

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte  
Materiālu un konstrukciju institūts

**Pāvels Akišins**

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorants

**PROGRESĪVO PULTRŪZIJAS PROCESU  
IZSTRĀDE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

RTU Izdevniecība  
Rīga 2017

Akišins, P. *Progresīvo pultrūzijas procesu izstrāde*. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2017. 37 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes “P-03” 2017. gada 21. septembra lēmumu, protokols Nr. 2017-3.



**EIROPAS SAVIENĪBA**

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Komitejas atbalstu programmā *FRAMEWORK7*, līgums Nr. NMP2-SL-2013-609149, projekts “*Development of an Innovative Manufacturing Process for the In-line Coating of Pultruded Composites (COALINE)*”.

**ISBN 978-9934-22-022-7**

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gada 19. decembrī Rīgas Tehniskajā universitātē, Kaļķu ielā 1, 119. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing. Lothar Kroll*  
*Technische Universität Chemnitz, Vācija*

*Dr. Ferran Marti*  
*AIMPLAS-Instituto Tecnológico Del Plastico, Spānija*

Profesors *Dr. habil. sc. ing. Vladimirs Kasjanovs*  
Rīgas Stradiņa universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing. Igors Tipāns*  
Rīgas Tehniskā universitāte

## APSTIPRINĀJUMS

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

Vārds Uzvārds ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 123 attēli, 23 tabulas, viens pielikums, kopā 105 lappuses. Literatūras sarakstā ir 78 nosaukumi.

# SATURS

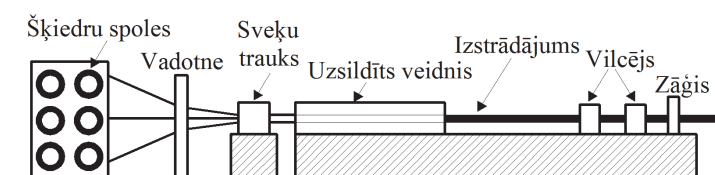
1.	DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
1.1.	Tēmas aktualitāte.....	5
1.2.	Darba mērķis.....	6
1.3.	Pētījuma uzdevumi.....	6
1.4.	Pētījuma metodes un līdzekļi.....	6
1.5.	Darba zinātniskā novitāte.....	6
1.6.	Darba praktiskā vērtība.....	7
1.7.	Darba aprobācija un publikācijas.....	7
2.	PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA.....	8
2.1.	Literatūras apskats.....	8
2.2.	Tradicionālo pultrūzijas procesu modelēšana.....	9
2.3.	Saistīšanās kinētikas modelēšana.....	12
2.4.	Simulēšanas algoritmu eksperimentālā validēšana.....	16
2.5.	Ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu modelēšana.....	19
2.6.	Daudzfunkcionālā pultrūzijas veidņa modelēšana.....	24
2.7.	Ar mikroviļņiem veicināta pultrūzijas procesa optimizācija daudzfunkcionālajām veidņim.....	26
2.8.	Secinājumi.....	32
	LITERATŪRAS SARAKSTS.....	34
3.	APROBĀCIJA UN PUBLIKĀCIJAS.....	36
3.1.	Publikāciju saraksts.....	36
3.2.	Konferenču saraksts.....	36
3.3.	Projekta semināri.....	37
3.4.	Promocijas darba aprobācija.....	37

# 1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

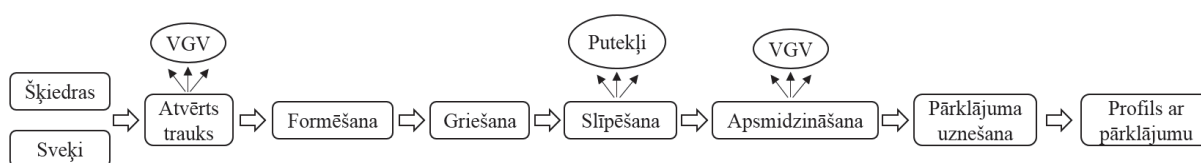
## 1.1. Tēmas aktualitāte

Pultrūzija ir ekonomiski izdevīgs šķiedru-polimēru kompozītu elementu ar konstantu šķērsriezumu ražošanas process (1.1. att.). Tas ir automatizēts process ar mazu darbietilpību un minimālu atkritumu daudzumu. Tradicionāls pultrūzijas process, kurā veidņa sildīšanai tiek izmantoti elektriskie sildķermeņi, ir zināms kopš 1951. gada, kad tas tika patentēts [8]. 2012. gadā pultrūzijas procesos izmantotu kompozītu daudzums sasniedza 47 000 t, kas ir aptuveni 20 % no Eiropā ražotu termoreaktīvu kompozītu daudzuma [23]. Pēdējo piecu gadu laikā pultrūzijas tirgus ir piedzīvojis ievērojamu izaugsmi, īpaši transporta un būvniecības nozarēs, un pēc prognozēm tas sasniegs 1,7 \$ miljardus 2017. gadā. Saskaņā ar jaunu tirgus pārskatu [9] globālā pultrūzijas tirgus nākotne izskatās perspektīvi, tā izaugsme no 2016. līdz 2021. gadam ir prognozējamā ar ikgadējo pieaugumu 4,6 %. Galvenie izaugsmes virzītāji šajā tirgū ir pieprasījuma kāpums viegliem materiāliem un augošs pieprasījums pēc kodīgās vidēs izturīgiem produktiem, piemēram, stiebrojuma stieņiem un režģiem. Šie fakti padara pultrūziju par vienu no visstraujāk augošiem ražošanas procesiem kompozītu tirgū.

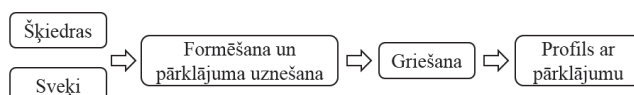
Lai palielinātu tradicionālo pultrūzijas procesu (1.2. att.) efektivitāti un pultrūdēta profila ar pārklājumu kvalitāti, ir veikta ar mikroviļņiem veicināta pultrūzijas process ar *in-line* pārklājuma tehnoloģiju (1.3. un 1.4. att.) izstrāde. Šis process ļauj ievērojami samazināt ražošanas soļu skaitu.



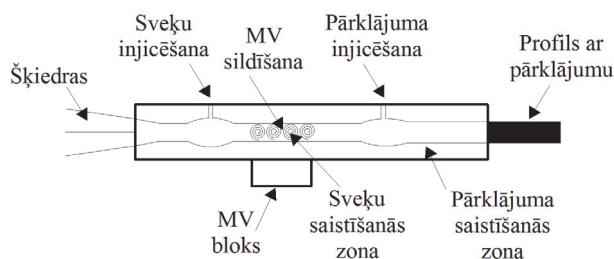
1.1. att. Tradicionāls pultrūzijas process.



1.2. att. Tradicionālā pārklāta pultrūdēta profila ražošana.



1.3. att. Progresīvā pārklāta pultrūdēta profila ražošana.



1.4. att. Progresīvā daudzfunkcionāla pultrūzijas veidņa shēma.

## 1.2. Darba mērķis

Promocijas darba galvenais mērķis ir jaunās metodoloģijas un rīku izstrāde progresīvo ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu ar *in-line* pārklājuma tehnoloģiju simulēšanai, projektēšanai un optimizācijai. Metodoloģijas pamatā ir dažādu galīgo elementu programmatūru izmantošana, eksperimentu plānošanas un atbildes virsmas metodes. Tā dod iespēju noteikt parametrus tehnoloģiskajam procesam ar minimālo enerģijas patēriņu.

## 1.3. Pētījuma uzdevumi

- Izstrādāt uzticamu skaitlisko procedūru pultrūzijas procesu simulēšanai.
- Izstrādāt saistīšanās kinētikas modeļus sveķiem ar augstām mikroviļņu absorbcijas īpašībām.
- Eksperimentāli validēt skaitliskās simulēšanas procedūras, izstrādātas promocijas darbā.
- Izstrādāt skaitliskās procedūras ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu simulēšanai.
- Izstrādāt ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu daudzfunkcionālajam pultrūzijas veidnim.
- Optimizēt ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu ar *in-line* pārklājuma tehnoloģiju.

## 1.4. Pētījuma metodes un līdzekļi

Promocijas darbā izmantotās pētīšanas metodes:

- galīgo elementu programmatūras *ANSYS Mechanical*, *ANSYS CFX*, *COMSOL Multiphysics*;
- *APDL* programmēšana;
- eksperimentu plānošanas un atbildes virsmas metodes;
- *EDAOpt* programmatūra eksperimentu plānošanai, pētniecībai un optimizācijai;
- *Microsoft Excel* programmatūras *Solver* rīks optimizācijas problēmu risināšanai;
- *Microsoft Excel* programmatūras grafiskie rīki rezultātu attēlošanai un analīzei.

## 1.5. Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darbā ir piedāvāta jauna simulēšanas un optimālās projektēšanas metodoloģija progresīviem ar mikroviļņiem veicinātiem pultrūzijas procesiem ar *in-line* pārklājuma tehnoloģiju. Izstrādātas metodoloģijas pamatā ir dažādu galīgo elementu programmatūru un optimizācijas datorprogrammu apvienota izmantošana savienotu termokīmisko un elektromagnētisko uzdevumu risināšanai un procesa optimizācijai. Skaitlisko pētījumu rezultātā ir noformulētas rekomendācijas progresīvo pultrūzijas procesu un daudzfunkcionālo

veidņu projektētājiem. Izmantojot optimizācijas rezultātus *Microsoft Excel* vidē, ir izstrādāts rīks efektīvai tehnoloģiskā procesa projektēšanai. Izmantojot šo rīku, tehnoloģi var noteikt pultrūzijas procesa parametrus kvalitatīva pārklāta profila ražošanai ar minimālo enerģijas daudzumu.

## **1.6. Darba praktiskā vērtība**

Promocijas darba rezultāti ir iekļauti Eiropas Savienības 7. Ietvarprogrammas projekta „*Development of an Innovative Manufacturing Process for the In-Line Coating of Pultruded Composites*” (*COALINE*) zinātniskajās atskaitēs. Projekta galvenais mērķis ir izstrādāt inovatīvu ražošanas procesu pārklājuma *in-line* uznešanai uz pultrūdējamo profilu. Pētījumā iegūtie rezultāti ir paredzēti izmantošanai vadošajās Eiropas kompānijās, pētniecības institūtos un akadēmiskajās institūcijās, kas strādā pultrūzijas jomā. Izstrādātā modelēšanas un optimizācijas metodoloģija progresīvo pultrūzijas procesu projektēšanai veicinās pētījumu attīstīšanu šajā jomā.

## **1.7. Darba aprobācija un publikācijas**

Promocijas darba rezultāti ir ziņoti septiņās starptautiskās konferencēs un astoņos projekta *COALINE* darba semināros. Promocijas darbs tika prezentēts un apspriests RTU Mehānikas institūta seminārā. Galvenie darba rezultāti ir atspoguļoti sešās publikācijās starptautiskos žurnālos un zinātnisko rakstu krājumos.

## 2. PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA

Promocijas darbā ir astoņas nodaļas.

**1. nodaļā** dots vispārējs pārskats par pultrūzijas procesiem, to simulēšanu un optimizāciju.

**2. nodaļā** aprakstīts pultrūzijas procesa termokīmiskā aprēķina vispārējs formulējums un skaitliskā interpretācija. Termokīmiskā uzdevuma aprēķinam ir izstrādātas divas skaitliskās procedūras, izmantojot dažādas galīgo elementu programmatūras (*ANSYS Mechanical* un *ANSYS CFX*). Ir dota to validācija ar eksperimentāliem un skaitliskiem rezultātiem, publicētiem zinātniskajā literatūrā.

**3. nodaļā** aprakstīta sveķu ar augstām mikroviļņu absorbcijas īpašībām saistīšanās kinētikas modeļu izveidošanas metodoloģijas izstrāde un validācija. Izveidotā metodoloģija ir izmantota *Microsoft Excel* rīkā.

**4. nodaļā** dota izstrādāto pultrūzijas procesu skaitliskās simulācijas procedūru eksperimentālā validācija. Parādīta dažādu procesa parametru un veidņa materiālu īpašību ietekme uz kompozīta materiāla temperatūru un saistīšanās pakāpi. Veikta izejas datu korekcija, izmantojot eksperimenta un simulācijas rezultātus ar mērķi iegūt ticamus rezultātus.

**5. nodaļa** veltīta progresīvo ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu skaitliskajai simulācijai un pētījumiem ar mērķi uzlabot procesa efektivitāti ir pētīta absorbcijas enerģijas lauka jaudas, veidņa termiskās izolācijas, tērauda veidņa priekšsildīšanas, sveķu sildīšanas un tērauda veidņa garuma samazināšanas ietekme uz pultrūzijas procesa parametriem.

**6. nodaļa** veltīta daudzfunkcionālā progresīvajos pultrūzijas procesos ar mikroviļņu sildīšanu un *in-line* pārklājuma tehnoloģiju izmantojamā pultrūzijas veidņa projektēšanai.

**7. nodaļa** apraksta uz eksperimentu plānošanas un atbildes virsmas tehnikas balstītu optimizācijas metodoloģiju, izmantotu progresīvā ar mikroviļņiem veicināta pultrūzijas procesa ar *in-line* pārklājuma tehnoloģiju optimizācijai.

Promocijas darba pētījumu sasniegumi ir apkopoti **8. nodaļā**. Tiek apspriesti arī ieteikumi turpmākajam darbam.

### 2.1. Literatūras apskats

Šajā nodaļā ir dots plašs literatūras apskats par pultrūzijas procesa pētījumiem. Apskatā ir atspoguļoti divi temati. Pirmais ir tradicionālo un ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu simulēšana. Ir dots arī neliels pultrūzijas procesu eksperimentālās pētīšanas metožu apskats. Otrais ir pultrūzijas procesu optimizācija. Esošā literatūra ir iedalīta divās grupās: ražošanas procesa eksperimentālā pētīšana; skaitliskā simulēšana un optimizācija.

Tradicionālie pultrūzijas procesi, to simulēšana un optimizācija ir plaši apskatīta zinātniskajā literatūrā. Progresīvie ar mikroviļņiem veicinātie pultrūzijas procesi ir pētīti ievērojami mazāk, optimizācijas uzdevumi netika risināti šim jaunajam tehnoloģiskajam procesam. Pultrūzijas veidņu projektēšana ar *in-line* pārklājuma tehnoloģiju nav minēta zinātniskajā literatūrā.



## 2.2. Tradicionālo pultrūzijas procesu modelēšana

Pultrūzijas procesa skaitliskajai pētīšanai tiek risināts šāds termokīmiskais uzdevums, kas sastāv no trīs vienādojumiem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q_b = 0; \\ \bar{\rho} \bar{c}_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{k}_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{k}_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{k}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q = 0; \\ \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) = R_r, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

kur  $T$  – temperatūra, °C;

$\rho$  – pultrūzijas veidņa materiāla blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$c_p$  – pultrūzijas veidņa materiāla īpatnējā siltumietilpība, J/(kg · °C);

$k_x, k_y, k_z$  – pultrūzijas veidņa materiāla siltuma vadītspēja  $x, y, z$  virzienos, J/(m °C s);

$q_b$  – enerģijas apmaiņas intensitāte uz robežvirsmas, J/(m<sup>3</sup> s);

$u$  – vilkšanas ātrums, m/s;

$\bar{\rho}$  – kompozīta materiāla vidējais blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$\bar{c}_p$  – kompozīta materiāla vidējā īpatnējā siltumietilpība, J/(kg °C);

$\bar{k}_x, \bar{k}_y, \bar{k}_z$  – kompozīta materiāla vidējā siltuma vadītspēja  $x, y, z$  virzienos, J/(m °C s);

$q$  – iekšējās siltuma ģenerācijas parametrs, kas saistīts ar siltuma izdalīšanos sveķu eksotermiskajā ķīmiskajā reakcijā, J/(m<sup>3</sup> s);

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

$H(t)$  – siltuma daudzums, kas izdalījās saistīšanās reakcijas rezultātā laikā  $t$ , J/kg;

$H_{tr}$  – kopējais reakcijas siltuma daudzums, J/kg.

Ir svarīgi atzīmēt, ka sistēmas pirmais vienādojums ir veidņa enerģijas līdzsvara vienādojums, otrais – kustīgā kompozīta materiāla enerģijas līdzsvara vienādojums. trešais – sveķu kustības (pārneses) vienādojums.

Siltuma pārnese kompozīta materiālā notiek, pateicoties vadītspējai un siltuma ģenerācijai, kas notiek ar veidņa siltumu izraisītas eksotermiskas reakcijas rezultātā. Siltuma ģenerācijas parametrs, kas apraksta siltuma izdalīšanos eksotermiskas reakcijas rezultātā, tiek definēts šādi:

$$q = V_r \rho_r H_{tr} R_r, \quad (2.2)$$

kur  $V_r$  – sveķu tilpuma daļa;

$\rho_r$  – sveķu blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$R_r$  – sveķu reakcijas ātrums,  $1/\text{s}$ , kas tiek definēts kā:

$$R_r(\alpha, T) = \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{1}{H_{tr}} \frac{dH(t)}{dt} = K(T) \cdot f(\alpha), \quad (2.3)$$

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

$K(T)$  – definēts ar Arrēniusa vienādojumu:

$$K(T) = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2.4)$$

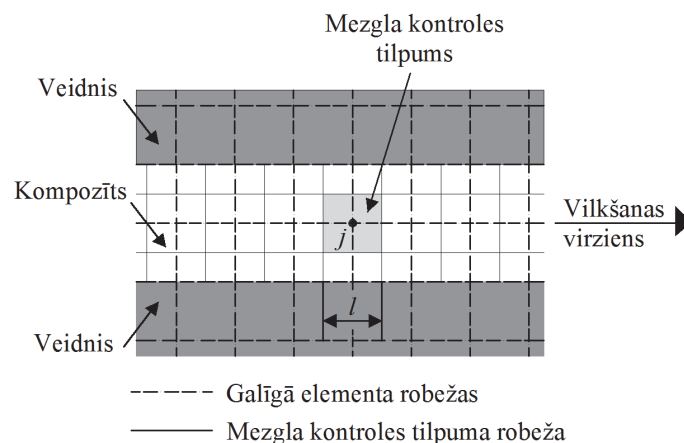
kur  $R = 8,314$  – universālā gāzes konstanta,  $\text{J}/(\text{mol } ^\circ\text{C})$ ;

$E$  – aktivācijas enerģija,  $\text{J}/\text{mol}$ ;

$K_0$  – frekvences faktors,  $1/\text{s}$ .

Pultrūzijas procesa simulēšanai tika izstrādātas divas skaitliskās procedūras. Pirmā simulācijas procedūra tika izveidota *ANSYS Mechanical* vidē un izmanto jaukto laika integrācijas shēmu un mezglu kontroles tilpumu metodi saistītas temperatūras un sveķu saistīšanās vienlaicīgam aprēķinam, izmantojot iteratīvu procedūru. Kustīgam kompozīta profilam tiek izmantota vienmērīga galīgo elementu diskretizācija vilkšanas virzienā. Mezglu kontroles tilpumi tiek izveidoti uz galīgo elementu tīkla pamata, kā parādīts 2.1. att. Kontroles tilpumu centri sakrīt ar galīgo elementu mezglu punktiem. Kontroles tilpumā tiek pieņemts konstants lauka mainīga sadalījums, kura vērtība ir noteikta ar attiecīgā galīgo elementu mezglā aprēķinātu lauka mainīgo.

Analīzes sākumā ir pieņemts, ka saistīšanās pakāpe ir vienāda ar  $\alpha^0$  visos mezglu kontroles tilpumos. Vairumā gadījumu tā ir vienāda ar nulli. Tad pārejošs termisks galīgo elementu aprēķins ir veikts ar mērķi noteikt sākotnēju temperatūru katrā elementā. Izmantojot temperatūras lauku, ar ārēju lietotāja programmu tiek rēķināts saistīšanās ātrums katram mezglu kontroles tilpumam  $j$  katrā solī  $i$ :



2.1. att. Galīgo elementu un mezglu kontroles tilpumu tīkli.

$$\frac{\partial \alpha_j^i}{\partial t} = \left[ \frac{\Delta \alpha_j^i}{\Delta t} \right] = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_j^i}\right) f(\alpha_j^{i-1}) \quad (2.5)$$

Laikam  $t > 0$  s saistīšanās pakāpe var būt noteikta, nepārtraukti izmantojot šādu attiecību:

$$\alpha_j^i = \alpha_j^{i-1} + \left[ \frac{\Delta \alpha_j^i}{\Delta t} \right] \Delta t, \quad (2.6)$$

kur  $\Delta t$  – laika solis, s, noteikts kā:

$$\Delta t = \frac{1}{p} \cdot \frac{l}{u}, \quad (2.7)$$

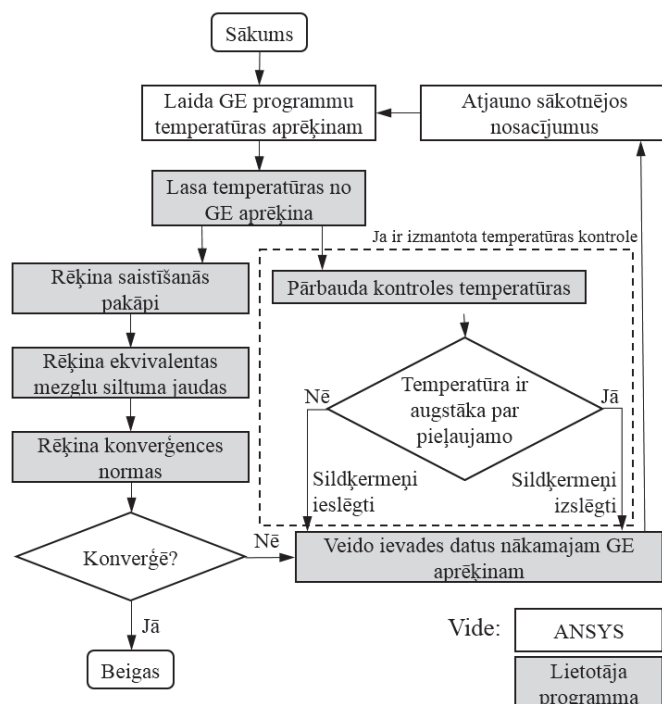
kur  $l$  – mezglu kontroles tilpuma garums vilkšanas virzienā, m;

$u$  – vilkšanas ātrums, m/s;

$p$  – apakšsoļu skaits. Ja apakšsoļu procedūra netiek izmantota,  $p = 1$ .

Saistīšanās reakcijas eksotermisks efekts tiek ievērots kā ekvivalenta mezglu siltuma jauda mezglu kontroles tilpumam vai mezglam  $j$  ar izteiksmi:

$$q = V_r \rho_r H_{tr} R_r = V_r \rho_r H_{tr} \left[ \frac{\Delta \alpha_j^i}{\Delta t} \right]. \quad (2.8)$$



2.2. att. ANSYS Mechanical vidē izveidotas procedūras blokskāme.

Iegūtas vērtības tiek izmantotas, lai aprēķinātu temperatūras lauku nākamajā iterācijas solī. Kompozīta kustība tiek simulēta ar temperatūras un saistīšanās pakāpes lauku pārvietošanu vilkšanas virzienā pēc katra aprēķina soļa. Nepieciešams atzīmēt, ka veidņa ieejā saistīšanās pakāpe ir nemainīga un vienāda ar  $\alpha^0$  jebkurā solī. Kopumā algoritms ir apkopots 2.2. att. parādītajā blokshēmā.

Otrā procedūra ir izstrādāta, izmantojot *ANSYS CFX* programmatūru. Kompozīts ir modelēts kā maisījums no divām komponentēm ar vienādām fizikālām īpašībām, kas reprezentē nereagētu un reagētu materiālu. Saistīšanās pakāpe  $\alpha$  ir modelēta kā reagēta materiāla masas daļa. Reakcijas laikā notiek fāzes pāreja starp divām komponentēm. Fāzes pārejas ātrums ir raksturots  $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$  un aprēķināts ar izteiksmi:

$$\text{Mass Transfer} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} \bar{\rho}. \quad (2.9)$$

Diemžēl šobrīd *ANSYS CFX* nav realizēta siltuma izdalīšanās fāzes pārejas gaitā, tāpēc ir nepieciešams simulēt šo efektu ar papildu siltuma avotu, izvietotu kompozīta tilpumā. Siltuma avota mērvienība ir  $\text{W}/\text{m}^3$ , un tas ir atkarīgs no fāzes pārejas ātruma:

$$\text{Heat Source} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} \rho_r H_u V_r. \quad (2.10)$$

Fāzes pārejas modelim *ANSYS CFX* programmatūrā ir vēl viens tehnisks ierobežojums – to nevar izmantot, ja ir modelēts kontakts starp šķidrumu un cieto ķermeņi. Tāpēc uzdevumos, kuros tiek rēķināts arī temperatūras lauks veidnī, kompozīts tiek modelēts ar citu paņēmieni – kā ciets ķermenis ar konstantu kustības ātrumu, nevis kā vienmērīga plūsma šķidruma tilpumā. Aprēķinā tiek ieviests papildu skalārs parametrs, vienāds ar  $\alpha$  un siltuma avota intensitāti *Heat Source*.

*ANSYS CFX* programmatūrā veiktu aprēķinu galvenā priekšrocība ir tā, ka saistīšanās pakāpes izmaiņa tiek rēķināta ar iebūvētām metodēm kopā ar termodinamikas aprēķiniem, ar ko tiek sasniegts aprēķina lielāks ātrums, precizitāte un stabilitāte, kas ir īpaši svarīgi procesa atsevišķās stadijās, kad saistīšanās pakāpe mainās ātri. Papildus nav nepieciešamības saskaņot aprēķina laika soli ar galīgā elementa izmēru vilkšanas virzienā. Galvenais *ANSYS CFX* izveidotas procedūras trūkums ir neiespējamība izmantot anizotropas termiskās vadītspējas.

Izstrādātas procedūras tika veiksmīgi validētas ar literatūrā aprakstītiem temperatūras un saistīšanās pakāpes laukiem, pētot cilindriskā stieņa [15], [21], [22], plakanās plāksnes [5], [15] un dubult-T profila [16] pultrūziju.

### 2.3. Saistīšanās kinētikas modelēšana

Pultrūzijas procesa simulēšanai ir nepieciešams izveidot matricas materiāla saistīšanās kinētikas modeli. Sveķu saistīšanās process ir eksotermiska reakcija. Siltuma izdalīšanās ir atkarīga no sveķu absolūtas temperatūras un saistīšanās pakāpes un var būt izmērīta ar DSK (diferenciālās skenējošās kalorimetrijas) aparātiem. Pastāv divu veidu DSK testi: dinamiskie

un izotermiskie. Izotermiskajā DSK sveķi tiek izturēti pie konstantas temperatūras līdz saistīšanās procesa beigām. Dinamiskajā DSK sveķi tiek sildīti ar konstantu ātrumu (no 1 °C/min līdz 15 °C/min) [14]. Pultrūzijas procesā, izņemot zonas ap veidņa sienām, sveķu temperatūra paceļas gandrīz ar konstantu ātrumu [19]. Tāpēc šajā pētījumā dinamiskās DSK testēšanas metodes tika izmantotas, lai noteiktu sveķu siltuma izdalīšanās, kas savukārt tika izmantota saistīšanās kinētikas modeļu izveidošanai. *Microsoft Excel* vidē tika izveidots rīks saistīšanās kinētikas modeļu parametru noteikšanai.

Kinētikas analīzē ir pieņemts, ka sveķu reakcijas ātrums var būt aprakstīts ar vienādojumu (2.3), kas sastāv no divām daļām: Arrēniusa vienādojuma  $K(T)$  (vienādojums (2.4)) un reakcijas funkcijas  $f(\alpha)$ , kas ir atkarīga no sveķu īpašībām un mainās atkarībā no izmantota reakcijas modeļa. Tradicionālās reakciju funkciju formas termoreaktīviem sveķiem ir:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha) \text{ – pirmās pakāpes kinētikas modelis,} \quad (2.11)$$

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \text{ – } n\text{-tās pakāpes kinētikas modelis,} \quad (2.12)$$

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n (1 + K_2 \alpha) \text{ – } n\text{-tās pakāpes kinētikas modelis ar autokatalīzi,} \quad (2.13)$$

$$f(\alpha) = \alpha^m (1 - \alpha)^n, \quad m + n = 2 \text{ – Prouta-Tompkina autokatalītisks modelis,} \quad (2.14)$$

kur  $m, n$  and  $K_i$  – impēriskās reakcijas konstantes.

Atsevišķos gadījumos vairāki vienādojumi tiek izmantoti reakcijas aprakstam. Tā plaši tiek lietota pārveidota termoreaktīvu sveķu saistīšanās ātruma aproksimācija – Kamala-Souroura autokatalītisks modelis:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \left( K_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) + K_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \alpha^m \right) (1 - \alpha)^n. \quad (2.15)$$

Arrēniusa vienādojuma koeficienti, aktivācijas enerģija  $E$  un frekvences faktors  $K_0$ , ir fiziskie lielumi, un tie var būt aprēķināti ar Kissindžera metodi [12] vai ASTM E 698 standarta metodoloģiju [2], izmantojot dinamiskās DSK testu rezultātus. Pietiekamai precizitātei ir nepieciešami vismaz trīs DSK testi, veikti ar dažādiem ātrumiem (parasti 1...10 °C/min).

Kissindžera metodes gadījumā tiek lietots šāds vienādojums:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = \ln\left(\frac{K_0 R}{E}\right) - \frac{E}{RT_p}, \quad (2.16)$$

kur  $\beta$  – sildīšanas ātrums, °C/s;

$T_p$  – maksimālā temperatūra, °C.

Zīmējot uz grafika  $\ln(\beta/T_p^2)$  pret  $1/T_p$ , aktivācijas enerģijas  $E$  un frekvences faktora  $K_0$  vērtības var būt noteiktas, izmantojot lineārās aproksimācijas slīpumu  $a_s$  un krustpunkta ar  $\ln(\beta/T_p^2)$  asi ordinātu  $b_{int}$ . Šajā gadījumā aktivācijas enerģijas vērtība tiek noteikta ar vienādojumu:

$$E = -a_s R \quad (2.17)$$

un frekvences faktors tiek noteikts kā:

$$K_0 = \frac{E e^{b_{int}}}{R}. \quad (2.18)$$

Standarta ASTM E 698 metodoloģijas izmantošanas gadījumā tiek analizēts  $\lg(\beta)$  pret  $1/T_p$  grafiks. Tad aktivācijas enerģijas vērtība tiek noteikta kā:

$$E = -2,19 a_s R \quad (2.19)$$

un frekvences faktors tiek noteikts kā:

$$K_0 = \beta \frac{E e^{\frac{E}{RT_p}}}{RT_p^2}. \quad (2.20)$$

Funkcijas  $f(\alpha)$  koeficienti tiek noteikti ar eksperimentālās siltuma plūsmas līknes piemeklēšanu, izmantojot mazāko kvadrātu metodi:

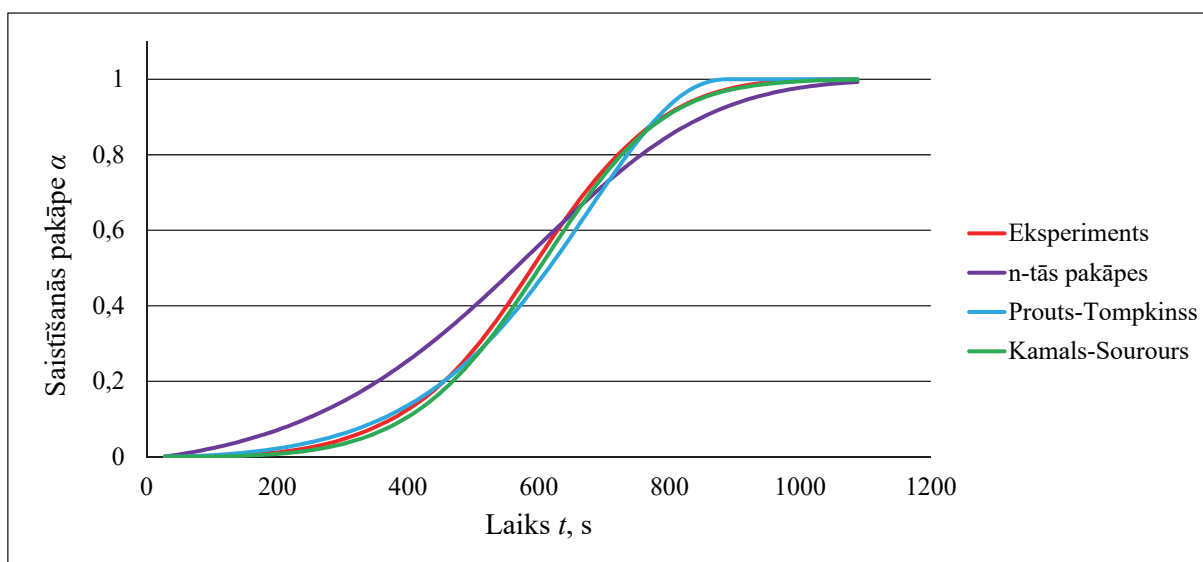
$$\Delta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\alpha_{ij}^{\text{exp}} - \alpha_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (2.21)$$

kur  $n$  – DSK testu skaits pie dažādiem sildīšanas ātrumiem;  
 $m$  – izlases punktu skaits.

*Microsoft Excel* vidē izstrādāts rīks saistīšanās kinētikas modeļu izveidošanai tika veiksmīgi validēts, izmantojot rakstā [1] ar *Netzsch DSC-204 Phenix* iegūtos DSK datus epoksīda sveķiem.

Arrēniusa vienādojuma parametri ir iegūti ar Kissendžera metodi un *STM E 698* procedūru.  $n$ -tās pakāpes, Prouta-Tompkinsa un Kamala-Souroura modeļi tika izvēlēti eksperimentālo siltuma plūsmas līkņu aprakstam.

Uzkonstruētas līknes sildīšanas ātrumam  $7,5$  °C/min ir parādītas 2.3. att. Nepieciešams atzīmēt, ka izveidotajos saistīšanās kinētikas modeļos tika izmantoti ar Kissindžera metodi iegūti Arrēniusa vienādojuma koeficienti. 2.3. att. viennozīmīgi parāda, ka lielāka precizitāte ir iegūta ar Kamala-Souroura modeli, bet  $n$ -tās pakāpes modelis ir devis sliktāku rezultātu.



2.3. att. Saistīšanās pakāpes atkarība no laika sildīšanas ātrumam 7,5 °C/min.

Izstrādāta metodoloģija tika veiksmīgi izmantota saistīšanās kinētikas modeļu izveidošanai sveķiem ar augstām mikroviļņu absorbcijas īpašībām, paredzētiem lietošanai progresīvajos pultrūzijas procesos. Izmantošanai tika izvēlēti šādi materiāli:

- sveķi: *POLRES 305BV* (poliesters);
- pārklājums: *RESOLTECH RESOLCOAT 2010 FGCS* (epoksīds).

Saistīšanās kinētikas parametru noteikšanai tika izmantoti ar *Perkin Elmer Diamond HeperDCS* iegūti rezultāti, sildot paraugus no 20 °C līdz 250 °C ar ātrumiem 2 °C/min, 5 °C/min, 10 °C/min, veicot testus *AIMPLASā* (Spānija). Arrēniusa vienādojuma parametri, aktivācijas enerģija un frekvences faktors tika noteikti ar Kissendžera metodi, un Kamala-Souroura modelis (vienādojums (2.15)) tika izmantots kā reakcijas funkcija. Noteiktie kinētikas parametri (2.1. un 2.2. tabulas) un eksperimentālās un modelētās saistīšanās pakāpes atkarības no temperatūras dažādiem sildīšanas ātrumiem (2.4. att.) pētījumā izmantotiem sveķiem un pārklājumam ir dodas tālāk tekstā.

2.1. tabula

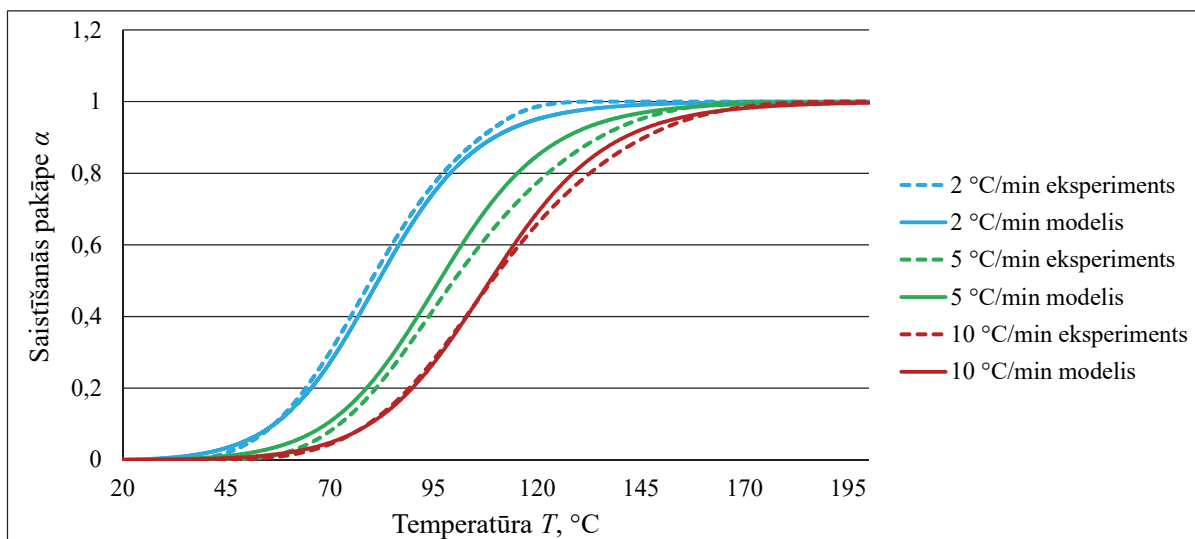
Noteiktie saistīšanās kinētikas modeļa parametri pārklājumam *RESOLTECH RESOLCOAT 2010 FGCS*

$H_{tr}$ , J/kg	$K_1$ , s <sup>-1</sup>	$K_2$ , s <sup>-1</sup>	$E_1$ , J/mol	$E_2$ , J/mol	$n$	$m$
152 907	2416 288	186 069 445 590 610	609 443	192 271	1,700	0,190

2.2. tabula

Noteiktie saistīšanās kinētikas modeļa parametri sveķiem *POLRES 305BV*

$H_{tr}$ , J/kg	$K_1$ , s <sup>-1</sup>	$K_2$ , s <sup>-1</sup>	$E_1$ , J/mol	$E_2$ , J/mol	$n$	$m$
323 074	14 289 310 986	285,870	85 573	33 141	2,342	0,519



2.4. att. Saistīšanās pakāpes atkarība no temperatūras pārklājumam *RESOLTECH RESOLCOAT 2010 FGCS* pie dažādiem sildīšanas ātrumiem.

## 2.4. Simulēšanas algoritmu eksperimentālā validēšana

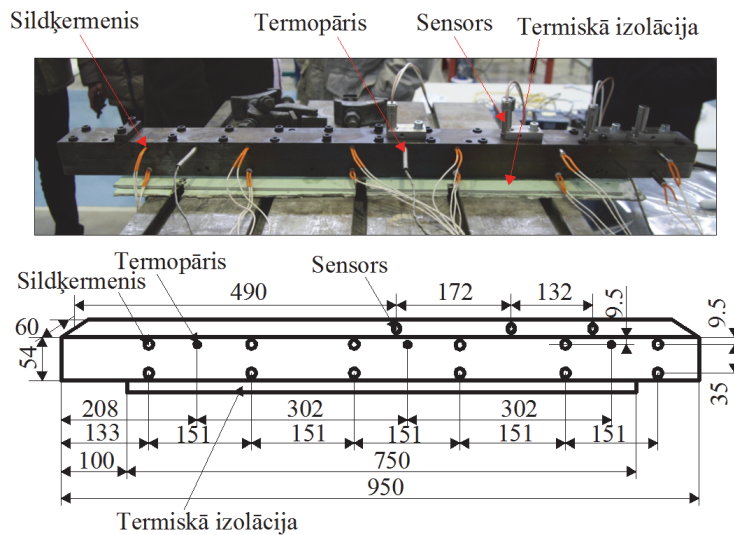
Tradicionālas pultrūzijas eksperiments tika veikts *AIMPLAS* (Spānija). Eksperimentālas iekārtas shēma ir parādīta 2.5. att. Veidņa sildīšana ir realizēta ar 12 elektriskiem sildķermeņiem, kas ir iedalīti trīs grupās un kontrolēti ar proporcionāli integrāli diferencējošu kontrolieri (PID) un termopāriem, izvietotiem starp katras grupas sildķermeņiem. Katra sildķermeņa elektriskā jauda ir 315 W. Kontrolieris izslēdz sildķermeņu grupu, kad temperatūra uz attiecīga termopāra sasniedz 100 °C, 120 °C vai 140 °C (2.3. tabula). Pultrūzijas procesa parametri, temperatūra un elektriskā pretestība uz velkama pultrūdējama profila virsmas, tika mērīti ar trīs speciāliem sensoriem, izstrādātiem *Synthesites Innovative Technologies* (Grieķija). Sensori datu apstrādei ir pieslēgti *Optimold* sistēmai [10].

Pultrūzijas veidnis ir izveidots no tērauda *40Cr*. Materiāli, kas izmantoti cilindriskā stienā ražošanai, ir stikla šķiedras *Unifilo 4800 tex* un poliestera sveķi *POLRES 305BV*. Šķiedru tilpuma daļa pultrūdējamā materiālā ir 55 %. Sveķu reakcijas ātrums ir aprakstīts ar Kamala-Souroura modeli (vienādojums (2.15)), izstrādātu 3. nodaļā. Eksperimentāls pultrūzijas process ir realizēts ar ātrumu 18 cm/min. Istabas temperatūra ir 17 °C, sveķu temperatūra ir vienāda ar istabas temperatūru, jo sveķu priekšsildīšana netika veikta.

2.3. tabula

Kontroles temperatūras				
Termopāris	Sākotnējā, °C	Korekcija 1, °C	Korekcija 2, °C	
			Pirmā izslēgšana	Pamata kontrole
1	100	85	65	85
2	120	105	85	105
3	140	125	105	125





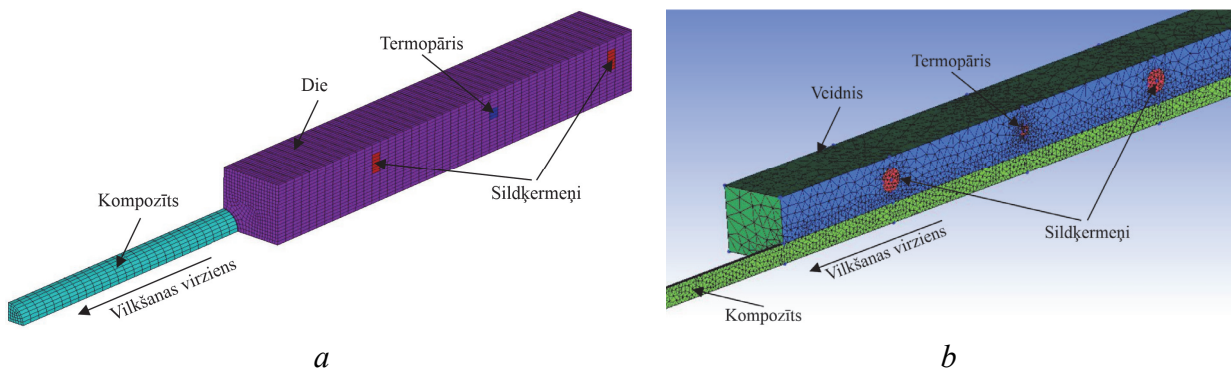
2.5. att. Tradicionālā pultrūzijas procesa shēma.

Pirmais galīgo elementu modelis cilindriskā stieņa pultrūzijas simulēšanai tika izveidots *ANSYS Mechanical*, izmantojot 3-D termisko cietķermeņa galīgo elementu *Solid 70*. Modelī tika izmantota simulējamā domēna simetrija, un tika modelēta tikai pultrūzijas veidņa viena ceturtda daļa. Siltuma pārneses un saistīšanās procesa analīzei pēc profila iziešanas no veidņa tika modelēta stieņa daļa ar garumu 250 mm pēc veidņa. Galīgo elementu modeļa fragments ir parādīts 2.6. a att.

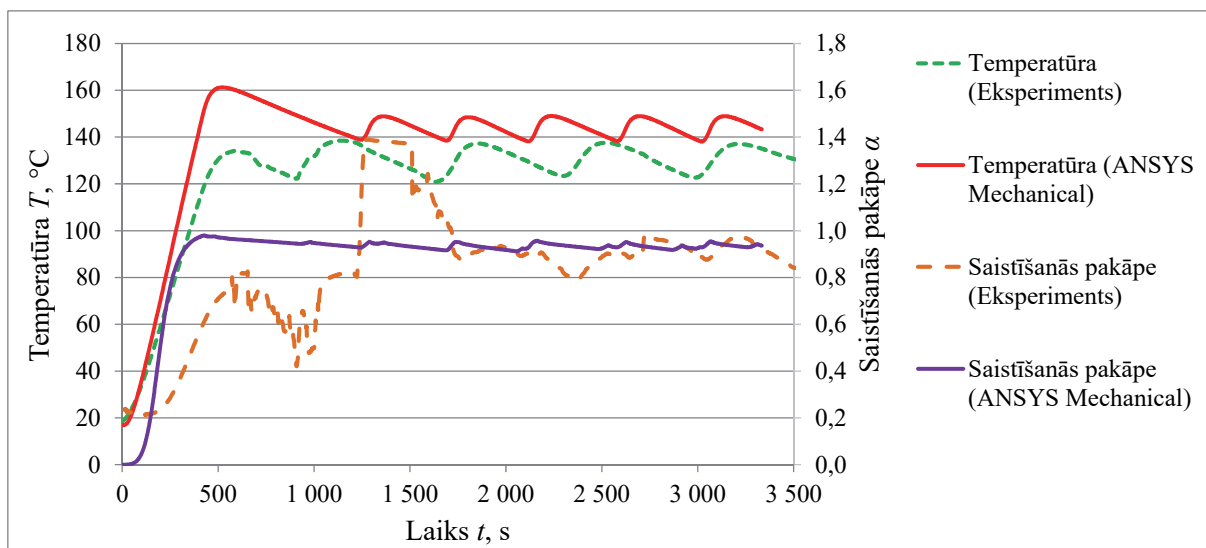
Simulācijas rezultāti, temperatūras un saistīšanās pakāpes uz trešā sensora ir parādīti kopā ar eksperimentāliem mērījumiem 2.7. att. Ir redzams, ka laba sakritība starp eksperimentāliem un simulācijas rezultātiem netika iegūta. Pieņemot, ka eksperimentālie rezultāti ir pareizi, ir nepieciešams atrast neprecizitātes cēloni.

Lai minimizētu starpību starp skaitliskiem un eksperimentāliem rezultātiem, tika ieviestas šādas korekcijas:

- sildķermeņu grupu kontroles temperatūru korekcija (*Korekcija 1* 2.3. tabulā);
- temperatūras kontroles algoritma korekcija (*Korekcija 2* 2.3. tabulā);
- veidņa materiāla termisko īpašību korekcija.



2.6. att. Galīgo elementu modeļa fragmenti: *ANSYS Mechanical* (a) un *ANSYS CFX* (b).

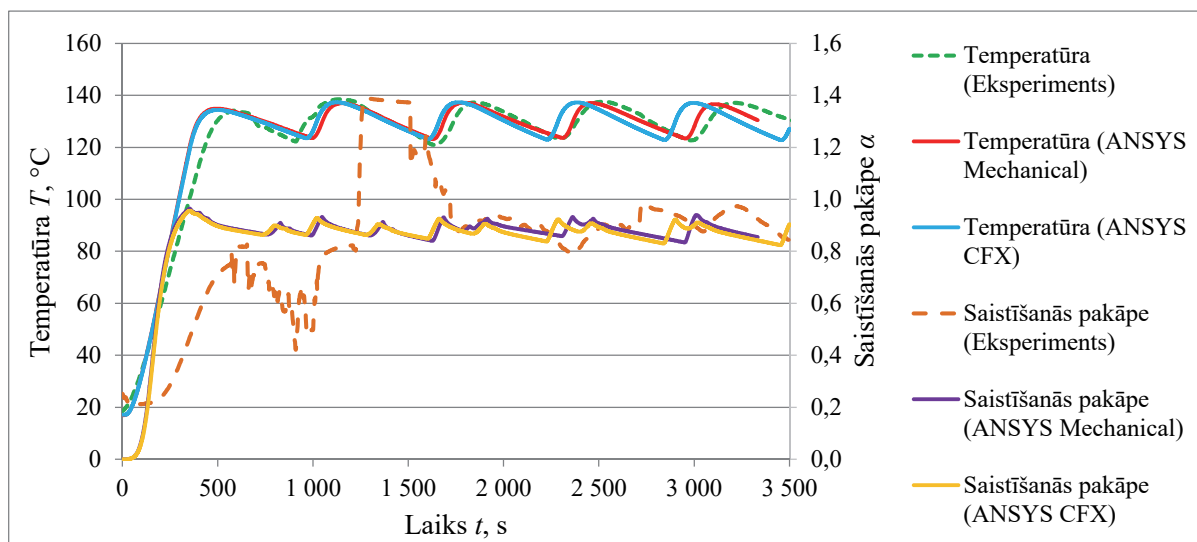


2.7. att. Temperatūras un saistīšanās pakāpes uz trešā sensora.

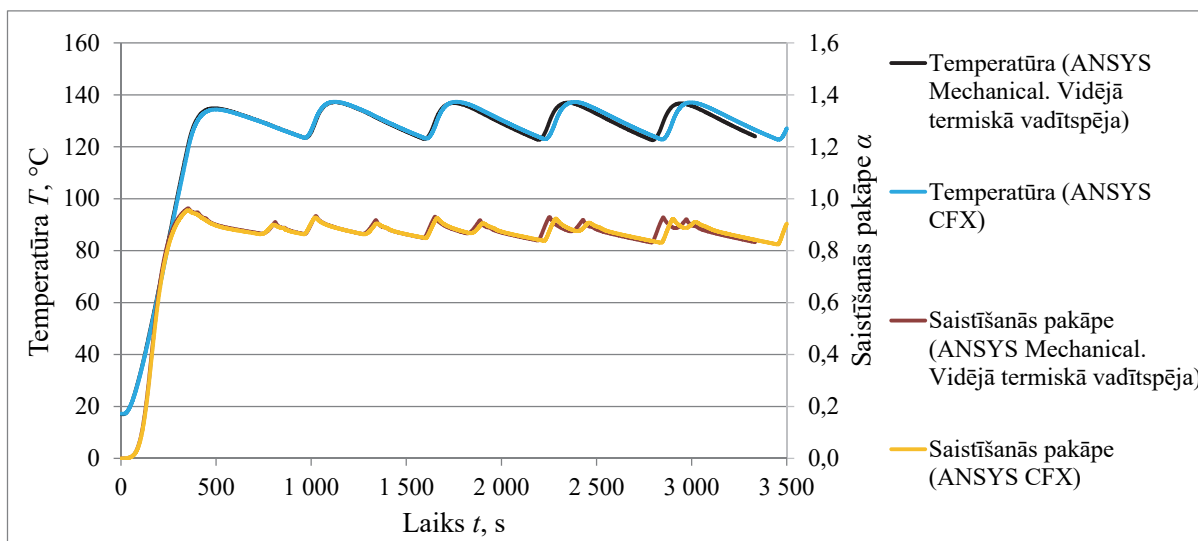
Pēc veiktām korekcijām starp eksperimentāliem un simulācijas rezultātiem ir iegūta laba sakritība (2.8. att.).

Lai validētu un izvērtētu *ANSYS CFX* aprēķina algoritmu, uzdevums tā fināla formulējumā tika risināts *ANSYS CFX* programmatūrā. Galīgo elementu modeļa fragments ir parādīts 2.6. b att. Ņemot vērā *ANSYS CFX* programmatūras ierobežojumu, kompozītam materiālam tika pieņemta izotropā termiskā vadītspēja, izrēķināta kā vidējā vērtība no  $k_x$  un  $k_y$ . Šīs simulācijas rezultāti kopā ar eksperimentāliem rezultātiem un rezultātiem, iegūtiem ar *ANSYS Mechanical*, ir doti 2.8. att. Starp temperatūrām un saistīšanās pakāpēm, iegūtām ar *ANSYS Mechanical* un *ANSYS CFX*, ir redzama neliela nesakritība.

Lai pārliecinātos, ka nesakritības cēlonis ir dažādas termiskās vadītspējas, kas izmantotas aprēķinos, nevis simulēšanas algoritma nepilnība, ar *ANSYS Mechanical* ir veikts papildu aprēķins, izmantojot vidējo termisko vadītspēju, iepriekš izmantoto *ANSYS CFX*. Simulācijas rezultāti ir doti 2.9. att. Tagad ir skaidri redzams, ka iepriekš iegūtas nesakritības cēlonis ir dažādas materiālu īpašības, kas izmantotas aprēķinos.



2.8. att. Ar *ANSYS Mechanical* un *ANSYS CFX* iegūtas temperatūras un saistīšanās pakāpes uz trešā sensora.



2.9. att. Ar *ANSYS Mechanical* un *ANSYS CFX* iegūtas temperatūras un saistīšanās pakāpes uz trešā sensora.

## 2.5. Ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu modelēšana

Ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu simulēšanai tika izstrādāta jauna metodoloģija, kas sastāv no diviem apakšmodeļiem. Katrs no apakšmodeļiem ir izveidots, izmantojot vispārīgā lietojuma galīgo elementu programmatūru. Pirmajā solī elektromagnētiskais apakšmodelis tiek izmantots elektriskā lauka sadales izvērtēšanai, risinot Maksvela vienādojumus ar *COMSOL Multiphysics*. Ar elektromagnētisko apakšmodeli iegūtais absorbcijas enerģijas lauks kompozītā materiālā otrajā solī tiek izmantots kā siltuma avots *ANSYS Mechanical* vidē izveidotajā termoķīmiskajā apakšmodelī temperatūras un saistīšanās pakāpes noteikšanai pultrūdējamā profilā. Lai parādītu izstrādātas metodoloģijas lietošanu tehnoloģiskā procesa projektēšanai, tika analizēta ar mikroviļņiem veicināta cilindriskā stieņa pultrūzija.

Elektromagnētiskais uzdevums tiek risināts ar mērķi noteikt elektriskā lauka sadalījumu un kā rezultātu – absorbcijas enerģijas lauku kompozītā materiālā, kas tiks izmantots kā siltuma avots termoķīmiskajā uzdevumā.

Izmantojot harmoniskā svārstīgā elektriskā lauka  $\vec{E}$  vispārpieņemtu īpašību:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) e^{2\pi i f t}, \quad (2.22)$$

kur  $\vec{r}$  – izvietojuma vektors;  
 $t$  – laiks, s;  
 $f$  – mikroviļņu frekvence, Hz.

Maksvela vienādojums var būt uzrakstīts šādā formā:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r}) - \epsilon_0 \mu_0 (2\pi f)^2 \epsilon_r \vec{E}(\vec{r}) = \vec{0}, \quad (2.23)$$

kur  $\epsilon_0$  – vakuuma caurlaidība, F/m;  
 $\mu_0$  – magnētiskā konstanta, H/m.

Šis kompleksais vienādojums tiek risināts skaitliski elektriskā lauka amplitūdām  $\vec{E}(\vec{r})$  attiecībā pret relatīvo caurlaidību  $\epsilon_r$ , kura dielektriskiem materiāliem, tādiem kā sveķu un šķiedru maisījums, ir kompleksā funkcija, kas atkarīga no frekvences  $f$ , temperatūras  $T$  un saistīšanās pakāpes  $\alpha$ :

$$\epsilon_r(f, T, \alpha) = \epsilon'(f, T, \alpha) - i\epsilon''(f, T, \alpha). \quad (2.24)$$

Tā var būt noteikta ar dobuma perturbācijas metodi [20] fiksētai frekvencei vai Korbino zondēšanas mērījumiem [6], [7] mainīgai frekvencei. Pēc vienādojuma (2.23) skaitliskā atrisinājuma absorbēta mikroviļņu enerģija, kas ģenerēta ar dielektriskiem zudumiem, tiek atrasta kā rakstā [18]:

$$Q(\vec{r}) = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}(\vec{r})|^2. \quad (2.25)$$

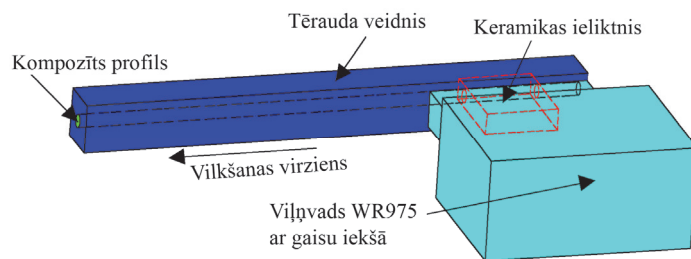
Zinot absorbētas enerģijas lauku  $Q$  kompozītā materiālā, var tikt izmantots termokīmiskais uzdevums, kas formulēts un atrisināts 2. nodaļā.

Lai demonstrētu izstrādātas metodoloģijas lietojumu tehnoloģiskā procesa projektēšanai, tika pētīta ar mikroviļņiem veicināta 16 mm diametra cilindriskā stieņa no stikla šķiedrām *Unifilo 4800 tex* un poliestera sveķiem *POLRES 305BV* pultrūzija.

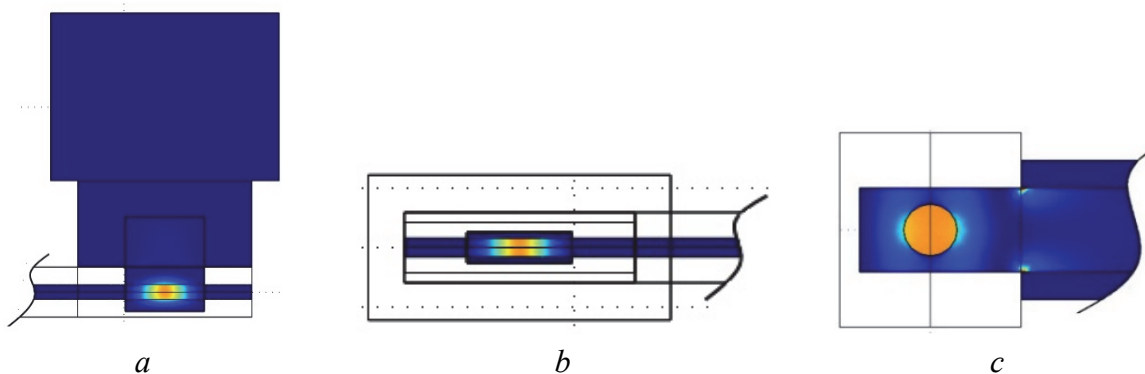
Šajā gadījumā pamata modelim ir nepieciešams nodrošināt simetrisku cilindrisku lauka sadalījumu ar elektriskā lauka maksimumu, kas pārklāj izstrādājuma diametru. Mikroviļņu sistēmas centrālā sastāvdaļa ir keramikas ( $ZrO_2$ ) ieliktnis ar 16 mm caurumu, kas tiks ielikts tērauda veidnī. Galvenais mērķis ir, lai mikroviļņu lauks caurumā un, respektīvi, profilā, kas tiek vilkts caur caurumu, būtu maksimāli homogēns. Tika izmantoti magnetrons ar frekvenci 915 MHz un viļņvads WR 975.

2.10. att. ir parādīta elektromagnētiskā modeļa shēma mikroviļņu pultrūzijai ar keramikas ieliktni un mikroviļņu virzīšanu keramiskajā daļā ar viļņvadu.

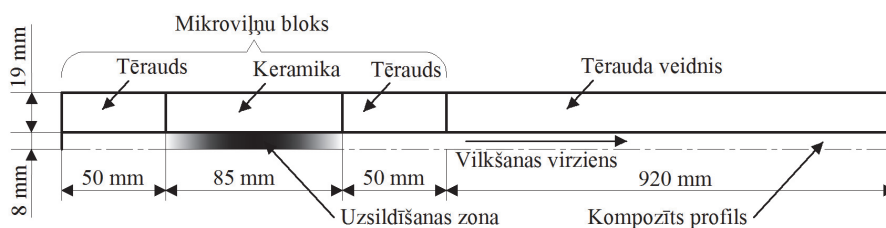
2.11. att. ir parādīti absorbcijas lauka  $Q$  sadalījumi. 2.11. a un 2.11. b att. rāda, ka profils tiek sildīts tikai keramikas ieliktnī. Pultrūzijas veidnis un viļņvads netiek sildīti. Keramikas ieliktna ārpusē mikroviļņu lauks ir tuvs nullei. 2.11. c att. rāda lauka sadalījumu veidņa un viļņvada griezumā. Absorbcijas lauks ir vienmērīgi koncentrēts stienī. Neliels papildu sildīšanas efekts ir novērojams keramikas ieliktnī.



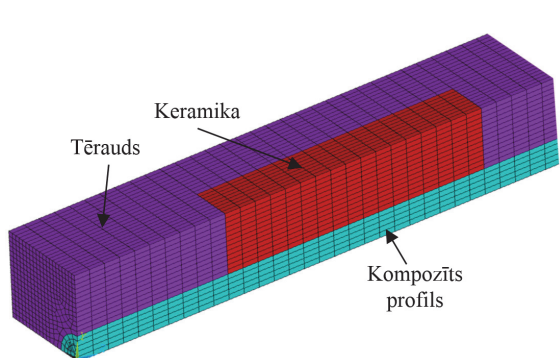
2.10. att. Elektromagnētiskā modeļa shēma.



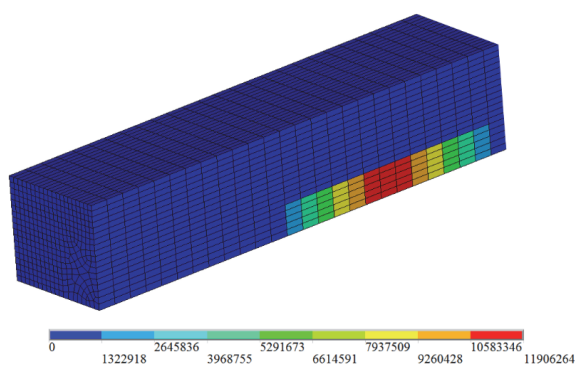
2.11. att. Elektriskā lauka sadalījums: skats no augšas (a); skats no sāna (b); šķērsgriezums (c).



2.12. att. Progresīvā pultrūzijas veidņa shēma.



2.13. att. Galīgo elementu modeļa fragments.



2.14. att. Absorbcijas enerģijas lauka simulācija pultrūdējamā profilā.

2.4. tabula

### Pultrūzijas procesa parametri

Nosaukums, mērvienība	Vērtība
Istabas un sveķu temperatūra tvertnē, °C	17 vai 27, vai 37
Vilkšanas ātrums, cm/min	18 vai 12, vai 6

Progresīvs pultrūzijas veidnis sastāv no mikroviļņu bloka ar keramikas ielikti, izvietotu pirms tērauda veidņa. (2.12. att.). Attiecīgā galīgo elementu modeļa fragments ir parādīts 2.13. att. Sildīšana tiek modelēta tikai kompozītā materiālā keramikas ieliktnā ietvaros. Simulēts absorbcijas enerģijas lauks ir parādīts 2.14. att. Ir svarīgi atzīmēt, ka temperatūras kontrole netika izmantota, enerģijas avots darbojās nepārtraukti. Pultrūzijas procesa parametri ir doti 2.4. tabulā.

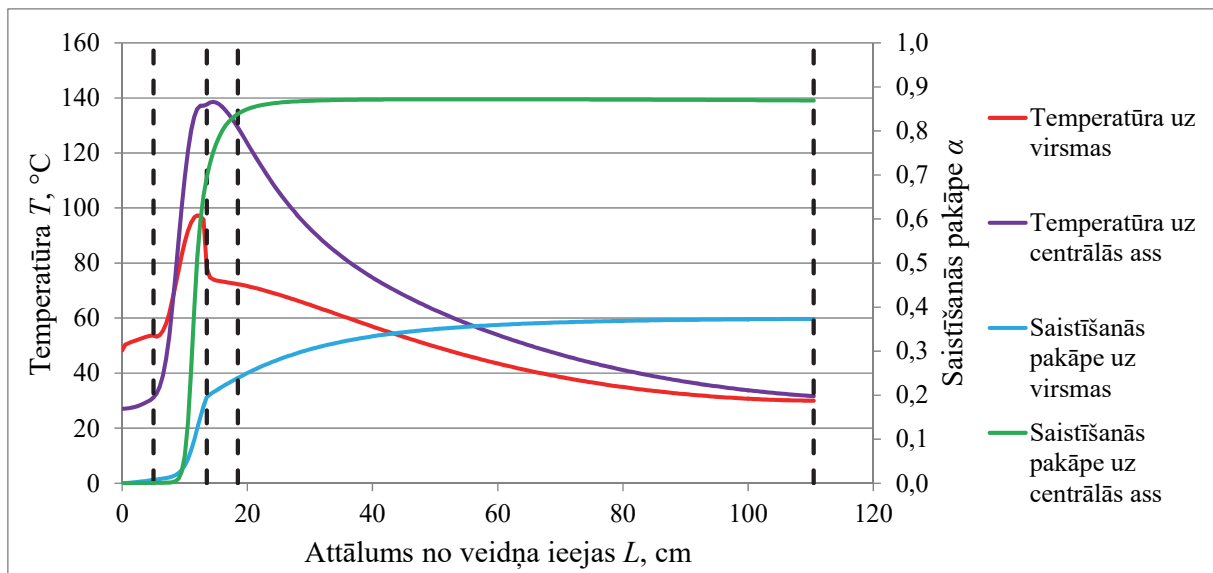
Sveķu reakcijas ātrums ir aprakstīts ar Kamala-Souroura saistīšanās kinētikas modeli (vienādojums (2.15) ar 2.2. tabulā dotiem parametriem). Lai uzlabotu sveķu mikroviļņu absorbcijas īpašības, tiem tika pievienota pildviela *Martinal* daudzumā 20 % no sveķu svara.

Simulācijas rezultāti, temperatūra un saistīšanās pakāpe gar profila centrālo asi un virsmu, laikiem 50 min no procesa sākuma istabas temperatūrai 27 °C un vilkšanas ātrumam 12 cm/min ir parādīti 2.15. att. Ir redzams, ka atšķirībā no tradicionālā pultrūzijas procesa tagad saistīšanās pakāpe uz profila centrālās ass pieaug daudz ātrāk nekā uz virsmas. Augstas saistīšanās pakāpes vērtības uz centrālās ass tiek sasniegtas tērauda veidņa sākumā vilkšanas ātrumam 18 cm/min un istabas temperatūrai 37 °C. Savukārt pilna saistīšanās uz profila centrālās ass tiek sasniegta keramikas ieliktnī pultrūzijas procesos ar ātrumu 6 cm/min un visām analizētām istabas temperatūrām. Tomēr saistīšanās pakāpe uz profila virsmas nesasniedz augstas vērtības visās analizējamās istabas temperatūru un vilkšanas ātrumu kombinācijās.

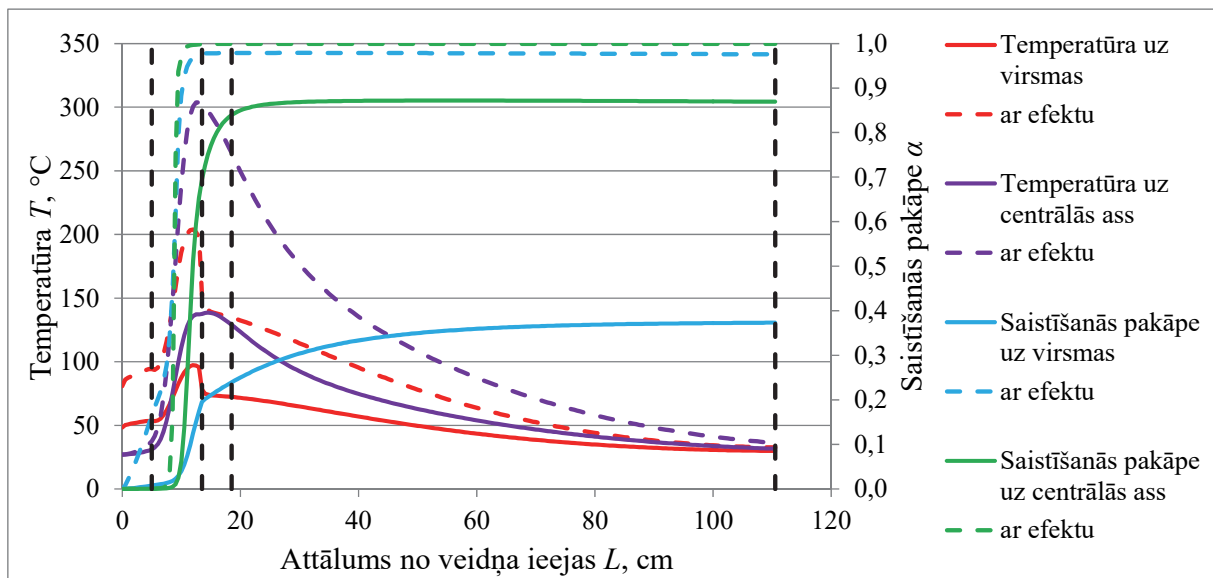
Lai iegūtu augstākas saistīšanās pakāpes vērtības uz profila virsmas un palielinātu vilkšanas ātrumu, tādējādi uzlabojot pultrūzijas procesa efektivitāti, tika analizēta šādu parametru ietekme uz pultrūzijas procesu:

- veidņa garuma samazināšana divas reizes;
- siltumizolācijas uzklāšana uz visām progresīvā pultrūzijas veidņa ārējām virsmām (tērauda veidņa un mikroviļņu bloka);
- tērauda veidņa priekšsildīšana (bez mikroviļņu bloka) līdz vienmērīgai temperatūrai 60 °C pirms pultrūzijas procesa sākuma;
- sveķu trauka (kompozīta) sildīšana līdz temperatūrai 50 °C visā pultrūzijas procesa garumā.

Analizējamo faktoru ietekme tika pētīta pultrūzijas procesam ar istabas temperatūru 27 °C un vilkšanas ātrumu 12 cm/min. Tika parādīts, ka tērauda veidņa garuma samazināšana neietekmē saistīšanās pakāpi uz profila virsmas. Tomēr kāda svarīga parametra pasliktināšanās arī netika noteikta. Tika parādīts, ka siltumizolācijas uzklāšana uz visām veidņa ārējām virsmām palielināja saistīšanās pakāpi uz profila virsmas par 36 %, kā arī, ka ar veidņa priekšsildīšanu pirms procesa sākumam līdz 60 °C ir iespējams palielināt saistīšanās pakāpes vērtību uz profila virsmas par 29 %. Sveķu trauka sildīšana visā procesa garumā palielināja saistīšanās pakāpi uz profila virsmas par 44 %, ko var izmantot progresīvo pultrūzijas veidņu projektēšanā. Tomēr ir nepieciešams atzīmēt, ka procesa efektivitāte šajā gadījumā var būt mazāka, jo sveķu trauka sildīšana notiek procesa visā garumā.



2.15. att. Temperatūra un saistīšanās pakāpe gar profila centrālo asi un virsmu istabas temperatūrai 27 °C un vilkšanas ātrumam 12 cm/min.



2.16. att. Temperatūra un saistīšanās pakāpe gar profila centrālo asi un virsmu ar absorbcijas enerģijas lauka intensitātes koeficientu 2,5.

Papildus tika analizēts divu faktoru ar vislielāko ietekmi uz saistīšanās pakāpi uz profila virsmas – tērauda veidņa priekšsildīšanas līdz 60 °C un tā siltumizolācijas – kopējais iespaids. Tika parādīts, ka tādā veidā saistīšanās pakāpi uz profila virsmas var palielināt par 79 %. Jāatzīmē, ka divu faktoru kopējais efekts (79 %) ir lielāks nekā summēti atsevišķie efekti (65 %).

Lai progresīvajā pultrūzijas veidnī sasniegtu lielāku saistīšanās pakāpi uz profila virsmas, tika analizēts absorbcijas enerģijas lauka jaudas palielināšanas iespaids. Jāatzīmē, ka absorbcijas enerģijas lauka sadalījums kompozīta profilā nemainās, ja tā jaudu proporcionāli palielina 1,5, 2,0 un 2,5 reizēs. 2.16. att. ir parādīts, ka augstas saistīšanās pakāpes vērtības uz profila virsmas var būt sasniegtas uzreiz mikroviļņu bloka keramikas ieliktnī. Tomēr nepieciešams atzīmēt, ka materiāla temperatūra šajā gadījumā var būt augstāka par pieļaujamo.

Lai izvairītos no sveķu pārkaršanas, ir nepieciešams palielināt vilkšanas ātrumu, kas arī ievērojami paaugstinās ar mikroviļņiem veicināta pultrūzijas procesa efektivitāti.

## 2.6. Daudzfunkcionālā pultrūzijas veidņa modelēšana

Daudzfunkcionālā veidņa galvenā ideja ir apvienot vienā pultrūzijas veidnī profila saistīšanu un pārklājuma uzklāšanu. Šis progresīvais process ļauj ievērojami samazināt ražošanas soļu skaitu (1.2. un 1.3. att.). Process raksturojams ar viegli gaistošo vielu un mazu daļiņu emisijas neesamību. Piedāvātajam procesam ir arī mazākas personāla un procesa izmaksas. Papildu ieguvums ir ekstraordinārā adhēzija starp profilu un pārklājumu, kas tiek sasniegta ar pārklājuma saistīšanu uz nepilnīgi saistīta profila. Labai adhēzijai starp profilu un pārklājumu ir nepieciešama profila virsmas saistīšanās robežās no 0,75 līdz 0,85. Daudzfunkcionālā veidņa shēma ir dota 1.4. att. Pēc pārklājuma uznešanas profila sveķi tiek pilnīgi saistīti kopā ar pārklājumu.

Profila sveķi tiek saistīti ar mikroviļņiem, tāpēc profils tiek sasildīts no centra uz virsmu, un saistīšanās reakcija arī sākas no centra. Saistīšanās reakcija ir eksotermiska, tāpēc teorētiski ir iespējams saistīt profila virsmu un pārklājumu ar eksotermisku siltumu, kas akumulēts profilā. Pārklājuma injicēšanas kamerai jābūt izvietotai maksimāli tuvu mikroviļņu blokam, jo profila temperatūra pēc sildīšanas zonas strauji krīt.

Iespēja saistīt pārklājumu ar mikroviļņiem ģenerēto siltumu un profila sveķu eksotermisku reakciju ir novērtēta vilkšanas ātrumam 18 cm/min, istabas temperatūrai 27 °C un pieliktai mikroviļņu enerģijai 2,35 kW. Pārklājums tiek uzests 100 mm attālumā no mikroviļņu bloka (2.17. att.). Pārklājuma materiāls ir epoksīds *RESOLTECH RESOLCOAT 2010 FGCS*. Pārklājuma slāņa biezums – 0,5 mm. Pirms injicēšanas pārklājums tiek sildīts līdz temperatūrai 50 °C.

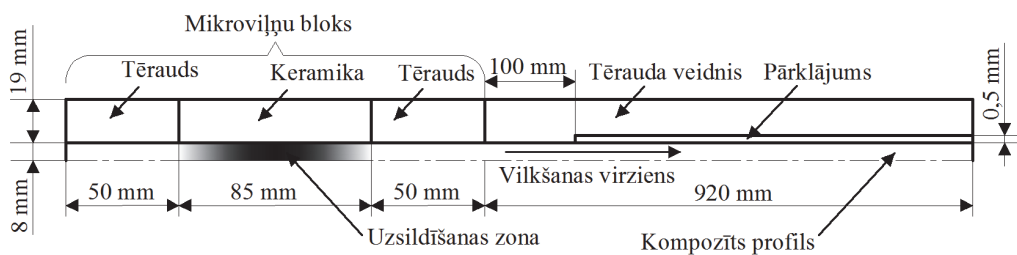
Veiktās simulācijas rezultāti, temperatūra un saistīšanās pakāpe uz profila centrālās ass un virsmas, kā arī uz pārklājuma iekšējās, vidus un ārējās virsmas laikiem 50 min no pultrūzijas procesa sākuma ir doti 2.18. att.

Uz profila centrālās ass augsta saistīšanās pakāpe ( $\alpha \geq 0,95$ ) ir sasniegta tērauda veidņa sākumā uzreiz aiz mikroviļņu bloka. Saistīšanās pakāpe uz profila virsmas aiz mikroviļņu bloka ir vienāda ar paredzēto vērtību 0,8 (labai adhēzijai ar pārklājumu). 2.18. att. ir redzams, ka pārklājums nav pilnīgi saistīts. Saistīšanās pakāpe uz iekšējās virsmas ir 0,31, bet uz ārējās – tikai 0,24.

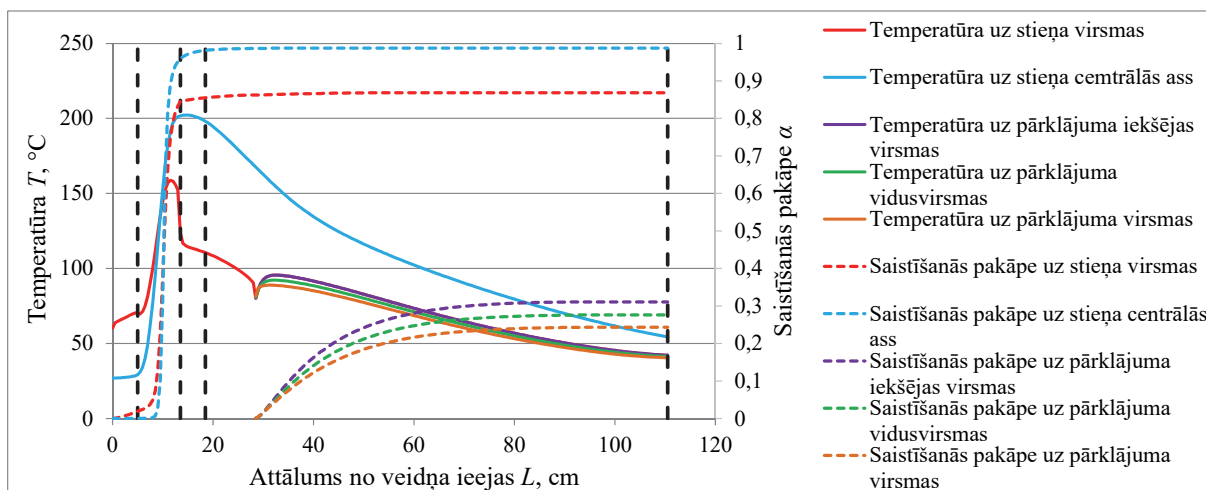
Lai iegūtu augstākas saistīšanās pakāpes vērtības pārklājumā, tika analizēta šādu parametru ietekme uz pultrūzijas procesu:

- siltumizolācijas uzklāšana uz visām progresīvā pultrūzijas veidņa ārējām virsmām (tērauda veidņa un mikroviļņu bloka);
- tērauda veidņa priekšsildīšana (bez mikroviļņu bloka) līdz vienmērīgai temperatūrai 60 °C pirms pultrūzijas procesa sākuma;
- siltumizolācijas un priekšsildīšanas vienlaikus izmantošana.

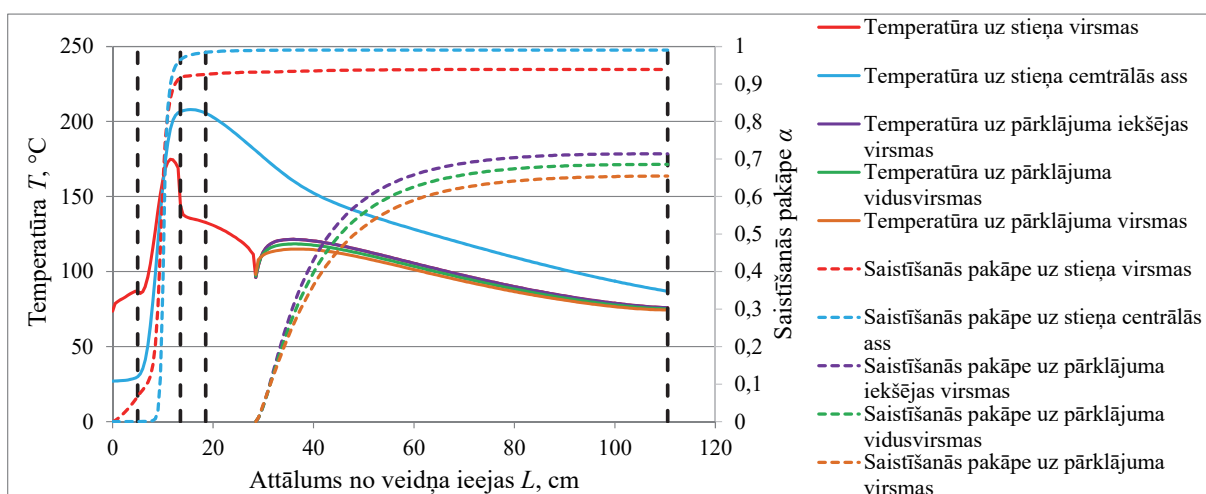




2.17. att. Simulējamais apgabals.



2.18. att. Temperatūras un saistīšanās pakāpes profilā un pārklājumā.



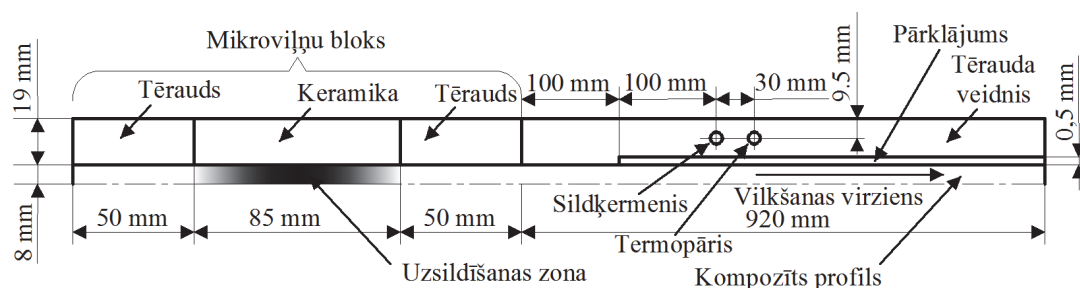
2.19. att. Temperatūras un saistīšanās pakāpes profilā un pārklājumā pie veidņa priekšsildīšanas un siltumizolācijas.

Tika parādīts, ka siltumizolācijas uzklāšana un veidņa priekšsildīšana paaugstina pārklājuma saistīšanās pakāpi, bet pilnīgu saistīšanu nedod (2.19. att.). Ir svarīgi arī atzīmēt, ka šajā gadījumā saistīšanās pakāpe uz profila virsmas pārklājuma injicēšanas vietā palielinājās no 0,85 līdz 0,9, tātad ir nepieciešamas samazināt pielikto mikroviļņu enerģiju. Mikroviļņu enerģijas samazināšana ir vajadzīga arī tādēļ, ka profila sveķi ir pārkarsti (maksimālā temperatūra ir 210 °C, bet pieļaujamā ir 190 °C).

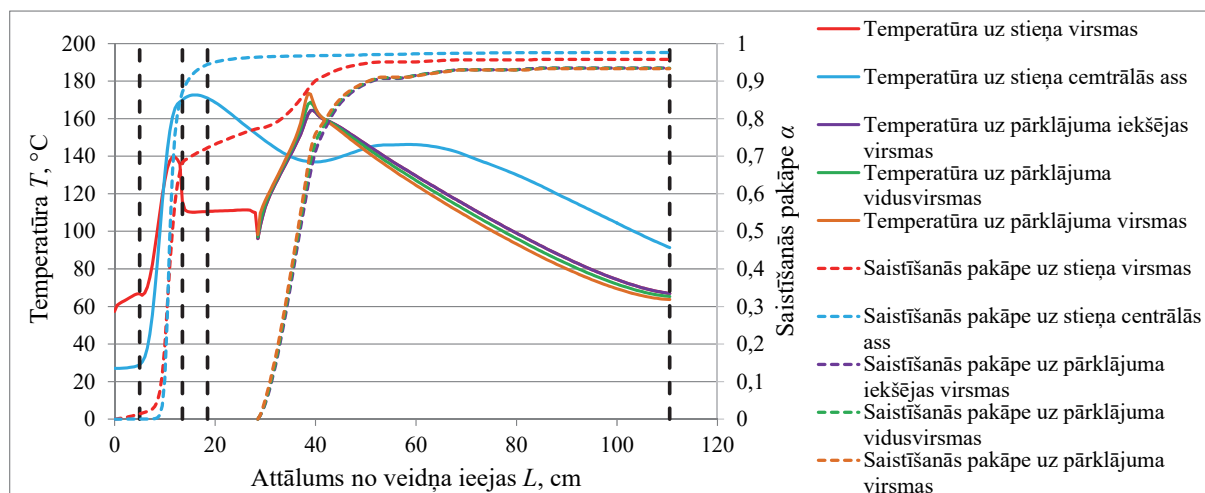
Iegūtie rezultāti rāda, ka pārklājuma pilnīga saistīšana tikai ar mikroviļņu sildīšanu nav iespējama un ir nepieciešami papildu elektriskie sildķermeņi.

Lai novērtētu elektrisko sildķermeņu izmantošanu kā sekundārus siltuma avotus, daudzfunkcionālajā pultrūzijas veidnī 100 mm attālumā no pārklājuma injicēšanas punkta tika ieviesti divi elektriski sildķermeņi ar jaudu 315 W un ar termopāri kontrolējamo temperatūru 160 °C. Vilkšanas ātrums un istabas temperatūra ir tādas pašas kā iepriekšējā piemērā ( $V = 18 \text{ cm/min}$ ,  $T_{\text{room}} = 27 \text{ °C}$ ), bet pieliktā mikroviļņu enerģija ir samazināta līdz 1,9 kW, lai izvairītos no sveķu pārkaršanās. Simulējamā apgabala shēma ir parādīta 2.20. att. Simulācijas rezultāti laikam 50 min no procesa sākuma ir doti 2.21. att.

Profila un pārklājuma sveķi tagad nav pārkaršēti. Sveķi uz profila centrālās ass ir gandrīz pilnīgi saistīti mikroviļņu blokā. Saistīšanās pakāpe uz profila virsmas pārklājuma uznešanas vietā ir 0,78, kas ir nepieciešams labai adhēzijai starp profilu un pārklājumu. Elektrisko sildķermeņu ģenerēta enerģija ir pietiekama profila virsmas ( $\alpha = 0,96$ ) un pārklājuma ( $\alpha = 0,93$ ) sveķu saistīšanai. Simulācijas rezultāti viennozīmīgi rāda, ka ir iespējams iegūt pilnīgi saistītu profilu ar pārklājumu.



2.20. att. Simulējamais apgabals.



2.21. att. Temperatūras un saistīšanās pakāpes profils un pārklājumā. Sildīšana: MV un divi elektriskie sildķermeņi. Kontroles temperatūra: 160 °C.

## 2.7. Ar mikroviļņiem veicināta pultrūzijas procesa optimizācija daudzfunkcionālajām veidnīm

Risināmās skaitliskās problēmas lielā izmēra dēļ ir izstrādāta optimizācijas metodoloģija, kas izmanto eksperimentu plānošanas [24] un atbildes virsmu [17] metodes. Šī metodoloģija ir matemātikas un statistikas metožu kopojums, kas ir noderīgs problēmu, kurās atbilde ar atkarīga no vairākiem mainīgiem un mērķis ir optimizēt šo atbildi, modelēšanai un analīzei.

Optimizācijas inženiermetodika, kuras pamatā ir eksperimentu plānošanas un atbildes virsmu metodoloģija, parādīta 2.22. att.

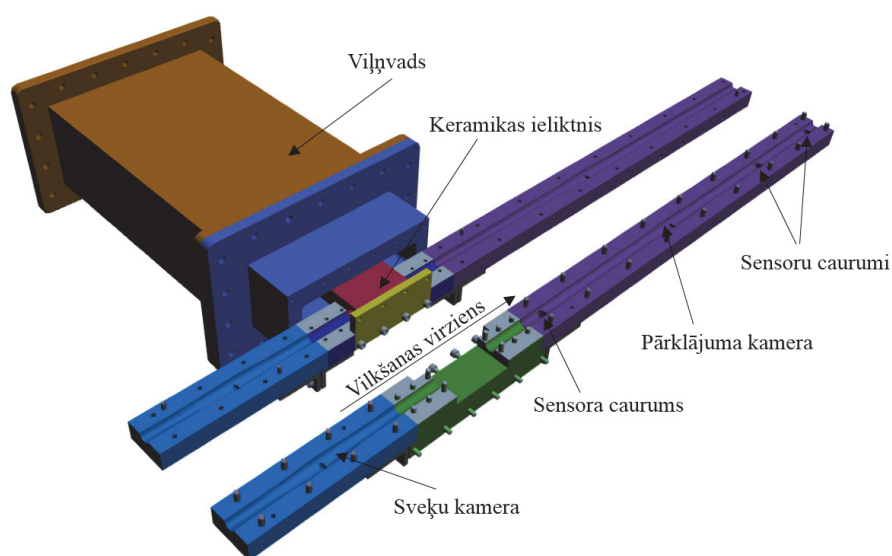
Pultrūzijas procesa parametru optimizācija ir veikta apaļa stieņa profilam ar diametru 16 mm, kas izveidots no stikla šķiedrām *Unfilo 4800 tex* (ar masas daļu 70 %) un poliestera sveķiem *POLRES 305BV*. Pildviela *Martinal* ir pielikta sveķiem ar masas daļu 20 %, lai palielinātu to mikroviļņu enerģijas absorbcijas īpašības. Profils ir pārklāts ar epoksīda pārklājumu *RESOLTECH RESOLCOAT 2010 FGCS* tajā pašā pultrūzijas veidnī. Pārklājuma slāņa biezums ir 0,5 mm.

Pultrūzijas iekārtas shēma ir attēlota 2.23. att. Veidnis ir veidots no tērauda *40Cr*. Sausas šķiedras tiek ievadītas veidnī un piesātinātas ar sveķiem sveķu kamerā, veidojot kompozītu profilu. Sveķi tiek daļēji saistīti, lai iegūtu uz virsmas saistīšanās pakāpi  $\alpha =$  no 0,75 līdz 0,85, kas ir vajadzīgs labai adhēzijai starp profilu un pārklājumu. Tad profils tiek vilkts caur pārklājuma kameru, kur tiek uznesss pārklājums. Pēc tam profils un pārklājums tiek sildīti ar astoņiem elektriskiem sildķermeņiem, kas iedalīti divās grupās un tiek kontrolēti ar PID kontrolieri un termopāriem, izvietotiem blakus sildķermeņiem. Katra sildķermeņa elektriskā jauda ir 315 W. Veidnī ir izveidoti trīs caurumi *Optimold* sistēmas [10] sensoru izvietošanai, kas nolasa velkamā profila temperatūru un saistīšanās pakāpi reālajā laikā.

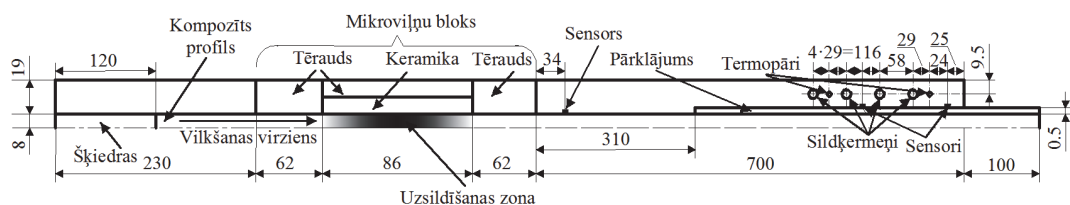


2.22. att. Optimizācijas process.

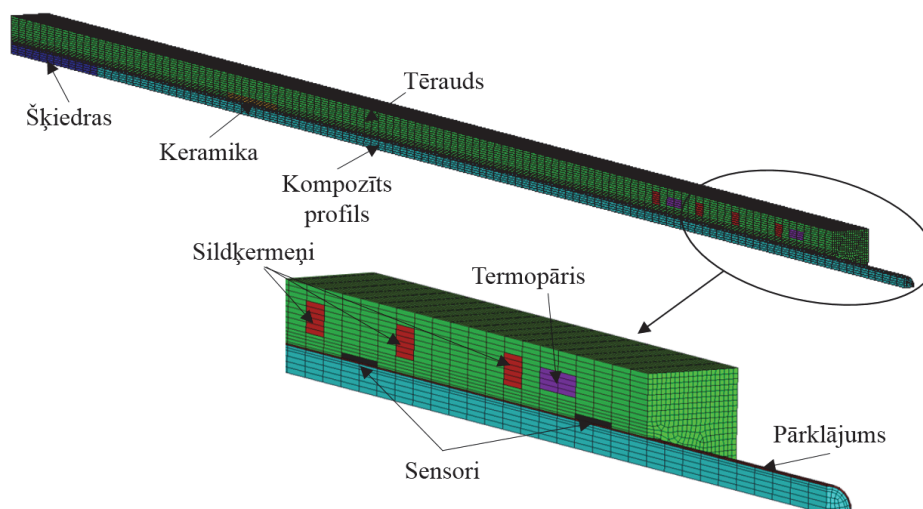
Simulējamā apgabala shēma ir dota 2.24. att. Atbilstošs galīgo elementu modelis, izveidots *ANSYS Mechanical* vidē, izmantojot 3-D termiskus galīgus elementus *Solid 70*, – 2.25. att., izmantojot simulējamā apgabala simetriju, tika modelēta progresīvā pultrūzijas veidņa viena ceturtā daļa.



2.23. att. Pultrūzijas iekārtas shēma.



2.24. att. Simulējamais apgabals.



2.25. att. Simulējamā apgabala galīgo elementu modelis.

Optimizācijas mērķis ir minimizēt enerģijas daudzumu (kWh) pret pārklāta pultrūdēta profila vienu metru:

$$\frac{W_{mw} + nW_{heater}k_t}{V_{pull}} \rightarrow \min, \quad (2.26)$$

kur  $W_{mw}$  – pieliktā mikroviļņu enerģija, kW;

$W_{heater}$  – elektrisko sildķermeņu jauda, kW;

$n$  – elektrisko sildķermeņu skaits;

$V_{pull}$  – vilkšanas ātrums, m/h;

$k_t$  – elektrisko sildķermeņu relatīvais darba laiks simulācijas laikā:

$$k_t = \frac{T_{work}}{T_{sim}}, \quad (2.27)$$

kur  $T_{work}$  – sildķermeņu darba laiks, h;

$T_{sim}$  – simulācijas kopējais laiks, h.

Daži procesa parametri, elektrisko sildķermeņu jauda un skaits, kā arī pārklājuma priekšsildīšanas temperatūra, ir fiksēti. To vērtības ir dotas 2.5. tabulā. Tehnoloģiskā procesa maināmo parametru apakšējās un augšējās robežas arī ir dotas 2.5. tabulā.

Optimizācijas procedūrā ir ievadīti ierobežojumi ar mērķi nodrošināt veidojamā profila kvalitāti – profila un pārklājuma sveķiem veidņa izejā jābūt pilnīgi saistītiem, kā arī procesa gaitā materiāli nedrīkst būt pārkarsti. Procesas ierobežojumi ir apkopoti 2.6. tabulā.

Ir zināms, ka, ja globālām aproksimācijām tiek plānots izmantot otrās pakāpes polinoma funkcijas, *D-Optimal* eksperimentu plāns ir vispiemērotākais [4]. Minimāls plāna punktu skaits šajā gadījumā tiek noteikts kā  $n = (k+1)(k+2)/2$ , kur  $k$  ir maināmo parametru skaits. Ir pieņemts izmantot divreiz lielāku punktu skaitu, tāpēc tika lietoti 30 eksperimenta punkti. *D-Optimal* eksperimentu plāns tika ģenerēts ar *EDAOpt* programmatūru [3].

2.5. tabula

Pultrūzijas procesa nemainīgie un mainīgie parametri

	Nemainīgs	Min. vērtība	Maks. vērtība
Pārklājuma priekšsildīšanas temperatūra, °C	50	–	–
Elektrisko sildķermeņu jauda, W	315	–	–
Elektrisko sildķermeņu skaits	8	–	–
Vilkšanas ātrums, cm/min	–	30	100
Istabas un sveķu temperatūra, °C	–	12	40
Pieliktā mikroviļņu enerģija, kW	–	2	6
Elektrisko sildķermeņu kontroles temperatūra, °C	–	70	150

2.6. tabula

Pultrūzijas procesa ierobežojumi

	Min. vērtība	Maks. vērtība
Temperatūra profilā, °C	–	190
Temperatūra pārklājumā, °C	–	250
Saistīšanās pakāpe veidņa izejā	0,93	–
Saistīšanās pakāpe pārklājuma injicēšanas vietā	0,75	0,85

2.7. tabula

Aproksimāciju standartnovirzes un relatīvās kļūdas

Simbols, vienība	Aproksimācija, izmantojot visus plāna punktus		Izslēgtu plāna punktu skaits	Aproksimācija pēc plāna punktu izslēgšanas	
	$\sigma_{err}^0$	$\Delta$ , %		$\sigma_{err}^0$	$\Delta$ , %
$T_{cent}$ , °C	8,898	15,8	2	5,516	6,2
$\alpha_{cent}$	0,0929	479,7	6	0,0349	8,2
$T_{surf}$ , °C	5,446	8,7	0	–	–
$\alpha_{surf}$	0,0372	16,2	6	0,0317	10,1
$\alpha_{coat\ inject}$	0,0826	1955,9	8	0,0164	10,1
$T_{coat}$ , °C	1,822	2,4	0	–	–
$\alpha_{coat}$	0,0230	34,2	7	0,0128	4,9
$k_t$	0,00301	10,0	0	–	–

Pēc katrā no 30 punktiem veiktiem galīgo elementu aprēķiniem to rezultātiem ir iegūtas otrās pakāpes polinoma funkciju aproksimācijas, lietojot mazāko kvadrātu metodi. Praktiskā pieredze rāda, ka otrās pakāpes modeļi ir vispiemērotākie reālo atbildes virsmu problēmu risināšanai [17].

Tika iegūtas šādas uzvedības funkcijas: maksimālā pārklājuma ( $T_{\text{coat}}$ ), profila virsmas ( $T_{\text{surf}}$ ) un centrālās ass ( $T_{\text{cent}}$ ) temperatūras, saistīšanās pakāpe veidņa izejā pārklājumā ( $\alpha_{\text{coat}}$ ), uz profila virsmas ( $\alpha_{\text{surf}}$ ) un centrālās ass ( $\alpha_{\text{cent}}$ ), un uz profila virsmas pārklājuma injicēšanas vietā ( $\alpha_{\text{coat inject}}$ ), kā arī sildķermeņu relatīvais darba laiks ( $k_t$ ). Ir nepieciešmas atzīmēt, ka tikai  $k_t$  aproksimācija tieši ietilpst mērķa funkcijā (vienādojums (2.26)). Temperatūru un saistīšanās pakāpju aproksimācijas tiek izmantotas kā ierobežojumi optimizācijas procesā.

Aproksimācijas funkciju, kas iegūta, izmantojot visus plāna punktus, standartnovirzes  $\sigma_{\text{err}}^0$  un maksimālās relatīvās kļūdas  $\Delta$  ir dotas 2.7. tabulā. 2.7. tabulā ir redzams, ka aproksimāciju relatīvās kļūdas ir lielas (kolonna  $\Delta$ ), īpaši punktiem ar zemām kompozīta materiāla saistīšanās pakāpēm un temperatūrām. Šie punkti ir ārpus intereses loka, tāpēc tos ir iespējams izslēgt no aproksimācijām, tādējādi palielinot aproksimāciju precizitātes un sašaurinot meklēšanas apgabala robežas. Ir svarīgi atzīmēt, ka no eksperimenta plāna tika izslēgti ne vairāk par astoņiem punktiem. Tie ir punkti ar saistīšanās pakāpēm, kas zemākas par 0,25, un maksimālām temperatūrām kompozīta materiālā, kas zemākas par 60 °C. Jauno aproksimācijas funkciju relatīvās kļūdas ir dotas 2.7. tabulas  $\Delta_1$  kolonnā. Ir redzams, ka dažu ārpus interesēm esošu punktu izslēgšana ļauj ievērojami paaugstināt aproksimāciju precizitāti. Maksimālā aproksimāciju relatīvā kļūda tagad nepārsniedz 10 %.

Ņemot vērā visus ar aproksimācijas funkcijām izteiktos ierobežojumus, tika atrasts mērķa funkcijas (vienādojums (2.26)) minimums. Tam ir lietotas divas metodes: gadījuma meklēšanas (GM) metodes jaunā versija [11], izmantota *EDAOpt* optimizācijas programmatūrā [3], un vispārināta samazināta gradienta (VSG) algoritmu [13], lietu *Microsoft Excel*.

Enerģijas patēriņa minimizācijas ar VSD metodi rezultāti ir doti 2.26. att. Atbilstošie rezultāti, iegūtie ar GM metodi, ir doti 2.27. att. Redzama atšķirība starp rezultātiem, iegūtiem ar dažādām metodēm, netika konstatēta. Atbildes funkcijas tika izmantotas oriģinālo funkciju vietā, tāpēc optimālais rezultāts tika pārbaudīts ar galīgo elementu aprēķinu *ANSYS Mechanical* vidē. Ir novērojama laba rezultātu sakritība (2.8. tabula).

Kā ir redzams 2.26. un 2.27. att., profila materiāls ir pilnīgi saistīts (saistīšanās pakāpe lielāka par 0,95), savukārt pārklājuma materiāls nav pilnīgi saistīts (saistīšanās pakāpe 0,93). Tajā pat laikā sildķermeņu kontroles temperatūra tuvojas domēna augšējai robežai (150 °C), bet vilšanas ātrums – apakšējai (30 cm/min). Pārklājuma saistīšanās pakāpe ir atkarīga no vilšanas ātruma un sildķermeņu temperatūras, tāpēc optimizācijas problēmā praktiski nav iespējams iegūt tās augstāku vērtību bez attiecīga domēna izmaiņas. Ņemot vērā to, ka maksimālā pārklājuma temperatūra (158,4 °C) ir daudz mazāka par pieļaujamo (250 °C) un maksimālā temperatūra uz profila virsmas (163,2 °C) arī ir mazāka par pieļaujamo temperatūru (190 °C), ir nepieciešams palielināt sildķermeņu kontroles temperatūru, ko tehnoloģiski ir iespējams veikt.

Sildķermeņu kontroles temperatūras maksimālā vērtība tika palielināta no 150 °C līdz 170 °C. Lai izvairītos no jaunā eksperimentu plāna ģenerēšanas un laiktelpīgiem galīgo elementu aprēķiniem katrā plāna punktā, tika veiktas aproksimāciju ekstrapolācijas, kā parādīts 2.28. att. Svarīgi atzīmēt, ka saistīšanās pakāpes vērtības tika ierobežotas ar 1,0. Aproksimācijas rezultāti modificētajā meklēšanas apgabalā doti 2.29. att.

Mainīgo parametru optimālās vērtības kopā ar atbilstošām ierobežojumu un mērķa funkcijas vērtībām, iegūtām ar aproksimācijām un validētām ar *ANSYS Mechanical* stimulācijām optimālajos punktos, ir dotas 2.8. tabulā, kurā visu ierobežojumu un mērķa funkcijas relatīvās kļūdas liecina par veiktās optimizācijas augstu precizitāti.

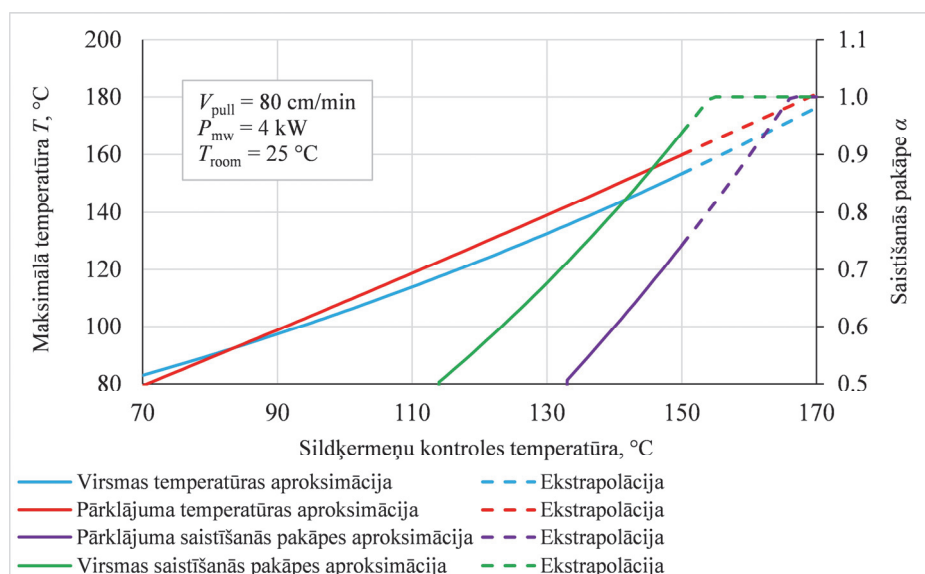
Izmantojot optimizācijas rezultātus, tika izstrādāts *Microsoft Excel* rīks ar mikroviļņiem veicinātu pultrūzijas procesu ar *in-line* pārklājuma tehnoloģiju efektīvai projektēšanai. Tā izmantošanas piemērs, optimālie projektēšanas parametri un attiecīgas ierobežojumu vērtības 20 °C istabas temperatūrai, doti 2.30. att.

	Pull speed, cm/min	Room and resin temperature, °C	MW Power, kW	Heaters control temperature, °C	Maximal temperature at centerline, °C	Degree of cure at centerline	Maximal temperature at profile surface, °C	Degree of cure at profile surface	Degree of cure on profile surface at coating injection point	Maximal temperature in coating, °C	Degree of cure in coating	Relative time of heaters work $k_t$	Energy consumption, kWh/m
Optimal	31.0	21.3	3.42	150.0	185.68	0.99	163.15	0.98	0.75	158.43	0.93	0.139	0.203
min	30	12	2	70		0.93		0.93	0.75		0.93		
max	100	40	6	150	190		190		0.85	250			

2.26. att. Optimālie rezultāti iegūtie ar VSG metodi.

Optimization: COALINE_elimination.prj											
Criterion: $1.6667 \cdot X_3 + 0.315 \cdot Y_8 \cdot X_1$ = 0.202749993509009											
Indices No	Min	Type	Max	Criterion=	0.20274999						
1) X1:	30	0	100	1) X1=	30.656118						
2) X2:	12	0	40	2) X2=	22.015749						
3) X3:	2	0	6	3) X3=	3.3816248						
4) X4:	70	0	150	4) X4=	150						
5) Y1:	0	2	190	5) Y1=	186.16949						
6) Y2:	0.93	1	2	6) Y2=	0.99593112						
7) Y3:	0	1	190	7) Y3=	163.64049						
8) Y4:	0.93	1	2	8) Y4=	0.97614721						
9) Y5:	0.75	1	0.85	9) Y5=	0.75000132						
10) Y6:	0	1	250	10) Y6=	158.5069						
11) Y7:	0.93	1	2	11) Y7=	0.93000024						
12) Y8:	0	0	1	12) Y8=	0.13794337						

2.27. att. Optimālie rezultāti, kas iegūti ar GM metodi.



2.28. att. Aproksimētas un ekstrapolētas temperatūras un saistīšanās pakāpes atkarības no sildķermeņu kontroles temperatūrām.

	Pull speed, cm/min	Room and resin temperature, °C	MW Power, kW	Heaters control temperature, °C	Maximal temperature at centerline, °C	Degree of cure at centerline	Maximal temperature at profile surface, °C	Degree of cure at profile surface	Degree of cure on profile surface at coating injection point	Maximal temperature in coating, °C	Degree of cure in coating	Relative time of heaters work $k_t$	Energy consumption, kWh/m
Optimal	63.9	40.0	4.98	169.2	165.33	0.93	166.38	1.00	0.75	176.24	1.00	0.153	0.140
min	30	12	2	70		0.93		0.93	0.75		0.93		
max	100	40	6	170	190		190		0.85	250			

2.29. att. Optimālie rezultāti, kas iegūti ar VSG metodi, modificētā meklēšanas apgalā.

2.8. tabula

### Optimālie rezultāti

	Simbols, vienība	Sākotnējais domēns			Modificēts domēns		
		Aproks.	<i>ANSYS</i>	$\Delta$ , %	Aproks.	<i>ANSYS</i>	$\Delta$ , %
Maināmie parametri	$V_{pull}$ , cm/min		31,0		64,0		
	$T_{room}$ , °C		21,3		40,0		
	$P_{mw}$ , kW		3,42		4,98		
	$T_{cont}$ , °C		150,0		169,3		
Ierobežojumi	$T_{cent}$ , °C	185,70	175,80	5,63	165,30	180,90	-8,62
	$\alpha_{cent}$	0,99	0,97	2,06	0,93	0,98	-5,10
	$T_{surf}$ , °C	163,20	155,10	5,22	166,40	177,00	-5,99
	$\alpha_{surf}$	0,98	0,94	4,26	1,00	0,95	5,26
	$\alpha_{coat}$ inject	0,75	0,69	8,70	0,75	0,77	-2,60
	$T_{coat}$ , °C	158,40	157,20	0,76	176,20	181,30	-2,81
	$\alpha_{coat}$	0,93	0,89	4,49	1,00	0,90	11,11
	$k_t$	0,139	0,141	-1,420	0,153	0,143	6,990
Mērķa funkcija, Wh/m	203	203	0,00	140	140	0,00	

	Pull speed, cm/min	Room and resin temperature, °C	MW Power, kW	Heaters control temperature, °C	Maximal temperature at centerline, °C	Degree of cure at centerline	Maximal temperature at profile surface, °C	Degree of cure at profile surface	Degree of cure on profile surface at coating injection point	Maximal temperature in coating, °C	Degree of cure in coating	Relative time of heaters work $k_t$	Energy consumption, kWh/m
Optimal	36.9	20.0	3.87	150.6	181.56	0.93	161.77	1.00	0.75	158.10	0.93	0.141	0.191
min	30	20	2	70		0.93		0.93	0.75		0.93		
max	100	20	6	170	190		190		0.85	250			

2.30. att. Optimālie rezultāti, kas iegūti ar VSG metodi, istabas temperatūrai 20 °C.

## 2.8. Secinājumi

1. Izstrādātas un veiksmīgi validētas skaitliskās metodes pultrūzijas procesu simulēšanai ir drošas un var būt izmantotas pultrūzijas procesu pētījumiem. Pirmā procedūra tika izstrādāta *ANSYS Mechanical* vidē un izmanto jaukto laika integrācijas shēmu un mezglu kontroles tilpumu metodi saistīto temperatūras un sveķu saistīšanās vienādojumu atdalīšanai. Otrā procedūra ir izstrādāta *ANSYS CFX* programmatūrā. Saistīšanās pakāpe ir ievadīta kā papildu mainīgais. Izstrādātas procedūras tika veiksmīgi validētas ar literatūrā aprakstītiem skaitliskiem un eksperimenta rezultātiem, kas dod iespēju salīdzināt izstrādātos algoritmus to lietojumā pultrūzijas procesu ar un bez temperatūras kontroles termokīmiskajai simulācijai, tādējādi nosakot to priekšrocības un ierobežojumus. Laba sakritība starp iegūtajiem galīgo elementu rezultātiem un literatūrā publicētiem rezultātiem, kā arī eksperimentu rezultātiem, tika novērota temperatūras un saistīšanās pakāpes laukiem visos testa uzdevumos, pētot



plakanas plāksnes, dubult-T profila un cilindriskā stieņa profilu pultrūziju. Neliela starpība tika novērota eksperimentāli mērītām un simulētām saistīšanās pakāpēm saistīšanās procesa sākumā, bet tā praktiski pazūd gandrīz saistītiem sveķiem.

2. Piedāvātā saistīšanās kinētikas izveidošanas metodoloģija tika veiksmīgi validēta epoksīda sveķiem, kas aprakstīti literatūrā. Labāka precizitāte tika iegūta ar Kamala-Souroura modeli. Izmantojot šo metodoloģiju, tika izveidots rīks *Microsoft Excel* vidē. Šis rīks tika veiksmīgi lietots saistīšanās kinētikas modeļu izveidošanai progresīvajos pultrūzijas procesos izmantošanai paredzētiem poliestera sveķiem un epoksīda pārklājumam ar augstām mikroviļņu absorbcijas īpašībām.
3. Izstrādāto pultrūzijas procesa simulēšanas algoritmu eksperimentālās validācijas gaitā tika parādīts, ka pārejoša procesa nosacījumi ir ļoti jutīgi pret izejas datu (procesa parametru) izmaiņām. Tika parādīta atbilstoša metodoloģija izejas datu koriģēšanai un to īsto vērtību noteikšanai, izmantojot eksperimenta rezultātus.
4. Progresīvo ar mikroviļņiem veicināto pultrūzijas procesu simulēšanai un pētīšanai tika izstrādāta jauna simulēšanas metodoloģija, kuras pamatā ir *COMSOL Multiphysics* un *ANSYS Mechanical* programmatūras. Progresīvā pultrūzijas veidņa projektēšanai tika noteikti ar mikroviļņiem veicināta pultrūzijas procesa parametri, kā arī temperatūras un saistīšanās pakāpes lauki kompozītā materiālā. Simulācijas rezultāti parādīja, ka izstrādātā tehnoloģija ļauj iegūt vienmērīgu kompozīta profila saistīšanās un augstas saistīšanās pakāpes vērtības. Lai palielinātu ar mikroviļņiem veicināta pultrūzijas procesa efektivitāti, papildus tika pētīta dažādu procesa parametru ietekme.
5. Tika parādīts, ka, ņemot vērā visus procesa nosacījumus un ierobežojumus, *in-line* pārklājuma tehnoloģijas gadījumā iegūt pilnīgu profila un pārklājuma sveķu saistīšanos, izmantojot tikai sildīšanu ar mikroviļņiem, nav iespējams. Pārklājuma saistīšanai pultrūzijās procesā nepieciešams ieviest papildu elektriskos sildķermeņus.
6. Tika parādīts, ka temperatūra un saistīšanās pakāpe ir ļoti jutīgas pret procesa parametru (vilkšanas ātrums, pieliktā enerģija, kontroles un istabas temperatūras) izmaiņām. Atbilstošo procesa parametru noteikšana ir iespējama tikai ar optimizācijas uzdevuma formulēšanu un atrisināšanu. Šis uzdevums tika veiksmīgi atrisināts ar mērķi noteikt minimālo enerģijas patēriņu. Izmantojot optimizācijas rezultātus, *Microsoft Excel* vidē tika izveidots rīks optimālo procesa nosacījumu noteikšanai atkarībā no izvēlētiem procesa parametriem.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Arkhangel'skii I.V., Dunaev A. V., Makarenko I. V., Tikhonov N. A., Belyaev S. S., Tarasov A. V. Non-isothermal kinetic methods. Workbook and laboratory manual. Berlin: Edition Open Access, 2013, 73 lpp.
- [2] ASTM E 698. Standard test method for Arrhenius kinetic constants for thermally unstable materials.
- [3] Auzins J., Janushevskis A., Janushevskis J., Skukis E. Software EDAOpt for Experimental Design, Analysis and Multi-Objective Robust Optimization. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimisation*, Kos Island, Greece, 2014, 23 lpp.
- [4] Auzins, J. Direct Optimization of Experimental Designs. In: *Proceedings of the 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Albany, USA, 2004, V. 274578, 12 lpp.
- [5] Chachad Y. R., Roux J. A., Vaughan J. G. Three-dimensional characterization of pultruded fiberglass-epoxy composite materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 14, lpp. 495–512, 1995.
- [6] Hewlett-Packard: Basics of measuring the dielectric properties of materials, Application Note 1217-1, Hewlett-Packard Co., 1992.
- [7] Hewlett-Packard: HP-Network Analyzer 8720 D + Dielectric Probe Kit 85070B: User's Manual, 1993.
- [8] Howald A.M. Meyer L.S. Shaft for Fishing Rods. US patent US2571717 A, 1951.
- [9] [http://www.lucintel.com/pultrusion\\_market\\_2021.aspx](http://www.lucintel.com/pultrusion_market_2021.aspx), 2017. gada 15. augusts.
- [10] <http://www.synthesites.com/ipage.php?p=9&l=11>, 2017. gada 16. februāris.
- [11] Janushevskis A., Akinfiev T., Auzins J., Boyko A. A Comparative Analysis of Global Search Procedures. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Engineering*, 10 (4), lpp. 236–250, 2004.
- [12] Kissinger H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. *National Bureau of Standards*, 29(11), lpp. 1702–1706, 1957.
- [13] Lasdon L. S., Fox R. L., Rather M. W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, 8 (3), lpp. 73–103, 1974.
- [14] Lee W.I., Loos A.C., Springer G.S. Heat of reaction, degree of cure, and viscosity of Hercules 3501-6 resin, *Journal of Composite Materials*, 16, lpp. 510–520, 1982.
- [15] Liu X. L., Crouch I. G., Lam Y. C. Simulation of heat transfer and cure in pultrusion with a general-purpose finite element package. *Composites Science and Technology*, 60, lpp. 857–864, 2000.
- [16] Liu X.-L. Numerical modelling on pultrusion of composite I beam. *Composites: Part A*, 32, lpp. 663–681, 2001.
- [17] Myers R. H., Montgomery D. C. Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. New York: John Wiley & Sons, 1976, 714 lpp.
- [18] Püschner H. Wärme durch Mikrowellen. Eindhoven: Philips Technische Bibliothek, 1964, 325 lpp.

- [19] Shokrieh M.M., Aghdami A.M. A dynamic model to simulate the time dependent pultrusion process of Glass/Polyester Composites, *Applied Composite Materials*, 18, lpp. 585–601, 2011.
- [20] Sucher M., Fox J. *Handbook of microwave measurements*, Vol. II, 3rd Edition. New York: Polytechnic Press., 1963, 340 lpp.
- [21] Suranto B. R., Ye L., Mai Y. W. Simulation of temperature and curing profiles in pultruded composite rods. *Composite Science and Technology*, 58, lpp. 191–197, 1998.
- [22] Valliappan M., Roux J. A., Vaughan J. G., Arafat E. S. Die and post-die temperature and cure in graphite/epoxy composites. *Composites: Part B*, 27B, lpp. 1–9, 1996.
- [23] Witten E. *Composites Market Report 2012: Market Developments, Trends, Challenges and Opportunities*, 2012.
- [24] Wu C. F. J., Hamada M. *Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimisation*. New York: John Wiley & Sons Inc., 2000, 630 lpp.

## 3. APROBĀCIJA UN PUBLIKĀCIJAS

### 3.1. Publikāciju saraksts

1. Barkanov E., Akishin P., Miazza N. L. and Galvez S. (2015): Numerical Simulation of Pultrusion Processes: Algorithms' Comparative Study. – In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Composite Science and Technology (Lisbon, Portugal), 12 lpp.
2. Akishin P., Barkanov E. and Bondarchuk A. (2015): Finite Element Modelling and Analysis of Conventional Pultrusion Processes. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 96, 012012, 10 lpp. (SCOPUS).
3. Barkanov E., Akishin P., Emmerich R. and Graf M. (2016): Numerical Simulation of Advanced Pultrusion Processes with Microwave Heating. - In: Proceedings of the VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (Eds. M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, G. Stefanou, V. Plevris), Vol. IV (Crete, Greece), 7720-7738 (SCOPUS).
4. Akishin P., Barkanov E., Miazza N. and Galvez S. (2017): Curing Kinetic Models of Resins for Microwave Assisted Pultrusion. Key Engineering Materials, Vol. 721, 92-96 (SCOPUS).
5. Barkanov E., Akishin P., Miazza N. L. and Galvez S. (2017): ANSYS-Based Algorithms for a Simulation of Pultrusion Processes. Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 24, No. 5, 377-384 (SCOPUS).
6. Barkanov E., Akishin P., Miazza N. L., Galvez S. and Pantelelis N. Experimental Validation of Thermo-Chemical Algorithm for a Simulation of Pultrusion Processes. IOP Conf. Series: Journal of Physics (pieņemts) (SCOPUS).

### 3.2. Konferenču saraksts

1. Akishin P., Barkanov E. and Bondarchuk A. Finite Element Modelling and Analysis of Curing and Pultrusion Processes. International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Azova, Krievija, 2015. gada 19.–22. maijs.
2. Barkanov E., Akishin P., Miazza N. L. and Galvez S. Numerical Simulation of Pultrusion Processes: Algorithms' Comparative Study. 10th International Conference on Composite Science and Technology. Lisabona, Portugāle, 2015. gada 2.–4. septembris.
3. Akishin P., Barkanov E., Miazza N. and Galvez S. Building of Curing Kinetic Models for a Simulation of Pultrusion Processes. Baltic Polymer Symposium. Sigulda, Latvija, 2015. gada 16.–18. septembris.
4. Akishin P., Barkanov E. and Bondarchuk A. Finite Element Modelling and Analysis of Conventional Pultrusion Processes. 2nd International Conference Innovative Materials, Structures and Technologies. Rīga, Latvija, 2015. gada 30. septembris–2. oktobris.
5. Barkanov E., Akishin P., Emmerich R. and Graf M. Numerical Simulation of Advanced Pultrusion Processes with Microwave Heating. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2016). Krita, Grieķija, 2016. gada 5.–10. jūnijs.

6. Akishin P., Barkanov E., Miazza N. and Galvez S. Curing Kinetic Models of Resins for Microwave Assisted Pultrusion Processes. 25 International Baltic Conference of Engineering Materials&Tribology (Baltmattrib 2016). Rīga, Latvija, 2016. gada 3.–4. novembris.
7. Barkanov E., Akishin P., Miazza N. L., Galvez S. and Pantelelis N. Experimental Validation of Thermo-Chemical Algorithm for a Simulation of Pultrusion Processes. V International Conference on Topical Problems of Continuum Mechanics. Tsaghkadzora, Armēnija, 2017. gada 2.–7. oktobris.

### **3.3. Projekta semināri**

1. Akishin P., Barkanov E. Simulation of Pultrusion Processes. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Brisele, Beļģija, 2014. gada 24.–25. februāris.
2. Akishin P., Barkanov E. Simulation of Pultrusion Processes. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Berlīne, Vācija, 2014. gada 14. maijs.
3. Akishin P., Barkanov E. Simulation of Pultrusion Processes. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Rīga, Latvija, 2014. gada 24.–25. septembris.
4. Akishin P., Barkanov E. Building of Curing Kinetic Models for a Simulation of Pultrusion Processes. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Valence, Spānija, 2015. gada 12.–13. februāris.
5. Akishin P., Barkanov E. Experimental Validation of Numerical Simulation of Pultrusion Processes. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Brisele, Beļģija, 2015. gada 30.–31. marts.
6. Akishin P., Barkanov E. Design of Multi-Stage and Modular Die. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Padova, Itālija, 2015. gada 15.–16. septembris.
7. Akishin P., Barkanov E. Pultrusion of Coated Rod Profile. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Bordo, Francija, 2016. gada 2.–3. februāris.
8. Akishin P., Barkanov E. Pultrusion of Box Profile. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Madride, Spānija, 2016. gada 20.–22. septembris.
9. Akishin P., Barkanov E. Optimisation of Rod Profile Pultrusion Process. Eiropas komisijas 7. Ietvarprogrammas projekts *COALINE*. Madride, Spānija, 2016. gada 20.–22. septembris.

### **3.4. Promocijas darba aprobācija**

1. Akišins P. Progresīvo pultrūzijas procesu izstrāde (Design of Advanced Pultrusion Processes). Rīgas Tehniskās universitātes Mehānikas institūts, Rīga, 2017. gada 25. aprīlis.