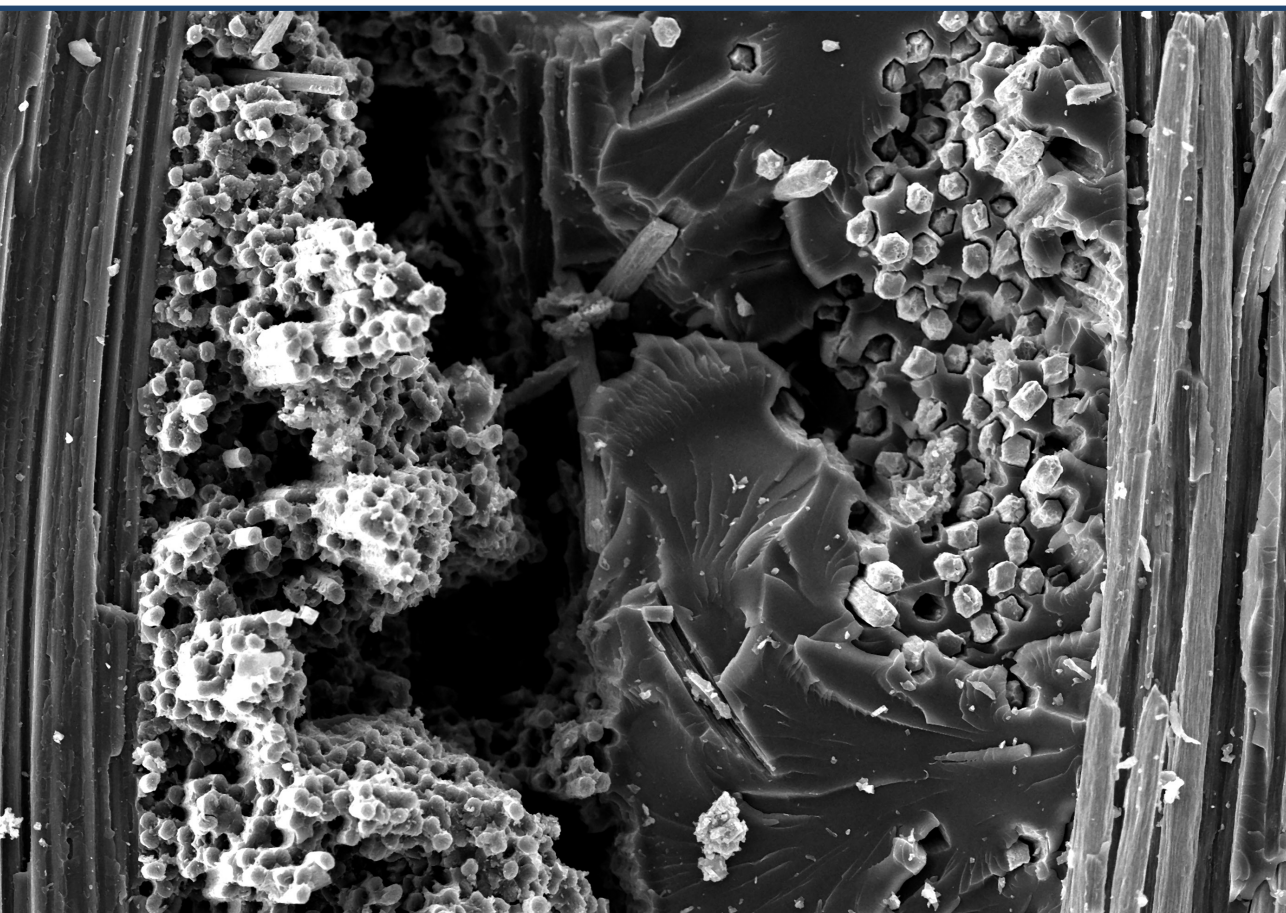


Anish Niranjana Kulkarni

MIKROBOJĀJUMU ATTĪSTĪBA INOVATĪVOS POLIMĒRU KOMPOZĪTMATERIĀLOS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte
Augstas veiktspējas materiālu un konstrukciju institūts

Anish Niranjan Kulkarni

Doktora studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika (lietišķā mehānika)” doktorants

MIKROBOJĀJUMU ATTĪSTĪBA INOVATĪVOS POLIMĒRU KOMPOZĪTMATERIĀLOS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Profesors *Dr. sc. ing.*
ANDREJS PUPURS

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Kulkarni, A. N. Mikrobojājumu attīstība inovatīvos polimēru kompozītmateriālos. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. 39 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-04” 2026. gada 30. marta lēmumu, protokols Nr. 04030-9.4/7.

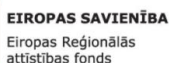
Vāka attēla autors Anish Niranjana Kulkarni.

<https://doi.org/10.7250/9789934373381>
ISBN 978-9934-37-338-1 (pdf)

PATEICĪBAS

Promocijas darbs izstrādāts ar šādu grantu atbalstu:

- Eiropas Sociālā fonda (SAM) finansētais projekts “Rīgas Tehniskās Universitātes un Banku Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” Nr. 8.2.2.0/20/I/008, programmā “Izaugsme un nodarbinātība”;
- doktorantūras grants (nr. 1061) projektā No. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 – “Konsolidācijas un pārvaldības izmaiņu ieviešana Rīgas Tehniskajā universitātē, Liepājas Universitātē, Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmijā un Latvijas Jūras akadēmijā un Liepājas Jūrniecības koledžā virzībai uz izcilību augstākajā izglītībā, zinātnē un inovācijās”;
- Latvijas Zinātnes Padomes Fundamentāli lietišķās pētījumu programmas (FLPP) projekts LZP-2019/1-0357 “Inovatīvu tekstilkompozītu/metāla savienojumu ar paaugstinātām mehāniskajām īpašībām izstrāde un darbības izpēte”;
- Latvijas Zinātnes Padomes Fundamentāli lietišķās pētījumu programmas (FLPP) projekts LZP-2022/1-0572 “Inovatīvas indukcijas sildīšanas sistēmas izstrāde augstas veiktspējas kompozītmateriālu ražošanai ar uzlabotām mehāniskajām īpašībām”;
- valsts pētījumu programmas “Sports” projekts VPP-IZM-Sports-2023/1-0001 “Inovācijas, metodikas un rekomendācijas sporta nozares attīstībai un pārvaldībai Latvijā”;
- Eiropas Savienības Atveseļošanas un noturības mehānisma finansētais projekts Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 “Konsolidācijas un pārvaldības izmaiņu ieviešana Rīgas Tehniskajā universitātē, Liepājas Universitātē, Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmijā un Latvijas Jūras akadēmijā un Liepājas Jūrniecības koledžā virzībai uz izcilību augstākajā izglītībā, zinātnē un inovācijās”. Zinātnieka grantu projekts Nr. RTU-ZG-2024/1-0013.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph.D.*) grāda iegūšanai tiks publiski aizstāvēts 2026. gada 9. oktobrī plkst. 10:00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 135 telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Martin Fagerström*,
Čalmersa Tehniskā universitāte, Zviedrija

Profesors *Endel Iarve*,
Teksasas Universitāte Arlingtonā, ASV

Dr. phys. Sergejs Tarasovs,
Latvijas Universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Anish Niranjan Kulkarni (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Promocijas darba kopsavilkums uzrakstīts uz 39 lappusēm, tajā ir 20 attēli, 2 tabulas un 54 atsaucis. Kopsavilkumā ir ievads par darba tēmu un galvenie darba rezultāti. Promocijas darbs veidots kā sešu publikāciju kopa. Raksti ir uzrakstīti angļu valodā, to kopējais apjoms ir 90 lappuses.

SATURS

Saīsinājumi	6
Promocijas darba vispārējs raksturojums	8
Mērķis un uzdevumi.....	9
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	9
Promocijas darba saturs.....	10
Darba aprobācija un publikācijas	10
1. Ievads	12
2. Promocijas darba galvenie rezultāti	18
2.1. Mikrobojājumu attīstība krusteniski līmētos laminātos ar augstu plaisu blīvumu	18
2.2. Mikrobojājumu attīstība hibrīdajos oglekļa / nerūsējošā tērauda šķiedru tekstīlkompozītos	22
2.3. Mikroplīsumu attīstība ar indukciju cietinātos termoreaktīvos kompozītos	29
3. Secinājumi	34
Atsauces	35

SAĪSINĀJUMI

GEM	galīgo elementu metode
CF	oglekļa šķiedra
UD	vienvirziena
ERR	enerģijas atbrīvošanās ātrums
GF/EP	stikla šķiedras / epoksīda kompozīts
CF/EP	oglekļa šķiedras / epoksīda kompozīts
ρ	šķērsvirziena plaisu blīvums
ρ_n	normalizētais plaisu blīvums
σ_T	šķērsvirziena spriegumi
σ_{Tn}	normalizētie šķērsvirziena spriegumi
d	puse no 90 grādu slāņa biezuma [0/90]s krusteniski līmētā kompozīta laminātā (2.1. apakšnodaļa)
t_0	0 grādu slāņa biezums [0/90]s krusteniski līmētā kompozīta laminātā
t_{90}	90 grādu slāņa biezums [0/90]s krusteniski līmētā kompozīta laminātā
G	enerģijas atbrīvošanās ātrums
G_T	kopīgais enerģijas atbrīvošanas ātrums
a_N	šķērsvirziena plaisas garums (2.1. apakšnodaļa)
E_L^0	garenvirziena elastības modulis 0 grādu slānim [0/90]s krusteniski līmētā kompozīta laminātā
G_{LT}^0	plaknes bīdes modulis 0 grādu slānim [0/90]s krusteniski līmētā kompozīta laminātā
E_T^{90}	šķērsvirziena elastības modulis 90 grādu slānim [0/90]s krusteniski līmētā kompozīta laminātā
l_d	delaminācijas garums (2.1. apakšnodaļa)
l_c	puse no attāluma starp divām blakus esošām šķērsvirziena plaisām (2.1. apakšnodaļa)
E_{x0}	sākotnējais kompozītmateriāla garenvirziena elastības modulis (2.2. apakšnodaļa)
ROM	maisījumu likums
SEM	skenējošā elektronu mikroskopija
RVE	reprezentatīvā tilpuma elements
3D	trīsdimensionāls
D_L	kompozītmateriāla garenvirziena bojājumu parametrs (2.2. apakšnodaļa)
X_T	kompozītmateriāla garenvirziena stiepes stiprība (2.2. apakšnodaļa)
Y_T	kompozītmateriāla šķērsvirziena stiepes stiprība (2.2. apakšnodaļa)
S_L	kompozītmateriāla bīdes stiprība (2.2. apakšnodaļa)
DSC	diferenciālā skanējošā kalorimetrija

T_g	stiklošanās temperatūra
E	kompozītmateriāla elastības modulis (2.3. apakšnodaļa)
E_n	normalizētais kompozītmateriāla elastības modulis (2.3. apakšnodaļa)
$\sigma_{\max}$	kompozītmateriāla galīgā stiepes stiprība (2.3. apakšnodaļa)
$\varepsilon_{\max}$	kompozītmateriāla sabrukšanas deformācija (2.3. apakšnodaļa)

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Šajā kopsavilkumā dots pārskats par sešu zinātnisko publikāciju kopu, kas veido promocijas darbu “Mikrobojājumu attīstība inovatīvos polimēru kompozītmateriālos”. Promocijas darba galvenais mērķis ir izpētīt mikrobojājumu attīstību polimēru kompozītmateriālos: i) ar augstu plaisu blīvumu; ii) ar hibrīdo šķiedru struktūru; iii) kas izgatavoti ar inovatīvu elektromagnētiskās indukcijas sildīšanas tehnoloģiju.

1. un 2. rakstā pētīta tādu mikrobojājumu kā šķērsvirziena plaisu un delamināciju veidošanos krusteniski līmētos kompozītu laminātos ar slāņojumu [0/90]_s. Šo mikrobojājumu izplatīšanās tika pētīta ar skaitliskajām metodēm, izmantojot GEM modelēšanu, analizējot enerģijas atbrīvošanās ātruma izmaiņas plaisas augšanas procesā vienvirziena mehāniskā slogojuma gadījumā. Šo pētījumu novitāte saistīta ar: i) šķērsvirziena plaisu augšanas pētījumiem kompozītos ar ļoti augstu plaisu blīvumu, kuros raksturīgi izteikti spriegumu gradienti 90 grādu slāņa biezuma virzienā; ii) detalizētu parametrisko analīzi, kas pēta ģeometrijas, materiālu īpašību un plaisu blīvuma ietekmi uz delamināciju plaisu augšanu, kas sākas šķērsvirziena plaisu galos.

3., 4. un 5. rakstā pētīta mikroplaisu rašanās un izplatība hibrīdajos oglekļa/tērauda šķiedru tekstīlkompozītos. Hibrīdie kompozīti tika izgatavoti no vienkāršā tinumā austiem un adītiem šķiedru audumiem un epoksīda matricas. Vienvirziena mehāniskās stiepes slogojuma gadījumā šajos kompozītos veidojas dažādi mikrobojājumi, piemēram, šķērsvirziena plaisas un delaminācijas šķērsvirziena pavedienos un šķiedru plīsumi garenvirziena pavedienos. Modelējot šo tekstīlkompozītu mehānisko darbību ar GEM, tika secināts, ka kompozīta makroskopiskā spriegumu-deformāciju līkne ir būtiski atkarīga no garenvirziena un šķērsvirziena pavedienu materiāla un tā stiprības īpašībām. Pētījuma novitāte saistīta ar jauna tipa hibrīdā kompozītmateriāla izgatavošanu, kā arī materiāla bojājumu matemātiskā modeļa (Kozars u. c. [1], [2]) pielāgošanu un pielietošanu hibrīdo tekstīlkompozītmateriālu mehāniskās darbības modelēšanā.

6. rakstā pētīta mikrobojājumu attīstība oglekļa šķiedru (CF) termoreaktīvās matricas kompozītos, kas izgatavoti ar elektromagnētiskās indukcijas sildīšanu. Parasti indukcijas sildīšana ar statiski novietotu spoli rada nevienmērīgu temperatūras sadalījumu. Šajā pētījumā indukcijas sildīšana tika veikta ar iekārtas prototipu, kas aprīkots ar kustīgu spoli. Lai gan ar kustīgo spoli var panākt vienmērīgāku temperatūras sadalījumu, sildīšanas laikā temperatūra un attiecīgi epoksīda matricas viskozitāte ir atšķirīga dažādās zonās. Tas savukārt var izraisīt gaisa ieslēgumu zonu veidošanos. Atkarībā no izvēlētās indukcijas spoles kustības trajektorijas kompozītmateriālā var izveidoties zonas ar lielu gaisa ieslēgumu daudzumu. Gaisa ieslēgumi savukārt izraisa spriegumu koncentrāciju un ātrāku plaisu veidošanos pie mehāniskās slodzes. Pētījuma novitāte ir saistīta ar jaunu un literatūrā maz aprakstītu izgatavošanas tehnoloģiju, kā arī pētījuma izstrādes gaitā veikts ar indukciju cietinātu kompozītmateriālu mehānisko īpašību salīdzinājums ar references paraugiem, kas izgatavoti industriālajā krāsnī.

Mērķis un uzdevumi

Promocijas darba galvenais mērķis ir izpētīt mikrobojājumu mehānismus inovatīvos kompozītmateriālos, kuriem ir:

- i) bojājumu stāvoklis ar augstu plaisu blīvumu;
- ii) jauna tipa tekstila struktūra, kas sastāv no hibrīdām oglekļa un nerūsējošā tērauda šķiedrām;
- iii) jauna izgatavošanas metode, izmantojot elektromagnētisko sildīšanu.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Promocijas darba novitāte saistīta ar mikrobojājumu mehānismu izpēti inovatīvos polimēru kompozītmateriālos tādos kā: i) polimēru kompozītmateriālos ar augstu plaisu blīvumu; ii) hibrīdajos oglekļa/nerūsējošā tērauda šķiedru tekstila kompozītmateriālos; iii) polimēru kompozītmateriālos, kas izgatavoti ar jaunu izgatavošanas metodi, izmantojot elektromagnētisko sildīšanu.

Galvenie promocijas darba rezultāti

1. Kompozītmateriālos ar augstu plaisu blīvumu, kas pakļauti vienvirziena stiepes slogojumam, 90 grādu slāņos veidojas izteikti šķērsvirziena spriegumu gradienti slāņa biezuma virzienā. Šie gradienti būtiski ietekmē enerģijas atbrīvošanās ātrumu, kas nepieciešama jaunu plaisu izveidošanai.
2. Spriegumu koncentrācijas dēļ krusteniski līmētiem kompozītmateriāliem, kas pakļauti stiepes slogojumam, šķērsvirziena plaisu galos veidojas lokālās delaminācijas (atslāņošanās). Delamināciju plaisas aug simetriski vai nesimetriski attiecībā pret šķērsvirziena plaisu un lamināta vidusplakni, veidojot I, T, C vai S formas plaisas. Šādu delaminācijas plaisu augšana ir atkarīga no šķērsvirziena plaisu blīvuma, 0/90 grādu slāņu biezuma attiecības un 0/90 grādu slāņu stinguma attiecības. Sākotnēji nesimetriskai I formas plisai ir tendence vispirms izveidoties par simetrisku plaisu pirms tālākās izplatības.
3. Hibrīdajos oglekļa / nerūsējošā tērauda šķiedru kompozītos, kas pakļauti vienvirziena stiepes slogojumam garenvirziena pavelienu virzienā, mikrobojājumi pirmkārt veidojas kā atslāņošanās starp impregnētā šķiedru kūļa un matricas virsmu. Palielinot slodzi, impregnētajos šķiedru kūļos veidojas šķiedru plīsumi, kas būtiski izmaina kompozīta spriegumu-deformāciju līkni makroskopiskā līmenī. Savienojoties vairākiem atsevišķu šķiedru plīsumiem, šķiedru kūļi plīst, izraisot galīgu kompozītmateriāla sabrukumu.
4. Izgatavojot kompozītmateriālus ar elektromagnētisko indukcijas sildīšanu, kustīga (pārvietojama) spole ļauj novērst auksto punktu veidošanos, kuros nepietiekamas temperatūras dēļ nevar īstenoties pilnvērtīga cietēšana (polimerizācija). Tomēr spoles pārvietošanās un attiecīgi nevienmērīgas uzsildīšanas dēļ kompozītmateriālā ir apgrūtināta gaisa burbuļu izvadišana no kompozītmateriālu slāņiem. Tas var

rezultēties ar augstu gaisa ieslēgumu koncentrāciju ar indukciju cietinātos kompozītmateriālos. Pie mehāniskās stiepes slogojuma gaisa ieslēgumi darbojas kā spriegumu koncentratori, izraisot šķērsvirziena plaisu veidošanos pie zemākiem ārēji pielikto spriegumu līmeņiem nekā references materiālos, kas izgatavoti industriālajā krāsnī ar vienmērīgu sildīšanu.

Promocijas darba saturs

Promocijas darba kopsavilkums sastāv no ievada un galveno rezultātu apraksta, kas iedalīts trīs apakšnodaļās: i) mikrobojājumu veidošanās un izplatība krusteniski līmētos kompozītmateriālos ar augstu plaisu blīvumu; ii) mikrobojājumu veidošanās hibrīdajos oglekļa / nerūsējošā tērauda tekstīlkompozītos; iii) mikrobojājumu veidošanās ar indukcijas sildīšanu izgatavotos termoreaktīvos kompozītos. Promocijas darbs veidots kā publikāciju kopa, kas ietver sešus zinātniskos rakstus, kuru saraksts dots nodaļā “Darba aprobācija un publikācijas”.

Darba aprobācija un publikācijas

1. raksts

Kulkarni AN, Pupurs A, Varna J. Analysis of initiation and growth of new transverse cracks in high crack density regions in cross-ply laminates. J Compos Mater 2025;59:539–50. <https://doi.org/10.1177/00219983241295811>.

2. raksts

Kulkarni AN, Pupurs A, Varna J. Parameters affecting growth of local delaminations at transverse crack tips in [0m,90n]s cross-ply laminates. Eng Fract Mech 2025;328:111549. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2025.111549>.

3. raksts

Kulkarni AN, Pupurs A, Šņepsts A, Irbe M. MICRO-DAMAGE EVOLUTION IN HYBRID CARBON/STEEL KNITTED AND WOVEN FABRIC COMPOSITES. In: Falzon B, McCarthy C, editors. Proceedings of the 2023 International Conference on Composite Materials, Belfast: Queen’s University Belfast; 2023.

4. raksts

Kulkarni AN, Kononova O, Jevstignejevs V, Pupurs A. FE MODELING OF DAMAGE DEVELOPMENT IN HYBRID CARBON/STEEL FIBER TEXTILE COMPOSITES USING FRACTURE MECHANICS AND COHESIVE ZONE APPROACH. In: Binetruy C, Jacquemin F, editors. Proceedings of the 21st European Conference on Composite Materials, Nantes: The European Society for Composite Materials (ESCM) and the Ecole Centrale de Nantes; 2024, p. 1362–68.

5. raksts

Kulkarni AN, Pupurs A, Kononova O, Jevstignejevs V, Maimi P, Subramani A. Parametric study of micro-damage evolution in woven hybrid carbon/stainless steel fiber composites. Under Preparation.

6. raksts

Pupurs A, Lācis V, Šņepsts A, **Kulkarni AN**, Irbe M. ANALYSIS OF MICRO-DAMAGE EVOLUTION IN INDUCTION-CURED THERMOSET COMPOSITES. In: Binetruy C, Jacquemin F, editors. Proceedings of the 21st European Conference on Composite Materials, Nantes: The European Society for Composite Materials (ESCM) and the Ecole Centrale de Nantes; 2024, p. 1529–34.

Starptautiskās zinātniskās konferencēs, kurās prezentēti promocijas darba rezultāti

1. 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20), June 26–30, 2022, Lausanne, Switzerland.
2. 63rd International Scientific Conference of Riga Technical University, Section ‘Engineering, Mechanics and Mechanical Engineering’, October 13, 2022, Riga, Latvia.
3. 81st International Scientific Conference of the University of Latvia, Section ‘Advanced Composite and Applications’, February 16, 2023, Riga, Latvia.
4. 23rd International Conference on Composite Materials (ICCM23), July 31–August 4, 2023, Belfast, UK.
5. 64th International Scientific Conference of Riga Technical University, Section ‘Engineering, Mechanics and Mechanical Engineering’, October 11, 2023, Riga, Latvia.
6. 82nd International Scientific Conference of the University of Latvia, Section ‘Advanced Composite and Applications’, February 13, 2024, Riga, Latvia.
7. 19th European Mechanics of Materials Conference (EMMC19), May 29–31, 2024, Madrid, Spain.
8. 21st European Conference on Composite Materials (ECCM21), July 2–5, 2024, Nantes, France.
9. TexComp-15 Conference, September 11–13, 2024, Leuven, Belgium.
10. 65th International Scientific Conference of Riga Technical University, Section ‘Civil and Mechanical Engineering’, October 17, 2024, Riga, Latvia.
11. 83rd International Scientific Conference of the University of Latvia, Section ‘Advanced Composite and Applications’, February 11, 2025, Riga, Latvia.
12. 12th International Conference on Composite Testing and Model Identification (CompTest 2025), May 21–23, 2025, Riga, Latvia.
13. 24th International Conference on Composite Materials (ICCM24), August 4–8, 2025, Baltimore, USA.
14. 66th International Scientific Conference of Riga Technical University, Section ‘Civil and Mechanical Engineering’, October 16, 2025, Riga, Latvia.

1. IEVADS

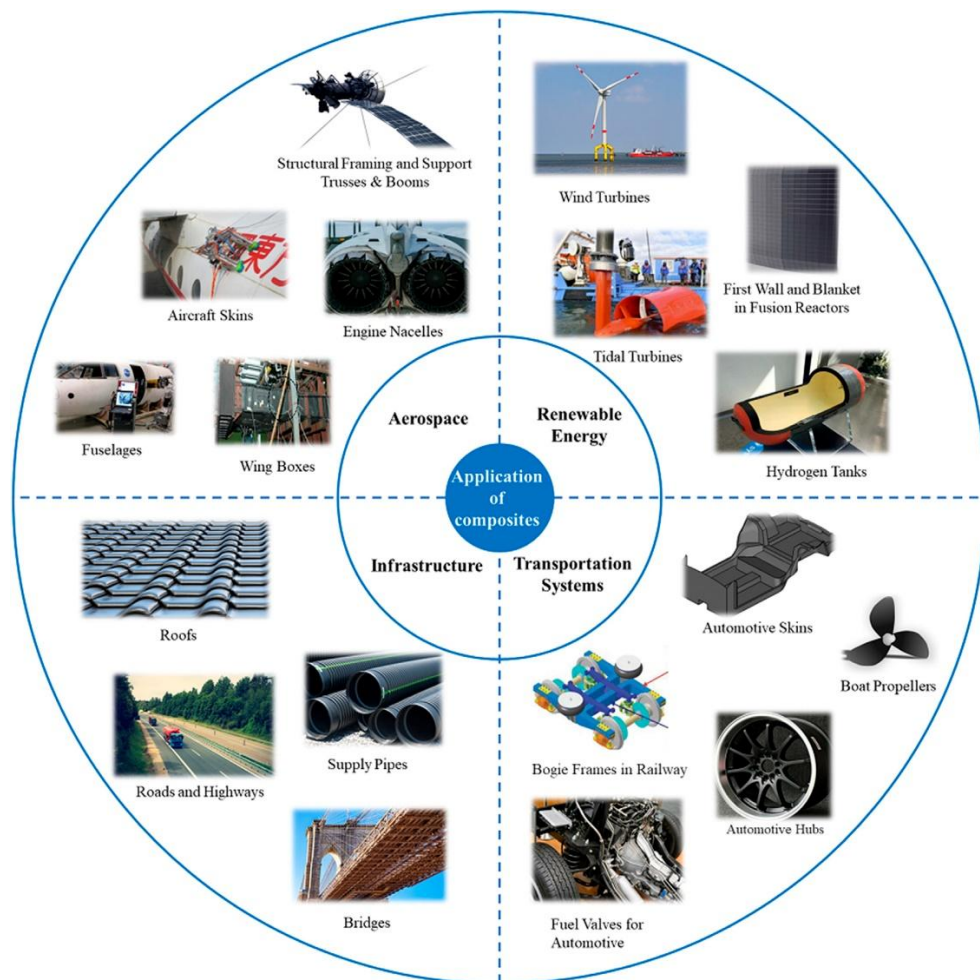
Polimēru kompozītmateriāli (kompozīti) sastāv no termoreaktīvas vai termoplastiskas polimēru matricas, kas kombinēta ar armējumu, piemēram, ar īsām vai nepārtrauktām šķiedrām. Šķiedras var būt patvaļīgi izkliedētas vai arī orientētas noteiktā virzienā. Ar šķiedrām armētos kompozītos šķiedras darbojas kā galvenā slodzi uzņemošā komponente. Tādējādi šķiedru novietojumam attiecībā pret slodzi ir būtiska nozīme, un tas nosaka kompozīta mehāniskās īpašības. Kompozītiem ir augsts stingums un stiprība, bet, salīdzinot ar metāliskiem materiāliem, tiem ir ievērojami zemāks blīvums. Līdz ar to polimēru kompozīti ir ļoti piemēroti viegla svara konstrukcijās, kur nepieciešams minimizēt svaru. Mūsdienās kompozītu pielietojums ir paplašinājies, ietverot dažādas tehniskās nozares, piemēram, transportā (lidaparātu fizelāžas un spārni, lidaparātu dzinēju lāpstiņas, helikopteru propelleri, ātrvilcieni, militārais transports), enerģijas nozarē (vēja turbīnas, ūdeņraža spiedientvertnes, saules enerģijas sistēmas), infrastruktūrā (caurules, tilti, jumti) (1.1. att.).

Kompozītos ar nepārtrauktām šķiedrām šķiedras var būt: i) patvaļīgi (dispersi) izkliedētas; ii) orientētas paralēli (vienvirziena kompozīts); iii) kā tekstila audums ar garenvirziena un šķērsvirziena pavedieniem. Austā šķiedru audumā garenvirziena pavedieni ir orientēti materiāla parauga garenvirzienā, savukārt šķērsvirziena pavedieni orientēti parauga platuma virzienā (1.2. att.). Atbilstoši sagaidāmajām slodzēm kompozīta atsevišķie slāņi var tikt orientēti dažādos virzienos, izveidojot specifisku lamināta slāņojumu. Piemēram, promocijas darba **1., 2. un 6. rakstā**, tiek pētīts krusteniski līmēts kompozīta lamināts, kur vienvirziena slāņi tiek likti paralēli (0° slānis) slodzei vai perpendikulāri tai (90° slānis). Pie vienvirziena stiepes sloģojuma 90° grādu slānī sāk veidoties plīsumi – šķiedru/matricas robežvirsmas atdalīšanās šķērsvirzienā [3].

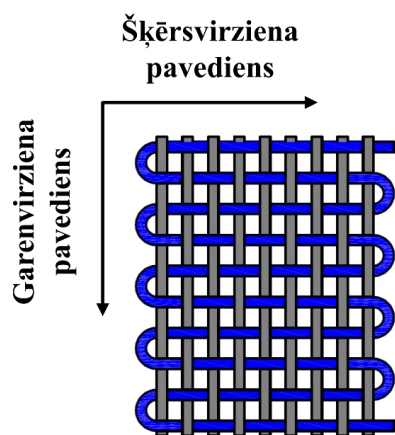
Kompozīta slāņos, kuros šķiedras orientētas perpendikulāri slodzes virzienam, bojājumi izveidojas spriegumu koncentrācijas starp šķiedru un matricu dēļ [4]. Spriegumu koncentrāciju izraisa atšķirība starp šķiedras un matricas šķērsvirziena elastības moduļiem. Izveidojas lokalizēti šķiedras/matricas robežvirsmas atslāņojumi un, palielinoties slodzei, atslāņojumi savienojas, izveidojot šķērsvirziena plaisu (1.3. att.) Krusteniski līmēta kompozīta lamināta gadījumā, palielinot slodzi, lokālie šķiedru atslāņojumi izraisa šķērsvirziena plaisas izveidošanos, kas aug slāņa biezuma virzienā, līdz sasniedz blakus esošā 0° grādu slāņa robežvirsmu [5], [6]. Biežāk lietotajos analītiskajos modeļos, kas apraksta spriegumstāvokli 90° grādu slāņos, tiek pieņemts, ka šķērsvirziena plaisa platuma virzienā aug momentāni, izveidojot tuneļa formas plaisu [7]–[11]. Šāds pieņēmums varētu nebūt patiess laminātiem ar relatīvi plāniem slāņiem, kuros šķērsvirziena plaisāšana var tikt aizturēta vai pilnībā nerealizēta [5].

Tekstīlkompozītos, kas sloģoti garenvirziena pavedienu virzienā, mikroplīsumi sāk veidoties kā šķiedru/matricas atslāņojumi starp impregnēto šķiedru pavediena (kūļa) ārējo virsmu un aptverošo matricu. Palielinoties slodzei, mikroplīsumi savienojas un izveido šķērsvirziena plaisu šķiedru pavedienā vai atslāņojumu starp šķiedru pavedienu un matricu [12]. 1.4. attēlā redzami piemēri ar: i) šķērsvirziena plaisu $[0/90]_s$ krusteniski līmētā laminātā; ii) šķērsvirziena pavediena delamināciju; iii) šķērsvirziena plaisu tekstīlkompozīta pavedienā. Bojājumu attīstība tekstīlkompozītos notiek, savienojoties mikroplīsumiem uz

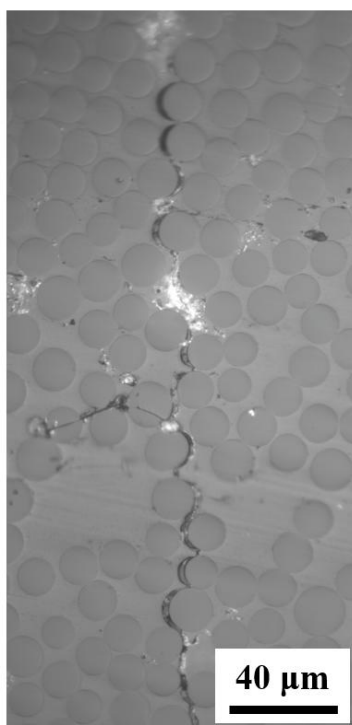
pavediena/matricas robežvirsmas, kā arī savienojoties šķērsvirziena plaisām, kā redzams 1.5. attēlā [13], [14].



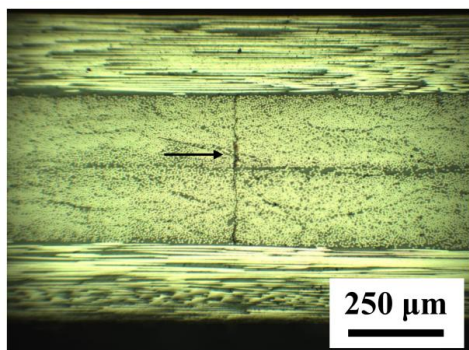
1.1. att. Polimēru kompozītu pielietojumi. Attēls izmantots ar autora un publicētāja atļauju [15].



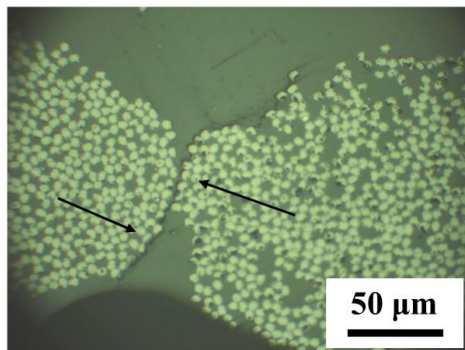
1.2. att. Vienkāršā pinuma austais tekstils.



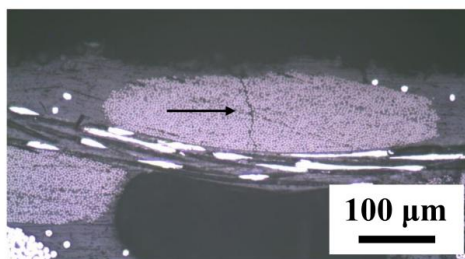
1.3. att. Šķiedras-matricas atslāņojumu savienošanās, izveidojot šķērsvirziņa plaisu stikla šķiedru/epoksīda kompozīta laminātā [16].



(a)

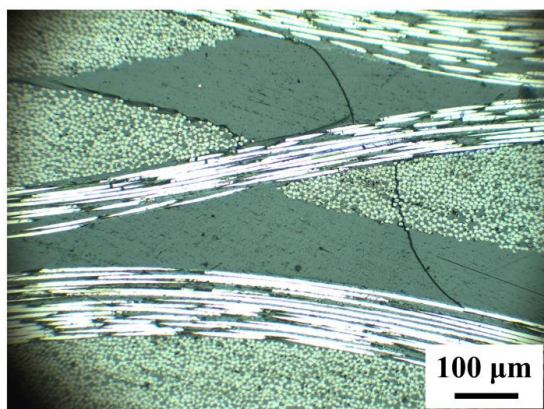


(b)



(c)

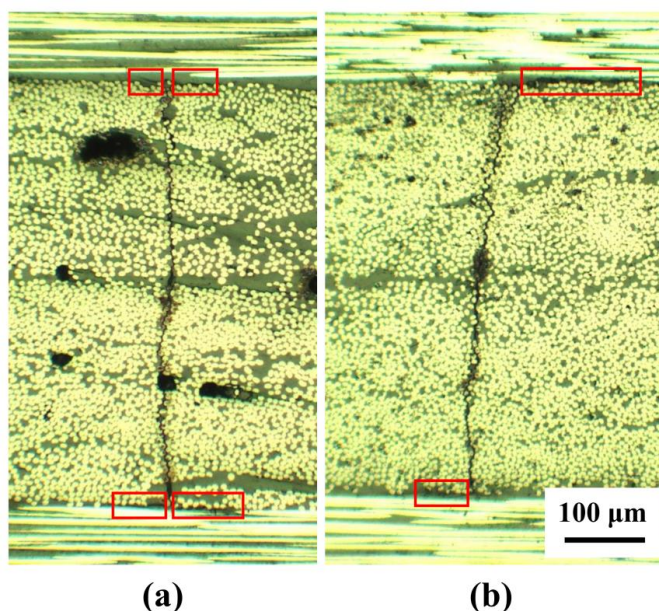
1.4. att. Piemēri ar šķērsvirziena plaisām oglekļa šķiedru/epoksīda kompozītos vienvirziena stiepes slogojuma gadījumā. (a) šķērsvirziena plaisa [0/90]s krusteniski līmētā laminātā; (b) šķērsvirziena pavediena/matricas atslāņošanās plaisa; (c) šķērsvirziena plaisa tekstilkompozīta šķiedru pavedienā.



1.5. att. Pavedienu un matricas atslāņošanās plaisu savienošanās oglekļa šķiedru/epoksīda tekstilkompozītā vienvirziena stiepes slogojuma gadījumā.

Krusteniski līmētā kompozīta laminātā ar šķērsvirziena plaisu 90 grādu slānī bojātais slānis plaisas lokācijā neuzņem stiepes spriegumus. Noteiktā attālumā no šķērsvirziena plaisas lokācijas slodze tiek pārnesta uz 90 grādu slāni, pateicoties bīdes spriegumiem [11]. Turpinot palielināt slodzi, 90 grādu slānī izveidojas jaunas šķērsvirziena plaisas, t. i., palielinās šķērsvirziena plaisu blīvums [17]. Sasniedzot noteiktu plaisu blīvumu, spriegumstāvokļi pie divām blakus esošām plaisām sāk mijiedarboties, izveidojot spriegumu perturbācijas. Tas savukārt samazina pieejamo enerģijas atbrīvošanās ātrumu (*ERR*), kas nepieciešams jaunu šķērsvirziena plaisu augšanai [18]. Sasniedzot noteiktu plaisu blīvumu izveidojas šķērsvirziena plaisu piesātinājums [17], [19].

Šķērsvirziena plaisas galos veidojas augsta šķērsvirziena normālspriegumu un ārpus plaknes bīdes spriegumu koncentrācija. Tā izraisa jaunas plīsuma formas – delaminācijas – veidošanos šķērsvirziena plaisas galos [6], [20]–[22]. Izveidotā delaminācijas plaisa izplatās pa 0/90 grādu slāņu robežvirsmu. Arī tā samazina pieejamo enerģijas atbrīvošanās ātrumu *ERR* un kavē jaunu šķērsvirziena plaisu veidošanos [18]. Lokālo delamināciju plaisas augšana ir atkarīga no vairākiem parametriem, tādiem kā 0/90 grādu slāņu biezuma attiecības, 0/90 grādu slāņu elastības moduļu attiecības un šķērsvirziena plaisu blīvums [23]. Atkarībā no lokālā spriegumstāvokļa lokālās delaminācijas var izplatīties dažādās formās, tādās kā, piemēram, I, T, S vai C veida formā. 1.6. attēlā redzami I un S veida delamināciju plaisu augšanas piemēri [0/90]s krusteniski līmētos laminātos.



1.6. att. (a) I veida formas delamināciju plaisas; (b) S veida formas delamināciju plaisas (uzskatei apvilktas ar sarkaniem taisnstūriem) oglekļa šķiedru/epoksīda [0/90]s krusteniski līmētos laminātos vienvirziena stiepes slogojuma gadījumā.

Galīgā kompozīta sabrukšana parasti notiek, kad izveidojas plīsumi garenvirziena šķiedrās, kas vērstas slodzes virzienā. Šāds sabrukums parasti ir trausls [24]. Tomēr atsevišķi kompozīti spēj uzrādīt ievērojamu plasticitāti pirms galīgā sabrukuma atkarībā no mikroplaisu izplatības secības. Epoksīda matricas kompozīti ar orientētām un plastiski deformējamām tērauda šķiedrām var uzrādīt ievērojamu plasticitāti pie stiepes slogojuma. Šādi kompozīti var sasniegt 7 % stiepes sabrukuma deformāciju, ko var tālāk palielināt, izmantojot matricu ar lielāku plasticitāti [25], [26]. Vienvirziena stikla šķiedru/epoksīda kompozīti, kas hibridizēti ar oglekļa šķiedru/epoksīda slāņiem, var uzrādīt plasticitāti, pateicoties progresīvai un izkliedētai atsevišķu slāņu plaisāšanai, un delamināciju plaisu izplatīšanās dēļ [27].

Papildus plasticitātes un stingrības palielinājumam šķiedru hibridizācija var paaugstināt termoreaktīvo kompozītu ilgtspēju. Ir vairāki veiksmīgi industriālā pielietojuma piemēri, kuros stikla un oglekļa/epoksīda kompozīti tiek hibridizēti ar dabīgajām šķiedrām, piemēram, lina šķiedrām, bez būtiskas mehānisko īpašību samazināšanās [28]. Pēdējā laikā pētniecībā ir pieaugusi interese pētīt “zaļās” iniciatīvas saistībā ar termoreaktīvo kompozītu ilgtspēju. Kā piemērus var minēt: i) stinguma un stiprības uzlabošanu otrreizēji pārstrādātām oglekļa šķiedrām, izmantojot pirolīzes apstrādi [29]; ii) enerģijas patēriņa samazināšanu kompozītmateriāla izgatavošanas procesā. Enerģijas patēriņu var samazināt, piemēram, aizstājot industriālās krāsns izmantošanu ar jaunām mūsdienās attīstītām tilpuma sildīšanas metodēm, tādām kā indukcijas sildīšana, mikroviļņu vai elektriskās pretestības sildīšana [30]. Ir pierādīts, ka ar indukciju cietinātiem termoreaktīviem kompozītiem var sasniegt līdzvērtīgas elastīgās, stiprības un sabrukuma deformācijas īpašības kā kompozītiem, kas izgatavoti industriālajā krāsnī. Tomēr ar indukciju izgatavotiem kompozītiem var būt ievērojami lielāks ieslēgto gaisa poru daudzums, salīdzinot ar vienmērīgā temperatūrā industriālajā krāsnī izgatavotiem kompozītiem [31].

2. PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

2.1. Mikrobojājumu attīstība krusteniski līmētos laminātos ar augstu plaisu blīvumu

90 grādu slāņos krusteniski līmētos laminātos pie vienvirziena stiepes slogojuma veidojas šķērsvirziena plaisas, ko sauc arī par matricas plaisām. Šīs plaisas izraisa spriegumu perturbācijas, ko var aprakstīt, izmantojot analītiskos modeļus, kas pieejami literatūrā [7]–[10], [17]. Šie analītiskie modeļi pieņem vienmērīgu spriegumstāvokli slāņa biezuma virzienā vai arī tie izmanto vienkāršas formas funkcijas, lai modelētu spriegumu sadalījumu.

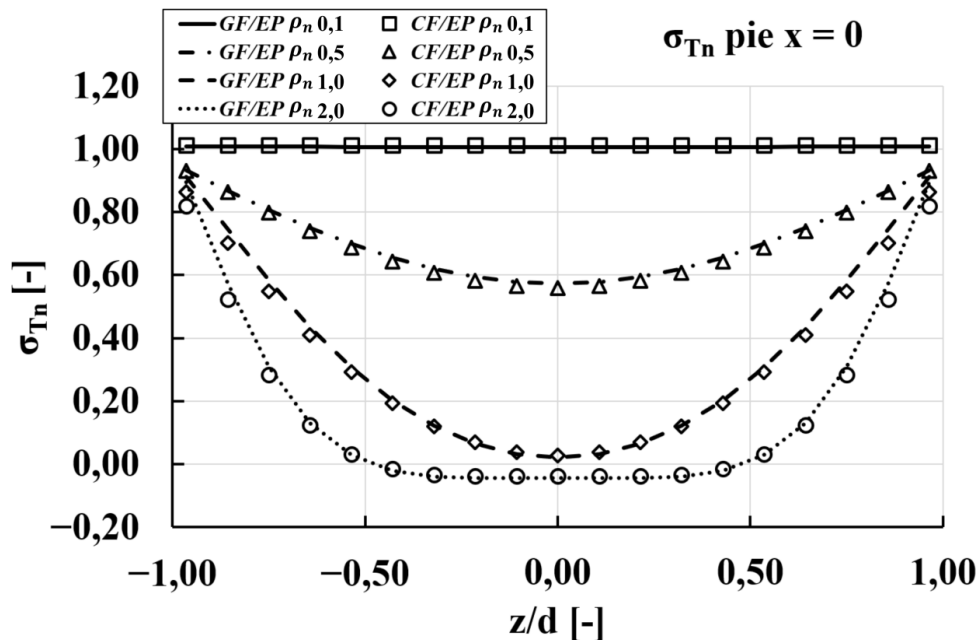
Reģionos ar augstu plaisu blīvumu spriegumu perturbācijas sāk mijiedarboties, tādējādi spriegumstāvoklis starp plaisām biezuma virzienā kļūst nevienmērīgs. Šādu spriegumstāvokli var raksturot, izmantojot daļēji analītiskas izteiksmes [32]–[35] vai GEM. **1. rakstā** izmantotā GEM analīze parāda būtiskus šķērsvirziena spriegumu gradientus 90 grādu slāņa biezuma virzienā stikla šķiedru/epoksīda (*GF/EP*) un oglekļa šķiedru/epoksīda (*CF/EP*) kompozītiem. Spriegumstāvokļa rezultāti pie dažādiem normalizētiem plaisu blīvumiem (ρ_n) redzami 2.1. attēlā. Jāņem vērā, ka šķērsvirziena plaisu blīvums, ρ , ir normalizēts pret 90 grādu slāņa biezumu $2 \times d$, tādā veidā, ka $\rho_n = \rho \times 2 \times d$. Ir redzams, ka spriegumu gradienti pieaug līdz ar šķērsvirziena plaisu blīvumu. Šie šķērsvirziena spriegumu gradienti būtiski ietekmē pieejamo *ERR* jaunas šķērsvirziena plaisas izveidošanās procesam (2.2. att.). Ja plaisu blīvums ir ļoti augsts ($\rho_n = 2,0$), izveidojas spiedes spriegumi lamināta vidusplaknes tuvumā (2.1. att.), kas pieejamo *ERR* jaunas šķērsvirziena plaisas izraisīšanai reducē līdz 0, pilnībā apturot plaisas augšanu (2.2. att.).

Enerģijas atbrīvošanās ātrums *ERR* jaunas šķērsvirziena plaisas augšanai esošo šķērsvirziena plaisu galos samazinās arī lokālo delaminācijas plaisu izveidošanās dēļ. Šādas lokālās delaminācijas esošo plaisu galos izveidojas augsta normālsprieguma un bīdes sprieguma dēļ. Lokālo delamināciju plaisu augšanu var pētīt, izmantojot analītiskos modeļus, kas apskata kopējo sistēmas padevīgumu. Šie modeļi pieņem, ka plaisu augšanas raksturs nemainās atkarībā no delaminācijas plaisas garuma [20], [36]. Tomēr skaitliskā analīze ar GEM promocijas darba **2. rakstā** parāda, ka *ERR* ir būtiski atkarīgs gan no delaminācijas plaisas garuma, gan arī no šķērsvirziena plaisu blīvuma, kā redzams 2.3. attēlā.

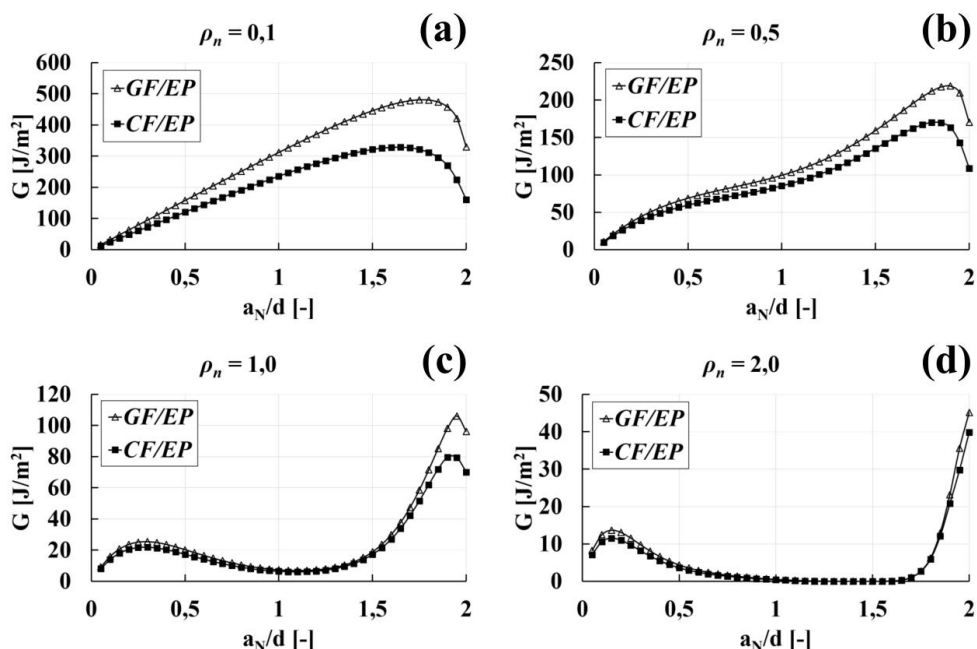
2. rakstā aprakstītajā parametriskajā analīzē secināts, ka līdz ar atkarību no delaminācijas plaisas garuma un šķērsvirziena plaisu blīvuma enerģijas atbrīvošanās ātrums *ERR* delaminācijas plaisas augšanai krusteniski līmētos laminātos ar slāņojumu [0/90]_s ir atkarīgs arī no slāņu biezuma attiecības t_0/t_{90} un no slāņu mehānisko īpašību attiecībām – E_L^0/E_T^{90} un G_{LT}^0/E_T^{90} . Īsām delaminācijām šo attiecību palielināšanās samazina pieejamo *ERR*, savukārt garu delaminācijas plaisu gadījumā novērojams pretējais efekts.

Atkarībā no lokālā spriegumstāvokļa un lokālās slāņu saskarvirsmas plīšanas stigrības variācijas lokālās delaminācijas var izplatīties dažādās formās, tādās kā I veida, T veida, S veida un C veida plaisās. Pieejamais *ERR* delamināciju plaisu augšanai ir atkarīgs arī no plaisas formas, kā redzams 2.4. attēlā. **2. rakstā** atspoguļotā *ERR* analīze parāda arī to, ka nesimetriskai

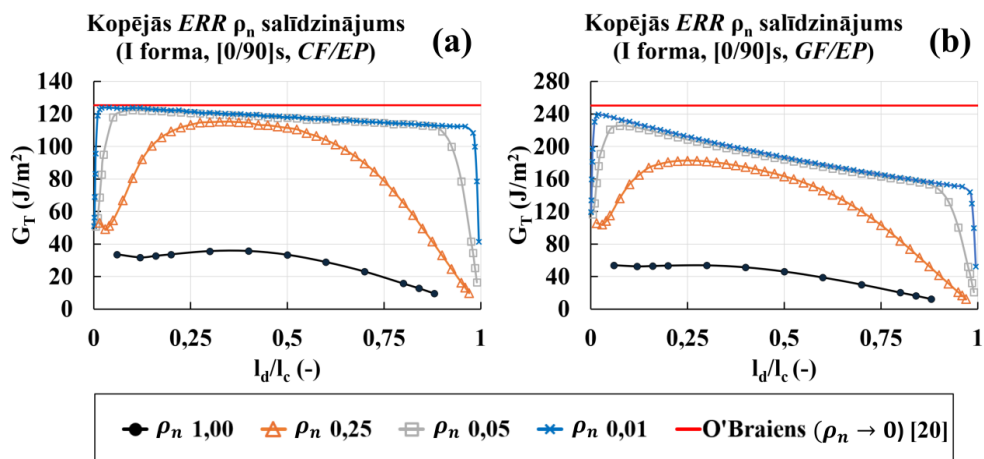
I veida delaminācijas plaisai pirms turpmākas plaisas augšanas ir tendence vispirms kļūt par simetrisku I veida plaisu.



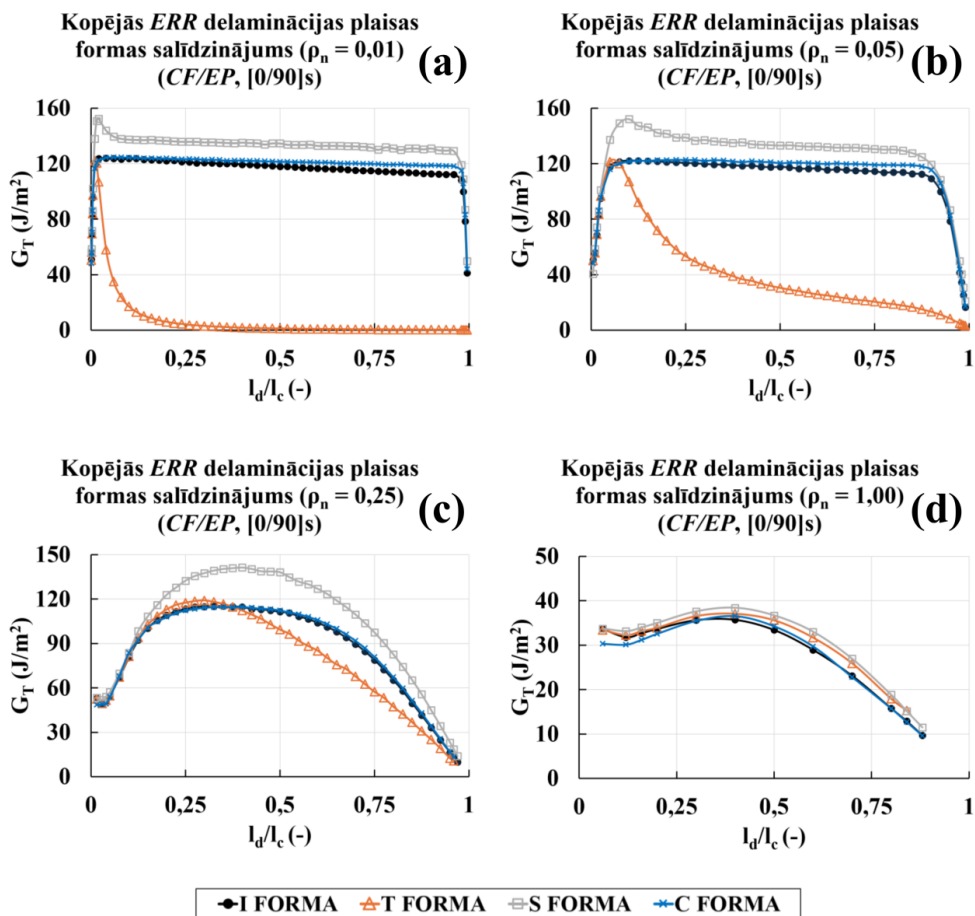
2.1. att. Normalizēto šķērsvirziena spriegumu (σ_{Tn}) sadalījums bojātajā 90 grādu slānī GF/EP un CF/EP krusteniski līmētos laminātos slāņa biezuma (z ass) virzienā. Spriegumu vērtības ir normalizētas attiecībā pret šķērsvirziena spriegumiem ne bojātā 90 grādu slānī. d apzīmē pusi no 90 grādu slāņa biezuma. Šķērsvirziena plaisu blīvums (ρ) ir normalizēts attiecībā pret $2 \times d$. Pārpublicēts no **1. raksta**.



2.2. att. Pieejamā enerģijas atbrīvošanās ātruma (ERR) aprēķins jaunas šķērsvirziena plaisas augšanai 90 grādu slānī stikla šķiedru/epoksīda (GF/EP) un oglekļa šķiedru/epoksīda (CF/EP) krusteniski līmētos kompozītos ar slāņojumu [0/90]s. Normalizētais plaisu blīvums (a) 0,1; (b) 0,5; (c) 1,0; (d) 2,0. a_N ir šķērsvirziena plaisas garums. Pārpublicēts no **1. raksta**.



2.3. att. Ar GEM aprēķinātais kopējais pieejamās enerģijas atbrīvošanās ātrums delamināciju plaisu augšanai: (a) oglekļa šķiedru/epoksīda (CF/EP); (b) stikla šķiedru/epoksīda (GF/EP) krusteniski līmētos laminātos ar slāņojumu [0/90]s un normalizēto plaisu blīvumu 1,00, 0,25, 0,05 un 0,01. Ar GEM aprēķinātās ERR tendences salīdzinātas ar konstanto ERR vērtību, kas aprēķināta ar O'Braienā analītisko modeli [20]. Pārpublicēts no **2. raksta**.



2.4. att. Kopējais enerģijas atbrīvošanās ātrums lokālo delamināciju augšanai I veida, T veida, S veida un C veida formas plaisas. Normalizētais plaisu blīvums: (a) 0,01; (b) 0,05; (c) 0,25; (d) 1,00. Pārpublicēts no **2. raksta**.

2.2. Mikrobojājumu attīstība hibrīdajos oglekļa / nerūsējošā tērauda šķiedru tekstilkompozītos

Literatūrā ir aprakstīta šķiedru hibridizācija ar tērauda šķiedrām vienvirziena kompozītos, lai uzlabotu to mehāniskās īpašības, it īpaši, lai samazinātu sabrukšanas trauslumu, kā arī pielāgotu materiālu daudzfunkcionāliem pielietojumiem [37]–[41]. Rehra un līdzautori [38], [39], savos pētījumos par šķiedru hibridizāciju vienvirziena kompozītiem, kuros kombinētas oglekļa un tērauda šķiedras, secināja, ka relatīvais oglekļa un tērauda šķiedru tilpuma daudzums, kā arī šķiedras un matricas adhēzija ir nozīmīgākie faktori, kas šķiedru hibridizācijas rezultātā palielina kompozīta sabrukšanas deformāciju un plastiskumu. Makbraida un O’Braiena [40], [41] ir ziņojuši par ievērojamu stingrības uzlabojumu hibrīdos stikla šķiedru / tērauda šķiedru vienvirziena kompozītos, kas pakļauti vienvirziena statiskam un cikliskam stiepes slogojumam. Šķiedru hibridizācija tekstilkompozītos literatūrā līdz šim nav detalizēti aprakstīta. Promocijas darba **3., 4. un 5. rakstā** aprakstīti pētījumi par hibrīdo tekstilkompozītu izgatavošanu, mehānisko īpašību testēšanu un mikrobojājumu izplatīšanos kompozītos ar oglekļa / nerūsējošā tērauda šķiedrām.

2.1. tabula

Hibrīdo un references materiālu sistēmas tekstilkompozītu konfigurācijas

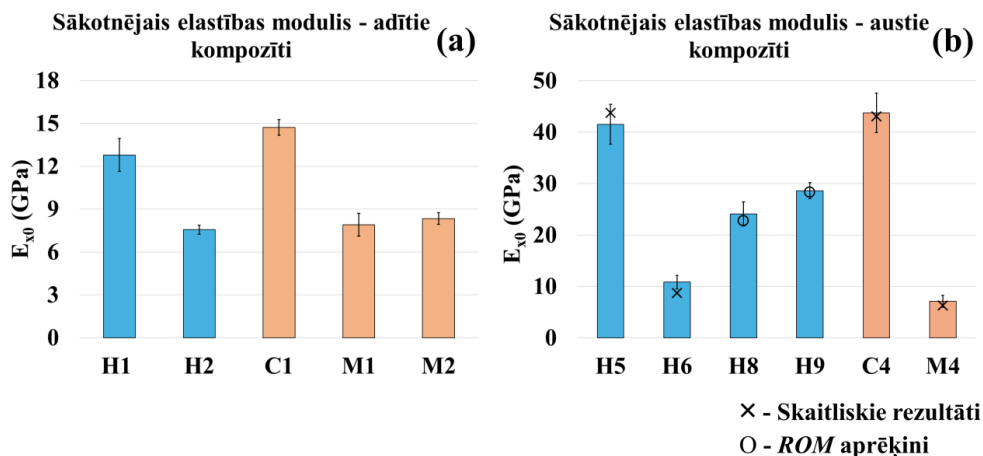
Auduma tips		Apzīmējums	Kompozīta slāņojums
Adītais	References	C1	$[(T300)_8]^*$
		M1	$[(SY\ 11/1)_8]^*$
		M2	$[(SY\ 11/1\ 3pavedieni)_8]$
	Hibrīdais	H1	$[(Hibrīdais\ SY11/1+T300)_8]$
		H2	$[(T300/SY11/1)]_{2s}$
Austais	References	C4	$[T300\ 1x]_4$
		M4	$[SY\ 11/1\ 2x]_3$
	Hibrīdais	H5	$[T300\ 1x + SY\ 11/1\ 2x]_4^{\#}$
		H6	$[SY\ 11/1\ 2x + T300\ 1x]_4$
		H8	$[(SY\ 11/1\ 2x + T300\ 1x)(T300\ 1x + SY\ 11/1\ 2x)]_{2.5}$
		H9	$[T300\ 1x / SY\ 11/1\ 2x]_{2.5}$

*T300 – oglekļa šķiedru pavediens, SY 11/1 – nerūsējošā tērauda šķiedru pavediens

[#]garenvirziena pavediens + šķērsvirziena pavediens.

Hibrīdie oglekļa/tērauda šķiedru kompozīti tika izgatavoti no austajiem un adītajiem šķiedru audumiem un epoksīda sveķiem, izmantojot vakuuma infūzijas metodi [42]. Kompozītu paraugi ar hibrīdajām vai references konfigurācijām (kā parādīts 2.1. tabulā) tika testēti, izmantojot kvazistatisko vienvirziena stiepes slogojumu, garenvirziena pavedienu virzienā. Izmantotais sloģošanas ātrums bija 2 mm/min, kas atbilst deformācijas ātrumam 1 %/min. 2.5. attēlā redzams sākotnējo elastības moduļu salīdzinājums pētītajām kompozītu konfigurācijām. Par adītajiem tekstilkompozītiem tika secināts, ka kompozītiem ar šķiedru

pavedienu līmeņa hibridizāciju (piemēram, H1) tika iegūts augstāks elastības modulis (stingums) nekā gadījumā, ja tiek izmantota slāņu līmeņa hibridizācija (piemēram, H2). Savukārt austajiem tekstilkompozītiem elastības modulis ir atkarīgs no garenvirziena pavedienu materiāla.

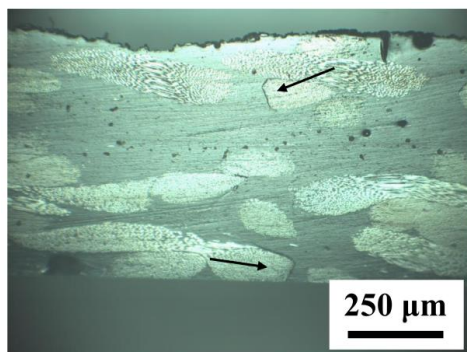


2.5. att. Sākotnējo elastības moduļu (E_{x0}) salīdzinājums adīto un austu audumu tekstilkompozītiem. Krusta zīmes norāda GEM modelēšanas rezultātus. H8 un H9 moduļa vērtības tiek aprēķinātas, izmantojot maisījumu likumu (ROM), pamatojoties uz H5, H6, C4 un M4 skaitliskajiem rezultātiem. Adaptēts no **3. un 5. raksta**.

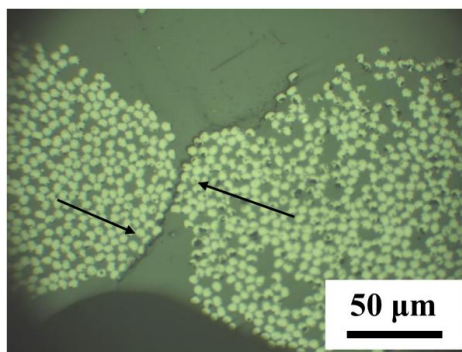
Pie 0.6% stiepes deformācijas, tika konstatēta mikroplīsumu parādīšanās adītajos tekstilkompozītos. Pirmie plīsumi tika novēroti pavedienu un matricu robežvirsmā (2.6. a att.). Adītajos hibridajos kompozītos pavediena/matricas robežvirsmas delaminācijas tika novērotas tikai starp oglekļa šķiedru pavedieniem un matricu, tās netika novērotas starp nerūsējošā tērauda šķiedru pavedieniem un matricu. Savukārt austajos kompozītos pirmie mikroplīsumi tika konstatēti, ja stiepes deformāciju līmenis ir 0,6–0,8 %. Tika novērots, ka izveidojas delaminācijas starp šķērsvirziena pavedieniem un matricu vai arī šķērsvirziena pavedienos izveidojas šķērsvirziena plaisas (2.6. b, c att.). Tika novērotas arī bīdes spriegumu plaisas caur tērauda šķiedru pavedieniem (2.6. d att.). Plaisu attīstība norisinājās kā pavedienu matricu delamināciju savienošanās adītajos kompozītos vai kā šķērsvirziena pavedienu plaisu un pavedienu matricas delamināciju plaisu savienošanās austajos kompozītos (2.7. att.).

Salīdzinot galīgā stiepes stiprības vērtības pētītajām kompozītu konfigurācijām, iegūtie rezultāti un to tendences ir ļoti līdzīgas materiālu stinguma vērtībām. Proti, adītajiem tekstilkompozītiem ar pavediena līmeņa šķiedru hibridizāciju atbilst augstāka garenvirziena stiepes stiprība, salīdzinot ar kompozītiem ar audumu slāņu līmeņa hibridizāciju. Austo kompozītu gadījumā tika secināts, ka garenvirziena stiepes stiprību galvenokārt nosaka garenvirziena pavedienu stiprība. Austajiem kompozītiem SEM analīze uzrādīja lielus garenvirziena atslāņojumus starp garenvirziena oglekļa šķiedru pavedieniem un matricu. Savukārt austajos kompozītos ar tērauda šķiedru pavedieniem SEM analīzē tika novēroti nelieli

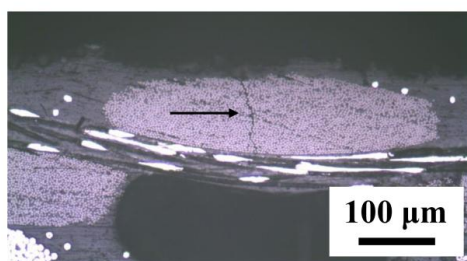
atslāpojumi starp garenvirziena pavedieniem un matricu, bet izteikti bija redzamas pavediena tērauda šķiedru plastiskās deformācijas ar plastiskā kakliņa veidošanos pie stiepes slogojuma, līdzīgi kā tērauda stieņos pirms galīgā sabrukuma.



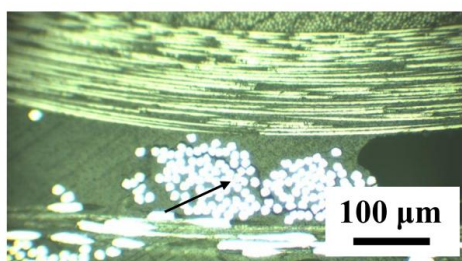
(a)



(b)

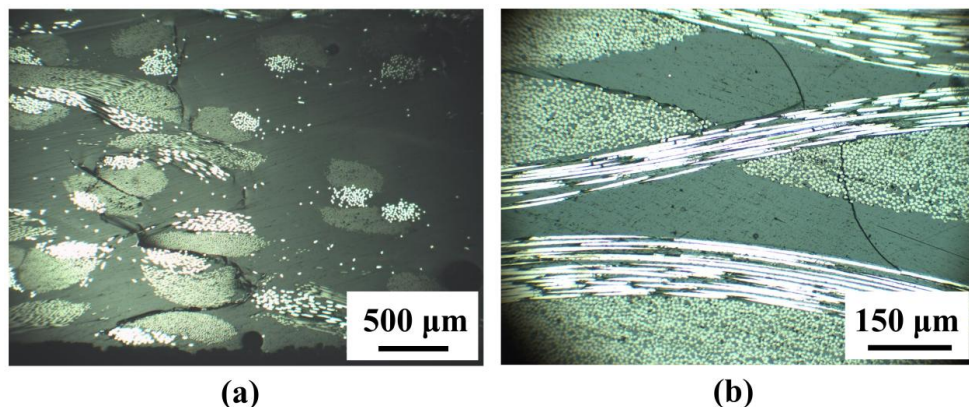


(c)



(d)

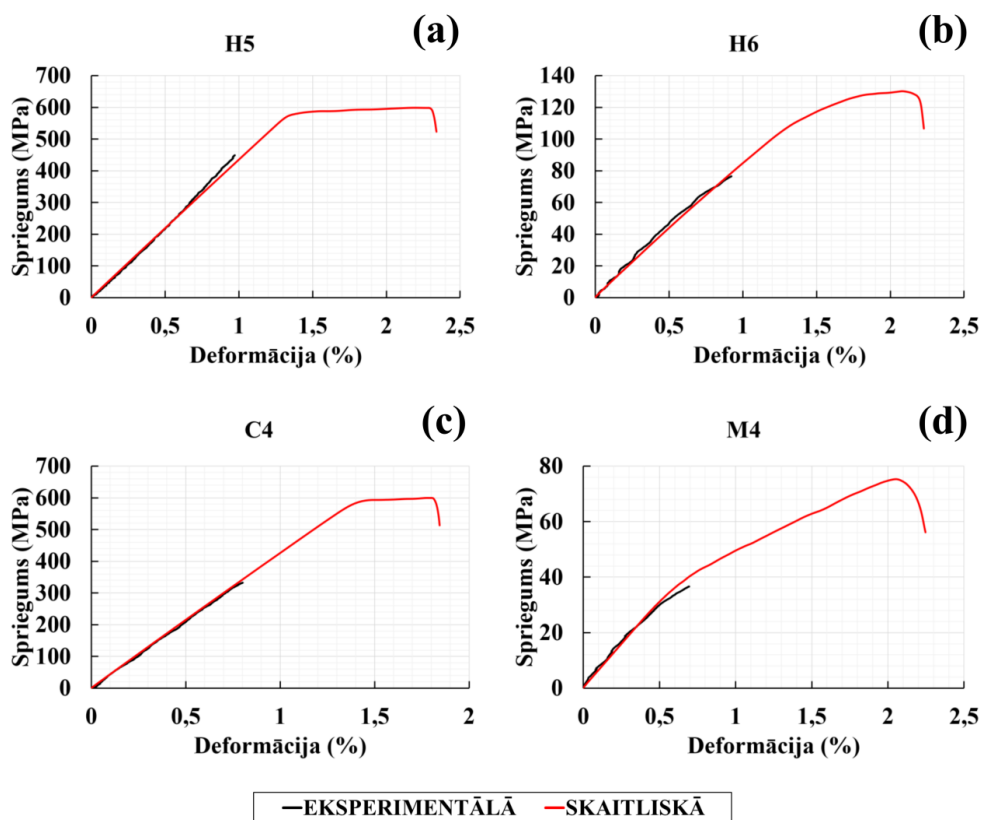
2.6. att. Mikroplisumu izveidošanās adītajos un austajos kompozītos vienvirziena kvazistatiskā stiepes slogojuma gadījumā: (a) pavediena/matricas delaminācijas kompozītā C1, ja stiepes deformācija ir 0,6 %; (b) oglekļa šķiedras pavedienu/matricas delaminācija kompozītā H8, ja stiepes deformācija ir 0,8 %; (c) šķērsvirziena plaisa oglekļa šķiedru pavedienos kompozītā H8, ja stiepes deformācija ir 0,8 %; (d) bīdes spriegumu plaisas tērauda šķiedru pavedienos kompozītā H9, ja stiepes deformācija ir 0,8 %.



2.7. att. Plīsumu attīstība adītajos un austajos kompozītos vienvirziena stiepes sloģojuma pavedienu garenvirzienā gadījumā: (a) šķiedru pavedienu/matricas delamināciju plaisu savstarpēja savienošānās kompozītos H1, ja stiepes deformācija ir 1,2 %; (b) delamināciju un šķērsvirziena plaisu savstarpēja savienošānās kompozītos C4, ja stiepes deformācija ir 0,8 %.

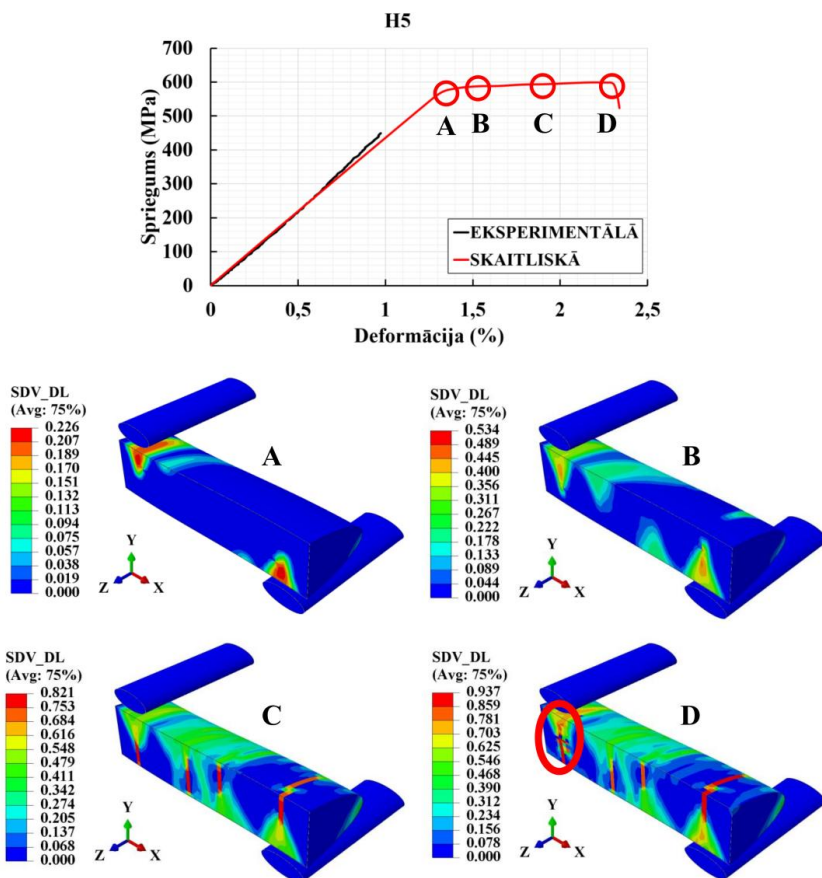
Adaptēts no **3. raksta**.

References un hibrīdo tekstilkompozītu mehāniskā darbība tika pētīta **4. un 5. rakstā**, izmantojot GEM skaitliskos aprēķinus. Pētīto kompozītu konfigurācijām H5, H6, C4 un M4 tika izveidoti 3D reprezentatīvie tilpuma elementi (*RVE*). Ar matricu pildītie šķiedru pavedieni tika modelēti kā homogēni ortotropi kompozītmateriāli, to mehānisko īpašību vērtības tika aprēķinātas, izmantojot koncentrisko cilindru mikromehānikas modeļus. Pavedieniem tika pieņemta eliptiskas formas šķērsgrīezuma forma. Garenvirziena pavedieniem tika piešķirta sinus funkcijas forma, savukārt šķērsvirziena pavedieni tika pieņemti kā taisni orientēti. Pavedieni *RVE* tika ietverti epoksīda sveķu matricas blokā, kuram tika definētas izotropā epoksīda matricas īpašības. Šķiedru pavedienu un matricas bloka ģeometriskie parametri tika noteikti, vadoties pēc eksperimentāli izgatavoto kompozītu analīzes optiskajā mikroskopā. *RVE* elementu skaitliskie aprēķini tika salīdzināti ar eksperimentāli noteiktajām vērtībām. Šķiedru pavedienu un matricas kopsalikums tika analizēts *ABAQUS* datorprogrammā, galīgo elementu tīklam izmantojot 3D cieta ķermeņa modeļa elementus. Lai izpētītu hibrīdo tekstilkompozītu pilnu mehānisko darbību pie stiepes sloģojuma, šķiedru pavedienu kompozītiem tika pielietots elastīgi plastiskais materiālu modelis, ko izveidojis Kozars ar līdzautoriem [1], [2], savukārt matricas blokam tika pielietots betona plīsumu plastiskais modelis [43], kas jau implementēts *ABAQUS* datorprogrammā.



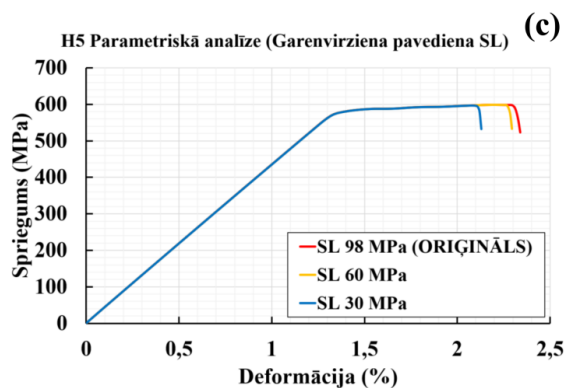
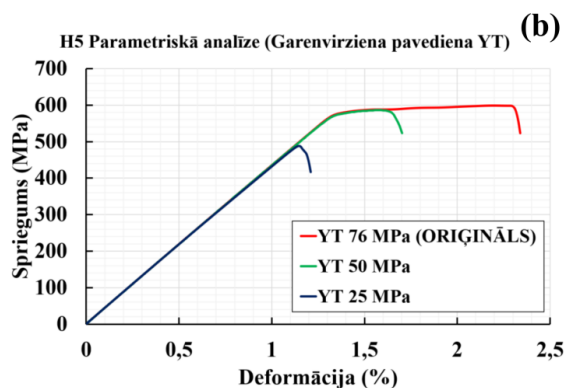
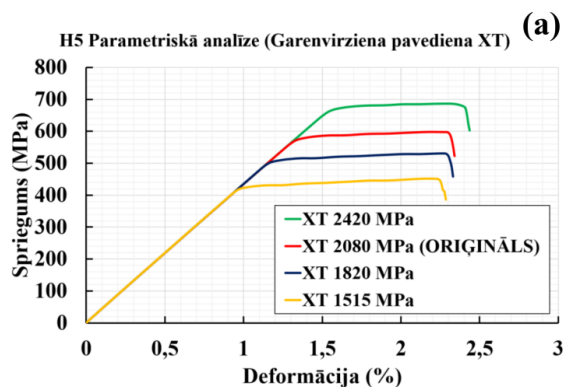
2.8. att. Spriegumu-deformāciju līkņu eksperimentālo un skaitlisko (GEM) rezultātu salīdzinājums pie kvazi-statiska stiepes slogojuma. Rezultāti parādīti kompozītu konfigurācijām: (a) H5; (b) H6; (c) C4; (d) M4. Adaptēts no 5. raksta.

2.8. attēlā redzams eksperimentālo un skaitlisko (GEM) spriegumu-deformāciju līkņu salīdzinājums. Lineāri elastīgajā stadijā eksperimentālajām un skaitliskajām spriegumu-deformāciju līknēm ir ļoti laba sakritība. Kā redzams 2.8. attēlā, skaitliskās līknes dod plašāku ieskatu pētīto kompozītu nelineārā darbībā un plastisko deformāciju un bojājumu veidošanās procesā. Hibrīdajai kompozītu konfigurācijai H5 skaitliskajai spriegumu-deformāciju līknei ir lineāri elastīgs raksturs, līdz materiālā pie noteiktas slodzes sāk veidoties mikroplīsumi, tādi kā delamināciju plaisas šķērsvirziena padeienu/matricas robežvirsmā, ja stiepes deformācija ir 1,2 %. Šo plīsumu rašanās būtiski neietekmē spriegumu-deformāciju līkni, jo H5 kompozīta mehānisko stingumu un stiprību galvenokārt nosaka garenvirziena padeieni. Kā redzams 2.9. attēlā, kompozīta H5 spriegumu-deformāciju līknē parādās lūzuma punkts, kad stiepes deformācija ir aptuveni 1,37 %, to izraisa šķiedru plīsumi garenvirziena padeienā (plīsumu veidošanās apzīmēta ar parametru D_L). Palielinot deformāciju, šķiedru plīsumi turpina veidoties lielākā apjomā, izveidojot vairākus šķiedru bojājumu klasterus, kā redzams 2.9. attēlā (sarkanās krāsas reģioni). Visbeidzot, ja pieliktā deformācija ir 2,3 %, garenvirziena padeieni pilnībā sagrūst, izraisot arī visa kompozītmateriāla galīgo sabrukumu.



2.9. att. Garenvirziena plīsumu, t. i., šķiedru plīsumu, attīstība (D_L), garenvirziena pavidienos hibrīdajos kompozītos H5 pie kvazi-statiska stiepes slogojuma. Adaptēts no **5. raksta**.

5. rakstā aprakstīta parametriska analīze, izmantojot GEM modeļus, lai salīdzinātu pilno spriegumu-deformāciju likni hibrīdajiem kompozītiem, tai skaitā H5. Tā kā tekstīlkompozītu darbību stiepes slogojuma gadījumā galvenokārt nosaka garenvirziena pavidienu stingums un stiprība, kā salīdzināšanas parametri tika izvēlēta garenvirziena pavidiena stiepes stiprība X_T , pavidiena šķērsvirziena stiepes stiprība Y_T , kā arī pavidiena bīdes stiprība S_L . Kā redzams 2.10. attēlā, garenvirziena stiepes stiprība X_T nosaka spriegumu-deformācijas līknes lūzuma punktu, sākoties šķiedru plīsumiem garenvirziena pavidienos. Zemāka pavidiena šķērsvirziena stiprība Y_T samazina galīgo kompozīta stiepes stiprību atšķirīgu plīsumu mehānismu dēļ, kā redzams 2.10. b attēlā. Visbeidzot, izmaiņas pavidiena bīdes stiprībā S_L , ietekmē plīsumu sadalījumu garenvirziena pavidienā pēc pirmo šķiedru plīsumu izveidošanās, kā redzams 2.10. c attēlā, nedaudz ietekmējot arī galīgo sabrukuma deformāciju.



2.10. att. Spriegumu-deformāciju līknes hibrīdajam kompozītam H5 pie vienvirziena stiepes slodguma. Parametriskajā analīzē pētīta garenvirziena pavediena: (a) garenvirziena stiprības X_T ietekme; (b) šķērsvirziena stiprības Y_T ietekme; (c) bīdes stiprības S_L ietekme. Pārpublicēts no 5. raksta.

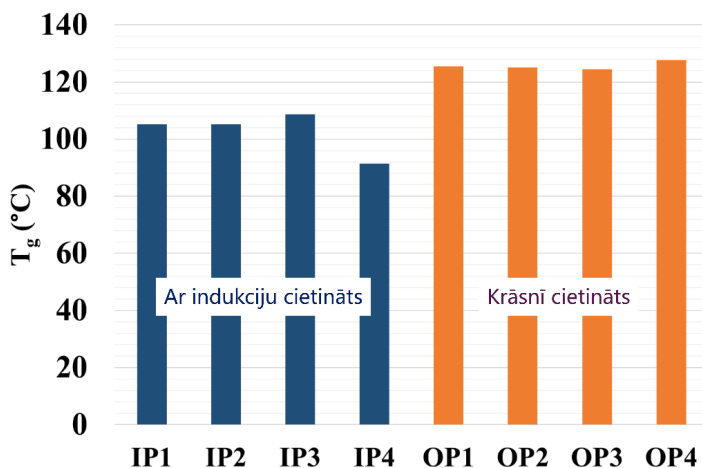
2.3. Mikropļūsmu attīstība ar indukciju cietinātos termoreaktīvos kompozītos

Neraugoties uz augstajām mehāniskajām īpašībām, oglekļa šķiedru termoreaktīvo kompozītu pielietojumu daudzās tehniskajās nozarēs ierobežo izejmateriālu un izgatavošanas procesa augstās izmaksas. Termoreaktīvo kompozītmateriālu izgatavošanas izmaksas varētu samazināt, izvēloties pielietot mazāk enerģiju patērējošas alternatīvas parastajai krāsnis vai autoklāva cietināšanas metodei [30]. Kā energoefektīvas alternatīvas varētu izmantot tilpuma sildīšanas metodes, tādas kā, piemēram, mikroviļņu sildīšana vai elektromagnētiskās indukcijas sildīšana, kur siltums tiek iekšēji ģenerēts izgatavojamā kompozītmateriāla tilpumā [44], [45].

Lai oglekļa šķiedru kompozītos varētu īstenoties indukcijas sildīšana, ir nepieciešams, lai materiāla struktūrā izveidotos noslēgtas elektriskās ķēdes indukcijas strāvas plūsmai. Šādas ķēdes var izveidoties, piemēram, veidojot laminātus no austiem audumiem vai veidojot daudzslāņu laminātus no vienvirziena šķiedru slāņiem [46], [47]. Indukcijas strāva kompozīta šķiedru struktūrā var tikt ierosināta, piemēram, ar indukcijas spoli, kas, pieslēgta maiņstrāvai, rada magnētisko lauku. Indukcijas strāva, plūstot cauri oglekļa šķiedrām, izraisa uzsilšanu, pateicoties dažādiem mehānismiem, tādiem kā Džoula zudumi, dielektriskā histerēze un kontakta pretestība [48]–[50]. Šķiedru uzsilšana izraisa arī ap šķiedrām apkārt esošās polimēra matricas uzsilšanu, tādējādi veicinot termoreaktīvās matricas cietināšanu (polimerizāciju).

Oglekļa šķiedru termoreaktīvo kompozītu indukcijas sildīšanas efektivitāte ir ļoti atkarīga no attāluma starp indukcijas spoli un kompozīta detaļu. Maksimālā sasniegtā temperatūra kompozīta detaļai ir apgriezti proporcionāla attāluma kvadrātam no spoles [51]. Literatūrā ir arī aprakstīts, ka temperatūras sadalījums ar indukciju sildītā tekstilkompozītā vai krusteniski līmētā laminātā ir līdzīgs indukcijas spoles formai [52]. Bieži praksē lietotās apla formas spole parasti izveido gandrīz apla formas temperatūras maksimuma sadalījumu kompozīta detaļā, izveidojot auksto punktu spoles centrā [53]. Aukstie punkti kompozīta detaļā novērš vienmērīgu termoreaktīvās polimēru matricas cietināšanu.

Izmantojot **6. rakstā** aprakstīto indukcijas sildīšanas sistēmu ar kustīgu spoli, tika panākta vienmērīgāka epoksīda matricas cietināšana krusteniski līmētā kompozītā ar [0/90]s slāņojumu. Saskaņā ar rekomendēto cietināšanas ciklu pētījumā izvēlētajai augstas stiprības vienvirziena oglekļa šķiedru *pre-preg* materiālu sistēmai *XC130-C12UD-300* [54], kā arī atbilstoši izveidotās indukcijas sildīšanas sistēmas kapacitātei, kompozītmateriāla sildīšana tika veikta četras stundas 100 °C temperatūrā. Cietēšanas vienmērīgums pēc pirmajiem izmēģinājuma testiem tika analizēts, izmantojot polimerizācijas pakāpes mērījumus ar diferenciālo skenējošo kalorimetriju (*DSC*). 2.11. attēlā redzama atbilstošā nomērītā stiklošanās temperatūra (T_g) ar indukciju sildītiem paraugiem un references materiāla paraugiem, kas tika cietināti parastajā industriālajā krāsnī. Stiklošanās temperatūras vērtība ir tieši proporcionāla polimerizācijas pakāpei. Ar indukciju cietinātiem paraugiem tika konstatēta būtiska variācija stiklošanās temperatūras T_g vērtībās, sasniedzot līdz pat 20 %. Kā redzams 2.11. attēlā, vidējā stiklošanās temperatūra ar indukciju cietinātiem paraugiem ir zemāka nekā krāsnī cietinātos paraugos.



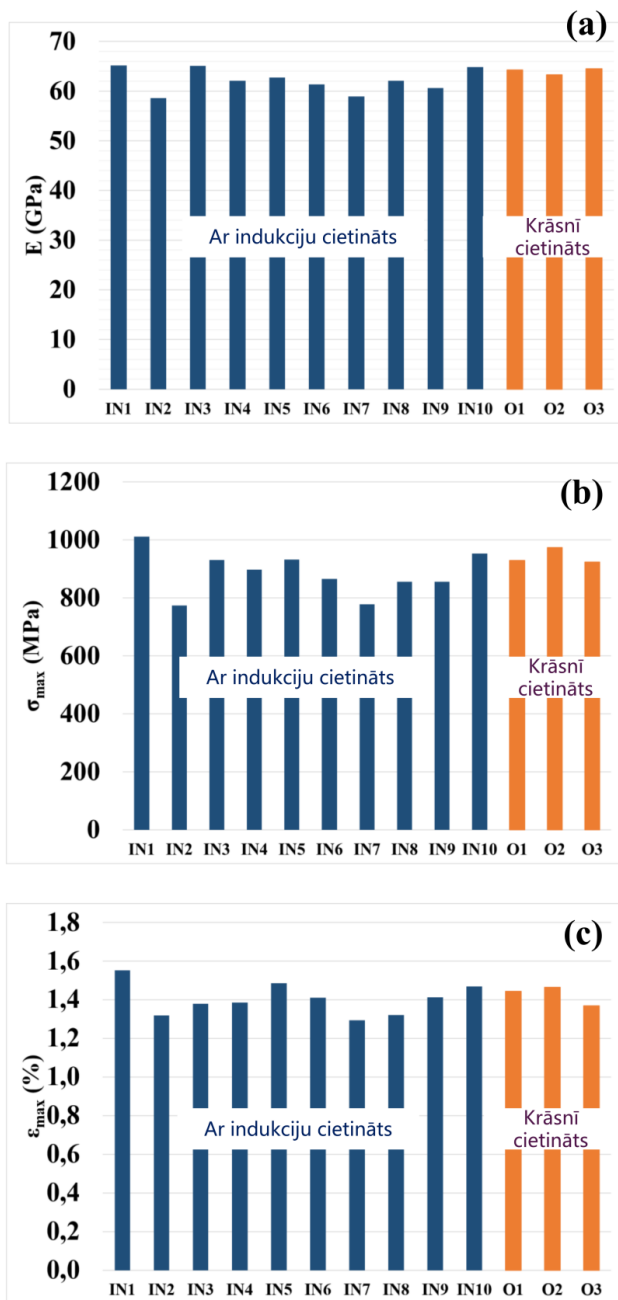
2.11. att. Stiklošanās temperatūras (T_g) vērtības, kas norāda polimerizācijas pakāpi ar indukciju cietinātos paraugos (IP1–IP4) un krāsnī cietinātos paraugos (OP1–OP4). Adaptēts no **6. raksta**.

Vadoties pēc izmēģinājuma indukcijas sildīšanas testiem, ar indukcijas sildīšanu tika izgatavota jauna [0/90]_s krusteniski līmēta kompozītmateriāla plate (izmērs 300 mm × 300 mm), pielāgojot indukcijas spoles kustību vienmērīgāka temperatūras sadalījuma sasniegšanai. No dažādām izgatavotās kompozītmateriāla plates vietām tika izgriezti taisnstūrveida paraugi, un to mehānisko īpašību variācija tika eksperimentāli noteikta, veicot kvazistatiskos stiepes slogojuma testus. Šobrīd pētniecības grupā turpinās jaunu kompozītmateriālu konfigurāciju izgatavošana un to padziļināta analīze.

Kā redzams 2.12. attēlā un 2.2. tabulā, lai gan testēto paraugu mehāniskās īpašības ar indukciju cietinātiem paraugiem dažādās kompozīta plates lokācijās savstarpēji atšķiras par 9 %, ar indukciju cietināta kompozīta elastības moduļa galīgās stiepes stiprības un sabrukuma relatīvās deformācijas vidējās vērtības no krāsnī cietināta references materiāla atšķiras ne vairāk kā par 6 %.

Indukcijas sildīšanas process, izmantojot kustīgu indukcijas spoli, kompozītmateriālā izraisa laikā mainīgus temperatūras gradientus. Tas savukārt izraisa nevienmērīgu cietēšanu, materiālā izveidojot attiecīgi cietākas vai mīkstākas zonas. Gaisa ieslēgumus, kas izveidojas *pre-preg* lamināta izgatavošanas procesā, ir vieglāk izvadīt no mīkstākajām zonām nekā no cietajām zonām. Ja mīkstākās zonas aptver cieto zonu reģions, tad gaisa ieslēgumi var permanenti palikt kompozītmateriāla struktūrā. Tādēļ ar indukciju cietinātiem kompozītiem tika novērots lielāks gaisa ieslēgumu daudzums nekā krāsnī cietinātos paraugos. Gaisa ieslēgumi kompozītā, kas pakļauts mehāniskai slodzei, darbojas kā spriegumu koncentratori, kas veicina mikropīsumu rašanos un izplatīšanos. 2.13. attēlā redzama šķērsvirziena plaista ar indukciju cietinātā kompozīta paraugā, kas izveidojusies no gaisa ieslēguma. Ņemot vērā relatīvi augstāku gaisa ieslēgumu daudzumu, ar indukciju cietinātiem paraugiem tika novērota

mikroplīsumu izveidošanās un attīstība pie zemākiem relatīvās deformācijas līmeņiem nekā krāsni cietinātā references materiālā, kā redzams 2.14. attēlā.

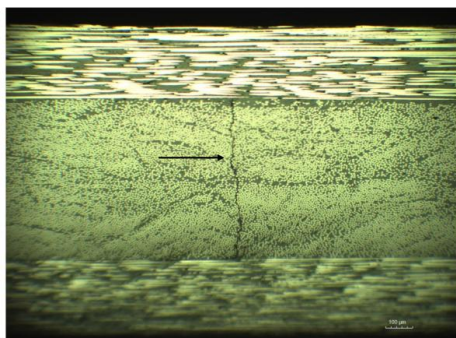


2.12. att. (a) Garenvirziena elastības modulis; (b) galīgā stiepes stiprība; (c) relatīvā stiepes deformācija pie sabrukuma ar indukciju cietinātiem un krāsni cietinātiem kompozītmateriālu laminātiem ar slāņojumu [0/90]_s.

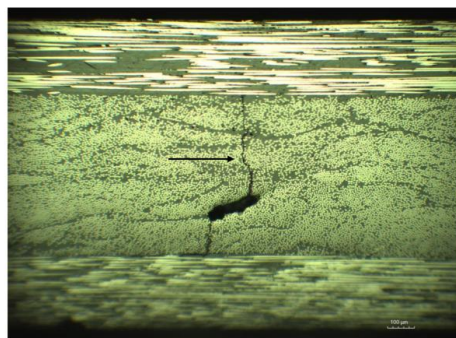
2.2. tabula

Mehānisko īpašību vidējo vērtību salīdzinājums ar indukciju cietinātiem un krāsni cietinātiem kompozītmateriālu paraugiem

	Ar indukciju cietināti	Krāsni cietināti	Atšķirība %
Elastības modulis (GPa)	$62,14 \pm 2,40$	$64,04 \pm 0,64$	2,95
Stiepes stiprība (MPa)	$885,53 \pm 75,37$	$941,96 \pm 27,54$	5,99
Relatīvā stiepes deformācija pie sabrukuma (%)	$1,40 \pm 0,08$	$1,43 \pm 0,05$	1,58



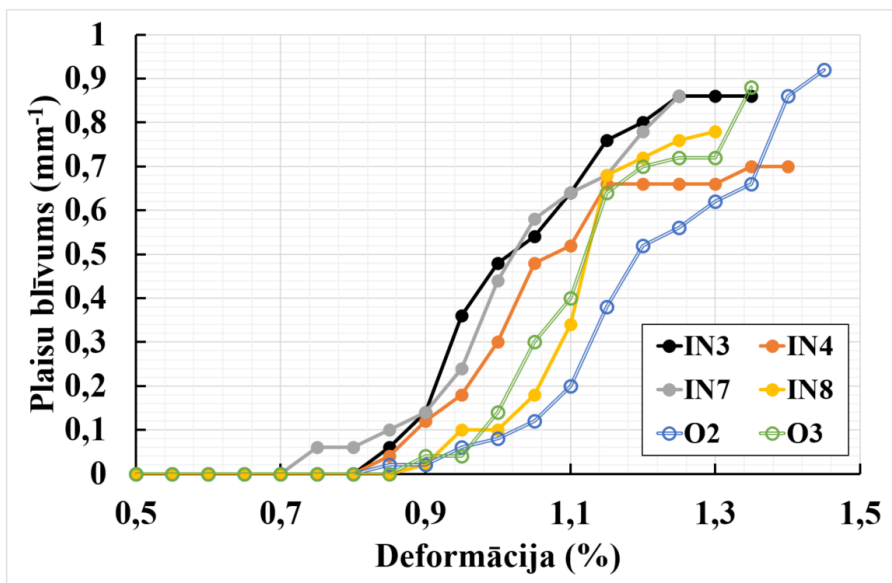
(a)



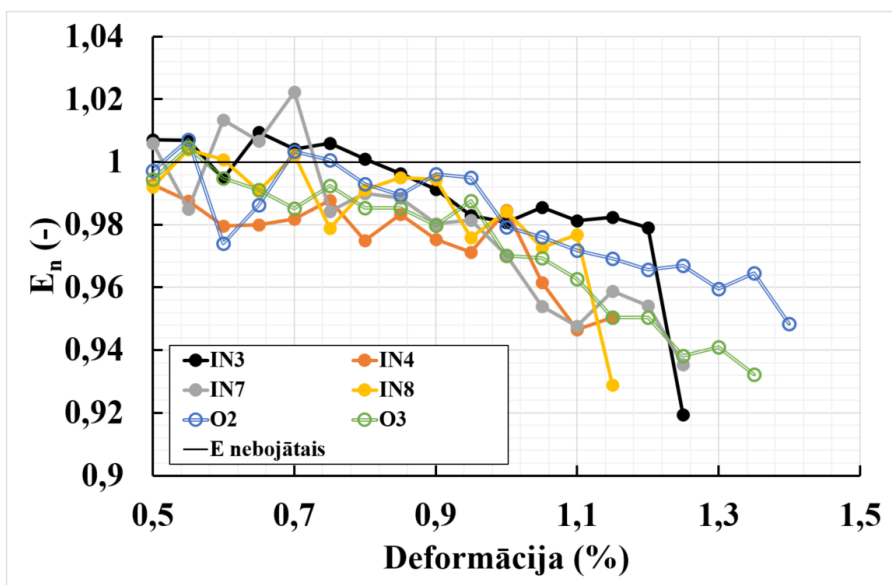
(b)

300 μm

2.13. att. Šķērsvirziena plaisas ar indukciju cietinātā krusteniski līmētā kompozītā ar slāņojumu [0/90]_s, kas pakļauts vienvirziena stiepes slogojumam. (a) šķērsvirziena plaisas izveidošanās patvaļīgā lokācijā 90 grādu slānī; (b) šķērsvirziena plaisas izveidošanās 90 grādu slānī, ja gaisa ieslēgums ir liels.



(a)



(b)

2.14. att. (a) Šķērsvirziena plaisu attīstība ar indukciju cietinātos krusteniski līmētos kompozītmateriālos ar slāņojumu [0/90]s pie pieaugošas stiepes relatīvās deformācijas; (b) attiecīgais stinguma samazinājums mikropļūsmu attīstības dēļ.

3. SECINĀJUMI

Promocijas darbā tika pētīta mikrobojājumu attīstība: (a) krusteniski līmētos laminātos ar augstu plaisu blīvumu; (b) hibrīdajos oglekļa/tērauda šķiedru tekstilkompozītos; (c) ar indukciju cietinātos kompozītos.

Galvenie darbā iegūtie secinājumi

1. Vienvirziena stiepes slogojuma gadījumā krusteniski līmētos kompozītos ar augstu šķērsvirziena plaisu blīvumu 90 grādu slāņos izveidojas lieli spriegumu gradienti. Šie spriegumu gradienti būtiski ietekmē enerģijas atbrīvošanās ātrumu, kas pieejams jaunas šķērsvirziena plaisas izveidošanai. Augsto spriegumu gradientu dēļ materiāla reģionos, kuros ir ļoti liels šķērsvirziena plaisu blīvums (plaisu blīvums reizināts ar 90 grādu slāņa biezumu pārsniedz vērtību 2,0), lamināta vidusplaknes tuvumā izveidojas spiedes spriegumi, kas pilnībā aptur jaunu šķērsvirziena plaisu augšanu.
2. Šķērsvirziena plaisu galos krusteniski līmētos laminātos, kas pakļauti vienvirziena stiepes slogojumam, spriegumu koncentrāciju dēļ veidojas lokālās delamināciju plaisas. Lokālo delamināciju augšana ir būtiski atkarīga no šķērsvirziena plaisu blīvuma, 0/90 grādu slāņu biezuma attiecības un specifiskām materiālu elastīgo īpašību attiecībām, tādām kā E_L^0/E_T^{90} un G_{LT}^0/E_T^{90} . Nesimetriskām I veida formas delaminācijām ir tendence augt līdz simetriskai I veida formai pirms tālākas plaisu izplatības.
3. Hibrīdajos oglekļa/nerūsējošā tērauda tekstilkompozītos, kas pakļauti stiepes slogojumam garenvirziena pavedienu virzienā, pirmie mikrobojājumi izveidojas šķērsvirziena pavedienu un matricas robežvirsmas delamināciju formā. Šādu bojājumu parādīšanās būtiski neizmaina materiāla spriegumu-deformāciju līkni, jo materiāla mehānisko darbību galvenokārt nosaka garenvirziena pavedienu īpašības.
4. Spriegumu-deformāciju līknē lūzuma punkts tiek sasniegts, sākoties šķiedru plīsumiem garenvirziena pavedienos. Palielinoties slodzei, plīsumu attīstība notiek, parādoties arvien vairāk šķiedru plīsumiem, kas izveido plīsumu klasterus, kas izraisa pilnīgu hibrīdā kompozīta sabrukumu.
5. Kompozītos, kas izgatavoti ar elektromagnētiskās indukcijas cietināšanu, izmantojot kustīgu indukcijas spoli, salīdzinot ar references krāsnī cietinātiem kompozītiem, tika novērots palielināts gaisa ieslēgumu daudzums, kas izraisa mikro-plīsumu izveidošanos un attīstību pie zemākiem relatīvās stiepes deformācijas līmeņiem.

ATSAUCES

- [1] Cózar IR, Otero F, Maimí P, González E V., Miot S, Turon A, et al. A three-dimensional plastic-damage model for polymer composite materials. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2022; 163. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107198>.
- [2] Cózar IR, Otero F, Maimí P, González E V., Turon A, Camanho PP. An enhanced constitutive model to predict plastic deformation and multiple failure mechanisms in fibre-reinforced polymer composite materials. *Compos Struct* 2024; 330. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117696>.
- [3] París F, Correa E, Mantič V. Kinking of transversal interface cracks between fiber and matrix. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME* 2007;74. <https://doi.org/10.1115/1.2711220>.
- [4] Gorbatikh L, Lomov S V. Damage accumulation in textile composites. *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-286-0.00003-0>.
- [5] Nairn JA. Matrix Microcracking in Composites. *Comprehensive Composite Materials*, 2000. <https://doi.org/10.1016/b0-08-042993-9/00069-3>.
- [6] Blázquez A, Mantič V, París F, McCartney LN. Stress state characterization of delamination cracks in [0/90] symmetric laminates by BEM. *Int J Solids Struct* 2008;45:1632–62. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2007.10.013>.
- [7] Lim SG, Hong CS. Prediction of Transverse Cracking and Stiffness Reduction in Cross-Ply Laminated Composites. *J Compos Mater* 1989;23:695–713. <https://doi.org/10.1177/002199838902300704>.
- [8] Hashin Z. Analysis of cracked laminates: a variational approach. *Mechanics of Materials* 1985;4. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(85\)90011-0](https://doi.org/10.1016/0167-6636(85)90011-0).
- [9] Varna J, Berglund L. Multiple transverse cracking and stiffness reduction in cross-ply laminates. *Journal of Composites Technology and Research* 1991;13. <https://doi.org/10.1520/ctr10213j>.
- [10] Varna J, Berglund LA. Thermo-elastic properties of composite laminates with transverse cracks. *Journal of Composites Technology and Research* 1994;16. <https://doi.org/10.1520/ctr10397j>.
- [11] Berthelot JM. Transverse cracking and delamination in cross-ply glass-fiber and carbon-fiber reinforced plastic laminates: Static and fatigue loading. *Appl Mech Rev* 2003; 56. <https://doi.org/10.1115/1.1519557>.
- [12] Lomov S V., Ivanov DS, Truong TC, Verpoest I, Baudry F, Vanden Bosche K, et al. Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test. *Compos Sci Technol* 2008; 68. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.07.005>.
- [13] Kulkarni AN, Pupurs A, Šņepsts A, Irbe M. MICRO-DAMAGE EVOLUTION IN HYBRID CARBON/STEEL KNITTED AND WOVEN FABRIC COMPOSITES. In: Falzon B, McCarthy C, editors. *Proceedings of the 2023 International Conference on Composite Materials*, Belfast: Queen's University Belfast; 2023.

- [14] Kulkarni AN, Pupurs A, Kononova O, Jevstignejevs V, Maimi P, Subramani A. Hybrid carbon/steel fiber textile composites for ductility improvements. n.d.
- [15] Chen J, Yu Z, Jin H. Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber-reinforced polymer composites: A review. *Front Mater* 2022;9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.986645>.
- [16] Kulkarni AN. Energy and Strength-based Criteria for Intralaminar Crack Growth in Regions with High Stress Gradients. Independent thesis Advanced level (degree of Master (Two Years)). Luleå University of Technology, 2021.
- [17] Garrett KW, Bailey JE. Multiple transverse fracture in 90° cross-ply laminates of a glass fibre-reinforced polyester. *J Mater Sci* 1977; 12:157–68. <https://doi.org/10.1007/BF00738481>.
- [18] Kulkarni AN, Pupurs A, Varna J. Analysis of initiation and growth of new transverse cracks in high crack density regions in cross-ply laminates. *J Compos Mater* 2025; 59:539–50. <https://doi.org/10.1177/00219983241295811>.
- [19] Berthelot JM, Le Corre JF. Statistical analysis of the progression of transverse cracking and delamination in cross-ply laminates. *Compos Sci Technol* 2000; 60:2659–69. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00140-8).
- [20] O'Brien TK. ANALYSIS OF LOCAL DELAMINATIONS AND THEIR INFLUENCE ON COMPOSITE LAMINATE BEHAVIOR. ASTM Special Technical Publication, 1985. <https://doi.org/10.1520/stp36310s>.
- [21] Wang ASD, Kishore NN, Li CA. Crack development in graphite-epoxy cross-ply laminates under uniaxial tension. *Compos Sci Technol* 1985; 24. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(85\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0266-3538(85)90058-2).
- [22] Kim TW, Kim HJ, Im S. Delamination crack originating from transverse cracking in cross-ply composite laminates under extension. *Int J Solids Struct* 1991; 27:1925–41. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(91\)90186-J](https://doi.org/10.1016/0020-7683(91)90186-J).
- [23] Kulkarni AN, Pupurs A, Varna J. Parameters affecting growth of local delaminations at transverse crack tips in [0m,90n]s cross-ply laminates. *Eng Fract Mech* 2025; 328:111549. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2025.111549>.
- [24] Wang L, Wu J, Chen C, Zheng C, Li B, Joshi SC, et al. Progressive failure analysis of 2D woven composites at the meso-micro scale. *Compos Struct* 2017; 178. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.023>.
- [25] Callens MG, Gorbatiikh L, Verpoest I. Ductile steel fibre composites with brittle and ductile matrices. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2014; 61:235–44. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2014.02.006>.
- [26] Allaer K, De Baere I, Lava P, Van Paepegem W, Degrieck J. On the in-plane mechanical properties of stainless steel fibre reinforced ductile composites. *Compos Sci Technol* 2014; 100. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.05.009>.
- [27] Czél G, Wisnom MR. Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2013; 52. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.04.006>.

- [28] Swolfs Y, Verpoest I, Gorbatiikh L. Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications. *International Materials Reviews* 2019; 64. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1467365>.
- [29] Corvo Alguacil M, Umeki K, Gaidukovs S, Barkāne A, You S, Joffe R. The impact of thermal treatment parameters on the preservation of carbon fiber mechanical properties after reclamation. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 2024; 9. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100431>.
- [30] Collinson MG, Bower MP, Swait TJ, Atkins CP, Hayes SA, Nuhiji B. Novel composite curing methods for sustainable manufacture: A review. *Composites Part C: Open Access* 2022; 9. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100293>.
- [31] Pupurs A, Lācis V, Šņepsts A, Kulkarni AN, Irbe M. ANALYSIS OF MICRO-DAMAGE EVOLUTION IN INDUCTION-CURED THERMOSET COMPOSITES. In: Binetruy C, Jacquemin F, editors. *Proceedings of the 21st European Conference on Composite Materials, Nantes: The European Society for Composite Materials (ESCM) and the Ecole Centrale de Nantes*; 2024, p. 1529–34.
- [32] McCartney LN, Schoeppner GA. Predicting the effect of non-uniform ply cracking on the thermoelastic properties of cross-ply laminates. *Compos Sci Technol* 2002; 62. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00091-X).
- [33] Hajikazemi M, Sadr MH. A variational model for stress analysis in cracked laminates with arbitrary symmetric lay-up under general in-plane loading. *Int J Solids Struct* 2014; 51. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.10.024>.
- [34] Hajikazemi M, Sadr MH, Hosseini-Toudeshky H, Mohammadi B. Thermo-elastic constants of cracked symmetric laminates: A refined variational approach. *Int J Mech Sci* 2014; 89. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.08.008>.
- [35] Hajikazemi M, McCartney LN. Comparison of Variational and Generalized Plane Strain approaches for matrix cracking in general symmetric laminates. *International Journal of Damage Mechanics* 2018; 27. <https://doi.org/10.1177/1056789516685381>.
- [36] Rahmani M, Farrokhabadi A. Prediction of induced delamination development in $[\theta/90]_s$ composite laminates using a computational analytical approach. *Compos Struct* 2018; 203. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.018>.
- [37] Hannemann B, Backe S, Schmeer S, Balle F, Breuer UP. New multifunctional hybrid polymer composites reinforced by carbon and steel fibers. *ICCM International Conferences on Composite Materials*, vol. 2015- July, 2015.
- [38] Rehra J, Hannemann B, Schmeer S, Hausmann J, Breuer UP. Approach for an Analytical Description of the Failure Evolution of Continuous Steel and Carbon Fiber Hybrid Composites. *Adv Eng Mater* 2019; 21. <https://doi.org/10.1002/adem.201800565>.
- [39] Rehra J, Jungbluth J, Katri B, Schmeer S, Gurka M, Balle F, et al. Damage and failure mechanisms of hybrid carbon fiber and steel fiber reinforced polymer composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2024; 185:108366. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108366>.

- [40] McBride AK, Turek SL, Zaghi AE, Burke KA. mechanical behavior of hybrid glass/steel fiber reinforced epoxy composites. *Polymers (Basel)* 2017; 9. <https://doi.org/10.3390/polym9040151>.
- [41] O'Brien C, Zaghi AE. Mechanical characteristics of hybrid composites with $\pm 45^\circ$ glass and $0^\circ/90^\circ$ stainless steel fibers. *Materials* 2018; 11. <https://doi.org/10.3390/ma11081355>.
- [42] Andrejs P, Inita B, Inga Ļ, Māris M, Mārtiņš I, Alens Š. MANUFACTURING AND EXPERIMENTAL TESTING OF COMPOSITE/METAL JOINTS WITH TEXTILE MESOSTRUCTURE. *ECCM 2022 – Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials: Composites Meet Sustainability*, vol. 2, 2022.
- [43] Concrete Damaged Plasticity. *ABAQUS Analysis User's Guide*, vol. Volume III Materials, 2016.
- [44] Thostenson ET, Chou TW. Microwave and conventional curing of thick-section thermoset composite laminates: Experiment and simulation. *Polym Compos* 2001; 22:197–212. <https://doi.org/10.1002/PC.10531>.
- [45] Bayerl T, Duhovic M, Mitschang P, Bhattacharyya D. The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2014; 57. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.024>.
- [46] Becker S, Mitschang P. Influence of thread count of carbon twill textile-reinforced polyamide 66 laminates on the inductive heating behavior. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2021; 34. <https://doi.org/10.1177/0892705719854493>.
- [47] Kidangan RT, Unnikrishnakurup S, Krishnamurthy CV, Balasubramaniam K. The influence of interlaminar microstructure on the induction heating patterns of CFRP laminates. *Mater Today Commun* 2022; 33. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104338>.
- [48] Miller AK, Chang C, Payne A, Gur M, Menzel E, Peled A. The nature of induction heating in graphite-fiber, polymer-matrix composite material. *SAMPE Journal* 1990; 26.
- [49] Fink BK, McCullough RL, Gillespie JW. A local theory of heating in cross-ply carbon fiber thermoplastic composites by magnetic induction. *Polym Eng Sci* 1992; 32. <https://doi.org/10.1002/pen.760320509>.
- [50] Kim H, Yarlagadda S, Gillespie JW, Shevchenko NB, Fink BK. A study on the induction heating of carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Advanced Composite Materials* 2002; 11. <https://doi.org/10.1163/156855102753613309>.
- [51] Rudolf R, Mitschang P, Neitzel M. Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2000; 31. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00094-4).
- [52] Uzzell JPN, Pickard LR, Hamerton I, Ivanov DS. Novel cellular coil design for improved temperature uniformity in inductive heating of carbon fibre composites. *Mater Des* 2024; 237. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112551>.
- [53] Lundström F, Frogner K, Andersson M. Analysis of the temperature distribution in weave-based CFRP during induction heating using a simplified numerical model with a

- cross-ply representation. Compos B Eng 2021; 223.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109153>.
- [54] XC130 Autoclave Cure Component Prepreg – Technical Datasheet – 10/11/2022. n.d.



Anish Niranjana Kulkarni dzimis 1997. gadā Pūnē (Indija). Indijas Nacionālajā tehnoloģiju institūtā *Tiruchirappalli* ieguvis bakalaura grādu metalurģijas un materiālu inženierzinātnēs (2019; ar izcilību). Pēc bakalaura studiju pabeigšanas ieguvis prestižo Eiropas Savienības *Erasmus Mundus* stipendiju, lai iegūtu Eiropas maģistra grādu progresīvo materiālu zinātnē un inženierijā. Kopš 2022. gada ir Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas (kopš 2024. gada 1. janvāra – Būvniecības un mašīnzinību) fakultātes doktorants un pētnieks. Doktorantūras studiju laikā piedalījies vairākās starptautiskās konferencēs un semināros, kā arī apmaiņas vizītēs Luleo Tehnoloģiju universitātē (Zviedrija) un Žironas Universitātē (Spānija). Patlaban strādā dažādos pētniecības projektos, kas saistīti ar polimēru kompozītmateriālu mehāniku, hibrīdiem tekstila kompozītmateriāliem un ar indukciju cietinātiem termoreaktīvajiem kompozītiem.