

Endija Namsone-Sīle

TRADICIONĀLU PULTRŪZIJAS PROCESU EFEKTIVITĀTES UN PRODUKTIVITĀTES UZLABOŠANA

Promocijas darba kopsavilkums

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte
Augstas veiktspējas materiālu un konstrukciju institūts

Endija Namsone-Sīle

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorante

**TRADICIONĀLU PULTRŪZIJAS PROCESU
EFEKTIVITĀTES UN PRODUKTIVITĀTES
UZLABOŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
JEVGENIJS BARKANOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Namsone-Sīle, E. Tradicionālu pultrūzijas procesu efektivitātes un produktivitātes uzlabošana. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 35 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “P-06” 2025. gada 2. jūnija lēmumu Nr. 04030- 9.6/3.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Promocijas darbs tapis ar Eiropas Reģionālās attīstības fonda (ERAF) projekta Nr, 1.1.1.1/18/A/053 “Tradicionālu pultrūzijas procesu efektivitātes uzlabošana” atbalstu.

Vāka attēls – www.shutterstock.com.

<https://doi.org/10.7250/9789934372100>

ISBN 978-9934-37-210-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 31.oktobrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 546. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Dmitrijs Serdjuks,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. sc. ing.* Andrejs Aņiskevičs,
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Genadij Lvov,
Nacionālā tehniskā universitāte "Harkivas Politehniskais institūts", Ukraina

APSTIPRINĀJUMS

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

Endija Namsone-Sīle (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 62 attēli, 30 tabulas, 10 pielikumi, kopā 121 lappuse. Literatūras sarakstā ir 82 avoti.

SATURS

SATURS	4
1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
1.1. Tēmas aktualitāte.....	5
1.2. Darba mērķis.....	6
1.3. Darba uzdevumi	6
1.4. Pētījuma metodes un līdzekļi.....	6
1.5. Darba zinātniskā novitāte	6
1.6. Darba praktiskā vērtība.....	7
1.7. Darba hipotēze	7
1.8. Darba aprobācija un publikācijas	7
1.8.1. Publikāciju saraksts	8
1.8.2. Konferenču saraksts	9
1.8.3. Projekta semināri.....	10
1.8.4. Promocijas darba aprobācija	10
2. PROMOCIJAS DARBA SATURS	11
2.1. Literatūras apskats	11
2.2. Multifizikālu problēmu modelēšana	11
2.3. Tradicionālu pultrūzijas procesu optimizācija.....	25
2.4. Progresīvu pultrūzijas procesu izstrāde.....	29
SECINĀJUMI.....	33
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	35

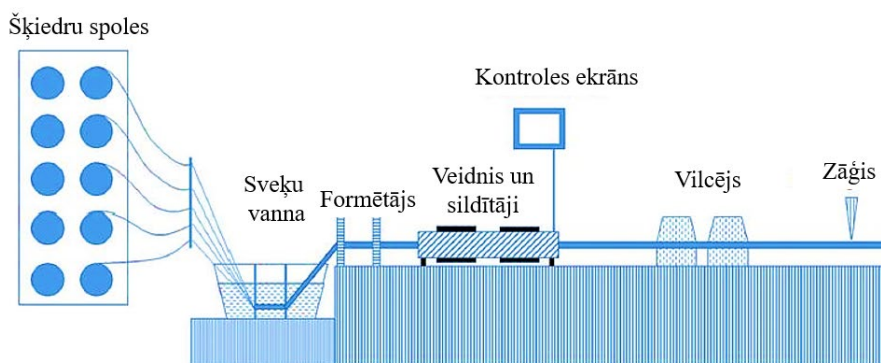
1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Pultrūzija ir nepārtraukts, šķiedru-polimēru kompozītmateriālu ražošanas process ar konstantu šķērsgrizumu. Tas ir automatizēts process ar minimālu atkritumu daudzumu un darbietilpību [1]. Pultrūzijas procesa vēsture aizsākās jau 20. gadsimta 50. gadu sākumā ar pirmo publicēto patentu 1951. gadā, prezentējot nepārtrauktu stieņu kompozītmateriālu konstrukciju ražošanas metodi [2]. Tradicionālā pultrūzijas procesa shematiskais attēlojums redzams 1.1. attēlā. Šī procesa laikā šķiedras tiek izvilktas caur apsildāmu formu, veidojot šķiedru-polimēru kompozītmateriālu.

Mūsdienās šķiedru pastiprināti kompozītmateriāli tiek plaši izmantoti dažādu vieglsvaru konstrukcijās, kur ir svarīga augsta stingrības attiecība pret svaru un izturības attiecība pret svaru un kas strādā lielas ekspluatācijas slodzes apstākļos. Pultrūdētie profili aizvieto tādus tradicionālos materiālus, ko izmanto dažādās nozarēs – transports, civilā būvniecība, vēja enerģētika, jūrniecība un aviācijā. Mūsdienās pultrūzija ir viens no straujāk augošiem ražošanas procesiem kompozītmateriālu tirgū.

Lai gan pultrūzijas nozares sektors demonstrē veiksmīgu izaugsmi, nepārtrauktais elektroenerģijas resursu izmaksu pieaugums varētu šo kustību ievērojami samazināt vai pat apturēt pilnībā. Tradicionālo pultrūzijas procesu efektivitāti un produktivitāti varētu uzlabot, optimizējot pultrūzijas procesa parametrus vai lietojot inovatīvus siltuma avotus, nevis elektrisko pretestību ar lieliem siltuma zudumiem. Tādēļ ir izstrādāta jauna, efektīva optimizācijas metodika, ņemot vērā visus nepieciešamos rūpniecisko pultrūzijas procesu parametrus un apkārtējās istabas temperatūru, kā arī ir izstrādāti elektromagnētiskie-termoķīmiskie galīgo elementu modeļi un algoritmi.



1.1. att. Tradicionālais pultrūzijas process [1].

1.2. Darba mērķis

Promocijas darba galvenais mērķis ir ievērojami uzlabot tradicionālo pultrūzijas procesu efektivitāti un produktivitāti, saglabājot pultrūdēto profilu kvalitāti. To var panākt:

- veicot procesa optimizāciju un izstrādājot interaktīvu tehnoloģisko karti;
- izmantojot inovatīvus siltuma avotus elektrisko pretestību vietā ar lieliem siltuma zudumiem un izstrādājot inovatīvus, mikroviļņu veicinātus pultrūzijas procesus.

1.3. Darba uzdevumi

- Jaunu elektromagnētisko un apvienotu elektromagnētisko-termoķīmisko galīgo elementu modeļu un algoritmu izstrāde progresīvo pultrūzijas procesu modelēšanai.
- Esošo termoķīmisko galīgo elementu modeļu un algoritmu modificēšana apvienotas elektromagnētiskās-termoķīmiskās problēmas risināšanai un rūpniecisko pultrūzijas procesu optimizācijai.
- Optimizācijas problēmu formulēšana un optimizācijas procesa risināšana tradicionālo pultrūzijas procesu efektivitātes un produktivitātes uzlabošanai.
- Interaktīvu tehnoloģisko karšu izstrāde tehnologu lietošanai industriālā vidē.
- Jaunu, mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesu izstrāde stieņu profila ražošanai.
- Izstrādātā progresīvā pultrūzijas procesa efektivitātes un produktivitātes novērtējums.

1.4. Pētījuma metodes un līdzekļi

Darbā izmantotas šādas zinātniskās pētniecības metodes:

- galīgo elementu programmatūras *ANSYS Mechanical*, *COMSOL Multiphysics*;
- *ANSYS* parametriskās modelēšanas valodas programmēšana;
- atbildes virsmu un eksperimentu plānošanas metodes;
- programmatūra *EDAOpt* (optimizācijai);
- programmatūras *Microsoft Excel* grafiskie līdzekļi iegūto rezultātu attēlošanai;
- programmatūras *Microsoft Excel Solver* rīks optimizācijas problēmu atrisināšanai.

1.5. Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darbā ir izstrādāta jauna, efektīva optimizācijas metode, ņemot vērā visus nepieciešamo rūpniecisko pultrūzijas procesu parametrus un apkārtējas vides temperatūru, izmantojot eksperimentu plānošanas un atbildes virsmu metodes.

Precīzāka un reālāka procesa optimizācija tiek panākt ar temperatūras kontroli, ko veic sildītāju ieslēgšanas un izslēgšanas stratēģija.

Jauns, mikroviļņu veicināts pultrūzijas process stieņu profila ražošanai ir izstrādāts, atrisinot apvienoto elektromagnētisko-termoķīmisko problēmu. Tas ir paveikts, izmantojot vispārējā lietojuma galīgo elementu programmatūru, kas ļauj ievērojami ietaupīt izstrādes laiku un izmaksas, kā arī padara pieejamas dažādas galīgo elementu pakotņu modelēšanas pieejas. Izstrādātie galīgo elementu modeļi un algoritmi ļauj saglabāt dielektriskā materiāla īpašību atkarību no temperatūras, kā tas noris reālos pultrūzijas procesos.

1.6. Darba praktiskā vērtība

Promocijas darbs tapis ar Eiropas Reģionālās attīstības fonda (ERAF) projekta Nr. 1.1.1.1/18/A053 “Tradicionālu pultrūzijas procesu efektivitātes uzlabošana” atbalstu. Projekta mērķis ir uzlabot tradicionālu pultrūzijas procesu efektivitāti, saglabājot pultrūdēto profilu kvalitāti un ievērojami samazinot izmaksas, kā arī veicinot veselīgāku vidi.

Promocijas darbam ir tieša praktiskā vērtība, jo ir būtiski uzlaboti divi rūpnieciskie tehnoloģiskie procesi. Tātad, SIA “*COMPOR*” rūpnieciskā tehnoloģiskā procesa, kas ražo divus stieņa profilus, vilkšanas ātrums ir palielināts par 50–125 %, savukārt enerģijas patēriņš ir samazināts par 20–33 % uz 1 metru pultrūdēta profila atkarībā no apkārtējās vides temperatūras, izmantojot izstrādāto interaktīvo tehnoloģisko karti. Turklāt *AIMPLAS* tehnoloģiskā procesa efektivitāte un produktivitāte stieņu profilu ražošanai ir palielināta 3 reizes un 5,5 reizes, kā siltuma avotu izmantojot mikroviļņus, nevis parastās elektriskās pretestības ar lieliem siltuma zudumiem izstrādātajā progresīvajā pultrūzijas procesā.

1.7. Darba hipotēze

Tradicionālo pultrūzijas procesu efektivitāti (enerģijas patēriņu) un produktivitāti (vilkšanas ātrumu) var ievērojami uzlabot, izmantojot izstrādāto optimizācijas procesa metodoloģiju vai lietojot inovatīvus siltuma avotus parasto elektrisko pretestību vietā, un attīstīt progresīvus, mikroviļņu veicinātus pultrūzijas procesus.

1.8. Darba aprobācija un publikācijas

Darba rezultāti ir prezentēti piecās starptautiskā konferencēs un divos ERAF projekta semināros. Promocijas darbs tika apspriests zinātniskajā sanāksmē Rīgas Tehniskās universitātes Augstas veiktspējas materiālu un konstrukciju institūtā. Promocijas darba rezultāti ir publicēti 10 rakstos starptautiskajos žurnālos (indeksēti *SCOPUS* datubāzē) un konferenču krājumos.

1.8.1. Publikācijas

1. Namsone E., Namsone E., Šahmenko G., Korjakins A., **Namsone E.** (2019): Research on Properties of Composites Based on Magnesium Binders. In: Environment Technology. Resources: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference (Rezekne, Latvia), pp. 192–197.
2. Barkanov E., Akishin P., **Namsone E.**, Bondarchuk A., Pantelelis N. (2019): In-Line Characterization of Pultruded Profiles. In: AIP Conference Proceedings: The 9th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials (Ischia, Italy), pp. 020003-1 - 020003-4.
3. **Namsone E.**, Ermakov D. (2019): Lamina Properties Non-destructive Characterisation of Asymmetric Carbon Fiber Reinforced Laminates. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (Riga, Latvia), pp. 1–9.
4. Namsone E., Šahmenko G., Namsone E., **Namsone E.**, Korjakins A., Bajāre D. (2019): Experimental Investigation on Foamed Concrete Produced Using a Planetary Ball Mill. In: Modern Building Materials, Structures and Techniques: Selected Papers of the 13th International Conference (Vilnius, Lithuania), pp. 16–17.
5. **Namsone E.**, Arshanitsa A., Morozovs A. (2020): Analysis of Curing Kinetic Models for Polyester Resin C-L ISO 112 G. Key Engineering Materials, Vol. 850, pp. 70–75.
6. Barkanovs E., Akishin P., **Namsone E.**, Bondarchuk A., Pantelelis N. (2020): Определение характеристик пултрузионных процессов с контролем температуры в реальном времени. Механика композитных материалов = Mechanics of Composite Materials, Vol. 56, pp. 203–224.
7. Barkanov E., Akishin P., **Namsone E.**, Auziņš J., Morozovs A. (2020): Оптимизация процессов пултрузии для промышленного применения. Механика композитных материалов = Mechanics of Composite Materials, Vol. 56, pp. 1015–1036.
8. Barkanov E., Akishin P., **Namsone E.**, Bondarchuk A., Pantelelis N. (2020): Real Time Characterization of Pultrusion Process with a Temperature Control. Mechanics of Composite Materials, Vol. 56, pp. 135–148.
9. **Namsone E.** (2021): Investigation of Residual Stresses and Deformations of a Pultruded Thin Beam Profile. In: Environment, Technology, Resources: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference (Rezekne, Latvia), pp. 232–235.
10. **Namsone E.**, Arshanitsa A. (2021): An effectiveness Improvement of the Pultrusion Process for a Production of Thin-Walled Rectangular Profile. Solid State Phenomena, Vol. 320, pp. 161–165.

11. **Namsone E.**, Ermakov D. (2021): Characterization of Woven Composite Material Properties by Using and Inverse Technique Based on Vibration Tests. *Key Engineering Materials*, Vol. 930, pp. 113–118.
12. Barkanov E., Akishin P., **Namsone E.**, Auziņš J., Morozovs A. (2021): Optimisation of Pultrusion Process for an Industrial Application. *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 56, pp. 697–712.
13. Barkanov E., Akishin P., **Namsone-Sile E.** (2022): Effectiveness and Productivity Improvement of Conventional Pultrusion Processes. *Polymers*, Vol. 14, pp. 841–851.
14. Barkanov E., Akishin P., **Namsone-Sile E.**, Emmerich R. and Graf M. (2022): Finite Element Solution of Electro-Magnetic-Thermo-Chemical Problem in Microwave Assisted Pultrusion Processes. *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 208, pp. 1–8.

1.8.2. Konferences

1. Namsone E., Namsone E., Šahmenko G., Korjamins A., **Namsone E.** Research on Properties of Composites Based on Magnesium Binders. 12th International Scientific and Practical Conference: Environment Technology. Rezekne, Latvia, 20–22 June 2019.
2. Barkanov E., Akishin P., **Namsone E.**, Bondarchuk A., Pantelelis N. In-Line Characterization of Pultruded Profiles. The 9th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials. Ischia, Italy, 12–15 September 2019.
3. **Namsone E.**, Ermakov D. Lamina Properties Non-destructive Characterisation of Asymmetric Carbon Fiber Reinforced Laminates. 4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. Riga, Latvia, 25–27 September 2019.
4. Namsone E., Šahmenko G., Namsone E., **Namsone E.**, Korjamins A., Bajāre D. Experimental Investigation on Foamed Concrete Produced Using a Planetary Ball Mill. The 13th International Conference: Modern Building Materials, Structures and Techniques. Vilnius, Lithuania, 16–17 May, 2019.
5. **Namsone E.**, Arshanitsa A., Morozovs A. Analysis of Curing Kinetic Models for Polyester Resin C-L ISO 112 G. 60th International Scientific Conference: Material Science and Applied Chemistry. Riga, Latvia, 24th October, 2020.
6. **Namsone E.**, Arshanitsa A. An effectiveness Improvement of the Pultrusion Process for a Production of Thin-Walled Rectangular Profile. The 28th International Baltic Conference: Materials Engineering and Modern Manufacturing. Kaunas, Lithuania, 22–23 October, 2020.
7. **Namsone E.** Investigation of Residual Stresses and Deformations of a Pultruded Thin Beam Profile. The 13th International Scientific and Practical Conference: Environmental. Technologies. Resources. Rezekne, Latvia, 17–18 June, 2021.

1.8.3. Projekta semināri

1. Barkanov E., Akishin P., Namsone E., Tatarinov A. An Effectiveness Improvement of Conventional Pultrusion Processes. Riga, Latvia, 20 October, 2020.
2. Barkanov E., Akishin P., Namsone-Sile E., Tatarinov A., Kovalov A. An Effectiveness Improvement of Conventional Pultrusion Processes. Riga, Latvia, 22 March, 2022.

1.8.4. Promocijas darba aprobācija

1. Namsone-Sīle E. Tradicionālu pultrūzijas procesu efektivitātes un produktivitātes uzlabošana (Effectiveness and Productivity Improvement of Conventional Pultrusion Processes). Rīgas Tehniskās universitātes Augstas veiktspējas materiālu un konstrukciju institūts, Rīga, 2024. gada 18. jūnijs.

2. PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darbs ietver piecas nodaļas.

1. **Pirmajā nodaļā** apkopots īss zinātniskās literatūras kopsavilkums, aprakstot pultrūzijas procesu, skaitliskās simulācijas un optimizācijas metodoloģijas.
2. **Otrajā nodaļā** reprezentēti termokīmiskie, elektromagnētiskie un apvienotie elektroķīmiskie-termokīmiskie galīgo elementu modeļi un algoritmi, kas ir izstrādāti mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesu modelēšanai.
3. **Trešajā nodaļā** definētas optimizācijas problēmas un risināšanas metode, kuras pamatā ir eksperimentu plānošanas un atbildes virsmu metodes.
4. **Ceturtajā nodaļā** aprakstīta mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesu modelēšana un to efektivitātes un produktivitātes novērtēšana.
5. **Piektajā nodaļā** apspriesti iegūtie rezultāti un publicēti ieteikumi turpmākajam darbam un pētījumiem.

2.1. Literatūras apskats

Šajā promocijas darba nodaļā sniegts literatūras apskats par pultrūzijas procesiem, aplūkojot trīs galvenās tēmas – tradicionālais pultrūzijas process, mikroviļņu veicināts pultrūzijas process un pultrūzijas procesu optimizācija. Turklāt ir sniegts īss pultrūzijas procesu skaitlisko simulāciju apskats. Jāsecina, ka ir mazāk pieejama literatūra par progresīviem, mikroviļņu veicinātiem pultrūzijas procesiem, salīdzinot ar tradicionālo pultrūzijas procesu.

2.2. Multifizikālu problēmu modelēšana

Otrajā nodaļā sniegti izstrādātie termokīmiskie, elektromagnētiskie un apvienotie elektromagnētiskie-termokīmiskie galīgo elementu modeļi un algoritmi mikroviļņu veicinātiem pultrūzijas procesiem.

Elektromagnētiskā problēma

Elektromagnētisko galīgo elementu modelis un algoritms ir nepieciešams, lai varētu noteikt elektriskā lauka sadalījumu un tā rezultātā iegūtu absorbētās enerģijas lauka sadalījumu kompozītmateriālā un keramikas formā, kas pēc tam tiek izmantots kā siltuma avots termokīmiskās problēmas risinājumam.

Elektromagnētisko lauku apraksta Maksvela vienādojumi, ko diferenciālā formā var izteikt kā elektriskā $\vec{E}$ un magnētiskā $\vec{H}$ lauka intensitātes izteiksmes šādā veidā:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.1)$$

kur $\vec{B}$ – magnētiskās plūsmas blīvums;

$\vec{D}$ – plūsmas blīvums;

$\vec{J}$ – strāvas blīvums;

ρ – lādiņa blīvums;

t – laiks.

Atbilstošās attiecības var izteikt šādās formās:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2.2)$$

kur μ – magnētiskā caurlaidība;

ϵ – elektriskā caurlaidība;

σ – elektriskā vadītspēja.

Magnetrons harmoniski svārstās elektromagnētiskajā laukā fiksētās frekvencēs 915 MHz vai 2,45 GHz, ko rekomendē Starptautiskā Telekomunikāciju savienība rūpnieciskai, zinātniskai un medicīniskai lietošanai. Skaitliski atrisinot 2.1. un 2.2. vienādojumu, tiek iegūta elektriskā lauka intensitāte:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z) e^{i2\pi f t}, \quad (2.3)$$

kur x, y, z – atrašanās vietas vektora koordinātes;

f – mikroviļņu frekvence.

Šīs vērtības tiek izmantotas absorbētā enerģijas lauka noteikšanai, kas ir nepieciešams termokīmiskajai analīzei.

Lai aprakstītu dielektriskos zudumus, elektriskā caurlaidība tiek izteikta kā kompleksa vērtība:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'', \quad (2.4)$$

kas sastāv no pašas elektriskās caurlaidības ϵ' un atbilstošā zuduma koeficienta ϵ'' . Turklāt pultrūzijas procesos šī ir kompleksa funkcija no frekvences f , temperatūras T un sacietēšanas pakāpes α :

$$\epsilon^*(f, T, \alpha) = \epsilon'(f, T, \alpha) - i \cdot \epsilon''(f, T, \alpha). \quad (2.5)$$

Elektromagnētisko jaudu pret tilpuma vienību, kas izkliedēta kompozītmateriālā un keramikas formā dielektrisko zudumu dēļ, var iegūt, integrējot Pointinga vektoru un izmantojot Maksvela vienādojumus, kā [3]:

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E_{rms}^2, \quad (2.6)$$

kur ε_0 – vakuuma caurlaidība;

E_{rms} – elektriskā lauka vidējais kvadrāts.

Tā kā nav pieejami fiziski testi vai literatūra, ko varētu izmantot testēšanai, papildus tiek izstrādāts galīgo elementu modelis programmatūrā *COMSOL Multiphysics*, lai verificētu iegūtos programmatūras *ANSYS* simulācijas rezultātus. Šajā gadījumā absorbētās enerģijas definējumam jāsakrīt abās programmās. *COMSOL* nemagnētiskam materiālam absorbcijas enerģiju dielektrisko zudumu dēļ nosaka automātiski šādā formā:

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(J \cdot E^*), \quad (2.7)$$

kur * apzīmē komplekso konjugātu.

Ņemot vērā strāvas blīvuma izteiksmi (2.2. vienādojums) un šādas atkarības:

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'', \quad (2.8)$$

$$E \cdot E^* = E'^2 + E''^2. \quad (2.9)$$

Absorbcijas enerģijas lauks abās programmās, *COMSOL* un *ANSYS*, tiek noteikts ar vienu un to pašu izteiksmi, izmantojot elektriskā lauka intensitāti:

$$Q = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' (E'^2 + E''^2). \quad (2.10)$$

Mikroviļņu sildīšanas efektivitāte tiek novērtēta šādi:

$$Q_{\%} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i V_i}{P_{MW}} \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

kur Q_i – absorbētā enerģija i -tajā galīgajā elementā;

V_i – tilpums i -tajā galīgajā elementā;

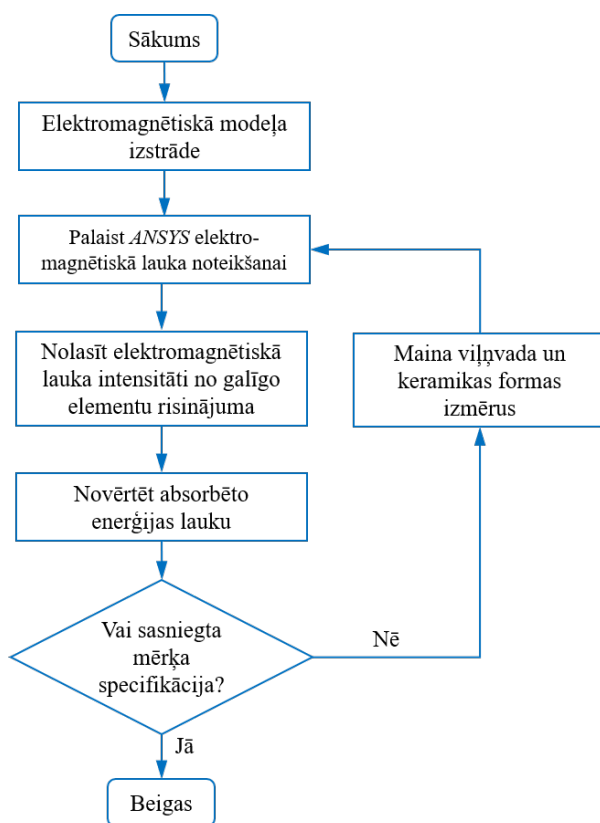
P_{MW} – mikroviļņu siltuma avota enerģija;

N_i – izmantoto galīgo elementu skaits keramikas vai kompozītmateriāla formas modeļēšanai.

Simulācijas tiek veiktas *COMSOL Multiphysics* un *ANSYS* vidē. Profilu šķērsgriezums ir iepriekš noteikts, un pirmajā solī tiek izveidots mikroviļņu shēmas modelis ar zināmu lauka sadalījumu, kas ir vispiemērotākais pieprasītajam šķērsgriezumam. Otrajā solī tiek aprēķināta elektromagnētiskā lauka intensitāte,

izmantojot galīgo elementu kodus. Pēc tam tiek nolasīti rezultāti, lietotāja izstrādātajā programmā novērtējot absorbēto enerģijas lauku. Vēlāk sākotnējais elektromagnētiskais modelis tiek skaitliski pilnveidots uz viendabīgu lauka sadalījumu, nodrošinot augstu enerģijas efektivitāti. Tas tiek veikts, pielāgojot keramikas formas un sacietējušu kompozītmateriālu modeļa izmērus, līdz tiek sasniegas mērķa specifikācijas (2.1. att.).

Saskaņā ar Nikvista-Šenona paraugu teorēmu [4] viļņu funkcijas diskrētai uztveršanai, maksimālajam lietotā tīkla viena elementa izmēram $x_{\max}$ jābūt $x_{\max} < \lambda/2$, kur λ lokālais viļņa garums. Lokālais viļņa garums λ nozīmē, ka to var saīsināt ar dielektriskiem materiāliem vai ietekmēt ar vadošām daļām tā, ka maksimālo tīkla elementa izmēru nosaka šādi:



2.1. att. Elektromagnētiskais algoritms noteiktām keramikas formām un sacietējušiem kompozītmateriāliem.

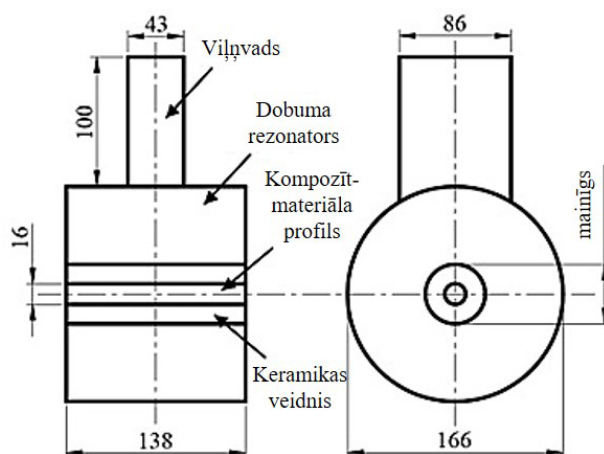
$$x_{\max} < \frac{\lambda_0}{20\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.12)$$

kur λ_0 – i -viļņa garums brīvā telpā;

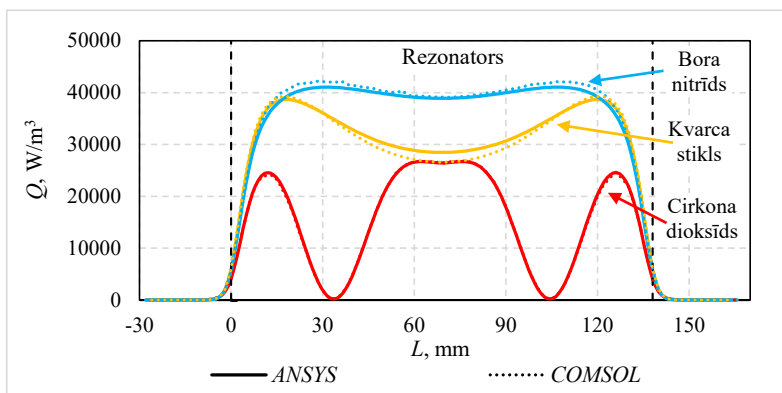
$\epsilon_r = \epsilon' / \epsilon_0$ – relatīvā caurlaidība.

Izstrādātajam galīgo elementu tīklam tiek risināti 2.1. un 2.2. vienādojumi attiecībā pret lokālā materiāla īpašībām no 2.5. vienādojuma ar iteratīviem vai tiešiem risinātājiem frekvenču diapazonā ar magnetrona fiksēto frekvenci f . Viļņa ierosmei, līdz ar to – jaudas ievadei, tiek izmantoti tā dēvētie “porta” robežnosacījumi. Pēc tam tiek aprēķināts sildīšanas ātrums Q , izmantojot 2.10. vienādojumu.

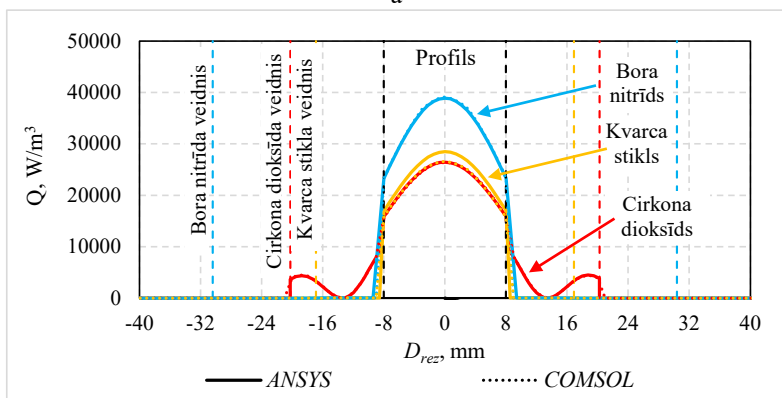
Lai varētu demonstrēt elektromagnētiskās sildīšanas priekšrocības, tiek pētīts stienņa profils, kura diametrs ir 16 mm, kas izgatavots no poliestera sveķiem *POLRES 305BV* un stiklšķiedrām 4800 tex (šķiedru tilpuma saturs – 55 %). Mikroviļņu sildīšanas shēma redzama 2.2. attēlā. Atbilstošais galīgo elementu modelis ir izstrādāts *ANSYS*, izmantojot augstas frekvences elektromagnētiskos galīgos elementus *HF120*. Lai pārbaudītu *ANSYS* izstrādātos galīgos elementu modeļus un algoritmu, tā pati problēma ir atrisināta programmā *COMSOL Multiphysics* [5]. Iegūtie *COMSOL* rezultāti ir redzami 2.3. attēlā. Salīdzinot ar *ANSYS* rezultātiem, ir novērojama ļoti laba sakritība starp abiem rezultātiem, kas liecina par augstu precizitāti un ticamību. Atšķirība starp aprēķinātajām mikroviļņu enerģijām kompozītmateriālam ir robežās 0–0,2 %, keramikas formā – 0,6 %.



2.2. att. Mikroviļņu sildīšanas iekārtas shēma.



a



b

2.3. att. Absorbētās enerģijas sadalījums keramikas formai, kas izgatavota no dažādiem materiāliem, profila viduslīnijai (a) un pa profila šķēsgriezuma vidu (b).

Parametriskā analīze parāda, ka vienai un tai pašai mikroviļņu iekārtai, izmantojot dažādus keramikas materiālus pultrūzijas formai, termokīmiskajā analīzē ir jāpārbauda dažādi siltuma pārnese procesi. Tātad, ja keramikai ar zemu relatīvo zuduma koeficientu siltuma pārnese veic tikai kompozītmateriālā absorbētā enerģija un sākas profila iekšpusē, tad keramikai ar lieliem iekšējiem zudumiem – tradicionālā sildīšana no karstas keramikas formas nav iespējama, jo mikroviļņu absorbcijas zudumi ir aptuveni vienādi gan veidnim, gan kompozītmateriālam. Turklāt keramikas materiāliem ar tuviem caurlaidības parametriem nav iespējams iegūt pultrūzijas veidņa diametru efektīvam un viendabīgam absorbcijas laukam.

Termokīmiskā problēma

Termokīmisko galīgo elementu modelis un algoritms ir nepieciešami, lai noteiktu temperatūras un saistīšanās lauka sadalījuma pakāpi un novērtētu pultrūdēto profilu kvalitāti.

Termoķīmiskā problēma, kas apraksta tradicionālos pultrūzijas procesus, sastāv no trīs galvenajiem vienādojumiem – enerģijas vienādojums veidnim, enerģijas vienādojums kompozītmateriālam, kas pārvietojas vilkšanas virzienā, un transportēšanas vienādojumus sveķiem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \\ \bar{\rho} \bar{c}_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{k}_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{k}_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q = 0 \\ \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) = R_r \end{array} \right. \quad (2.13)$$

kur T – temperatūra;

ρ un c_p – pultrūzijas veidņa materiāla blīvums un īpatnējā siltumietilpība;

k_x, k_y, k_z – pultrūzijas veidņa materiāla siltumvadītspēja x, y, z virzienos;

u – vilkšanas ātrums;

$\bar{\rho}$ un $\bar{c}_p$ – kompozītmateriāla vidējais blīvums un vidējā īpatnējā siltumietilpība;

$\bar{k}_x, \bar{k}_y, \bar{k}_z$ – kompozītmateriāla vidējā siltumvadītspēja x, y, z virzienos;

q – iekšējais siltuma ģenerācijas parametrs, saistīts ar siltuma izdalīšanos sveķu eksotermiskajā ķīmiskajā reakcijā;

$\alpha = H(t)/H_{tr}$ – saistīšanās pakāpe;

$H(t)$ – siltuma daudzums, kas izdalījies saistīšanās reakcijas rezultātā laikā t .

Siltuma pārnese kompozītmateriālā notiek vadīšanas rezultātā eksotermiskās ķīmiskās reakcijas rezultātā, ko ierosina veidņa temperatūra. Eksotermiskās sveķu reakcijas dēļ ģenerācijas parametrs, kas saistīts ar siltuma izdalīšanos, tiek izteikts šādi:

$$q = V_r \rho_r H_{tr} R_r, \quad (2.14)$$

Kur V_r – sveķu tilpuma daļa;

ρ_r – sveķu blīvums;

R_r – sveķu reakcijas ātrums, izteikts:

$$R_r(\alpha, T) = \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{1}{H_{tr}} \frac{dH(t)}{dt} = K(T) \cdot f(\alpha), \quad (2.15)$$

kur $f(\alpha)$ atkarīgs no sveķu īpašībām un mainās atkarībā no lietotās sveķu reakcijas modeļa;

$K(T)$ ir izteikts ar Arrēniusa vienādojumu:

$$K(T) = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2.16)$$

kur $R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ – universālā gāzes konstante.

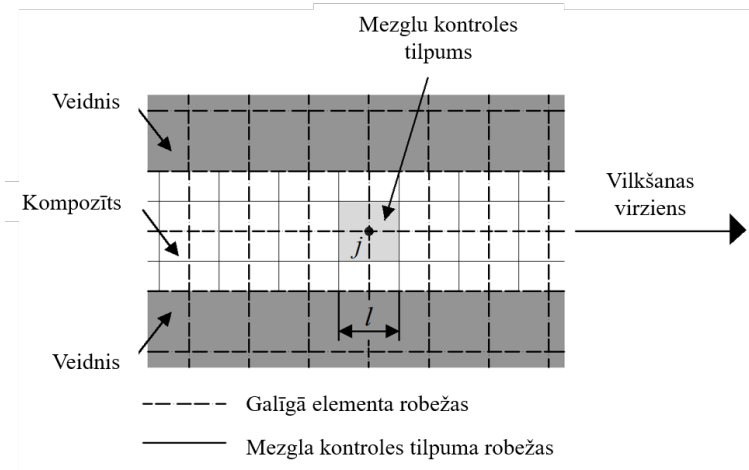
Jāņem vērā, ka Arrēniusa vienādojuma koeficienti – aktivācijas enerģija E un frekvences faktors K_0 – ir fizikālie lielumi un tos var noteikt ar Kisindžera metodi vai *ASTM E698* standarta metodoloģiju, izmantojot DSK (diferenciālās skenējošās kalorimetrijas) testus [6]. Izvēlētais funkcijas $f(\alpha)$ koeficienti tiek iegūti vienkāršā veidā, savienojot eksperimentālās siltuma plūsmas līknes, izmantojot mazāko kvadrātu metodi [7].

Pultrūzijas procesa laikā pastiprinājums tiek piesūcināts ar sveķiem pirms ievadīšanas uzsildītā veidnī. Tādēļ ir svarīgi atcerēties, ka sveķi neplūst. Vairumā gadījumu pultrūzijas procesu simulācijai tiek izmantots nepārtraukts modelis ar vidējām materiāla īpašībām, kas tiek noteiktas pēc maisījuma likuma:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= (1 - V_r)\rho_f + V_r\rho_r \\ \bar{c}_p &= \frac{(1 - V_r)\rho_f c_{pf} + V_r\rho_r c_{pr}}{\bar{\rho}}, \\ \bar{k} &= \frac{k_f k_r \bar{\rho}}{(1 - V_r)\rho_f k_r + V_r\rho_r k_f} \end{aligned} \quad (2.17)$$

kur f un r attiecas uz šķiedrām un sveķiem.

Algoritms ir izstrādāts *ANSYS Mechanical* vidē un balstīts jaukta laika integrācijas shēmā un mezglu kontroles tilpuma metodē, lai vienlaikus atrisinātu apvienotos enerģijas un pārvietošanas vienādojumus (2.13. un 2.18. vienādojums), izmantojot iterācijas tehniku. Mezglu kontroles tilpumi ir veidoti, pamatojoties uz galīgo elementu tīklu, kā tas redzams 2.4. attēlā.



2.4. att. Galīgā elementu un mezglu kontroles tilpumu tīkli.

Sākumā tiek pieņemts, ka saistīšanās pakāpei ir viena un tā pati vērtība α^0 katrā kompozītmateriāla mezglu kontroles tilpumā. Lielākoties tā ir vienāda ar nulli. Pēc tam tiek veikta pārejošā termiskā analīze, lai noteiktu sākotnējo temperatūru katrā elementā. Izmantojot temperatūras lauku, ārējā lietotāja programma aprēķina saistīšanās ātrumu katram mezglu kontroles tilpumam j katram solim i :

$$\frac{\partial \alpha_j^i}{\partial t} = \left[\frac{\Delta \alpha_j^i}{\Delta t} \right] = K_0 \exp \left(-\frac{E}{RT_j^i} \right) f(\alpha_j^{i-1}). \quad (2.18)$$

Laikam $t > 0$ saistīšanās pakāpi var noteikt, izmantojot šādu attiecību:

$$\alpha_j^i = \alpha_j^{i-1} + \left[\frac{\Delta \alpha_j^i}{\Delta t} \right] \Delta t, \quad (2.19)$$

kur Δt – laika solis, kas izteikts:

$$\Delta t = \frac{1}{p} \cdot \frac{l}{u}, \quad (2.20)$$

kur l – mezglu kontroles tilpuma garums vilkšanas virzienā;

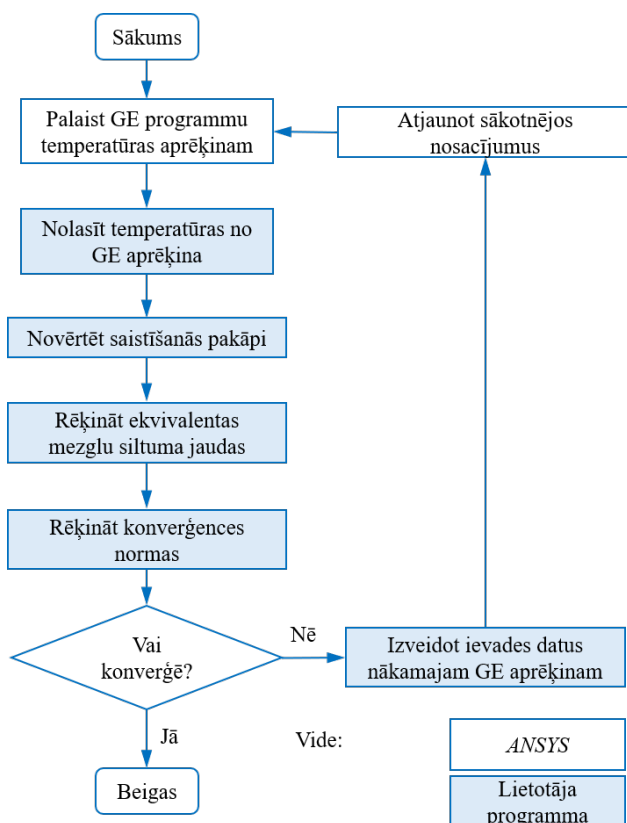
u – vilkšanas ātrums;

p – apakšsoļu skaits.

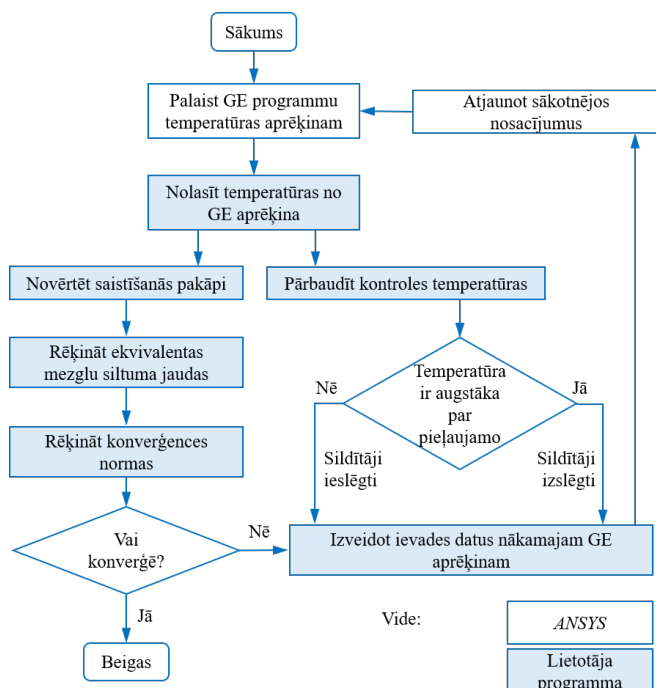
Ja apakšsoļu procedūra netiek izmantota, tad $p = 1$. Eksotermiskais efekts saistīšanās reakcijā tiek ievērots kā ekvivalenta mezglu siltuma jauda mezglu kontroles tilpumam vai mezglam j , ko izsaka šādi:

$$q = V_r \rho_r H_{tr} R_r = V_r \rho_r H_{tr} \left[\frac{\Delta \alpha_j^i}{\Delta t} \right]. \quad (2.21)$$

Šīs vērtības tiks izmantotas, lai varētu aprēķināt temperatūras lauku jaunam iterācijas posmam. Tādējādi ar sveķiem piesūcināta kompozītmateriāla pārvietošanās tiek simulēta, mainot temperatūru un saistīšanās pakāpes laukus pēc katra aprēķina soļa. Jāņem vērā, ka pie veidņa ieejas saistīšanās pakāpe paliek nemainīga un ir vienāda ar α^0 katrā iterācijas solī. Algoritma blokshēma redzama 2.5. attēlā. Tradicionālo pultrūzijas procesu simulācijas gadījumā ar temperatūras kontroli temperatūras, kas iegūtas pārejošās termiskās analīzes laikā, tiek izmantotas arī elektrisko sildītāju darbu kontrolei. Reālos apstākļos šo kontroli veic termopāri, kas ir novietoti konkrētos punktos veidnī. Modificētais algoritms redzams 2.6. attēlā.



2.5. att. Termoķīmiskais algoritms tradicionālajam pultrūzijas procesam.



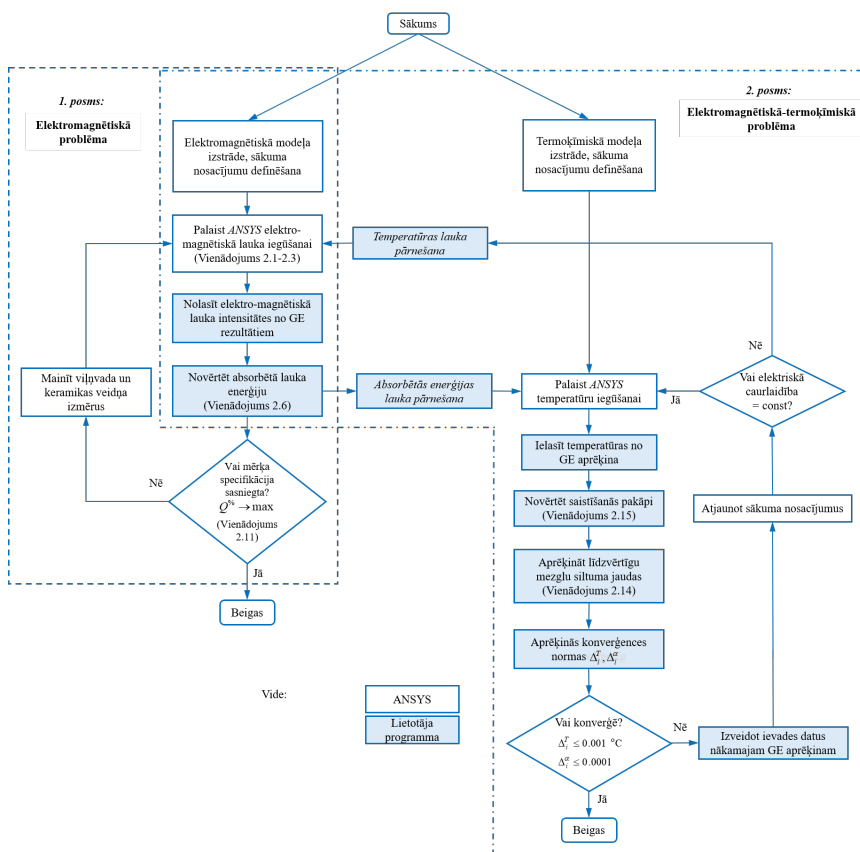
2.6. att. Termoķīmiskais algoritms tradicionālajam pultrūzijas procesam ar temperatūras kontroli.

Termoķīmiskais algoritms [8], kas balstīts jaukta laika integrācijas shēmā un mezglu kontroles tilpuma metodē, ir veiksmīgi validēts, veicot pultrūzijas procesa analīzi dažādiem profiliem [9, 10]. Lielāka rezultātu atšķirība ir novērojama pirmajā sensorā, kur sveķi vēl ir želejas stadijā. Turpretī ļoti laba sakritība ir panākta vietās, kur sveķi jau gandrīz pilnībā ir sacietējuši.

Elektromagnētiskā-termoķīmiskā problēma

Mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesu analīzei ir nepieciešams izmainīt 2.13. vienādojumu, kas apraksta termoķīmisko problēmu:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - Q_{cd} = 0 \\ \bar{\rho} \bar{c}_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{k}_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{k}_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q - Q_{comp} = 0 \\ \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) = R_r \end{array} \right. \quad (2.22)$$



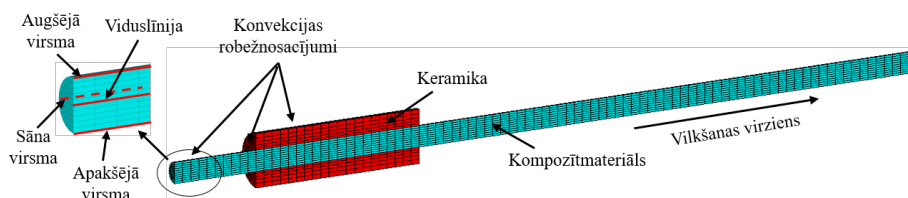
2.7. att. Apvienotais elektromagnētiskais-termoķīmiskais algoritms mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesu simulācijai.

Otrā vienādojuma beigās parametrs $Q_{comp}(f, T, \alpha)$ attēlo absorbēto enerģijas lauku Q_{comp} kompozītmateriālā – $Q_{cd}(f, T)$ attēlo absorbēto enerģijas lauku keramikas veidnī, ņemot vērā tikai materiālus ar lieliem dielektriskiem zudumiem, kur f ir mikroviļņu frekvence. Pirmais vienādojums ir pārveidots tikai gadījumā, ja keramikas materiāla dielektriskie zudumi ir lieli un tos nevar izslēgt no termoķīmiskās analīzes. Enerģijas un pārneses vienādojumi ir saistīti, jo vienādojumā parādās eksotermiskās siltuma izdalīšanās termins, bet elektromagnētiskās un termoķīmiskās problēmas ir saistītas relatīvās elektriskās caurlaidības, ko izmanto, lai aprēķinātu abus absorbētās enerģijas laukus, kas atkarīgi no mikroviļņu frekvences, temperatūras un saistīšanās pakāpes (2.5. vienādojums).

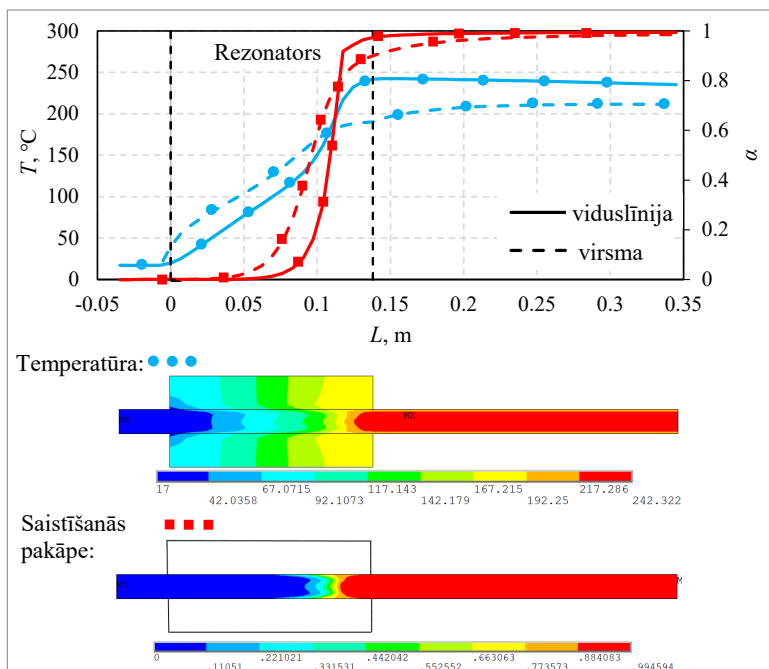
Lai atrisinātu saistīto 2.22. vienādojumu, ir izstrādāts iteratīvs galīgo elementu algoritms, saglabājot elektriskās caurlaidības atkarību no mikroviļņu frekvences, temperatūras un saistīšanās pakāpes (2.7. att.).

Mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesa simulācijai izvēlēti poliestera klases sveķi, jo to noārdīšanās temperatūra ir diezgan augsta – 270 °C, kā liecina SIA “COMPOR” [11] veiktie eksperimenti. Galīgo elementu modelis termokīmiskās uzvedības stieņa profila simulācijai (2.8. att.) ir izveidots programmā *ANSYS Mechanical*, izmantojot 3D termiski cietus galīgo elementus *Solid70*. Elementam ir astoņi mezgli un viena brīvības pakāpe – temperatūra katrā mezglā un ortotropa materiāla īpašības. Ņemot vērā aplūkotās problēmas simetriju, tiek modelēta tikai puse no profila un veidņa.

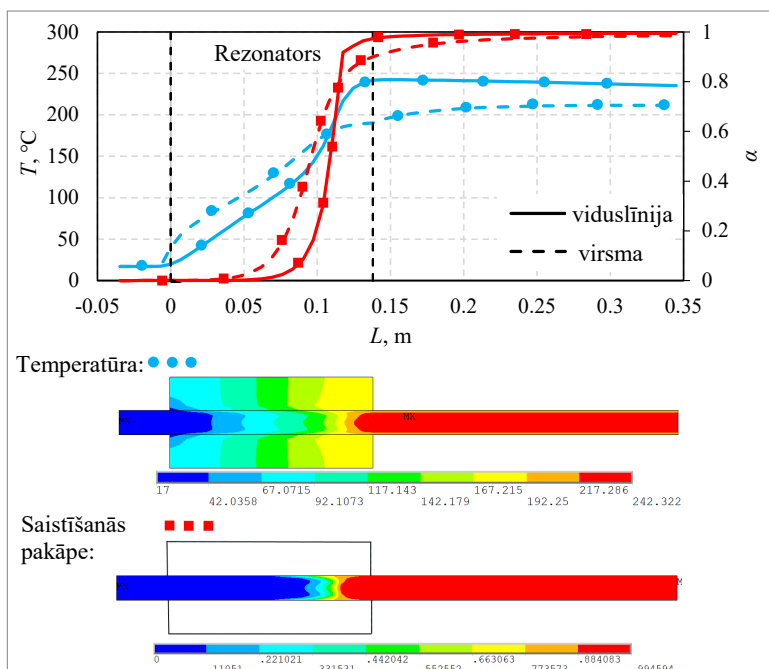
Fiziski pamatota mikroviļņu veicināta pultrūzijas procesa rezultāti, kas darbojas ar izmantoto mikroviļņu enerģiju 0,6 kW un vilkšanas ātrumu 50 cm/min, redzami 2.9. attēlā keramikas veidnim, kas izgatavots no bora nitrīda. 2.10. attēlā redzams, ka visi ierobežojumi attiecībā uz pieļaujamo un vēlamo saistīšanās pakāpi uz profila virsmas pie veidņa izejas un galaproduktā ir izpildīti. Svarīgi atzīmēt, ka modificētā procesa produktivitāte ir uzlabota divas reizes, palielinot vilkšanas ātrumu līdz 100 cm/min, bet tas prasa ievērojami lielāku lietoto mikroviļņu enerģiju (1,1 kW), kas tika izmantota iepriekšējā pultrūzijas procesā. Protams, analizētā pultrūzijas procesa efektivitāti un produktivitāti var panākt, veicot optimizāciju.



2.8. att. Termokīmisko galīgo elementu modelis pultrūzijas procesa simulācijai.



2.9. att. Temperatūras un saistīšanās pakāpes sadalījums gar pultrūdēta profila keramikas formu, izgatavotu no bora nitrīda.



2.10. att. Temperatūras un saistīšanās pakāpes sadalījums gar pultrūdēto profilu modificētajai pultrūzijas formai.

2.3. Tradicionālo pultrūzijas procesu optimizācija

Ir izstrādāta jauna, efektīva optimizācijas metodoloģija, ņemot vērā visus nepieciešamos rūpnieciskos pultrūzijas procesa parametrus un apkārtējas telpas temperatūru, izmantojot eksperimentu plānošanas un atbildes virsmu metožu tehnikas. Precīzāka un reālāka procesa optimizācija, kāda ir sasniegta iepriekšējos pētījumos, tiek panākta ar temperatūras kontroli, kas veikta, izmantojot sildītāju ieslēgšanas un izslēgšanas stratēģiju. Izmantojot netiešās optimizācijas metodoloģiju, tehnologu ērtībām papildus ir izstrādātas tehnoloģiskās kartes, izmantojot *EXCEL* rīkus.

Risināmās skaitliskās problēmas lielā izmēra dēļ ir izstrādāta netiešā optimizācijas metodoloģija, kurā izmantotas eksperimentu plānošanas [12] un atbildes virsmu [13] metodes (2.11. att.).

Ņemot vērā to, ka mainīgo sadalījums meklēšanas apgabalā nav zināms, tiek izvēlēts eksperimentu plāns ar pēc iespējas regulāru punktu sadalījumu faktoru apgabalā. Plāna izveidei tiek izmantots šāds kritērijs:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{l_{ij}^2} \Rightarrow \min, \quad (2.23)$$

kur n – eksperimentu skaits;

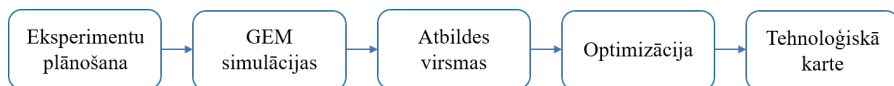
l_{ij} – attālums starp eksperimenta punktiem, kas numurēti ar i un j ($i \neq j$).

Eksperimentu plānu raksturo plāna matrica B_{ij} . Faktoru apgabals ir raksturots kā $x_j \in [x_j^{\min}, x_j^{\max}]$, un eksperimenta punktus aprēķina, izmantojot 2.24. izteiksmi:

$$x_j^{(i)} = x_j^{\min} + \frac{1}{n-1} (x_j^{\max} - x_j^{\min}) (B_{ij} - 1), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (2.24)$$

Minimālais eksperimenta punktu skaits optimizācijas problēmai tiek noteikts $N = 2L$, kur $L = (k+1)(k+2)/2$, un k ir maināmo parametru skaits.

Pultrūzijas iekārta, kas paredzēta divu stieņu izgatavošanai vienlaikus, redzama 2.12. attēlā. Veidņa izmēri ir šādi: 500 mm × 150 mm × 110 mm, attālums starp diviem profila kanāliem – 40 mm. Veidnis tiek sildīts ar divām elektrisko sildītāju plāksnēm, kas novietotas augšējā un apakšējā malā, netālu pie veidņa izejas.



2.11. att. Optimizācijas metodoloģija.



2.12. Pultrūzijas iekārta.

Sildītāju izmēri ir 300 mm × 150 mm × 15 mm, to elektriskā jauda – 2750 W. Sildītāju darbu kontrolē starp tiem esošais termopāris. Stieņa profila ražošanai tiek izmantoti šādi materiāli: stikla šķiedra *tex4800* (šķiedra masas daļa 78 %) un poliestera sveķi *C-L ISO 112G*. Galīgo elementu modelis divu stieņu pultrūzijas procesa simulācijai ir veidots *ANSYS Mechanical* vidē, izmantojot 3D termiski cietus galīgos elementus *Solid70*. Ņemot vērā simetrijas problēmu, tiek modelēta tikai ceturtdaļa no veidņa. Termoķīmiskā procesa analīzei pēc profila iziešanas no veidņa tiek modelēts papildu stieņa garums 300 mm pēc veidņa. Sildītāju plāksnes atrodas pie veidņa izejas, tāpat kā reālā tehnoloģiskā procesa laikā. Ņemot vērā to, ka ir sagaidāma sveķu sacietēšanās pēc veidņa reģionā, tiek modelēts papildu profila garums līdz 1 m.

Optimizācijas problēma ir formulēta divām mērķa funkcijām. Pirmā funkcija apraksta pultrūzijas procesa efektivitāti un samazina elektriskās enerģijas patēriņu (kWh), kas nepieciešams 1 m gara pultrūdēta profila ražošanai:

$$\frac{n \cdot W_{heater} \cdot k_t}{m \cdot V_{pull}} \rightarrow \min, \quad (2.25)$$

kur n – sildītāju skaits;

m – vienlaikus ražoto profilu skaits, šajā gadījumā $m = 2$;

W_{heater} – elektriskā sildītāja jauda, kW;

V_{pull} – vilkšanas ātrums, m/h;

k_t – relatīvais sildītāju darbības laiks, ko aprēķina pēc 3.12. vienādojuma.

Otrā mērķa funkcija ir saistīta ar pultrūzijas produktivitāti un palielina vilkšanas ātrumu:

$$V_{pull} \rightarrow \max. \quad (2.26)$$

2.1. tabula

Aproksimāciju precizitāte un ticamība pēc dažu punktu likvidēšanas					
Simbols, apz.	σ_{cross} , %	R_{adj}^2	σ	σ , %	Δ_{max} , % (punkts Nr.1.)
1. kārtas aproksimācija					
α_{surf}	59,8	0,70	0,09	54,4	24,7 (27)
α_{cent}	79,1	0,49	0,13	71,2	46,1 (17)
2. kārtas aproksimācija					
α_{surf}	20,7	0,97	0,03	16,3	3,6 (11)
α_{cent}	52,3	0,86	0,07	37,9	15,6 (17)
3. kārtas aproksimācija					
α_{surf}	22,4	0,99	0,02	9,6	3,2 (27)
α_{cent}	24,8	0,99	0,01	8,1	1,4 (3)

2.2. tabula

Optimālie parametri			
	Minimālā vērtība	Maksimālā vērtība	Optimālā vērtība
Vilkšanas ātrums, cm/min	20	45	45
Telpas un sveķu temperatūra, °C	10	40	40
Elektrisko sildītāju kontroles temp., °C	115	150	142

Daži pultrūzijas procesa parametri (jauda un elektrisko sildītāju skaits) tiek pieņemti kā konstanti optimizācijas parametri, pārējie (vilkšanas ātrums un sildītāju kontroles temperatūra), kā arī telpas un sveķu temperatūra tiek pieņemti kā mainīgie parametri, robežas nosakot meklēšanas apgabalā. Optimizācijas procedūrā ir ieviesti arī ierobežojumi, lai nodrošinātu kvalitatīvu profila ražošanu, kad sveķi ir pilnībā sacietējuši un nav pārkarsēti pultrūzijas procesa laikā. Aproksimāciju kļūdas, kas raksturo precizitāti un ticamību, apkopotas 2.1. tabulā. Tajā redzams, ka, likvidējot dažus punktus ar zemu saistīšanās pakāpes vērtību, pirmās un otrās kārtas polinomiem nav panākts aproksimāciju kvalitātes uzlabojums. Optimizācijas problēma ar otrās kārtas polinomiem divām mērķfunkcijām (2.25. un 2.26. vienādojums) tiek atrisināta ar vispārināto samazināto gradienta algoritmu, kas iestrādāts *Microsoft Excel* © *Solver*. Abām mērķfunkcijām iegūti vienādi izstrādātā pultrūzijas procesa optimālie parametri, kas apkopoti 2.2. tabulā.

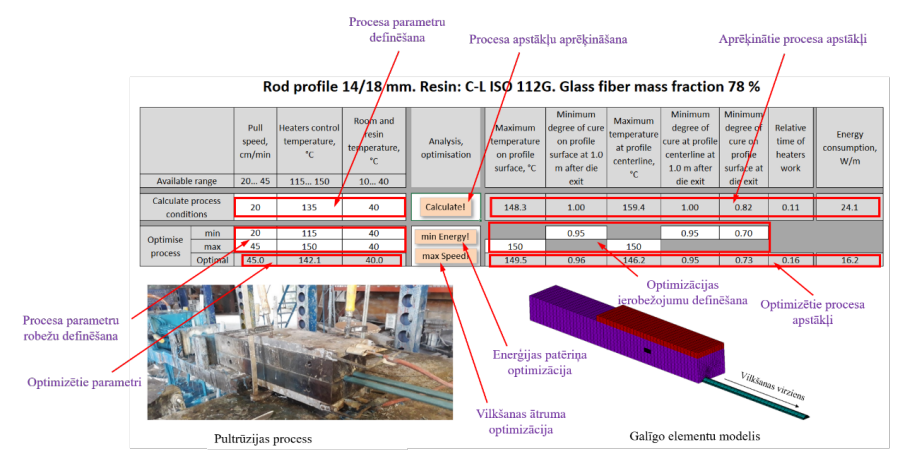
Tehnoloģiskā karte

Tehnoloģiskā karte, kas balstīta regresijas polinomos, ir izveidota *EXCEL* vidē efektīvai divu stieņu pultrūzijas procesa modelēšanai. *EXCEL* rīka izskats redzams 2.13. attēlā, un tas sastāv no divām galvenajām daļām:

- procesa apstākļu aprēķins (temperatūras un saistīšanās pakāpes kompozītmateriāla profilā un procesa enerģijas patēriņš) definētajiem procesa parametriem un apkārtējās telpas un sveķu temperatūras (fiksēts vilkšanas ātrums, sildītāju kontroles temperatūra un telpas temperatūra);

• procesa parametru optimizācija, minimizējot enerģijas patēriņu (2.25. vienādojums) vai maksimizējot vilkšanas ātrumu (2.26. vienādojums), ņemot vērā iepriekš definētos procesa apstākļu ierobežojumus (2.3. tab.). Jāņem vērā, ka daži parametri optimizācijas procesā var tikt apskatīti kā konstantes.

Lai ievērotu rūpnieciskos nosacījumus, optimizācijas problēma ir atkārtoti risināta dažādā apkārtējās telpas temperatūrā. Procesu optimizētie parametri apkopoti 3.18. tabulā kopā ar rezultātiem, kas iegūti, veicot regresijas, izmantojot “COMPOR” tehnoloģiskās kartes informāciju.



2.13. att. Izstrādātās tehnoloģiskās kartes saskarne.

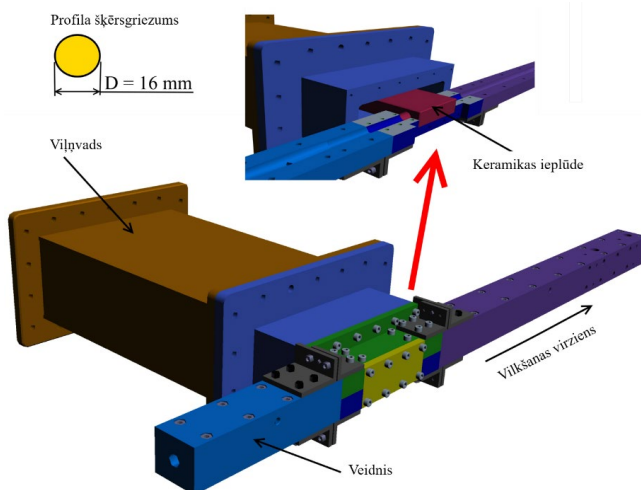
2.3. tabula

Procesa parametru salīdzinājums (optimizētais tehnoloģiskais process un “COMPOR” tehnoloģiskā karte) dažādā telpu temperatūrā

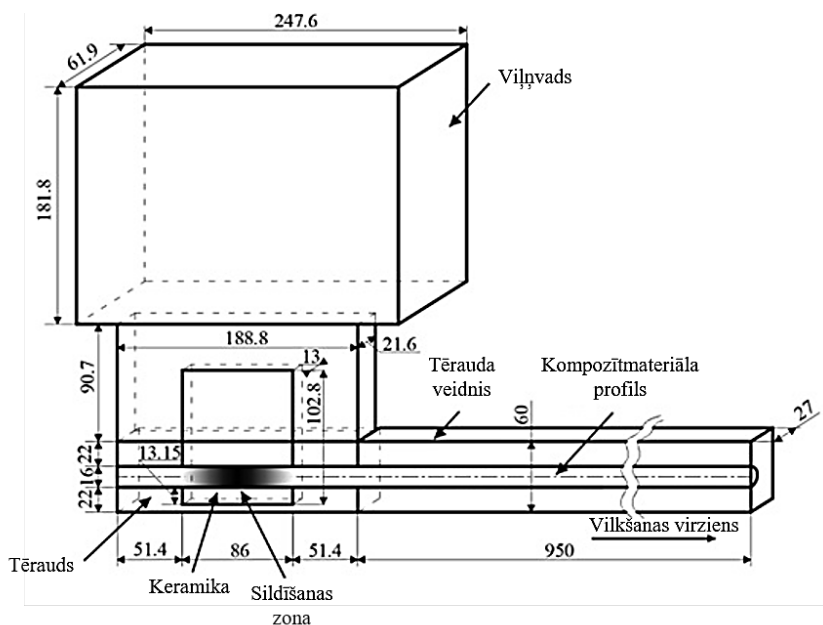
	“COMPOR” tehnoloģiskā karte				Optimizēts tehnoloģiskais process			
Vilkšanas ātrums, cm/min	20				29,9	35,4	39,9	45,0
Elektrisko sildītāju kontroles temp., °C	135				138	141	142	142
Telpas un sveķu temperatūra, °C	10	20	30	40	10	20	30	40
Maksimālā temp. uz profila virsmas, °C	146	146	147	148	147	150	150	150
Minimālā saistīšanās pakāpe uz profila virsmas	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,97	0,97	0,96
Maksimālā temp. uz profila viduslīnijas, °C	161	161	161	159	150	150	148	146
Minimālā saistīšanās pakāpe uz profila viduslīnijas	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95	0,95	0,95
Minimālā saistīšanās pakāpe uz profila virsmas (pie veidņa izejas)	0,82	0,82	0,82	0,82	0,77	0,79	0,77	0,73
Enerģijas patēriņš, W/m	33,4	30,3	27,2	24,1	26,7	22,6	19,3	16,2

2.4. Progresīvu pultrūzijas procesu izstrāde

Izstrādāto galīgo elementu modeļu un algoritmu lietojumu demonstrē reāla mikroviļņu veicināta pultrūzijas procesa izstrāde, stieņa profila, kura diametrs ir 16 mm, ražošanai (2.14. att.).



2.14. att. Mikroviļņu veicināts pultrūzijas process.



2.15. att. Mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesa shēma (izmantota simetrija).

Konverģences pētījums

Modelis	GE garums vilkšanas virzienā, mm	Maksimālais GE izmērs šķērsgrīzumā, mm			GE skaits vilkšanas virzienā	GE skaits kompozīt- materiāla šķērsgrīzumā	Kopējais GE skaits	Absorbētā enerģija kompozīt- materiāla profilā, %	Absorbētā enerģija keramikā, %
1	7,25	2,2	4,0	3,3	157	48	99501	7,4	7,7
2	7,25	1,4	3,8	3,3	157	70	104525	7,4	7,8
3	4,63	2,2	4,0	3,3	246	48	141357	7,4	7,6
4	4,63	1,4	3,8	3,3	246	70	149229	7,4	7,8
5	4,63	1,1	2,1	1,7	246	122	524567	7,6	8,0

Procesa shēma redzama 2.15. attēlā, un tā sastāv no tērauda veidņa, kura garums ir 950 mm, šķērsgrīzuma izmērs – 54 mm × 60 mm, un mikroviļņa bloka, kas pievienots veidnim un sastāv no keramikas ieklūdes (cirkonija dioksīds) un viļņvada.

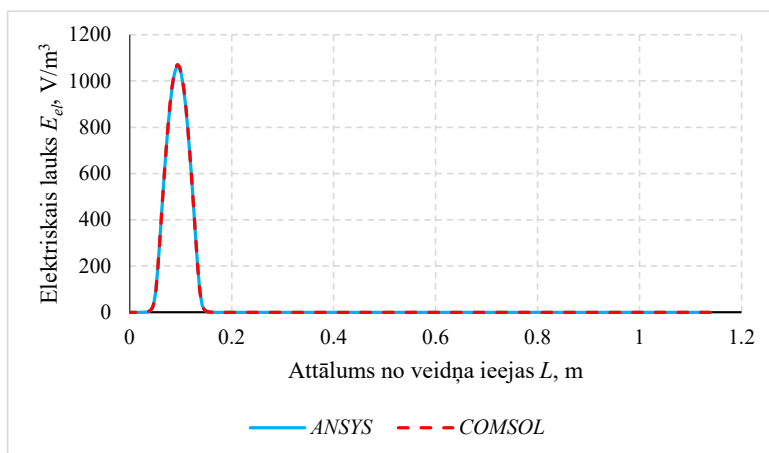
Elektromagnētisko galīgo elementu modelis ir veidots *ANSYS*, izmantojot augstas frekvences elektromagnētiskos galīgos elementus *HF120*. Šis ir pirmās kārtas sešskaldņu elementu sastāvs ar vienu brīvības pakāpi – elektriskā lauka pieskares komponenti (*AX*) katrā malā. Tiek izmantots taisnstūra pieslēgvietā ar izmantoto enerģiju 1 W viļņvada augšpusē un TE₁₀ režīmā.

Konverģences pētījums tiek veikts, izmantojot galīgo elementu modeli ar pieciem dažādiem tīkliem. Galīgo elementu modeļi doti 2.4. tabulā. Lai pārbaudītu *ANSYS* iegūtos elektromagnētiskās analīzes rezultātus, galīgo elementu modelis ir izstrādāts un analizēts arī *COMSOL Multiphysics*. Elektrisko un absorbēto enerģiju lauku sadalījums pa profila viduslīniju redzams ir 2.16. un 2.17. attēlā. Ir redzams, ka nav novērojama liela rezultātu atšķirība, līdz ar to var secināt, ka izstrādātajam elektromagnētiskajam galīgo elementu modelim un algoritmam ir augsta uzticamība.

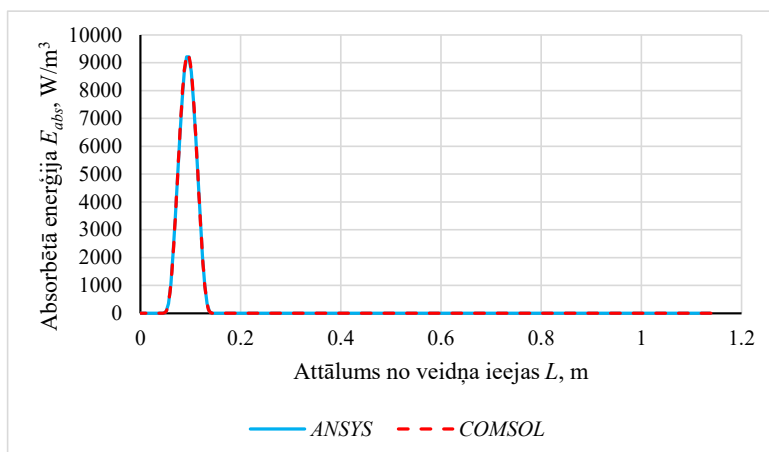
Termoķīmiskās analīzes rezultāti liecina, ka veidņa garumu var saīsināt bez pultrūzijas procesa zudumiem. Tas palīdzētu samazināt izmaksas, kas nepieciešamas pultrūzijas veidņu ražošanai (mazāk materiāla) un augstas precizitātes darba virsmu apstrādei. Tērauda veidņa garums tiek samazināts piecas reizes (no 950 mm uz 190 mm), kas rada pultrūzijas iekārtas kopējā garuma samazinājumu trīs reizes (no 1138,8 mm uz 378,8 mm). Lai izpētītu saistīšanas procesu profilā, atstājot veidni, tā garums netiek mainīts. Redzams, ka veidņa garuma samazināšana nemaina temperatūras sadalījumu un saistīšanās pakāpi pultrūdētā profilā. Turklāt saistīšanās process īsākā stieņa veidnī ir ātrāks, jo masīvā veidnī ir papildu siltuma zudumi.

Izstrādātā mikroviļņu veicināta pultrūzijas procesa efektivitāte ir novērtēta, salīdzinot ar reālo, tradicionālo pultrūzijas procesu [10], kas ir veiksmīgi verificēts eksperimentāli 17 °C apkārtējās vides temperatūrā. Rezultāti, kas parāda produktivitāti (atkarībā no vilkšanas ātruma) un efektivitāti (atkarībā no enerģijas patēriņa), apkopoti 2.5. tabulā.

Jāņem vērā, ka tradicionālo pultrūzijas procesa produktivitāte un efektivitāte ir pieņemta kā 100 %. Iegūtie rezultāti parāda, ka, izmantojot magnetronu ar augstu frekvenci 2,45 GHz, ir iespējams palielināt pultrūzijas procesa produktivitāti vairāk nekā 5,5 reizes, bet efektivitāti – gandrīz līdz trīs reizēm. Magnetrona lietojums ar zemāku frekvenci 915 MHz ir ļāvis tikai uzlabot produktivitāti vairāk nekā trīs reizes, taču enerģijas patēriņš ir ievērojami palielināts. Šādā veidā, lai izstrādātu efektīvu, mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesu ar augstu produktivitāti, būtu ieteicams izmantot magnetronus ar augstu frekvenci – 2,45 GHz.



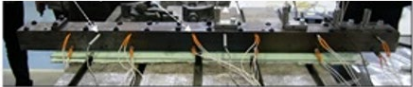
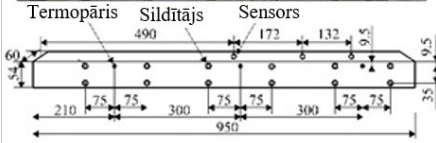
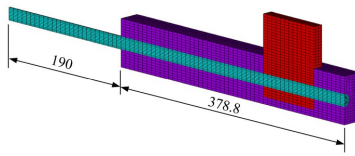
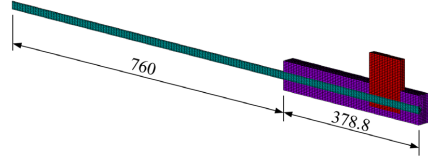
2.16. att. Elektriskā lauka sadalījums pa profila centra līniju.



2.17. att. Absorbētās enerģijas lauka sadalījums pa centra līniju.

2.5. tabula

Mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesa efektivitāte

Produkts	Stienis (diametrs – 16 mm), izgatavots no poliestera sveķiem <i>POLRES 305BV</i> ($v_f = 45\%$) un stikla šķiedras 4800 tex ($v_f = 55\%$)						
Pultrūzija	Tradicionālā [14]			Mikroviļņu veicinātā			
GEM shēmas	Termopāris Sildītājs Sensors  Termopāris Sildītājs Sensors 			 			
	Konstantas			Konstantas			
Simulācijā izmantoto sveķu dielektriskās īpašības	Konstantas			Konstantas			Atkarīgas no temperatūras
Sildīšanas sistēma	12 elektriskie sildītāji, katrs 315 W			Magnetrons: 915 MHz, 5290 W Keramikas bloks: cirkonija dioksīds		Magnetrons 2.45 GHz Keramikas bloks: bora nitrīds	
				1000 W	850 W	850 W	550 W
Sildīšanas sistēmas darbības režīms	Kontrolē ar proporcionālo-integrālo-atvasināto kontrolieri (automātiski ieslēdzas un izslēdzas)			Nepārtraukts (vienmēr ieslēgts)			
Vilkšanas ātrums, cm/min	18			59			
Enerģijas patēriņš līdzsvara stāvoklī, W/m	24,8			149,4			
Produktivitāte, %	100			327,8			
Efektivitāte, %	100			602,4			
				67,3	57,3	57,3	37,1

SECINĀJUMI

1. Izstrādāti jauni elektromagnētisko-termoķīmisko galīgo elementu modeļi un algoritmi mikroviļņu veicinātu pultrūzijas procesu holistiskais simulācijai, kā arī pultrūzijas veidņa modelēšanai. Šim nolūkam ir izmantota vispārēja lietojuma programmatūra *ANSYS*, kas ļauj ievērojami ietaupīt laiku un izmaksas, kā arī padara pieejamas dažādas galīgo elementu pakotņu modelēšanas iespējas. Tas ir ļāvis atrisināt apvienoto elektromagnētisko-termoķīmisko problēmu ar no temperatūras atkarīgām dielektriskā materiāla īpašībām. Parametriskā analīze apstiprināja, ka mikroviļņu veicināti pultrūzijas procesi darbojas ar lielu ātrumu (ātra saistīšanās) un to darba temperatūras ir augstākas nekā tradicionālajiem pultrūzijas procesiem. Šī iemesla dēļ sveķi ar lieliem dielektriskiem zudumiem un augstu iznīcināšanas temperatūra ir labākā izvēle šādam lietojumam. Turklāt tie ir jāpārbauda ar DSK iekārtām pie lielākiem ātrumiem nekā tradicionālajiem pultrūzijas procesiem. Svarīgi atzīmēt, ka promocijas darbā izstrādātie galīgo elementu modeļi un algoritmi ir veiksmīgi validēti ar rezultātiem, kas iegūti specializētās programmās (*COMSOL Multiphysics*) eksperimentāli vai izmantojot pieejamo literatūru.
2. Pamatojoties uz parametriskās analīzes rezultātiem, ir formulētas jaunas optimizācijas problēmas, ņemot vērā visus nepieciešamos rūpnieciskos pultrūzijas procesa parametrus. Tradicionālu pultrūzijas procesu modelēšanai ir izstrādāta netiešā optimizācijas metodoloģija, kas ir balstīta eksperimentu plānošanas un atbildes virsmu metodēs. Šī pieeja ir ļāvusi novērtēt industriālo pultrūzijas procesu efektivitāti un produktivitāti ar temperatūras kontroli, ko veic sildītāju ieslēgšanas un izslēgšanas stratēģija. Tādā veidā ir iegūtas reālākas elektriskās enerģijas vērtības, kas patērētas pultrūzijas veidņa sildīšanai. Iespēja ļaut sveķiem saistīties ārpus pultrūzijas veidņa ir ļāvusi padarīt efektīvāku pultrūzijas procesu. Tomēr šajā gadījumā eksotermiska ķīmiskā reakcija ir pārvietota pie veidņa izejas un formulētajā optimizācijas problēmā jāievieš papildu ierobežojumi. Tas ir – minimālā saistīšanās pakāpe kompozītmateriālam veidņa izejā. Ar šo ierobežojumu tiek garantēts, ka sveķi pie veidņa izejas neplūst un ir cietā stāvoklī.
3. Pašreizējie iegūtie optimālie risinājumi ir paredzēti esošajiem pultrūzijas veidņiem, ko izmantot rūpnīcā. Šajā darbā nav bijusi iespēja mainīt veidņa dizainu. Taču vislielāko tehnoloģiskā procesa efektivitāti var iegūt apvienotam optimālam veidnim, kā arī sākotnēji izvēlētiem sveķiem. Šajā gadījumā ir iespējams papildus ietaupīt tērauda materiālu, kas tiek izmantots pultrūzijas veidņa ražošanai, un samazināt augstās apstrādes izmaksas.
4. Jauna, interaktīva tehnoloģiskā karte ir izstrādāta, izmantojot netiešas optimizācijas metodoloģiju. Tas ļauj ne tikai noteikt procesa apstākļus (temperatūra un saistīšanas pakāpe kompozītmateriāla profilā) fiksētajiem

procesa parametriem un apkārtējās vides temperatūrai, bet arī samazināt enerģijas patēriņu vai maksimāli palielināt vilkšanas ātrumu faktiskajai apkārtējās vides temperatūrai rūpnieciskos apstākļos. Izstrādātas tehnoloģiskās kartes lietojums ir pierādījis būtisku procesa efektivitātes un produktivitātes uzlabojumu, salīdzinot ar esošo tehnoloģisko karti, kas patlaban tiek rūpnieciski izmantota. Lai palielinātu izstrādātas tehnoloģiskās kartes darbības ātrumu, formulēto optimizācijas uzdevumu risināšanai ir lietots vispārinātais samazināta gradienta algoritms. Tas tiek darīts ar mērķi spēt izmantot šos tehnoloģiskos rīkus visos iespējamajos datoros, pat tādos, kuros ir lēns centrālā procesora ātrums. Tomēr ir jāatceras, ka šajā gadījumā optimālie risinājumi atsevišķās problēmās varētu būt ļoti atkarīgi no sākotnējiem nosacījumiem un iegūtais risinājums var nebūt globāli optimizēts.

5. Izstrādātā mikroviļņu veicināta pultrūzijas procesa novērtējums ar reālo, tradicionālo pultrūzijas procesu, kas verificēts eksperimentāli, ir pierādījis tā ievērojamo produktivitāti (vairāk nekā 5,5 reizes) un efektivitāti (gandrīz līdz trīs reizēm), saglabājot augstu pultrūdēto profilu kvalitāti.

Turpmākiem pētījumiem, lai saglabātu pultrūdēto profilu kvalitāti un novērtētu strukturālo uzvedību un ģeometrisku precizitāti, ir jāizstrādā termomehāniskais galīgo elementu modelis un algoritms procesa spriegumu un deformāciju aprēķināšanai.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Safanov A. A., Carlone P., Akhatov I. Mathematical simulation of pultrusion processes: A review, *Composite Structures*, vol. 184, pp. 153–177, 2018.
- [2] Howald A. M. Meyer L. S. Shaft for Fishing Rods. US patent US2571717 A, 1951.
- [3] Metaxas A. C. and Meredith R. J. *Industrial Microwave Heating*, IEEE Power Engineering Series 4, Peter Peregrinus Limited, London, 1983.
- [4] Shannon C. E. Communication in the Presence of Noise. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 37 (1), pp. 10–21, 1949.
- [5] COMSOL Multiphysics reference manual, Version: COMSOL 5.5, 2019.
- [6] Bogetti T. A. and Gillespie J. W. Process-Induced Stress and Deformations in Thick-Section Thermoset Composite Laminates. *Journal of Composite Materials*, 26 (5), pp. 626–660, 1992.
- [7] Namsone E., Arshanitsa A. and Morozovs A. Analysis of Curing Kinetic Models for Polyester Resin C-L ISO 112 G. *Key Engineering Materials*, 850, pp. 70–75, 2020.
- [8] Barkanov E., Akishin P., Miazza N. L. and Galvez S., ANSYS-Based Algorithms for a Simulation of Pultrusion Processes, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 5 (24), pp. 377–384, 2017.
- [9] Barkanov E., Akishin P., Namsone E., Bondarchuk A. and Pantelelis N. In-Line Characterization of Pultruded Profiles. *Book of Abstracts of the International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials*, Ichia, Italy, 14, pp. 12–15, September 2019.
- [10] Barkanov E., Akishin P., Namsone E., Bondarchuk A. and Pantelelis N. Real-time Characterization of Pultrusion Processes with a Temperature Control. *Mechanics of Composite Materials*, 56, pp. 135–148, 2020.
- [11] <https://compor.eu/> 15 March 2023.
- [12] Wu C.F. J. and Hamada M. *Experiments: Planning, Analysis and Parameters Design Optimisation*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
- [13] Myers R. H. and Montgomery D. C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimisation Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2002.
- [14] Baran I., Tutum C. C., Nielsen M. W. and Jattel J. H. Process Induced Residual Stresses and Distortions in Pultrusion. *Composites: Part B*, 51, pp. 148–161, 2013.



Endija Namsone-Stīle dzimusi 1993. gadā Dobelē. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi profesionālo bakalaura grādu un inženiera kvalifikāciju (2017), kā arī profesionālo maģistra grādu ar izcilību (2018) transportbūvēs. No 2019. līdz 2022. gadam strādāja RTU Materiālu un konstrukciju institūtā zinātniskās asistentes amatā un ERAF zinātniskajā projektā "Tradicionālu pultrūzijas procesu efektivitātes uzlabošana". 2015. gadā saņēmta AS "Latvijas Valsts meži" teicamnieku stipendiātu programmas stipendija. 2018. gadā saņēmta Gunta Boles prēmija par izcilām sekmēm studijās būvniecības specialitātē un augstā profesionālā līmenī izstrādātiem kursa projektiem. Divas reizes iekļauta RTU Zelta absolventu fondā (2016./2017. un 2017./2018. studiju gada izlasēs). Patlaban strādā Dobeles novada pašvaldībā par transportbūvju inženieri.