo šī tehnika ļauj veikt parauga iekšējās struktūras telpisku analīzi, kas nav iespējams, lietojot standarta mikroskopiskas tehnikas. Atšķirībā no skenējoša elektronu mikroskopa (*Scanning Electron Microscope*) vai gaismas mikroskopiem, balstītiem uz periodiskiem griezumiem, lietojot mikrotomogrāfiju, nav nepieciešams sagatavot parauga sērijveida šķērsgriezumus. Šī metode līdz šim netika plaši lietota adīta stiegrojuma struktūras izpētei.



(a)



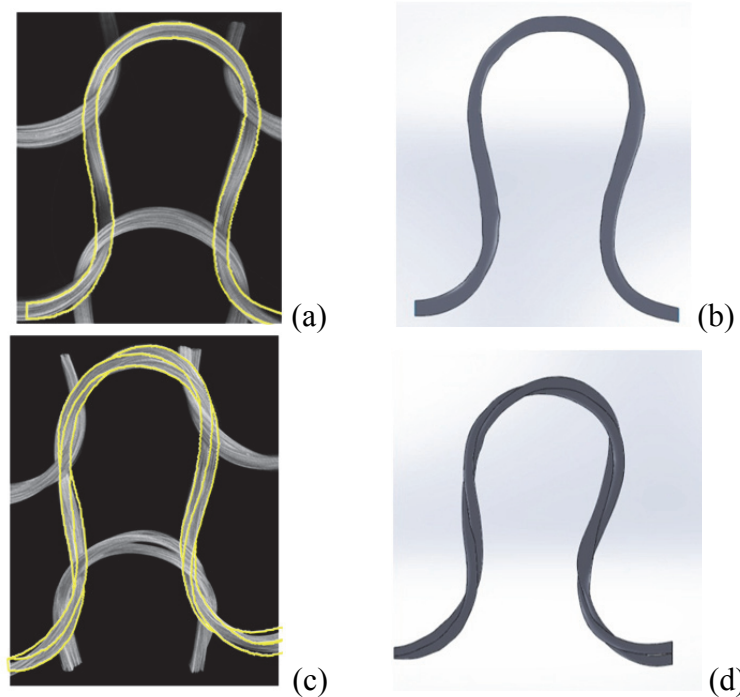
(b)



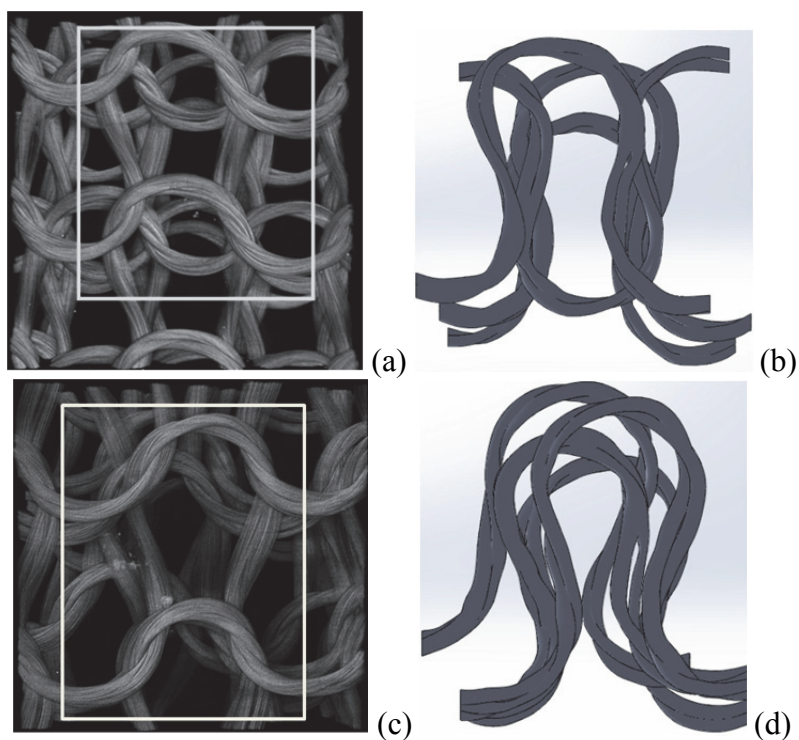
(c)

1. att. Pētāmie paraugi mikrorentģentomogrāfijas analīzei: audumi G2 (a), G3 (b) un 4 slāņu kompozīts (c)

Šajā nodaļā piedāvāta un izmēģināta analīzes procedūra polimērkompozītu plānas trikotāžas reālas ģeometrijas noteikšanai. Pētījumā rentģenstaru mikrorentģentomogrāfija lietota ģeometrisku parametru mērīšanai un trīsdimensiju vizualizācijai cilpai plānā trikotāžā. Šajā darbā tika apskatīti 2 veida stikla šķiedru trikotāžas audumi un 4 slāņu kompozītmateriāls. Mikrotomogrāfiska pētījuma rezultātā pierādīts, ka šī metode ir piemērots instruments tekstilstiegrojuma reālas ģeometrijas noteikšanai. Iegūtā ģeometrija var tikt izmantota tālākiem pētījumiem, piemēram ar *GEM*.



2. att. Mikrotomogrāfijas analīzes rezultāti audumam G2 (a, b) un audumam G3 (c, d): (a), (c) rekonstruēts auduma attēlojums, (b), (d) vienas cilpas ģeometriskais modelis, balstīts uz izmērītiem lielumiem



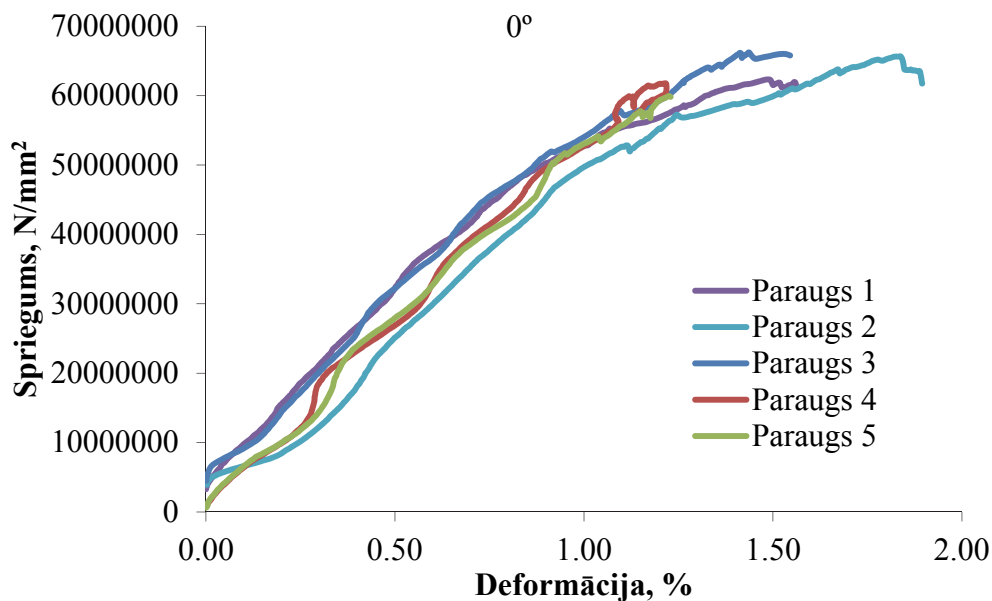
3. att. Ar trikotāžas audumu stiegrots kompozītmateriāls — Paraugs 1 (a–b) un Paraugs 2 (c–d): (a), (c) rekonstruēts apjoms; (b), (d) ģeometriskais modelis, izveidots, izmantojot mikrotomogrāfijas analizē iegūtos datus

Analizējot mikrotomogrāfijas pētījuma rezultātus, var secināt, ka:

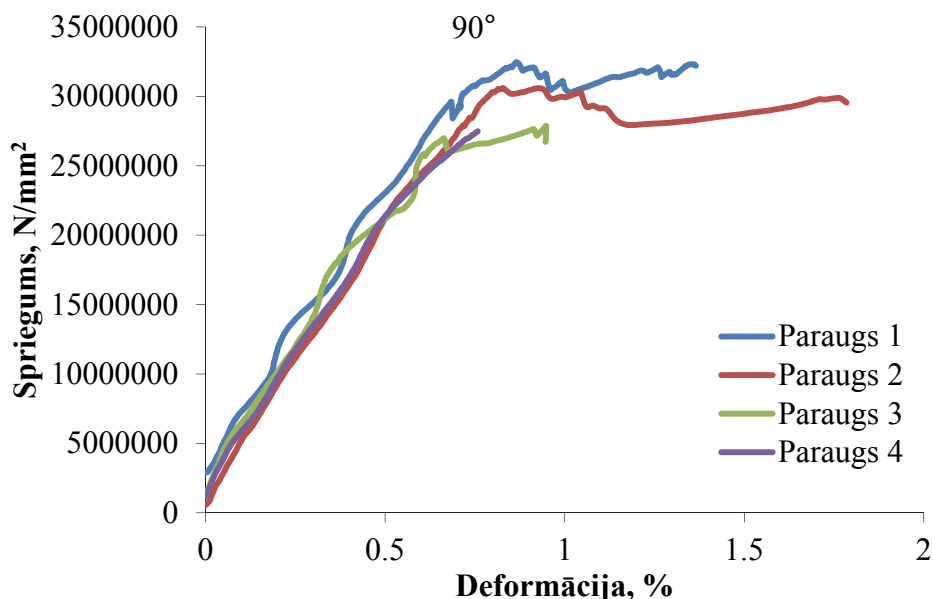
- standarta mikrotomogrāfijas iekārtas var tikt lietotas šķiedrainu struktūru ģeometrijas noteikšanai;
- izmantojot šo tehniku, var noteikt reālu tekstilstruktūru diegu šķērsriezuma laukumus un formas, kas savukārt var uzlabot eksistējošus modeļus, kuros šķērsriezumi ir uzskatīti par apaļiem;
- šķērsriezuma laukumi, kā arī to eliptisitāte variējas atkarībā no diega zonas: divu diegu kontakta zonā šķērsriezumiem ir lielāka eliptisitāte, kas atspoguļo kompresijas spēku darbību;
- ar mikrotomogrāfijas tehniku iegūta diega viduslīnija atbilst teorētiski iegūtai, izmantojot Lifa-Glaskina modeli, deviācijas novērojamas platīnas loku reģionā.

Stiepes testu rezultātā ir iegūtas materiāla mehāniskās īpašības (elastības moduļi principiālos virzienos) vienslāņa un 4 slāņu KM.

Eksperimenta gaitā iegūtas sprieguma-deformācija līknes (4., 5. att.), pēc kuru datiem ir aprēķināti elastības moduļi 0° un 90° virzieniem abu veidu KM (vienslāņa un 4 slāņu). Rezultātā ir iegūti šādi elastības moduļu lielumi: 4 slāņu KM — $E_L = 5,46$ GPa, $E_T = 3,95$ GPa, vienslāņa KM — $E_L = 1,545$ GPa, $E_T = 1,543$ GPa.

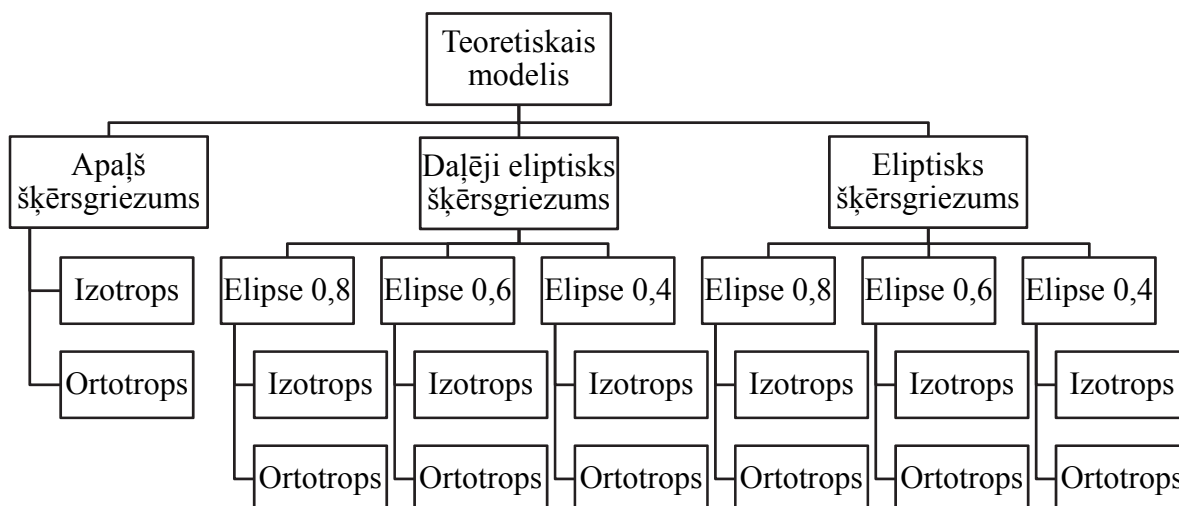


4. att. Eksperimentālie rezultāti 4 slāņu 0° paraugiem

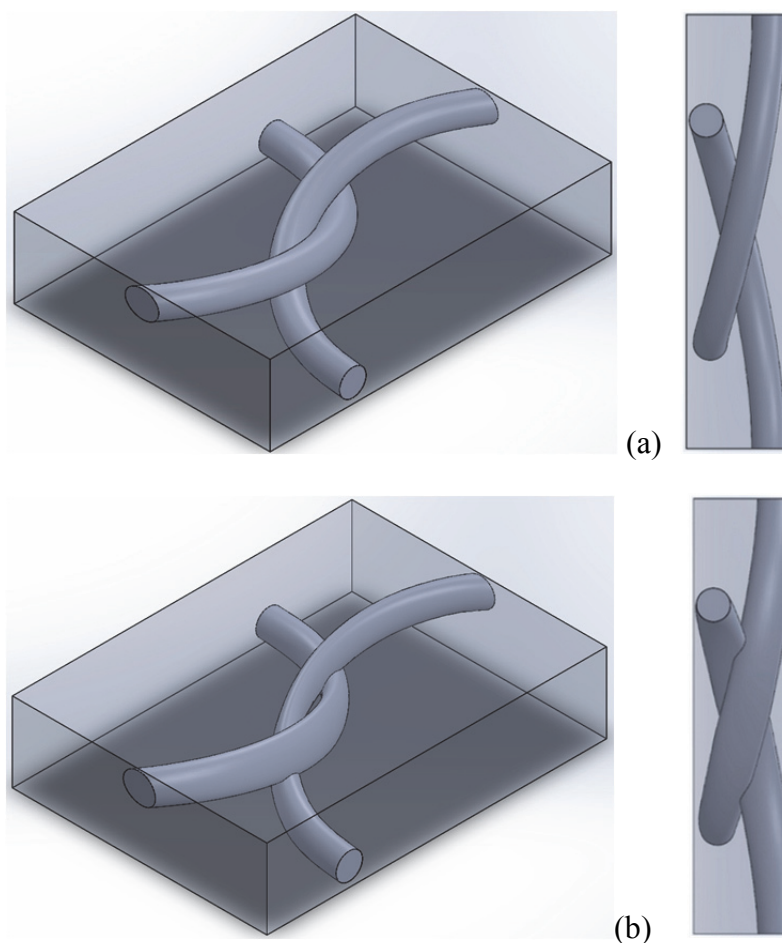


5. att. Eksperimentālie rezultāti 4 slāņu 90° paraugiem

Trešā nodaļa. Šajā nodaļā aprakstīts polimerkompozītu ar trikotāžas stiegrojumu teorētiskais pētījums. Pētījumu nosacīti var sadalīt trīs daļās — pirmā ir skaitliska modelēšana ar mērķi noteikt KM elastības modulūkus, otra — elastīgu īpašību modelēšana ar *GEM*, kurā apskatīti modeļi ar apaļu, daļēji eliptisku un eliptisku diegu šķērsgrizumiem, trešā — stiprības skaitliska modelēšana. Iegūtās elastības īpašības tika salīdzinātas gan savā starpā, gan ar eksperimentāliem datiem, kas aprakstīti iepriekšējā nodaļā.



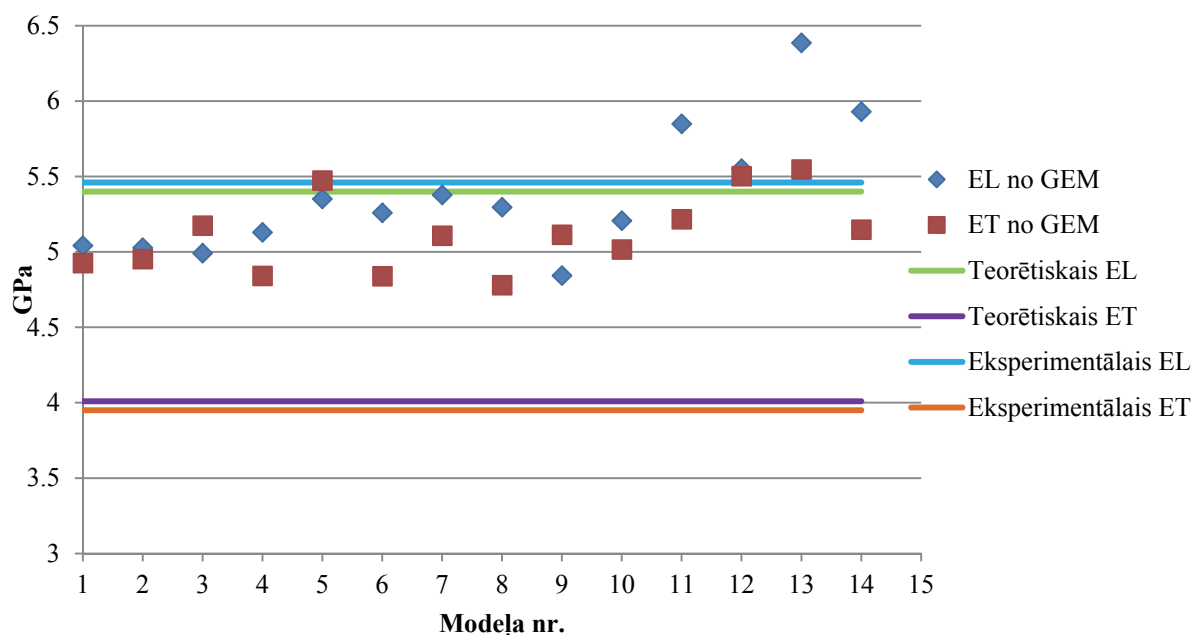
5. att. *GE* modeļu veidu apkopojums



7. att. Dažu modeļu attēlojumi izometriskā skatā un skatā no kreisas puses:
 a — izotrops modelis ar apaļu šķērsriezumu, b — izotrops modelis ar daļēji eliptisku
 (asu attiecība ir 0,4) šķērsriezumu

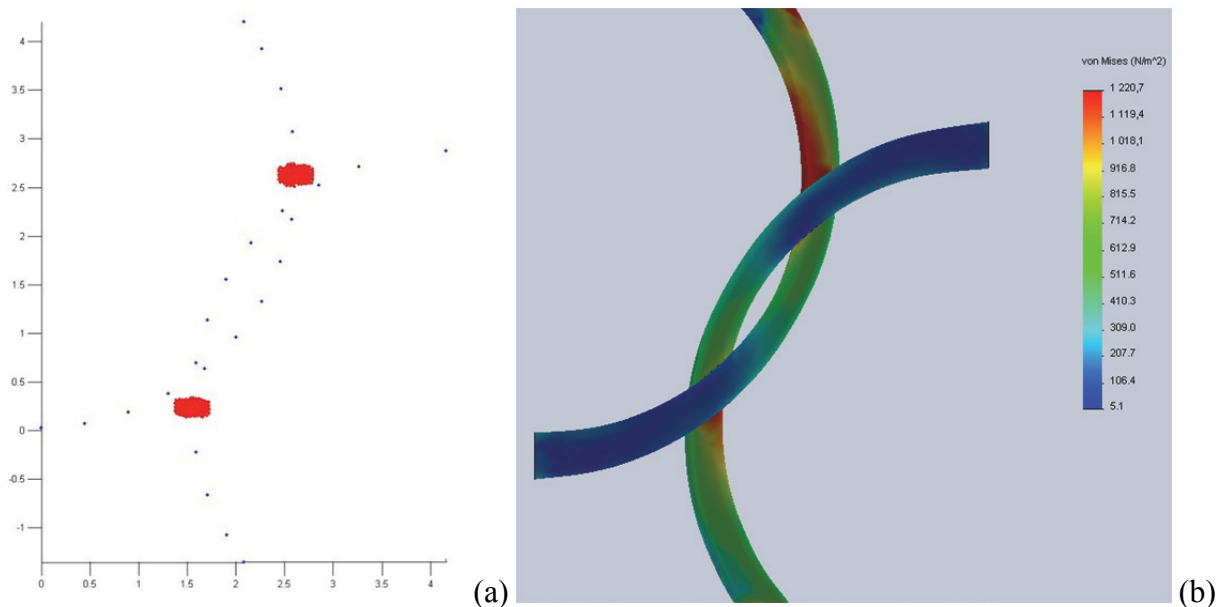
Elastības moduļi ir aprēķināti, dalot matricas skaldnes un diega šķērsriezuma uz tās skaldnes vidējo spriedumu ar to vidējo deformāciju.

Salīdzinot eksperimentāli (ar stiepes testu palīdzību) iegūtos elastības moduļu lielumus ar teorētiski aprēķinājumiem, var secināt, ka eksperimentāli iegūtās elastības moduļu vērtības labi sakrīt ar analītiski aprēķinātiem lielumiem. Dažu izveidotu GE modeļu garenvirziena modulis E_L labi sader ar eksperimentāliem un teorētiskiem datiem, savukārt E_T modulis no GE ir lielāks par aprēķināto un eksperimentālo un ir līdzīgs E_L .



8. att. Elastības moduļu salīdzinājums

Dažiem modeļiem tika noteiktas maksimālo spriegumu vietas, izmantojot *Matlab* programmu.

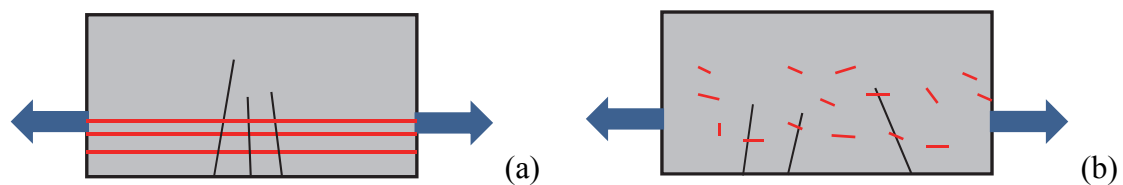


9. att. Maksimālo spriegumu atrašanās vietu vizuālais attēlojums: modelis Nr. 7 — izotropis modelis ar daļēji eliptisku šķērs griezumu (ass attiecība 0,4) un attiecīga modeļa spriegumu sadalījums *GE* programmā

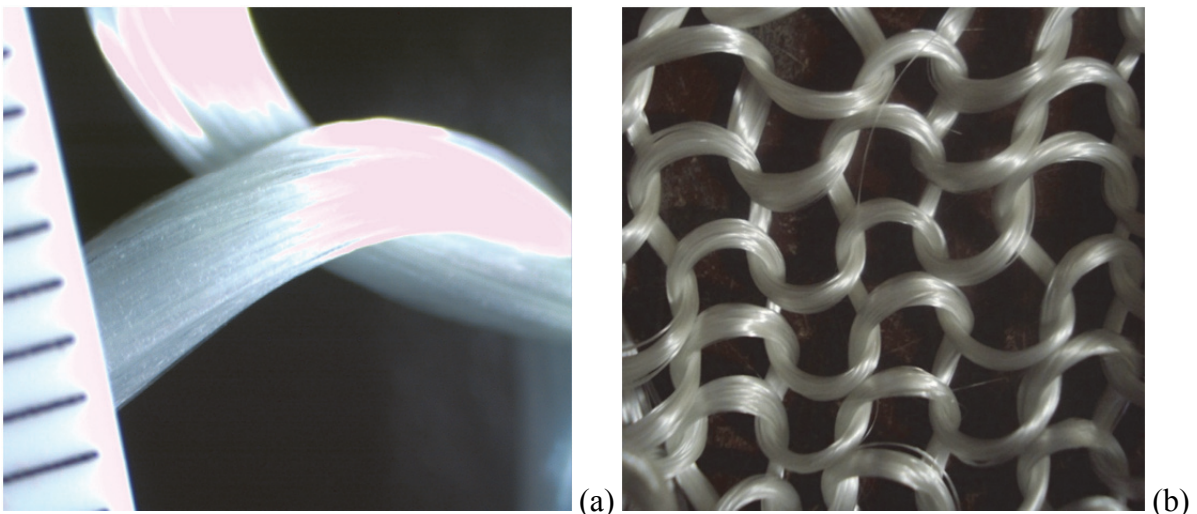
Trešajā nodaļā veikta arī stiprības prognozēšana, izmantojot *GEM*. Sagraušana ir apskatīta kā secīgs diegu plīsums ārējās stiepes slodzes ietekmē. Pētījuma objekts ir vienslāņa plānas trikotāžas stiebrojuma kompozītlāksne. Pieliktie stiepes spēki diegos izraisa

nevienmērīgu spriedumu sadalījumu. Pirmais trikotāžas diegs saplīsīs vietā, kur spriegumam ir lielāka vērtība.

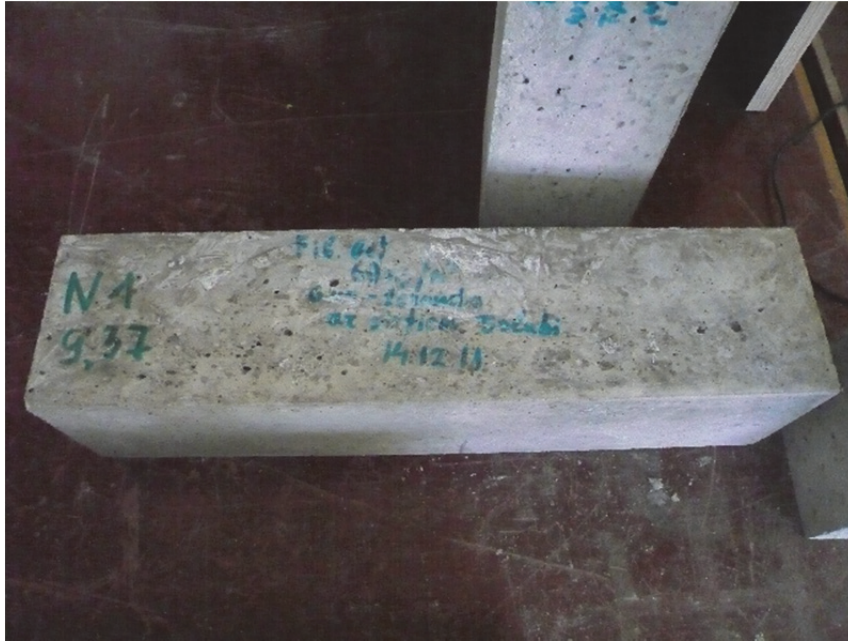
Ceturrtā nodaļa veltīta trikotāžas stiegrojuma izmantošanai fibrobetonos. Cementkompozītu stiegrošana ar nepārtrauktam šķiedrām ir viens no efektīvākiem veidiem, lai iegūtu augstas veiktspējas materiālu [22]. Cementkompozīti var būt stiegoti ar dažādas ģeometrijas tērauda šķiedrām, stikla, sintētiskām vai naturālām šķiedrām [1] un tekstilizstrādājumiem. Šķiedru stiegrojums kļūst efektīvs pārsvarā pēc tam, kad matrica ir ieplaisājusi un šķiedras notur plaisas (10. att), šādā veidā uzlabojot materiāla slodzes nestspēju. Šajā darbā fibrobetona paraugi tika stiegoti ar stikla šķiedru plānas trikotāžas audumu. Pētījuma mērķis ir novērtēt stikla šķiedru trikotāžas slāņu ietekmi uz fibrobetona īpašībām. Šajā nodaļā veikta arī modelēšana. Modelēšanas rezultātā tika iegūts spriegumu sadalījums un tika analizētas abu pētāmo diegu 105 šķērsriezumi. Katrā šķērsriegzumā (kas ir ortogonāls telpā pret diega viduslīniju) tika noteikti vidējie spriegumi.



10. att. Trikotāžas (a) un fibru (b) stiegrojuma betonā shematiskais attēlojums: auduma un šķiedru stiegrojumam slodzes gadījumā ir novērojama dažāda uzvedība [11]



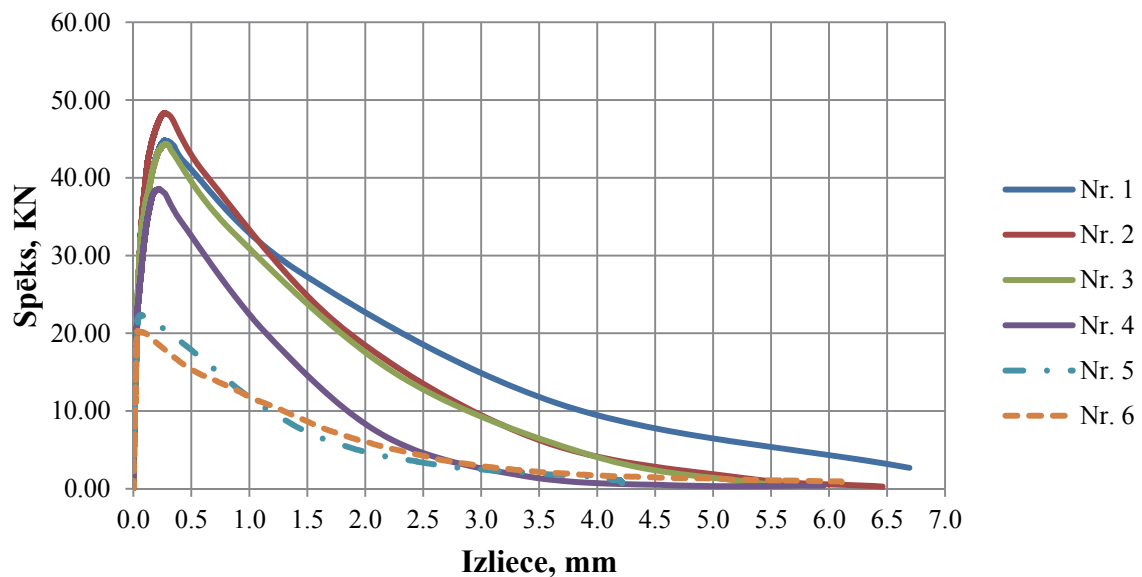
11. att. Trikotāžas stiegrojums: (a) diegu sakrustošanas apgabals un adījuma fragments (b)



12. att. Gatavs paraugs — fibrobetona brusa ($100 \times 100 \times 400$ mm)

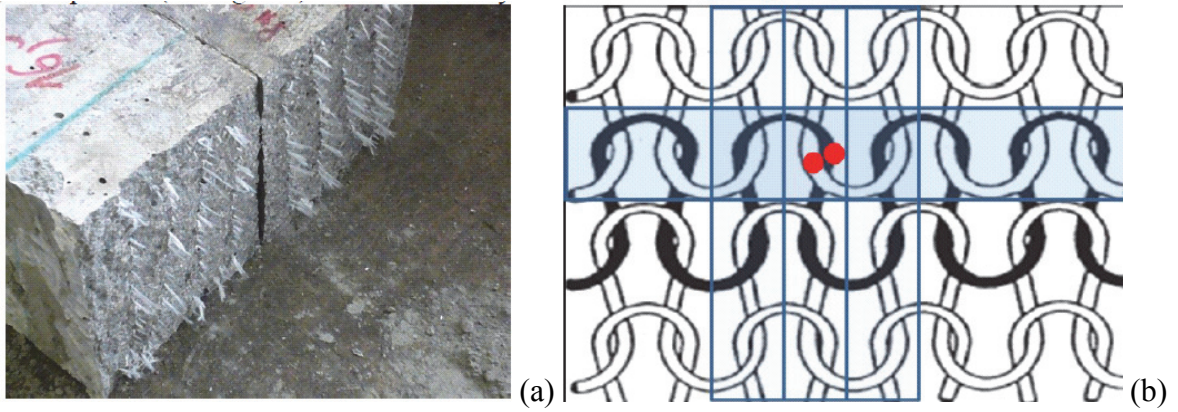
Fibrobetona paraugi tika eksperimentāli pētīti, izmantojot četru punktu lieces testu.

Auduma stiebrojuma ietekme uz pētīto paraugu stiprību redzama 13. att. Paraugu nestspēja ir 38–48 kN. Paraugiem (Nr. 1–4 13. att.) ar trikotāžas slāņiem maksimāla slodze ir apmēram divās reizēs lielāka, salīdzinot ar paraugiem bez adīta stiebrojuma (Nr. 5–6).



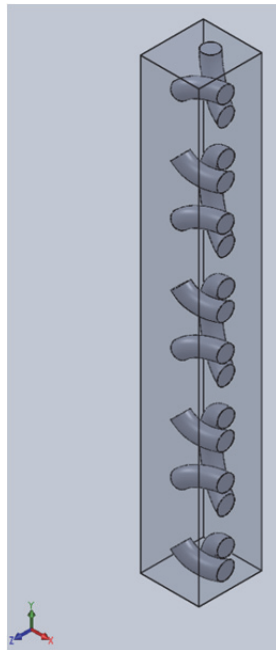
13. att. Spēka-izlieces līknes: paraugi Nr. 5 un 6 ir bez trikotāžas stiebrojuma

Analizējot pētījuma rezultātus, var secināt, ka betons un fibrobetons var būt veiksmīgi stiebroti ar plānas trikotāžas audumu no stikla šķiedru diegiem. Eksperimenti parādīja slodzes lieluma palielinājumu paraugiem ar trikotāžas slāņiem.

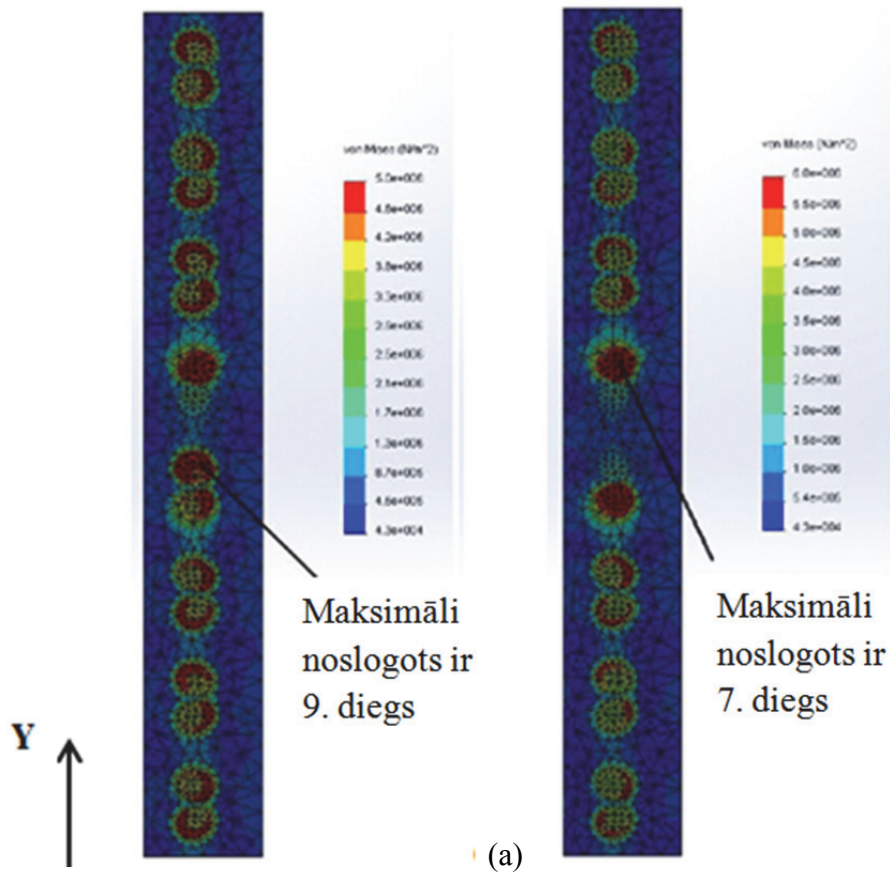


14. att. (a) Betona paraugs ar 4 slāņu trikotāžas stierojumu pēc sagraušanas;
 (b) sastieptu diegu reģions makroplaisā

Lai modelētu betona bloka ar trikotāžas slāņu stierojumu stiprību, ceturtajā nodaļā tika izveidots strukturāls modelis, tika izmantota varbūtības pieeja un piedāvāta diegu secīgas sagraušanas procesa modelēšana.



15. att. Izmantotais strukturālais modelis



16. att. Fon Mīzesa spriegumu sadalījuma piemērs: (a) ir sabrucis viens diegs (8. no augšas), (b) ir sabrukuši divi diegi (8. un 9.)

SECINĀJUMI

Šajā promocijas darbā tika apskatīti kompozītmateriāli ar trikotāžas stiegrojumu. Tika analizētas plānas kulirētas trikotāžas izmantošanas iespējas polimēru matricas un fibrobetona matricas kompozītmateriālos. Ir veikti šādi **pētījumi**:

- stiepes testi — eksperimentāli noteikti vienslāņa un 4 slāņu vienvirziena polimērkompozītu elastības moduli divos principiālos materiāla virzienos;
- datormodelēšana ar *GEM*, lai noteiktu slāņaina kompozīta īpašības; izveidotajos modeļos lietoti dažādi šķērsriezuma tipi;
- skaitliskā modelēšana elastības moduļu noteikšanai, izmantojot pārejas matricas modeli;
- trikotāžas stiegrojuma reālas ģeometrijas noteikšana ar rentgenstaru mikrotomogrāfijas tehniku;
- datormodelēšana ar *GEM* ar mērķi prognozēt adīta stiegrojuma kompozītu stiprību;
- eksperimentāli pārbaudīta trikotāžas stiegrojuma ietekme uz fibrobetona bloku nestspēju.

Pētījumā eksperimentāli un teorētiski iegūtie elastības moduļi ir salīdzināti savā starpā; piedāvāta reālas trikotāžas ģeometrijas noteikšanas metodika, izmantojot mikrotomogrāfiju; aprakstīta trikotāžas stiegrojuma kompozītu stiprības modelēšanas metode.

Iegūtie **rezultāti un atziņas**

1. Analizējot literatūras avotus, tika secināts, ka, lai arī eksistē diezgan liels skaits pētījumu par trikotāžas stiegrojuma kompozītmateriāliem, ir novērojams visaptverošas modelēšanas trūkums šāda veida materiāliem, nav esošu modeļu validācijas, izmantojot mūsdienīgas *GEM* programmas, kā arī gandrīz nav pētīta stiprības prognozēšana.
2. Mikrotomogrāfijas tehnika var tikt veiksmīgi lietota reāla trikotāžas stiegrojuma struktūras noteikšanai, kas savukārt var uzlabot esošos trikotāžas modeļus. Pašlaik šāda veida tehnika var būt laukietilpīga, bet tai ir liels potenciāls, jo īpaši — ja tiks dota iespēja automatizēt datu apstrādi un vienkāršot datu migrāciju 3D modelēšanas programmās.
3. Stiepes testu rezultātā tika iegūtas elastības moduļu vērtības divos principiālos virzienos divu veidu paraugiem — vienslāņa un 4 slāņu plānas trikotāžas stiegrojums kompozītmateriālam ar polimērmaticu. Vienslāņa kompozīta elastības moduļu lielumi divos principiālos virzienos ir ļoti līdzīgi.
4. Ar trikotāžu stiegrots kompozītmateriāls var būt modelēts mūsdienu nespecifiskajā *GE* modelēšanas programmā. Šajā darbā tika izmantots *SolidWorks*. Iegūtie rezultāti garenvirziena modulim labi sakrīt ar eksperimentālajiem un teorētiskajiem datiem, šķērsvirziena modulim ir novērojama lielāka atšķirība. Jāpiebilst, ka *SolidWorks* ir ļoti jutīgs pret robežnoteikumu un tīklojuma parametru izmaiņu.
5. Darbā tika izmēģināta kompozītmateriālu stiprības modelēšana *GEM* programmā ar varbūtības teorijas izmantošanu.
6. Plānas trikotāžas stiegrojumu var veiksmīgi lietot betonu un fibrobetonu stiegrošanai to nestspējas uzlabošanai. Visracionālāk šāda veida stiegrojumu izmantot telpiskās detaļās un konstrukcijās, piemēram, čaulās.

Rekomendācijas turpmākiem pētījumiem

Veikt vairāk eksperimentu elastības moduļu noteikšanai, īpaši — slāņainiem, kompozītplāksnēm ar dažādiem slāņu orientāciju leņķiem.

Optimizēt un uzlabot galīgo elementu modeļus elastības moduļu noteikšanai un stiprības/sagraušanas modelēšanai; veikt modeļu parametru (robežnoteikumu, tīklojuma) ietekmes validāciju; iespējams automatizēt modeļu radīšanu.

Dziļāk izpētīt tekstilmateriālu ģeometrijas evolūciju deformācijas procesā un deformācijas ģeometrijas ietekmi uz materiāla īpašībām.

Precīzāka kompozītmateriālu ar trikotāžas stiprības prognozēšana.

Veikt mikrotomogrāfijas tehnikas datu (t. i., iegūtā ģeometriskā modeļa) mehānisku analīzi.

Lai izmantotu iespējas, ko sniedz nesagraujoša mikrotomogrāfijas metode, nepieciešams veikt vairākus pētījumus ar mērķi optimizēt izejas datu apstrādi un padarīt šo apstrādi precīzāku un ātrāku; liels potenciāls ir risinājumam, kas ļautu konvertēt mikrotomogrāfijas izejas datus uzreiz ģeometriskajos modeļos to tālākai pētīšanai *GEM* datorprogrammās.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. ACI Committee 544. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 1997. — 66 p.
2. De Araujo M., Figueiro R., Hong H. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabric for technical applications. Part II: 3D model based on the elastica theory// *Autex Research Journal*. — 2003. — Vol. 3, No 4. — pp. 117–123.
3. De Araujo M., Figueiro R., Hong H. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabric for technical applications. Part III: 2D hexagonal FEA

- model with non-linear truss elements// *Autex Research Journal*. — 2004. — Vol. 4, No 1. — pp. 107–112.
4. De Araujo M., Fangueiro R., Hong H. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabric for technical applications. Part IV: 3D FEA model with a mesh of tetrahedric elements// *Autex Research Journal*. — 2004. — Vol. 4, No 2. — pp. 72–80.
 5. de Jong. S. and Postle R. An Energy Analysis of the Mechanics of Weft-knitted Fabrics by Means of Optimal-control Theory. Part I: The Nature of Loop-interlocking in the Plain-knitted Structure// *Journal of the Textile Institute*. — 1977. — Nr. 68. 307–315 pp.
 6. Doyle P. J. Fundamental Aspects of the Design of Knitted Fabrics// *Journal of the Textile Institute*. — 1953. — Nr. 44. 561–P578 pp.
 7. Gommers B., Verpoest I. Tensile behaviour of knitted fabric reinforced composites// *Proceedings of ICCM-10*. — 1995. pp. 309–316.
 8. Grishanov S. A, Cassidy T., Spencer D. J. A syntactic method of description and analysis of weft knitted fabric structure// *Knitting International*. — 1995. — Nr. 1227. pp. 60–62.
 9. Huang Z. M. Progressive flexural failure analysis of laminated composites with knitted fabric reinforcement// *Mechanics of Materials*. — 2004. — 36. — 239–260 pp.
 10. Huang Z. M. Simulation of the mechanical properties of fibrous composites by the bridging micromechanics model// *Composites: Part A*. — 2001. — 32. — pp. 143–172.
 11. Khabaz A. Short fibers reinforced concrete quasi-plastic fracture analysis. Doctoral Thesis. Riga Technical University. 2009.
 12. Khondker O. A., Herszberg I., Leong K. H. An Investigation of the Structure-Property Relationship of Knitted Composites// *Journal of Composite Materials*. — 2001. — Vol. 35, No. 06. pp. 489–508.
 13. Leaf G. A., Glaskin A. The Geometry of Plain Knitted Loop// *Journal of the Textile Institute*. — 1955. — Nr. 46. 587–605 p.
 14. Leaf G. A. Models of the Plain-Knitted Loop// *Journal of the Textile Institute*. — 1960. — Nr. 51. 49–58 p.
 15. Leong K. H., Ramakrishna S., Huang Z. M., Bibo G. A. The potential of knitting for engineering composites — a review// *Composites: Part A*. — 2000. Nr. 31, pp. 197–220.
 16. Loginov A. U., Grishanov S. A., Harwood R. J. Modelling the Load-Extension Behaviour of Plain-knitted Fabric: Part I: A Unit-cell Approach towards Knitted-fabric Mechanics// *Journal of the Textile Institute*. — 2002. — Nr. 93:3. 218–238 pp.
 17. Loginov A. U., Grishanov S. A., Harwood R. J. Modelling the Load-Extension Behaviour of Plain-knitted Fabric: Part II: Energy Relationships in the Unit Cell// *Journal of the Textile Institute*. — 2002. — Nr. 93:3. 239–250 pp.
 18. Loginov A. U., Grishanov S. A., Harwood R. J. Modelling the Load-Extension Behaviour of Plain-knitted Fabric: Part III: Model Implementation and Experimental Verification// *Journal of the Textile Institute*. — 2002. — Nr. 93:3. 251–275 pp.
 19. Munden D. L. *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics*, Vol. 1, edited by P. Grosberg (Wiley-Interscience, USA), 1969, 420 p.
 20. Peirce F. The geometry of cloth structure// *Journal of the Textile Institute*. — 1937. Nr. 28. 45–96 pp.
 21. Peirce F. T. Geometrical Principles Applicable to The Design of Functional Fabrics// *Journal of the Textile Institute*. — 1947. — Nr. 17. 123–148 p.
 22. Peled A., Bentur A. Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites// *Cement and Concrete Research*. — 2000. — Nr. 30, pp. 781–790.

23. Postle R., Munden. D. L. Analysis of the Dry-relaxed Knitted-loop Configuration. Part II: Three dimensional Analysis// Journal of the Textile Institute. — 1967. — Nr. 58. 352–365 pp.
24. Vanclooster K., Barburski M., Lomov S. V., et al. Experimental Characterisation of Steel Fibre Knitted Fabrics Deformability// Experimental Techniques. Epub ahead of print 31 December 2012. DOI: 10.1111/ext.12009.