

Šis darbs izstrādāts Latvijas Universitātē ar Eiropas
Reģionālās attīstības fonda atbalstu projektā
Nr. 2013/0051/2DP/2.1.1.1.0/13/APIA/VIAA/009



EIROPAS SAVIENĪBA

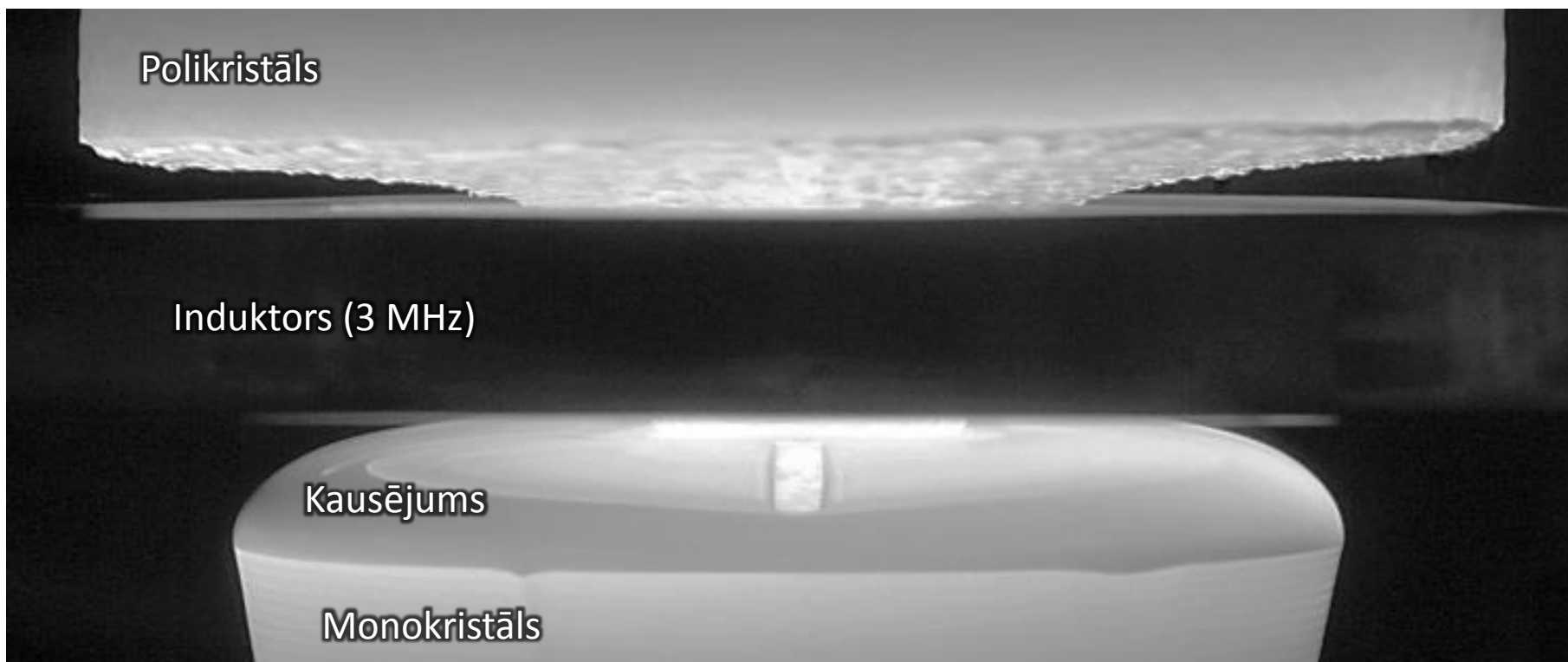
IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Struktūru veidošanās silīcija kausēšanā ar AF EM lauku peldošās zonas procesā

Kristaps Bergfelds, Jānis Virbulis, Armands Krauze

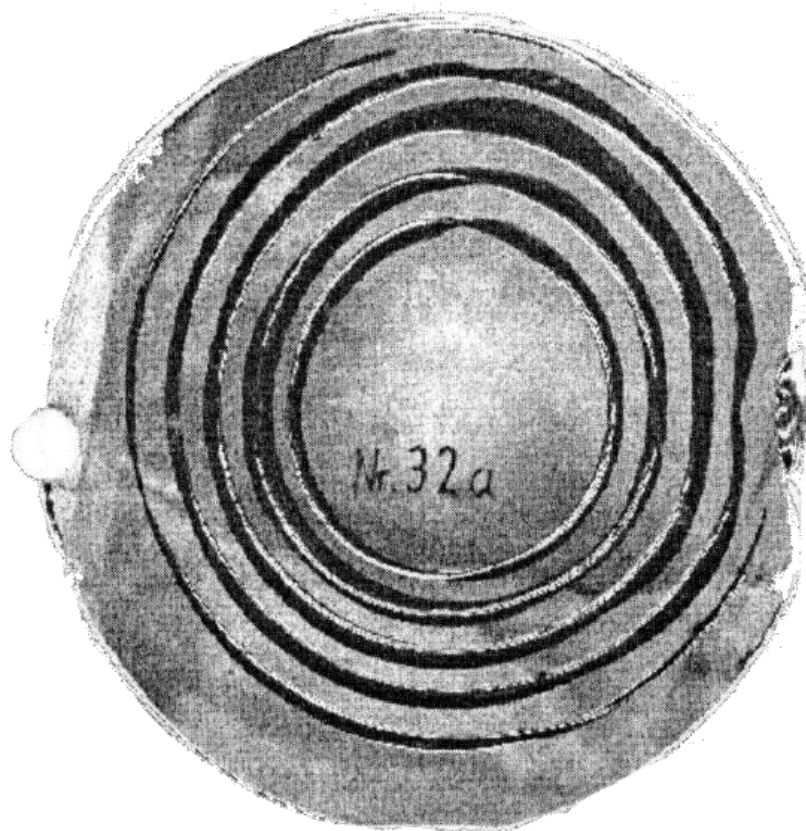
Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference
LU Fizikas un matemātikas fakultāte, Zeļļu iela 8, Rīga
30.02.2014.

Modelētās problēmas apraksts



Att. 1: Peldošās zonas (PZ) procesa fotogrāfija, kurā redzama nestabilas formas polikristāla kušanas frontes virsma¹.

Modelētās problēmas apraksts

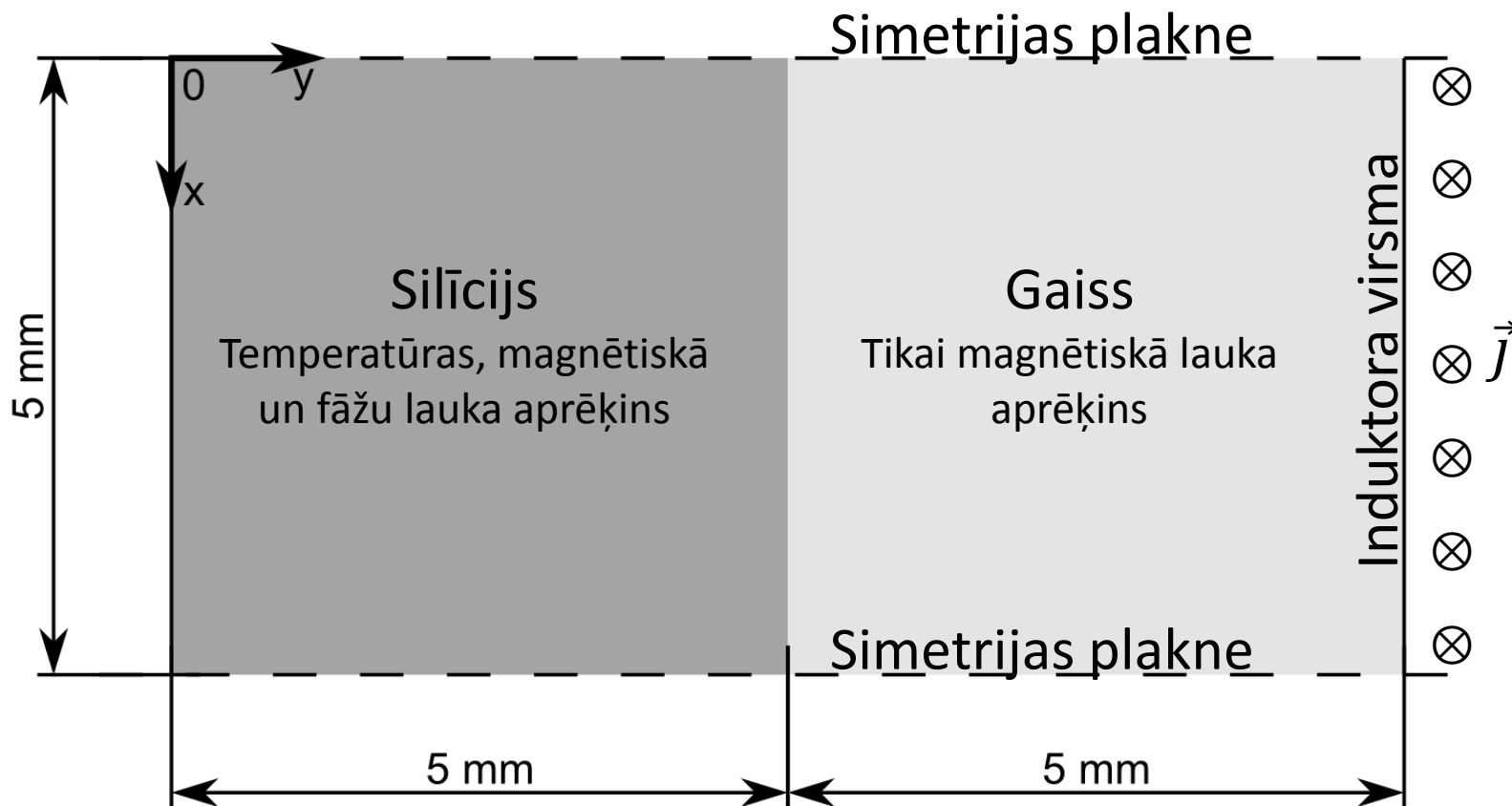


Att. 2: Gredzenveida struktūras uz silīcija plāksnes, kas novietota zem AF induktora².

Modelētās problēmas apraksts

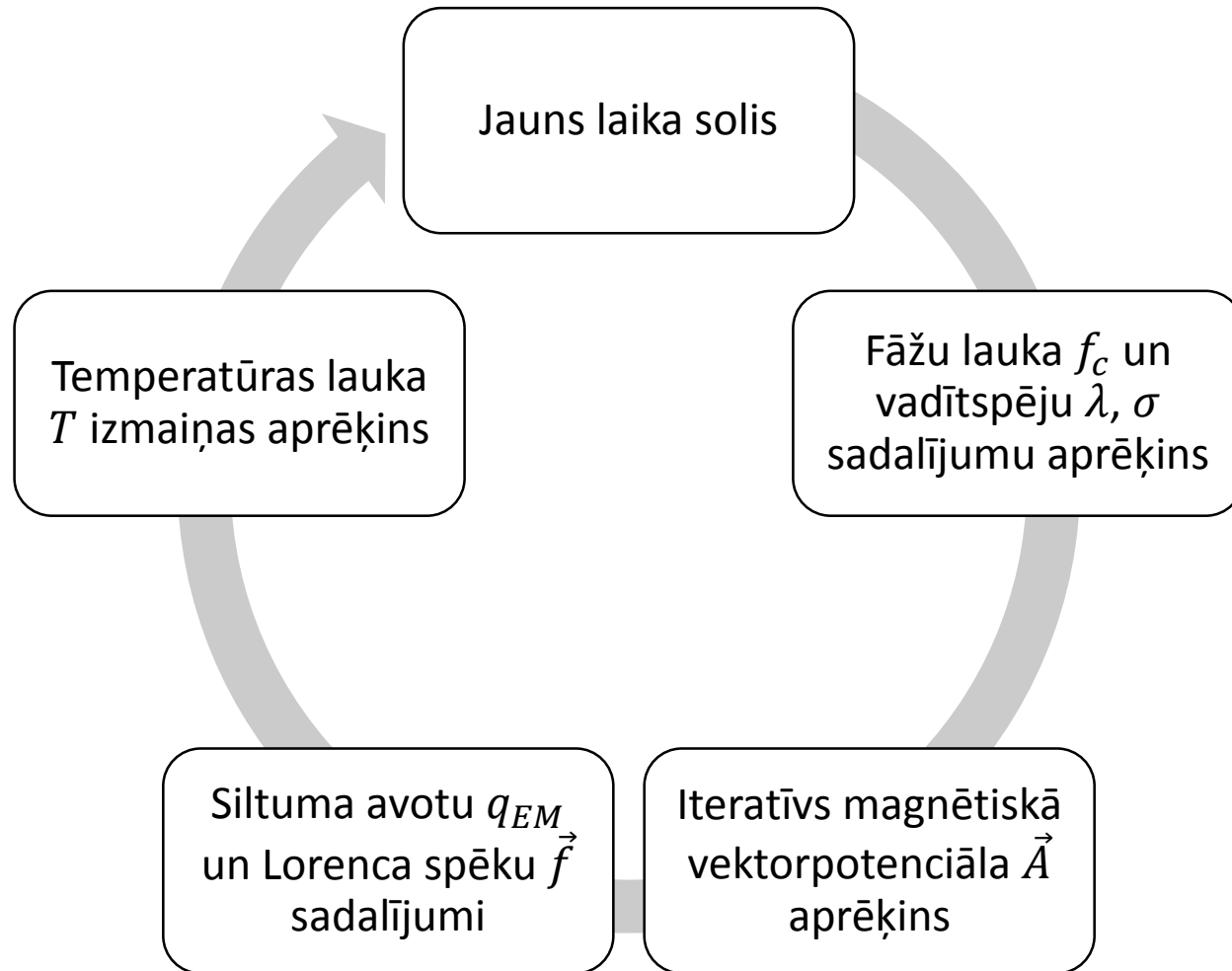
- Stabila PZ procesa nodrošināšanai nepieciešams izprast procesus, kas nosaka kušanas frontes formu.
- Pastāv uzskats, ka frontes formu nosaka kausējuma plūsmas īpašības¹.
- Turpretim šī darba ietvaros tiek izvirzīta hipotēze, ka nestabilitāšu veidošanās ir saistīta ar inducēto strāvu koncentrēšanos kausējuma apgabalos.
- Cēlonis ir elektrovadītspējas σ un skinslāņa biezuma δ atšķirības cietā un šķidrā silīcijā.
 - cietam: $\sigma = 5,0 \cdot 10^4 \text{ S/m}$ $\delta = 1,30 \text{ mm}$
 - šķidram: $\sigma = 1,2 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ $\delta = 0,27 \text{ mm}$

Matemātiskā modeļa izveide



Att. 3: Modelētā apgabala shēma un galvenie matemātiskā modeļa elementi.

Matemātiskā modeļa izveide



Att. 4: Aprēķinu algoritms, kas realizēts ar programmu paketes *GNU Octave* palīdzību.

Matemātiskā modeļa izveide

- Fāžu lauka aprēķins³

$$f_c = \begin{cases} 0 & \text{if } T > T_0 + \frac{\Delta T_s}{2} \\ \frac{T_0 + \frac{\Delta T_s}{2} - T}{\Delta T_s} & \text{if } T \geq T_0 - \frac{\Delta T_s}{2} \text{ and } T \leq T_0 + \frac{\Delta T_s}{2} \\ 1 & \text{if } T < T_0 - \frac{\Delta T_s}{2} \end{cases}$$

- Temperatūras lauka aprēķins

$$\left(\rho c_p - L \frac{df_c}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + q_{EM}$$

$$\frac{\varepsilon \sigma_{SB} T^4}{\lambda} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=5 \text{ mm}} \quad 0 = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0 \text{ mm}} \quad 0 = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=5 \text{ mm}}$$

Matemātiskā modeļa izveide

- Magnētiskā lauka vektorpotenciāls

$$\Delta \vec{A} - i\omega\sigma\mu\vec{A} = 0 \quad 0 = A_z|_{y=0\text{mm}} \quad k_I = A_z|_{y=10\text{mm}}$$

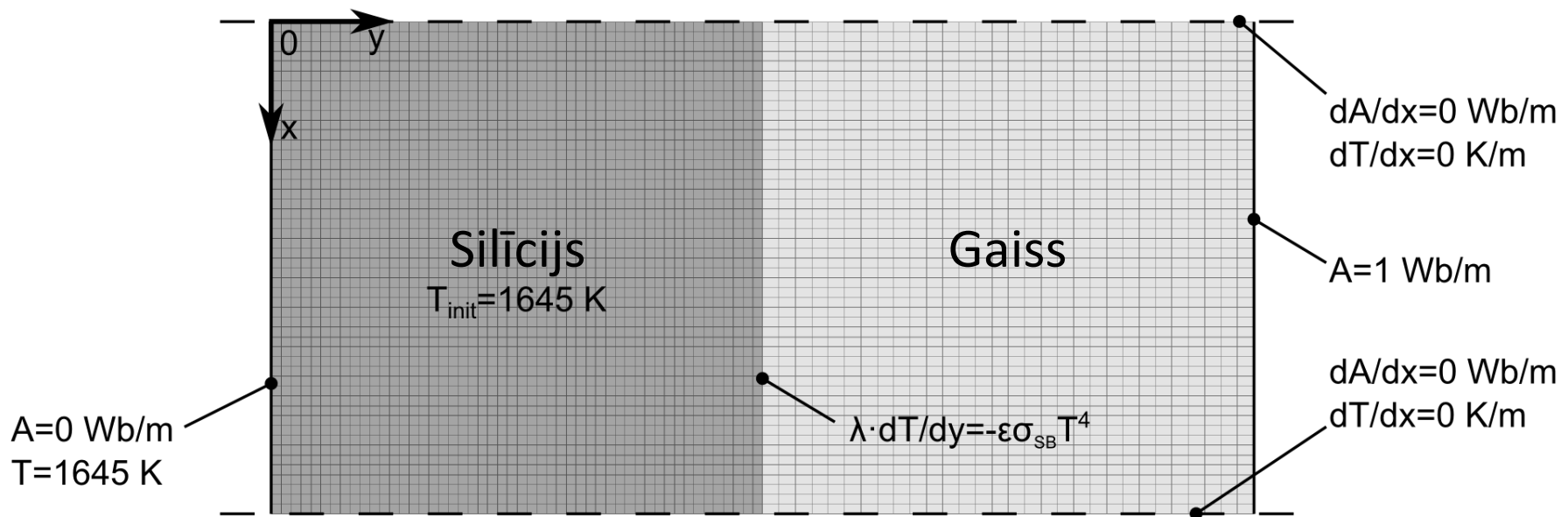
- Strāvas blīvums, siltuma avoti, magnētiskais lauks

$$j_z = -i\sigma\omega A_z \quad q = \frac{|j_z|^2}{\sigma} \quad \vec{B} = (B_x, B_y, B_z) = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y}, -\frac{\partial A_z}{\partial x}, 0 \right)$$

- Lorenca spēku blīvums

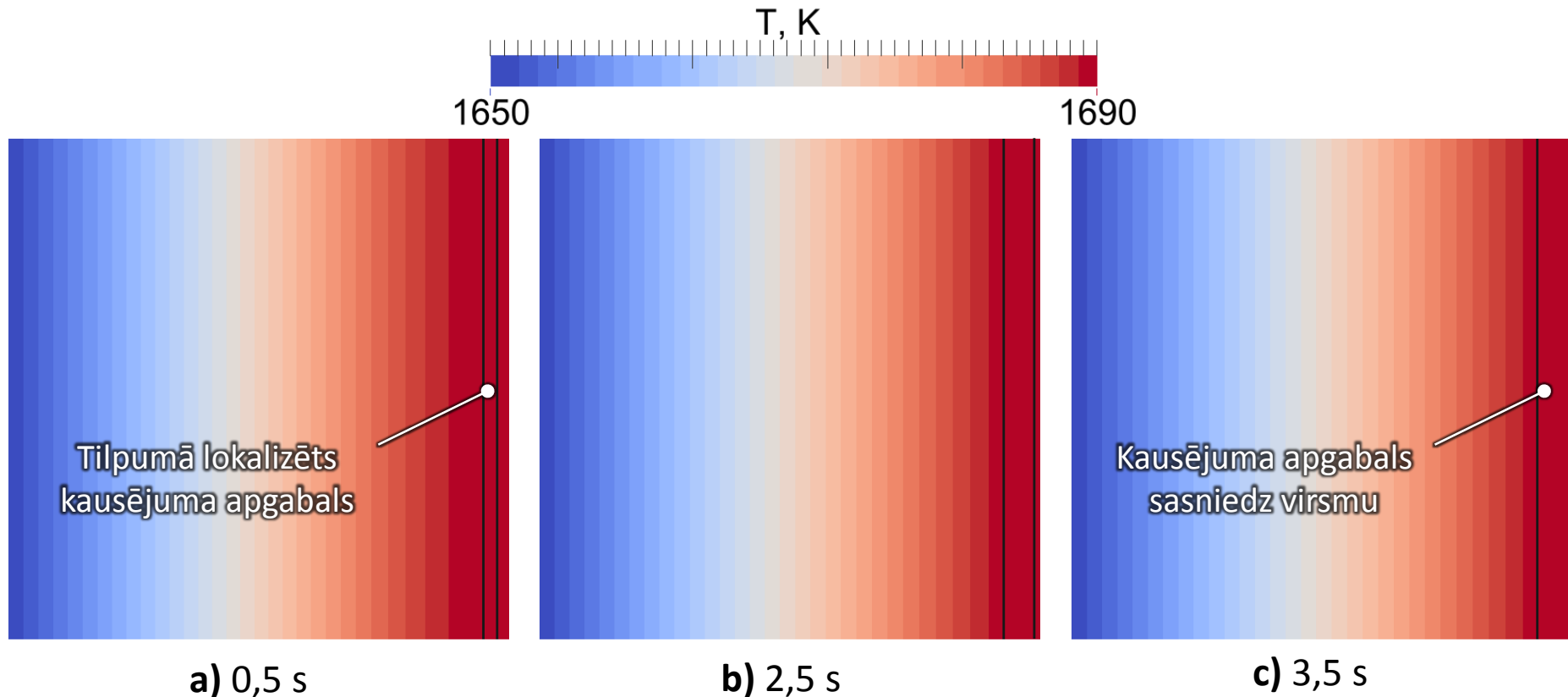
$$\begin{aligned} \overline{f_x} &= -\frac{1}{2}\Re(j_z)\Re(B_y) - \frac{1}{2}\Im(j_z)\Im(B_y) \\ \overline{f_y} &= \frac{1}{2}\Re(j_z)\Re(B_x) + \frac{1}{2}\Im(j_z)\Im(B_x) \end{aligned}$$

Aprēķinu rezultāti ar vienmērīgu sākotnējo temperatūras lauka sadalījumu



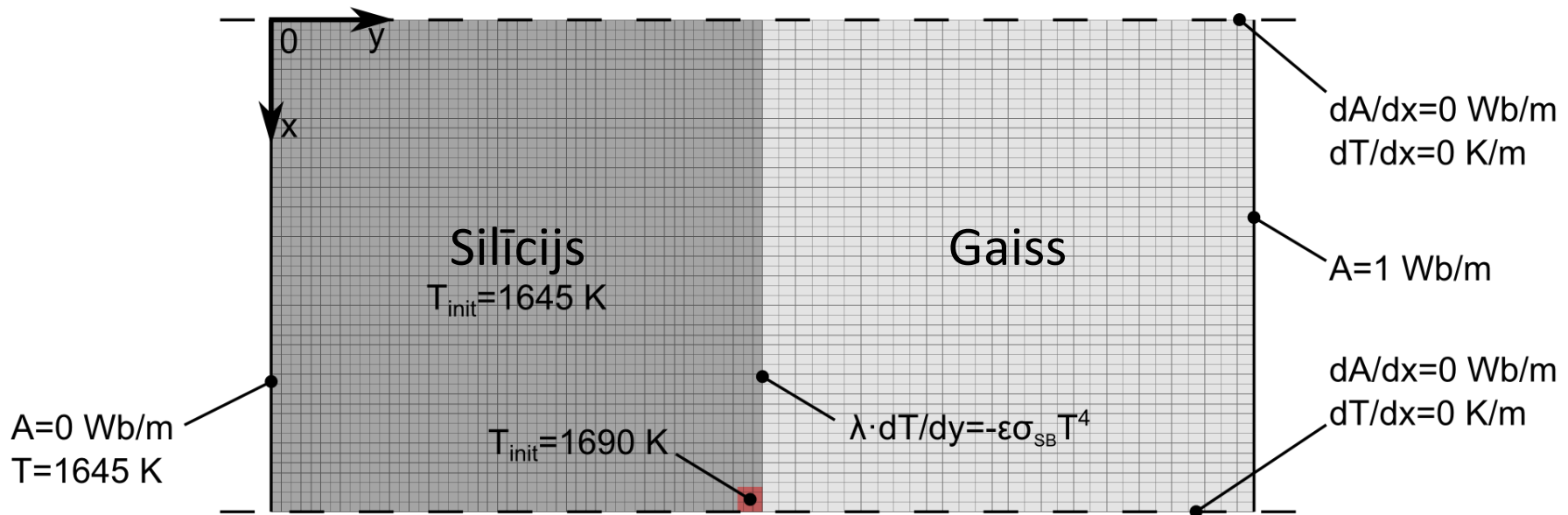
Att. 5: Sākuma un robežu nosacījumu shēma aprēķiniem bez sākotnējās temperatūras lauka perturbācijas.

Aprēķinu rezultāti ar vienmērīgu sākotnējo temperatūras lauka sadalījumu



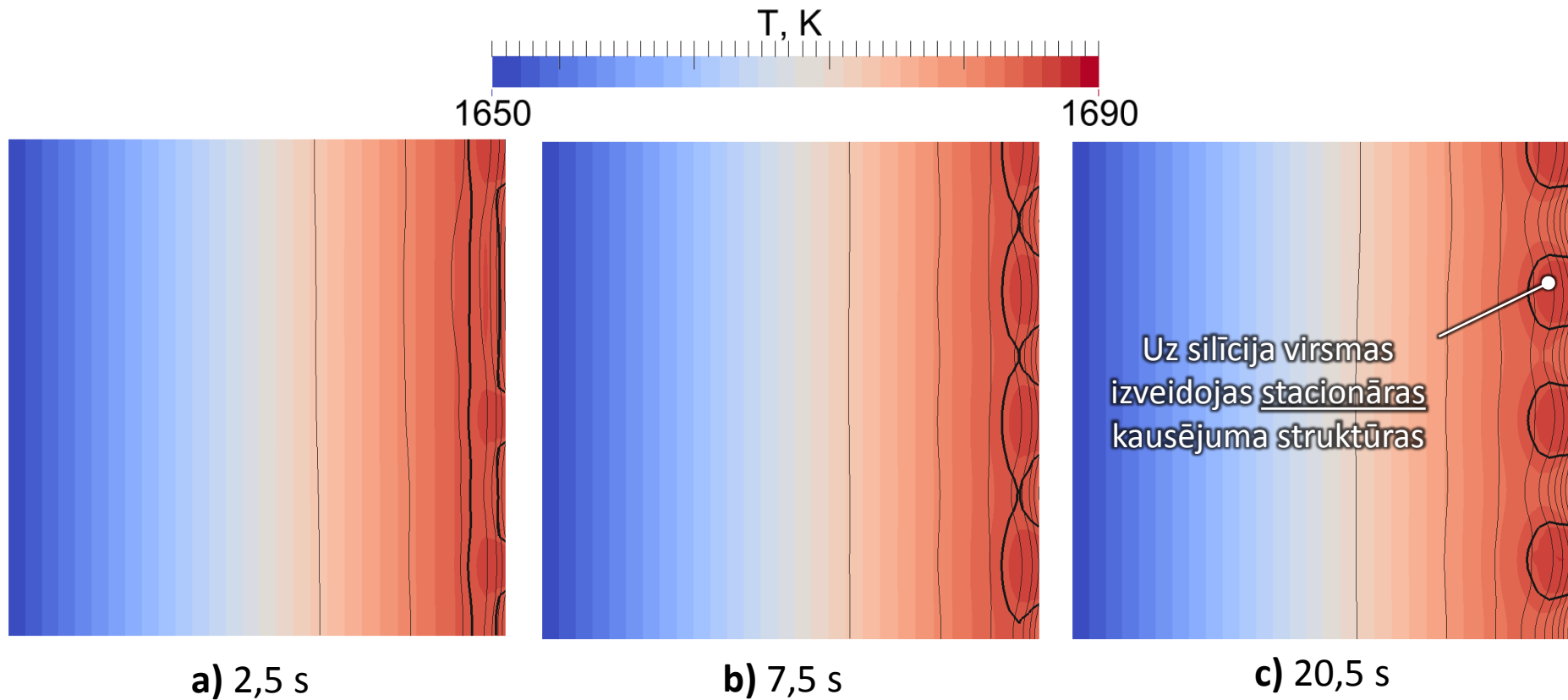
Att. 6: Dažādos laika brīžos aprēķinātie temperatūras lauki. Ar melnu līniju iezīmēta fāžu robeža starp cieto un šķidro silīciju.

Aprēķinu rezultāti ar sākotnējā temperatūras lauka perturbāciju



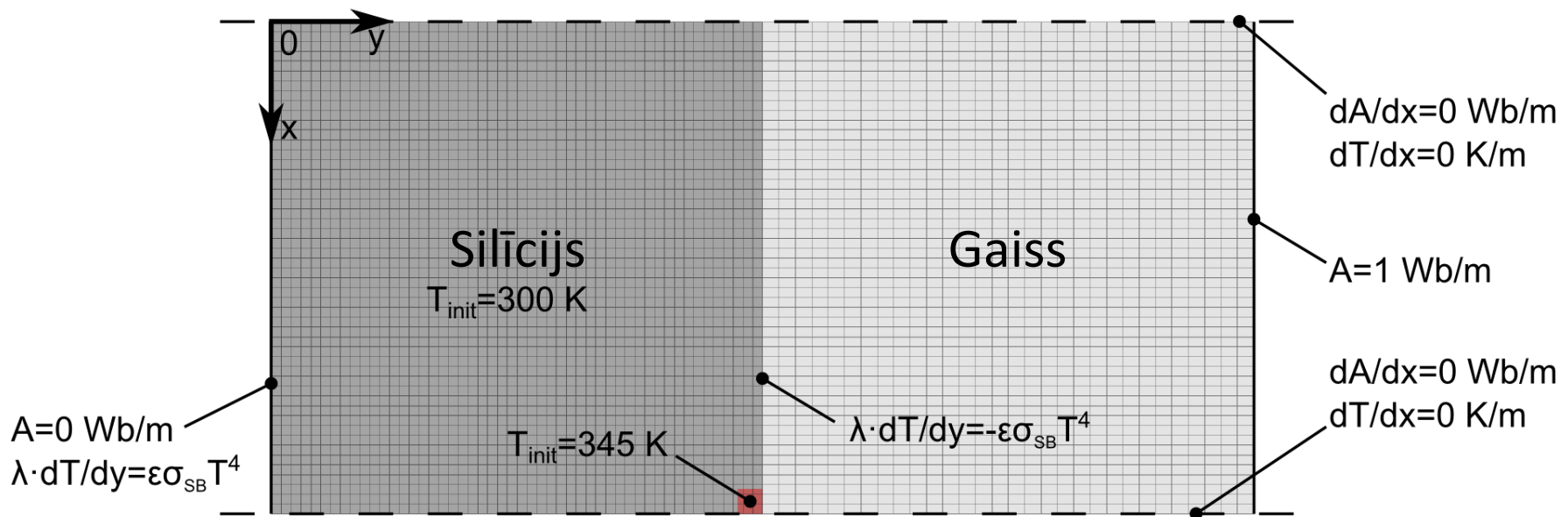
Att. 7: Sākuma un robežu nosacījumu shēma aprēķiniem ar sākotnējās temperatūras lauka perturbācijas.

Aprēķinu rezultāti ar sākotnējā temperatūras lauka perturbāciju



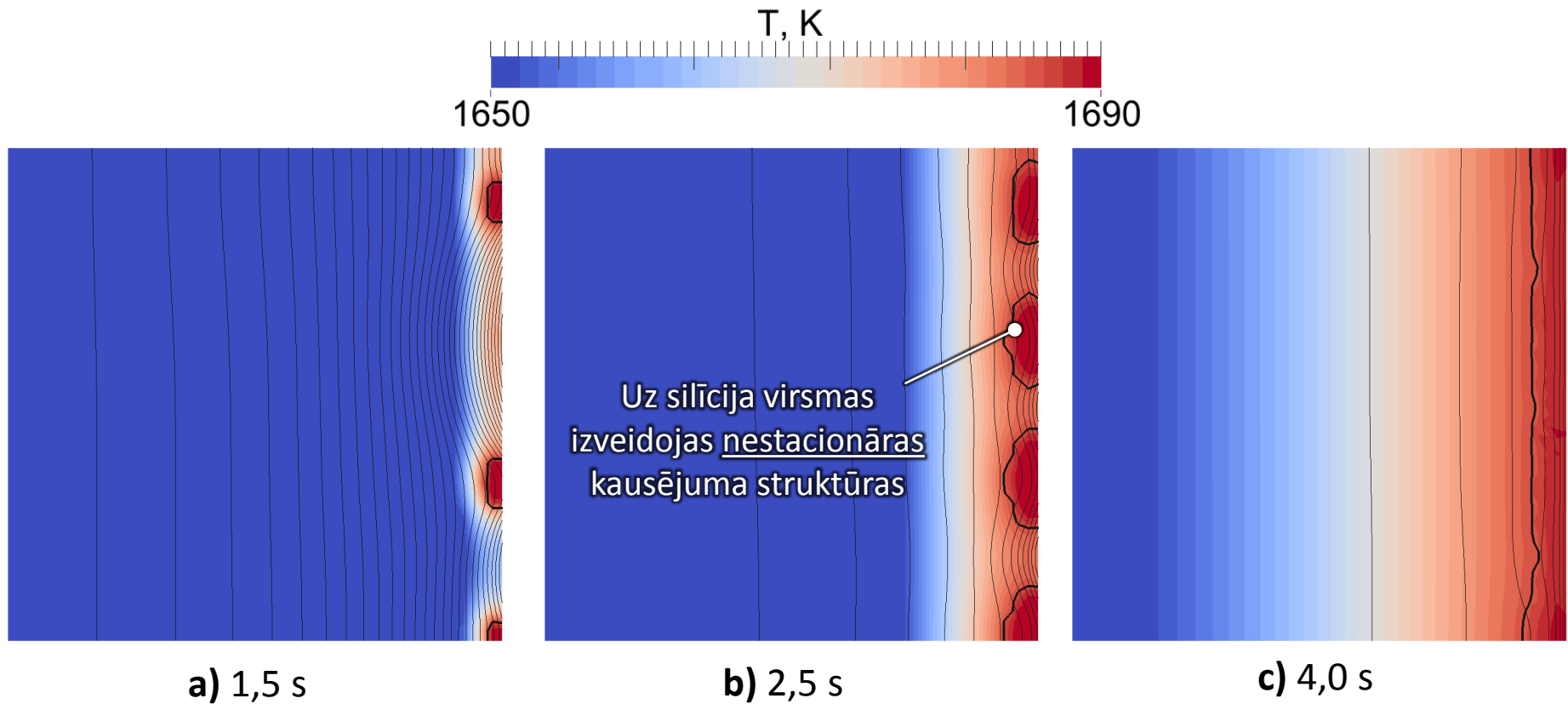
Att. 8: Dažādos laika brīžos aprēķinātie temperatūras lauki. Ar biezū melnu līniju iezīmēta fāžu robeža starp cieto un šķidro silīciju, bet ar šaurām melnām līnijām magnētiskā lauka vektorpotenciāla izolīnijas.

Aprēķinu rezultāti ar abpusēju apgabala siltumstarojumu



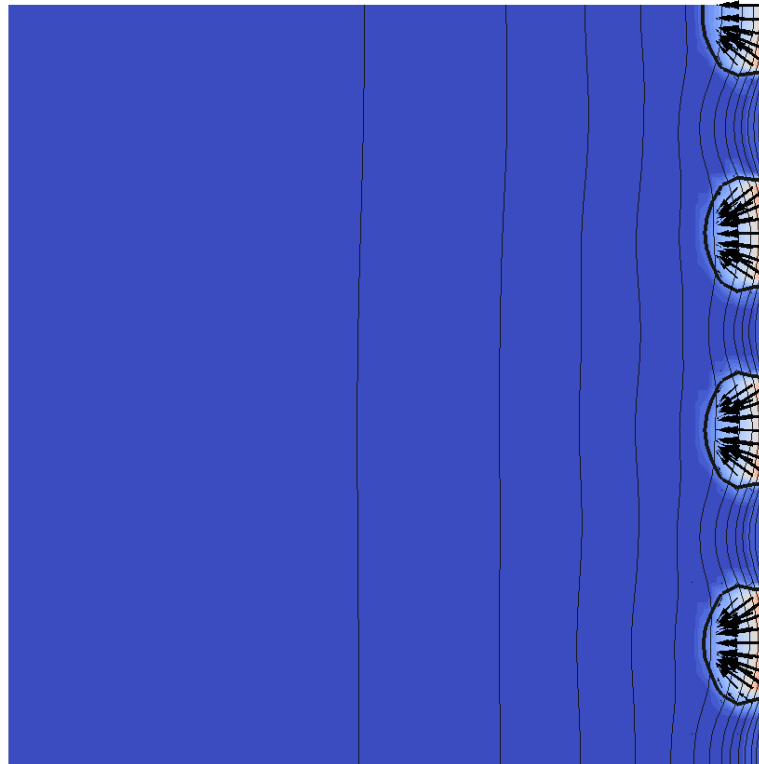
Att. 9: Sākuma un robežu nosacījumu shēma aprēķiniem ar abpusēju apgabala siltumstarojumu.

Aprēķinu rezultāti ar abpusēju apgabala siltumstarojumu



Att. 10: Dažādos laika brīžos aprēķinātie temperatūras lauki. Ar biezu melnu līniju iezīmēta fāžu robeža starp cieto un šķidro silīciju, bet ar šaurām melnām līnijām magnētiskā lauka vektorpotenciāla izolīnijas.

Lorenca spēka ietekme uz kausējuma pilienu formu



Att. 11: Siltuma avotu un Lorencu spēka sadalījums modelētajā apgabalā aprēķiniem ar viļņusēju siltumstarojumu. Lielākā vektora garums ir $|\vec{f}_{\max}| = 7,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^3$. Krāsas atspoguļo siltuma avotus ar $q_{\max} = 9,8 \cdot 10^9 \text{ W/m}^3$. Parādītas arī fāžu robežas un vektorpotenciāla izolīnijas.

Lorenca spēka ietekme uz kausējuma pilienu formu

- Lineāra Lorenca spēka blīvuma aprēķins

$$f_{\text{lin}} = \int_L \vec{f} \cdot d\vec{l} = \int_{y_1}^{y_2} f_y \cdot dy$$

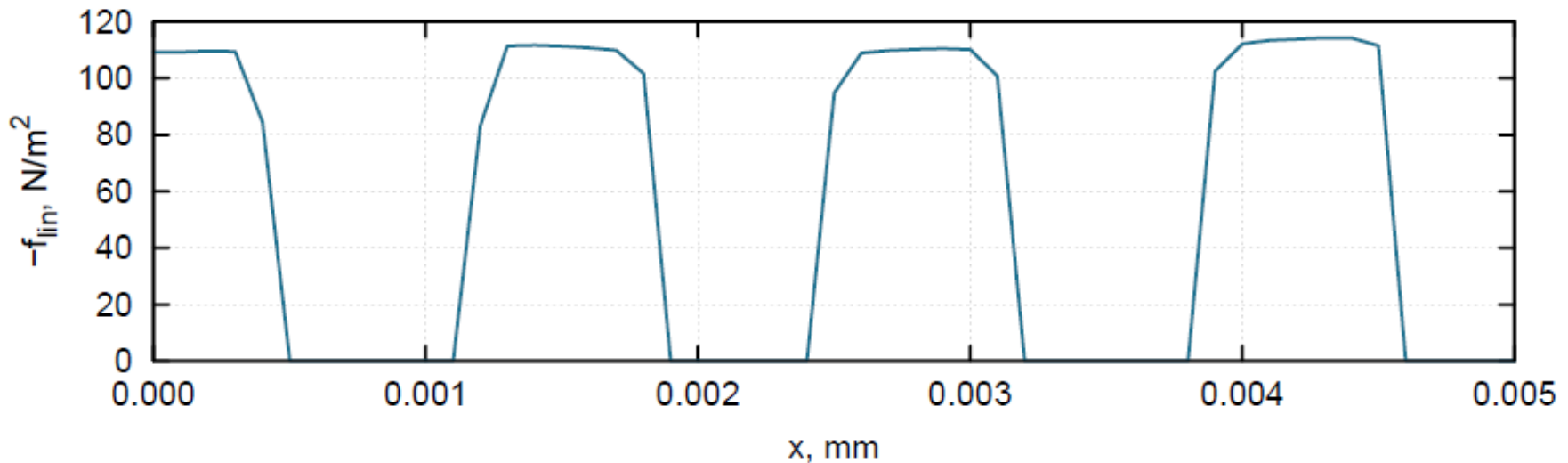
- Nepieciešamais virsmas liekums

$$f_{\text{lin}} = k \cdot \gamma \quad \Rightarrow \quad k = \frac{f_{\text{lin}}}{\gamma} = \frac{110 \text{ N/m}^2}{0.88 \text{ N/m}} = 125 \text{ 1/m}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{125 \text{ 1/m}} = 8.0 \text{ mm}$$

Lorenca spēka ietekme uz kausējuma pilienu formu

- Lineārais Lorenca spēka sadalījums var tikt izmantots kausējuma brīvās virsmas formas aprēķiniem.



Att. 12: Lineārā Lorenca spēka sadalījums gar modelētā silīcija apgabala virsmu.

Secinājumi

- Kristāla kušanas frontes formas nestabilitātes cēlonis ir EM lauka mijiedarbība ar divfāzu vidi.
- Kausējuma plūsma nav nepieciešama parādība šīs nestabilitātes novērošanai.
- Lorenca spēkiem kausējuma pilienos ir būtiska nozīme to formas veidošanā.
- Atrasti divi iespējami procesa režīmi – stacionāru un nestacionāru struktūru veidošanās.

Tālāka pētījumu norise

- Skaitlisko parametru ietekme uz aprēķinu rezultātu.
- Kausējuma pilienu brīvās virsmas formas aprēķins, aplūkojot kapilāro un Lorenca spēku līdzsvaru.
- Kausējuma aizplūšanas un kvazistacionāra kušanas procesa modelēšana
- Trīsdimensionāli aplūkotās problēmas modeļi. Tie iespējams aprakstītu papildus inducēto strāvu koncentrēšanos kausējuma apgabalu galos.