

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



**EIROPAS REĢIONĀLĀS ATTĪSTĪBAS FONDS**

**Elektrosārņu process labākai titāna  
nogulsņējumu morfoloģijai**

**Projekts Nr. 1.1.1.1./16/A/85  
( Progresā ziņojums - 5)**

**2018**

**02.01. –31.03.**

Projektā piedalās:

1. Platacis Ernests \*
2. Kravalis Kalvis
3. Kārlis Gailītis
4. Linards Goldšteins
5. Mihails Majorovs
6. Blumbergs Ervīns
7. Kaģalnickovs Vadims
8. Serga Vera
9. Krūmiņa Aija
10. Ivanovs Sergejs
11. Sudņikovičs Sergejs
12. Šints Viesturs
13. Andrejs Šiško
14. Kaldre Imants

\*Projekta zinātniskais vadītājs: tel. 67944700; mob. 26513424.

e – pasts: erik@sal.lv

Projekta administratīvā vadītāja: **M. Broka**; tel. mob. 29166326

e – pasts: maija.broka@lu.lv

#### **Projekta uzdevums :**

- Veikt rūpnieciskos pētījumus ar mērķi izstrādāt jaunu tehnoloģiju, kas balstīta uz Krola un elektrosārņu procesiem un tehnoloģijas prototipu Ti/TiAl sakausējumu iegūšanai.

➤

#### **Projekta rezultāti:**

- Jābūt izveidotam jaunas Ti/TiAl sakausējumu iegūšanas tehnoloģijas prototipam;
- Jābūt apstiprinātai un aizstāvētai projekta izpildes gaitā izstrādātajai tehnoloģijai patenta formā, publicētiem 4 oriģināliem zinātniskiem rakstiem un 8 ziņojumiem starptautiskās konferencēs.

### **Aktivitāte Nr. 1. Tehnoloģijas prototipa izstrāde, integrējot galvenās tehnoloģiskās komponentes**

Tehnisku iemeslu dēļ Ti/TiAl eksperimentālās iekārtas reaktora modeļa stends bija jāpārvieto uz telpām metalurģiskajā boksā. Šajā sakarībā bija jāsakārto elektriskā instalācija, ventilācija, jāpievada ūdens reaktora dzesēšanas sistēmai un jāveic citi labiekārtošanas darbi. Tas prasīja ne tikai zināmu piepūli, bet arī laiku. Pēc stenda pārvietošanas un tā montāžas zīm.1.1. bija jāpārbauda atsevišķu mezglu darbība un jāveic attiecīga profilakse.



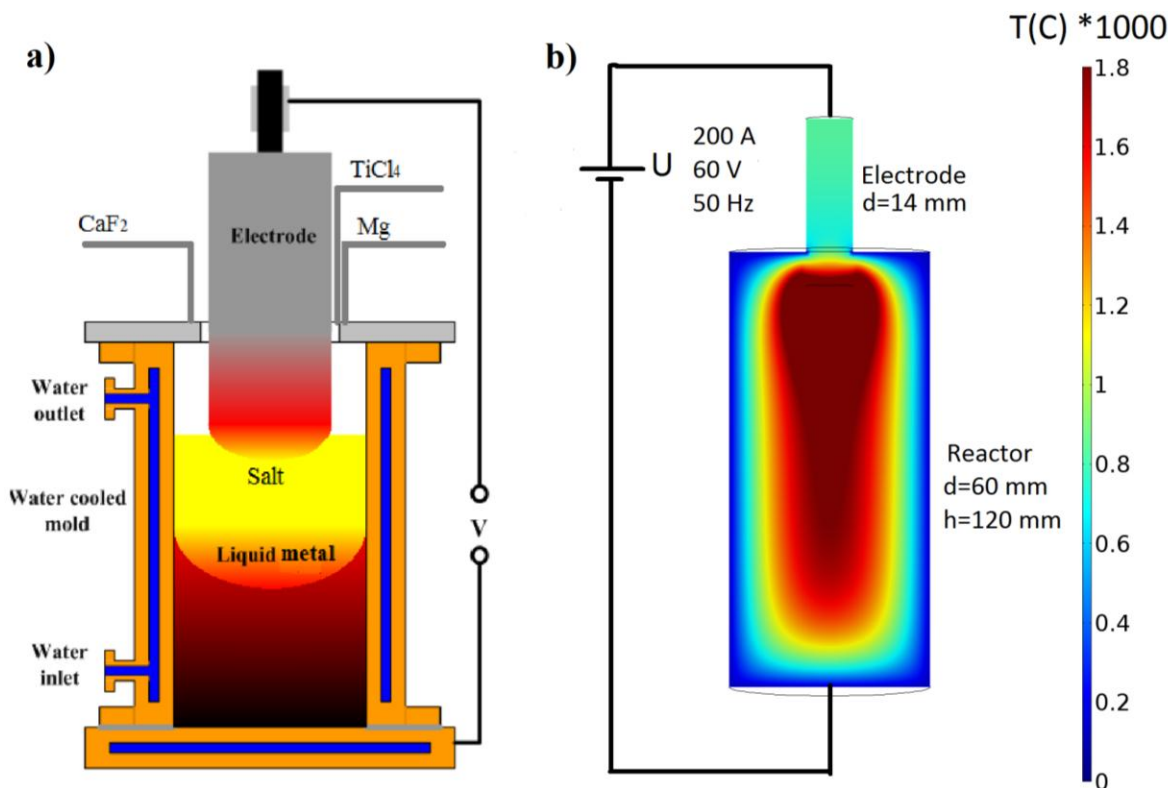
Zīm. 1.1. Ti/TiAl iekārtas reaktora modeļa stends metalurģiskajā boksā.

Praktiski stends sakārtots, pārbaudīts un sagatavots eksperimentu veikšanai.

### **Aktivitāte Nr.3. Mērījumi, modelēšana un raksturošana. Titāna elektrošlakas kausēšanas matemātiskā modelēšana**

Imants Kaldre (28.03.2018.)

Veikti skaitliskie aprēķini ar programmu Comsol 5.0. Līdz šim izstrādātie skaitliskie modeļi bija maza mēroga modeļa eksperimentam. Šie skaitliskie modeļi apraksta elektriskās strāvas un potenciāla sadalījumu reaktorā, kā arī izdalīto Džoula siltumu un temperatūras sadalījumu pie fiksētas sienu temperatūras. Pēdējā laikā veikti arī aprēķini šķidro sāļu plūsmai reaktorā, kuru izraisa lokāla siltuma izdalīšanās elektroda tuvumā. Tas noved pie ievērojamas temperatūras atšķirības, kura izraisa intensīvu konvektīvo kustību, rezultātā notiek temperatūras pārdalīšanās reaktora kamerā. Konvektīvās kustības galvenais cēlonis ir ne tikai sāļu blīvuma izmaiņa atkarībā no temperatūras, bet arī citi mazāk nozīmīgi kustības cēloņi, kas šeit nav apskatīti un līdz ar to nav ņemti vērā..



Zīm. 2. 1. a) Shematisks elektrošlakas procesa attēls. b) Skaitliski aprēķinātais temperatūras sadalījums reaktora kamerā pie dotajiem parametriem. Strāvas un sprieguma parametri balstīti uz reālajos eksperimentos izmērīto. Uz reaktora ārējās sienas 100<sup>0</sup> C temperatūrā

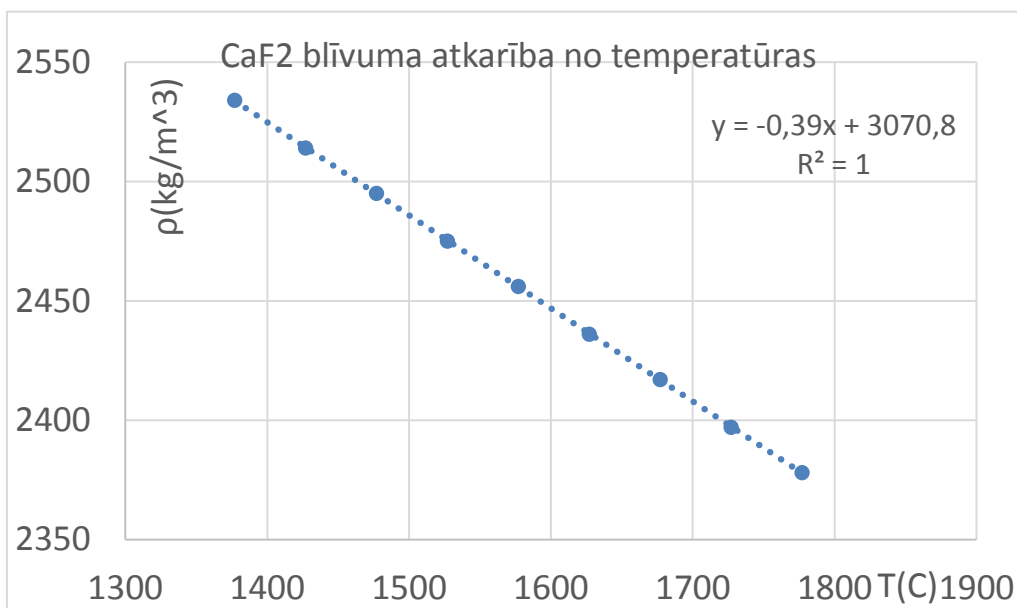
Materiālu fizikālās īpašības apkopotas Tabulā.1. Apskatīts modelis, kura 14 mm diametra titāna elektrods iemērīts šķidrā CaF<sub>2</sub>, kurš atrodas cilindriskā nerūsējošā tērauda konteinerā (d=60mm, h=120 mm). Uz tērauda konteinerā iekšējās sienas veidojas ciets sāļu slānis, kurā nav kustība, tas darbojas kā temperatūras izolācija. Šo slānīti var iekļaut modelī kā atsevišķu domēnu, bet šajā gadījumā pieņemts, ka slānītis ir plāns, bet rada ievērojamu siltuma pretestību, kas ņemta vērā uzdodot tērauda sienas siltuma pretestību. Balstoties uz precīzākiem mērījumiem, šo cieta sāļu slānīti arī iespējams iekļaut modelī kā atsevišķu domēnu.

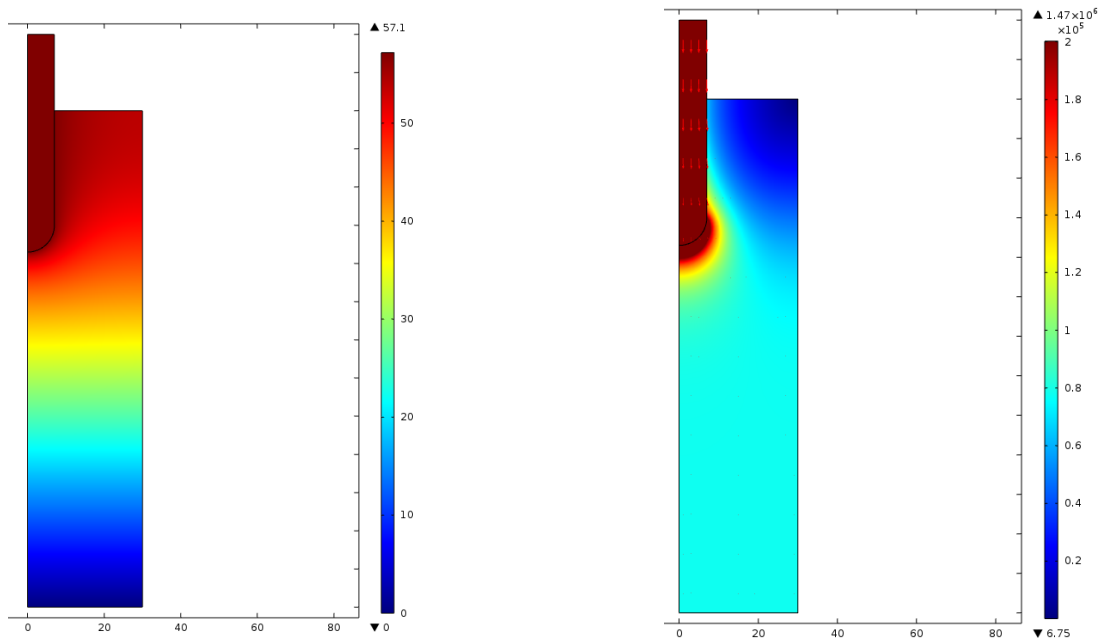
Tabula 1. Sāļu un metālu fizikālās īpašības, kas izmantotas skaitliskajā modelī

	CaF <sub>2</sub> (solid)	CaF <sub>2</sub> (liquid)	Titanium	AISI304 steel	Unit
<b>Density</b>	3100	2500	4500	7900	kg/m <sup>3</sup>
<b>Specific heat</b>	1690	1280	600	480	J/kg·K
<b>Thermal conductivity</b>	1	1	20	15	W/m·K
<b>Electric conductivity</b>		150	2.3·10 <sup>6</sup>	1·10 <sup>6</sup>	Sim/m
<b>Viscosity</b>		0.015			Pa·s
<b>Surface tension</b>		0.285			N/m
<b>Heat of fusion</b>			3·10 <sup>8</sup>		J/kg

Tabula 2. Šķidra CaF<sub>2</sub> blīvuma atkarība no temperatūras

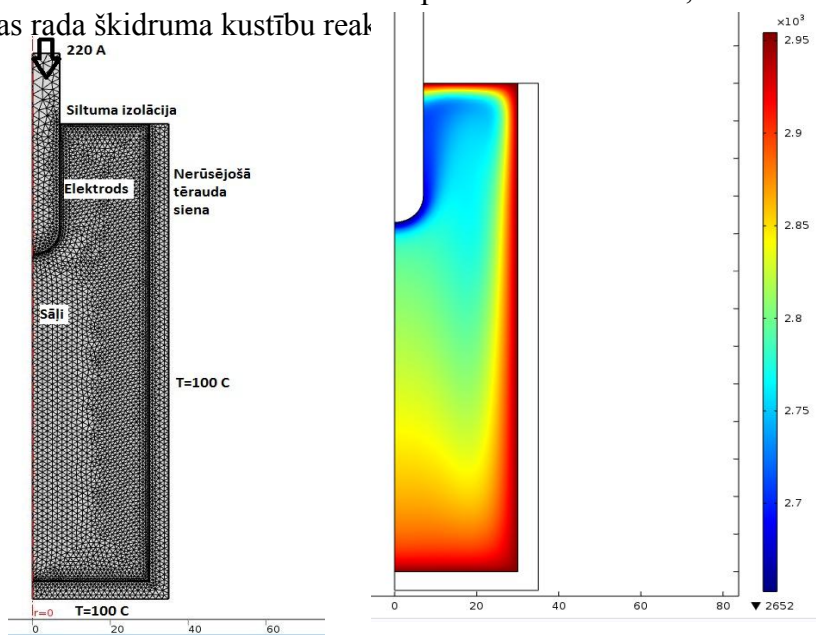
Attiecīgi aprēķinātā CaF <sub>2</sub> blīvuma atkarība no temperatūras		
T, K	T, C	g/cm <sup>3</sup>
1650	1377	2,534
1700	1427	2,514
1750	1477	2,495
1800	1527	2,475
1850	1577	2,456
1900	1627	2,436
1950	1677	2,417
2000	1727	2,397
2050	1777	2,378



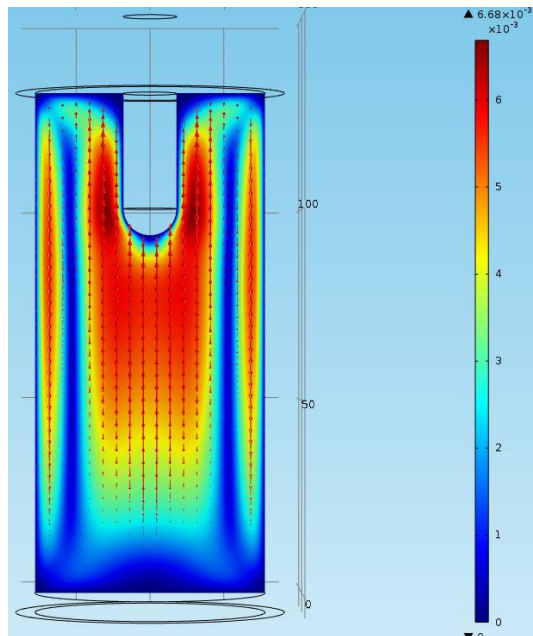


Zīm.2.3. a) Skaitliski aprēķinātais elektriskais potenciāls; b) strāvas blīvums, integrālā strāva caur elektrodu un sāli ir 220 A. Kopējā izdalītā jauda 12 kW

No zīm.2. 3(b) redzams, ka siltuma izdalīšanās ir ļoti lokalizēta elektroda gala tuvumā, jo sāļiem ir būtiski sliktāka elektrovadītspēja nekā elektroda materiālam. Statiskā gadījumā tas nozīmē, ka siltuma pārnese notiek tikai siltuma vadīšanas ceļā. Tā kā sāļu siltumvadītspēja ir zema ( $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) tad arī modelis parāda, ka reaktora centrā tiek sasniegta ļoti augsta temperatūra. Tiek izveidots aksiāli simetrisks modelis ar 8000 šūnām, nodefinējot sāļu blīvuma atkarību no temperatūras saskaņā ar zīm.2. Šajā modelī sāļu domēnā tiek risināts arī hidrodinamikas modelis, kur tilpuma spēku šķidrā fāzē rada sāļu blīvuma izmaiņa. Blīvuma sadalījums pēc aprēķina parādīts zīm.4(b). Blīvumam ir vismazākā vērtība pie karstā elektroda, bet tas ir lielāks pie aukstajām sienām, kas rada šķidruma kustību reak

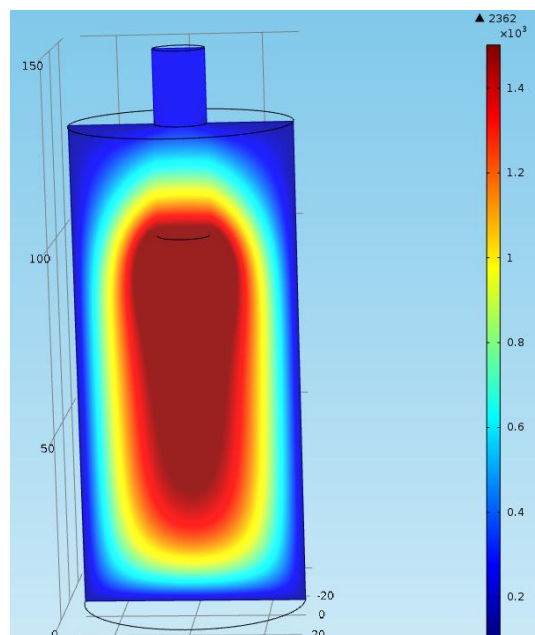
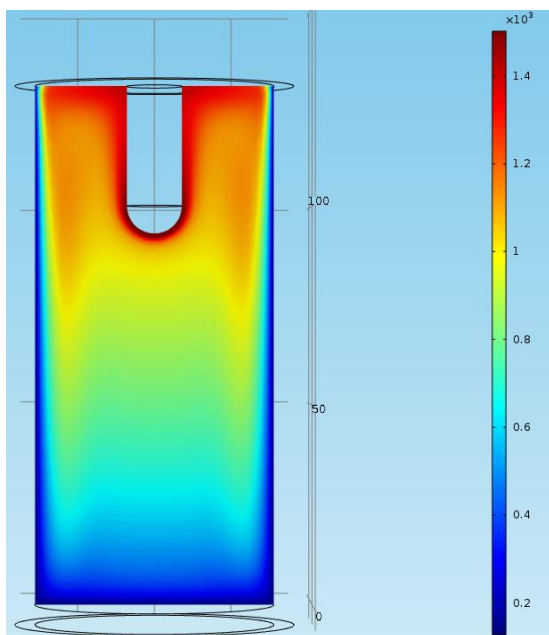


Zīm.2.4. a) Aksiāli simetriska 3D modeļa sadalījums šūnās un temperatūras robežnosacījumi. b) Sāļu blīvums eksperimenta laikā



Zīm.2.5. Ātruma sadalījums. Redzams, ka maksimālais ātrums, kas tiek sasniegts ir ap 5 mm/s

Šķidruma kustības ātrums parādīts zīm.5, kur redzams, ka šķidrums gar malām grimst uz leju, bet simetrijas ass tuvumā ceļas uz augšu. Šāda kustība veic siltuma pārnesi no karstās zonas uz auksto. Tas nozīmē, ka notiek temperatūras sadalījuma izmaiņa reaktorā. Temperatūras sadalījums reaktorā ar konvekciju un bez ir salīdzināts zīm.2.6. Redzams, ka intensīvas konvektīvās siltumpārnesei dēļ temperatūra reaktora centrā ir ievērojami zemāka nekā statistisku sāļu gadījumā.



Zīm.2. 6. Temperatūras sadalījums a) ar konvekciju; b) bez konvekcijas

## Secinājumi

- Skaitliskais modelis labi strādā siltuma un elektromagnētisma, kā arī plūsmas aprēķinos.
- Šķidro sāļu termiskā kustība tīgelī ir ievērojama un būtiski izmaina temperatūras sadalījumu.
- Viegli var iekļaut aprēķinos sāļu īpašību atkarību no temperatūras (blīvums, viskozitāte, siltumvadītspēja, elektrovadītspēja, siltumietilpība)
- Lai precīzi aprakstītu fiziku, jāzina materiālu īpašības un sienu robežnosacījumi
- Ģeometriju un īpašības var izmainīt veicot optimizāciju, lai sasniegto vēlamās īpašību parametrus reaktorā.
- Modeļi var papildināt (plūsma, reakciju siltums, 3D aprēķins, cietais slānis uz sienas)

## Elektrosārņu pārkausēšanas reaktora fizikālo procesu modelēšana

Kārlis Gailītis

Projekta darbības Nr. 3. mērījumi, modelēšana un raksturošana ietvaros veikta zinātniskajā un tehniskajā literatūrā aprakstīto industriālo un laboratorijas izmēru elektrosārņu pārkausēšanas iekārtu darbības principu un galveno raksturlielumu analīze un salīdzināšana ar projektā izstrādāto iekārtu.

Projektā izstrādātā kombinētā Krolla un elektrosārņu pārkausēšanas procesu iekārta pēc uzbūves principiem ir līdzīga rūpnieciskajā ražošanā un metalurģisko pētījumu laboratorijās izmantotajām elektrosārņu pārkausēšanas procesa iekārtām. Analogiski kā iekārtās elektrosārņu pārkausēšanai zem spiediena (angl. – Pressure Electroslag Remelting jeb saīsināti PESR), tajā tiek nodrošināta reaktora hermētiska noslēgšana darbam aizsarggāzu atmosfērā, kā arī reaktorā tiek ievadīti papildus gāzveida reaģenti. Būtiskākās projektā izstrādātās iekārtas atšķirības ir tās reaktora kameras nelielie izmēri – diametrs un augstums, nerūsējošā tērauda izmantošana izplatītāko vara kristalizatoru vietā, kā arī salīdzinoši nelielais elektrosārņu pārkausēšanas procesā izmantotais titāna daudzums.

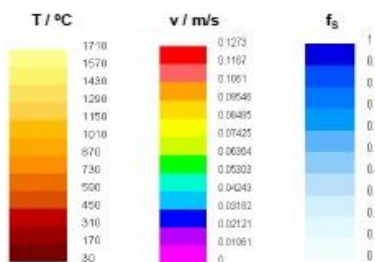
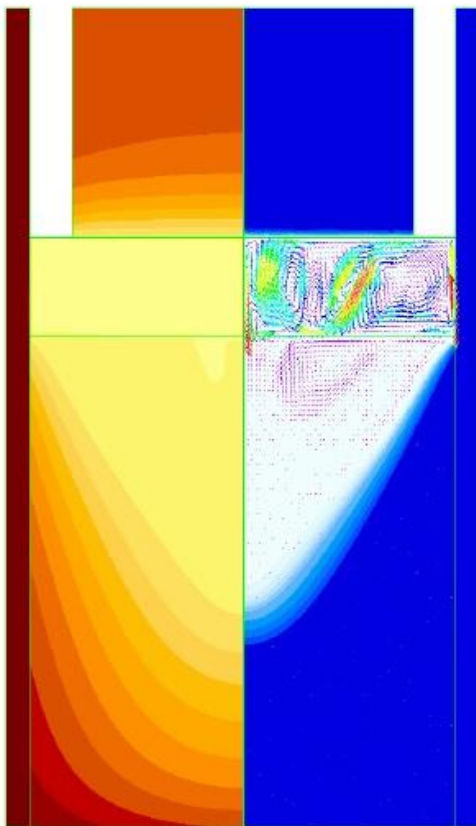
Elektrosārņu pārkausēšanas procesā liela vērtība ir jāpiešķir nerūsējošā tērauda reaktora pietiekamai dzesēšanai. Pēc Patona institūta datiem, elektrosārņu pārkausēšanas reaktora dzesēšanai konvekcijas režīmā ir jāasniedz ūdens plūsmas ātrumi līdz 2-2,5 m/s [1]. Ņemot vērā projektā izstrādātā reaktora dzesēšanas sistēmas kontūru šķērsriezuma izmērus, šāds ūdens plūsmas ātrums atbilst aptuveni 25 l/s (1,5 m<sup>3</sup>/min.) ūdens caurplūdei reaktora sānu dzesēšanas kontūram un aptuveni 5 l/s (0,3 m<sup>3</sup>/min.) reaktora vāka un dibena dzesēšanas kontūriem.

Siltuma ģenerēšana elektrosārņu vannā notiek nevienmērīgi. Lielākā siltuma plūsma kušņu vannas virsmas līmeņa rajonā virzienā uz dzesēšanas sistēmu var sasniegt līdz pat 0,7-1 MW/m<sup>2</sup>. Pie atdzesētajām reaktora sānu sienām veidojas sacietējušu elektrosārņu slānis līdz dažu milimetru biezumam, ar atšķirīgām fizikālām īpašībām - zemāku elektrovadītspēju un siltumvadītspēju nekā elektrosārņiem šķidrā fāzē. Siltumģenerācijas zonā temperatūras kušņu



vannā var sasniegt līdz pat 1900-2100 °C. Kušņu vannas virsmas tuvumā siltumvadīšanas un siltuma starošanas ietekmē pārkausējamā elektroda virsmas temperatūra pieaug līdz 1200 C. Eksperimentāli noteiktais siltuma pārneses koeficients starp izkausēto elektrosārņu vannu un sacietējušo sārņu sienu ir aptuveni 3,84-4,05kW/m<sup>2</sup>K [1].

Temperatūru sadalījuma skaitliskie aprēķini ietver saistītu elektromagnētisko, siltuma pārneses un šķidrums plūsmas vienādojumu atrisināšanu ar atbilstošiem robežnosacījumiem. Atsevišķi autori [2] skaitliskajos aprēķinos ar siltuma avotu un noteču palīdzību ņem vērā pārkausēto metāla pilienu kustību cauri elektrosārņu vannai. Zīmējumā 2.7. redzams uzņēmuma Böhler Edelstahl GmbH ar ESI Group izstrādāto programmatūru CALCOSOFT 2D aprēķinātais temperatūru sadalījums elektrosārņu pārkausēšanas reaktorā.



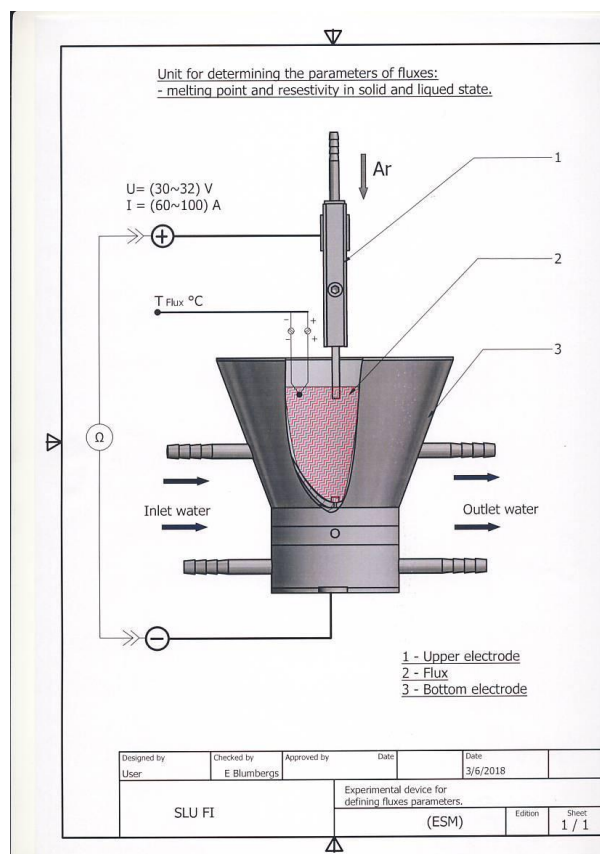
Zīm. 2.7. PESR procesa stacionāro temperatūru sadalījuma elektrodā, elektrosārņu vannā, reaktora sienā un lietnī, kā arī konvekcijas plūsmu ātrumu šķidrā fāzē aprēķinu rezultāti [2].

Aprēķina rezultātos redzams jau iepriekš [1] minētais pārkausējamā metāla elektroda temperatūru pieaugums nelielā posmā virs elektrosārņu vannas līmeņa, intensīva konvekcijas kustība elektrosārņu vannā, kā arī kristalizācijas frontes forma lietnī.

Literatūra

1. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии. Учеб. пособие для вузов. - М.: Металлургия, 1990, 280с.
2. A. Kharicha, A. Mackenbrock, A. Ludwig, W. Schützenhöfer, V. Maronnier, M. Wu, O. Köser, R. Tanzer, „Selected Numerical Investigations on ESR Process”, LMPC Proceedings, Nancy, 2007.

Pēc stenda montāžas un tā mezglu pārbaudes istabas temperatūrā varēja atsākt eksperimentus. Iepriekš veiktie eksperimenti parādīja, ka, nodrošinot vajadzīgos eksperimenta apstākļus, ir iespējams titānu izfiltrēt cauri kušņu slānim. Interesanti bija noskaidrot stenda sistēmu darbību maksimāli tuvu reāliem darba apstākļiem, t.i. pie temperatūrām 1100 – 1200 °C un paralēli atstrādāt darba iemaņas ar šķidriem kušņiem. Šim mērķim tika izprojektēta un izgatavota speciāla šķidro kušņu uzpildīšanas iekārta, zīm. 3.1.



Zīm. 2.8. Šķidro kušņu uzpildīšanas iekārta.

Definēts NaCl kušņu daudzums tika iebērts dozatorā, zīm.2.9. un izkausēts mufeļkrāsnī, zīm. 2.10 (temperatura  $t = 975 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

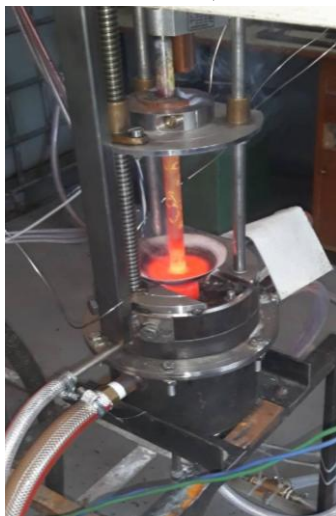


Zīm. 2.9. Dozators (izkausēti NaCl kušņi)



Zīm2.10. Mufeļkrāsns

Šķidrie NaCl kušņi tika ievadīti reaktorā, zīm.2.11.



Zīm. 2.11. Šķidro NaCl kušņu uzpildīšana reaktorā.

Temperatūra reaktorā (aptuveni  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tika uzturēta ar elektriskā loka palīdzību. Toties reaktora korpus, kā arī vāks un reaktora dibens tika dzesēti. Maksimālā temperatūra uz reaktora virsmas nepārsniedza  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Eksperimentam noslēdzoties, elektrods kopā ar vāku tika demontēts, zīm. 2.12. Kā redzams no zīm. 2.13. reaktora korpusa iekšpuse ir nosacīti tīra. Redzamas vienīgi atsevišķas kušņu pēdas. Eksperimenta laikā visas stenda sistēmas darbojas apmierinoši. Ir iespējams uzturēt elektrisko loku reaktorā, dzesēšanas sistēma nodrošina reaktora korpusa temperatūru un iespēju to regulēt mainot ūdens caurplūdi. Toties, lai pētītu titāna elektroda kušanas procesu un tā filtrēšanos cauri kušņu slānim, ir jāpilnveido dozatora konstrukcija.



Zīm. 2.12. Ti elektrods kopā ar NaCl kušņiem



Zīm.2.13. Reaktors pēc elektroda demontāžas

#### **Aktivitāte Nr.4. Zināšanu un tehnoloģijas pārnese.**

Kas attiecas uz zināšanu un tehnoloģijas pārnesei ir iesniegts un pieņemts referāts

E. Platacis, I. Kaldre, E. Blumbergs, V. Serga, „*Electroslag process for better titanium deposition morphology*” (Electromagnetic material processing (EMP) konferencei Japānā. (sk. Pielikumu 1). Paralēli tam tiek vākti materiāli patentam.

#### **5. Secinājumi.**

1. Labiekārtota telpa eksperimentu veikšanai ar ķīmiskām vielām metalurģiskajā boksā un pārvietots, samontēts un pārbaudīts Ti/TiAl eksperimentālās iekārtas reaktora modeļa stends.
2. Turpinās teorētiskie reaktorā notiekošo atsevišķu procesu izvērtējumi ar mērķi izstrādāt iekārtas kompleksu 3D matemātisko modeli.
3. Pārbaudītas reaktora modeļa sistēmas darba apstākļos kas ir tuvi reālajiem un veikts eksperiments ar izkausētu kušņu uzpildīšanu reaktorā.
4. Sagatavots, iesniegts un akceptēts Referāts EMP konferencei Japānā.

#### **Pielikums 1.**

##### **Electroslag process for better titanium deposition morphology**

E. Platacis, I. Kaldre, E. Blumbergs, V. Serga

Institute of Physics University of Latvia, Miera 32, Salaspils LV-2169, Latvia

\*erik@sal.lv

Most common process for titanium production nowadays is Kroll process, which has several drawbacks. Process is cyclical, and titanium comes out in sponge like form. This means that process is long, requires complex post-processing and is energy consuming. In this work we present the idea to use modified Kroll and electroslag process to produce titanium and TiAl alloy in continuous, more efficient process. In this work experimental result acquired by small scale

experimental setup is presented and numerical and analytical results showing the potential of this technology are given.

Basic idea is to use high temperature reactor where titanium tetrachloride is reduced with magnesium, while liquid flux layer is placed below reaction zone as shown in Fig.1 (a).

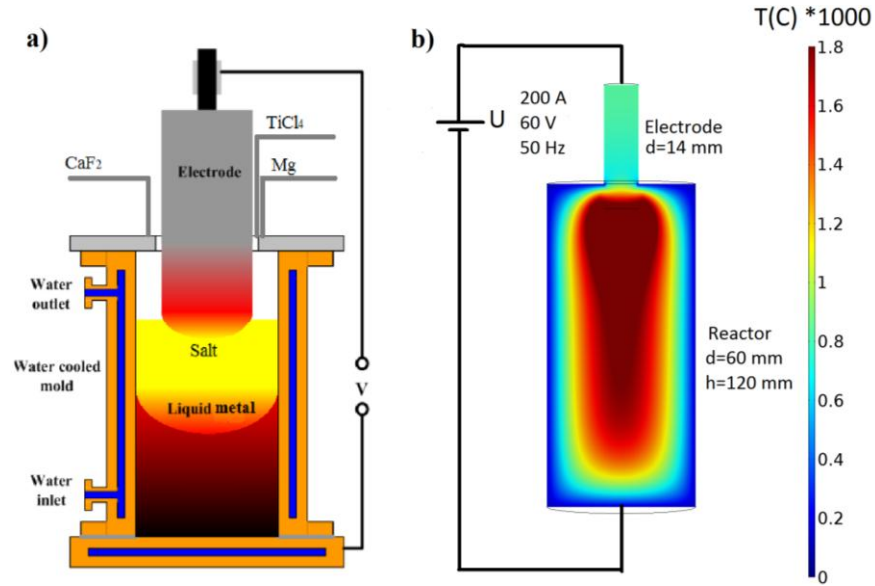


Figure 2. a) Scheme of the experimental setup; b) numerically calculated temperature in the reactor

Flux layer may significantly change the morphology of the titanium deposition as titanium droplets are filtering through flux layer. It is shown that this process can be done in small semi-continuous reactor by electric arc heating. Reaction products are heated up to  $1500$  °C (Fig.1(b)), while reactor walls are protected by thin solid crust of the material. Numerical models to describe thermal, fluid flow and electromagnetic processes in reactor model and full-scale reactor are presented along with first experimental results using small scale experimental reactor. Potential improvement comparing with the existing industrial process is estimated.