



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

Reinis Baranovskis

**ELEKTROMAGNĒTISKI
IEROSINĀTU PLŪSMU IZPĒTE
AR MĒRĶI OPTIMIZĒT
DEGAZĀCIJAS PROCESU
ŠĶIDRĀ METĀLĀ**

Rīga, 2023



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**ELEKTROMAGNĒTISKI IEROSINĀTU
PLŪSMU IZPĒTE AR MĒRĶI
OPTIMIZĒT DEGAZĀCIJAS PROCESU
ŠĶIDRĀ METĀLĀ**

Reinis Baranovskis

Darba vadītājs: Dr. phys. Ilmārs Grants

Doktora grāda iegūšanai fizikas un astronomijas nozarē
Apakšnozare: Šķidrums un gāzu mehānika

Rīga 2023

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, Matemātikas un Optometrijas fakultātē un Latvijas Universitātes Fizikas institūtā laika posmā no 2019. gada līdz 2022. gadam.

Darbs sastāv no ievada, četrām nodaļām, kopsavilkuma un literatūras saraksta.

Darba forma ir disertācija fizikas un astronomijas nozarē, šķidrumu un gāzu mehānikā.

Darba zinātniskais vadītājs: Dr. phys. vadošais pētnieks Ilmārs Grants

Darba recenzenti:

- 1) Dr. phys. Guntars Kitenbergs (Latvijas Universitāte, Latvija)
- 2) Dr. sc. Aleksandrs Pedčenko (Coventry University, Lielbritānija)
- 3) Dr. ing. Egbert Baake (Leibniz Universitāt Hannover, Vācija)

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2023. gada 24. martā Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas nozares promocijas padomes atklātā sēdē

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU Fizikas un astronomijas zinātņu nozares promocijas

Padomes priekšsēdētājs: _____/ Dr. phys. Andris Jakovičs /

Padomes sekretāre: _____/ Sintija Siliņa /

© Latvijas Universitāte, 2023
© Reinis Baranovskis, 2023

ISBN 978-9934-18-931-9
ISBN 978-9934-18-932-6 (PDF)

Anotācija

Doktora darba pētījuma motivācija ir nepieciešamība uzlabot vienu no alumīnija ražošanas posmiem: degazāciju. Degazācija ir alumīnijā izšķīdušo gāzu koncentrācijas samazināšana, kas galvenokārt nozīmē atbrīvošanos no šķidrā alumīnijā izšķīdušā ūdeņraža. Industrijā visizplatītākais degazācijas risinājums ir inertas gāzes ievadīšana izkausētā alumīnijā, ar kuras palīdzību tiek piesaistīts izšķīdušais ūdeņradis, un tas kopā ar gāzes burbuļiem tiek izvadīts prom no metāla caur tā brīvo virsmu. Procesa efektivitātes uzlabošanai industrijā veic burbuļu sašķelšanu - visbiežāk mehāniski, ar alumīnijā iemērtu rotoru. Lai izvairītos no siltuma zudumiem un strauja detaļu nolietojuma, ko rada tiešais kontakts ar karsto un agresīvo vidi, darbā tiek pētīta jauna bezkontakta metode alumīnija degazēšanai, kurā turbulento plūsmu burbuļu sašķelšanai rada elektromagnētiskie spēki. Šķidrā metālā inducētā plūsmā tiek pētīta eksperimentāli, izmantojot GaInSn sakausējuma un alumīnija modeļus. Pirmo reizi ir tiešā veidā veikti burbuļu izmēra mērījumi šķidrā metālā (GaInSn) un noskaidrota to diametra korelācija ar plūsmas raksturlielumiem. Veiktie ātruma un spiediena mērījumi raksturo radītās plūsmas dinamiku šķidrā metāla tilpumā. Jaudas mērījumi raksturo elektromagnētiskās mijiedarbības efektivitāti un ierobežojumus plūsmas intensitātei, ko spēj radīt rotējošie pastāvīgie magnēti. Iegūtie eksperimentālie rezultāti papildus tiek izmantoti, lai validētu skaitliskos modeļus, kas ir izstrādāti paralēli šim darbam. Izmantojot eksperimentāli pārbaudītus skaitliskos modeļus ir iespējams aprēķināt turbulences raksturlielumus šķidrā metāla plūsmā. Šajā darbā tiek aprakstīta metode, kurā skaitlisko modeļu rezultāti tiek izmantoti analītiskiem aprēķiniem, ar kuriem var paredzēt burbuļa izmērus izotropiskā turbulentā plūsmā. Balstoties uz šo metodi, tiek paredzēts sagaidāmo burbuļu izmērs alumīnija degazācijas prototipa iekārtā. Uzlabojot metalurģiem tik "ikdienišķu" ražošanas posmu, ietekme būtu mērāma vairāk nekā 2500 alumīnija pārkausēšanas rūpnīcās visā pasaulē, kurās kopsummā ir ap 25 000 degazēšanas iekārtu, potenciāli samazinot patērētās inertās gāzes daudzumu, patērēto enerģiju un negatīvo ietekmi uz vidi kopumā.

Atslēgvārdi: alumīnija degazācija, burbuļu sagraušana, izšķīdis ūdeņradis, metāla maisīšana

Saturs

1	Ievads	5
1.1	Motivācija	5
1.2	Darba mērķi	5
1.3	Kopsavilkuma struktūra	6
1.4	Novitāte	7
2	Teorētiskais pamatojums	8
2.1	Gāzu šķīstība metālos	8
2.2	Burbuļu sadalīšanās mehānismi	9
3	Literatūras apkopojums	12
3.1	Alumīnija degazēšanas metodes	12
3.2	Burbuļu veidošanās šķīdros metālos	14
4	Eksperimenti	15
4.1	GaInSn eksperimentu modelis	15
4.2	Mērījumu metodes	18
5	Rezultāti un diskusija	19
6	Kopsavilkums	23
6.1	Publikācijas un dalība konferencēs	24
6.2	Tālākie pētījuma soļi	26
6.3	Autora ieguldījums	28
	Literatūras saraksts	29
	Pateicības	32

1. Ievads

1.1. Motivācija

Lai gan alumīnijs ir pasaulē otrs visvairāk izmantotais metāls, daži tā ražošanas posmi nav uzlaboti gadu desmitiem. Mans promocijas darbs fokusējas uz vienu no alumīnija ražošanas posma, ko sauc par "degazēšanu", uzlabošanu. Metalurģiskā vidē izkausēts metāls satur izšķīdušas gāzes, kas izraisa mehāniskus defektus, piemēram, porainību, kas pasliktina mehāniskās īpašības [1]. Lai no tā izvairītos, pirms izkausētā metāla kristalizācijas ir jāsamazina izšķīdušo gāzu koncentrācija zem kritiskā līmeņa. Visizplatītākais veids ir inertas gāzes ievadīšana sakausējumā, kas absorbē izšķīdušo ūdeņradi un atstāj metālu caur tā brīvo virsmu. Esošajām metodēm [2] ir nepieciešams mehānisks kontakts ar metālu, lai izkļiedētu gāzi mazākos burbuļos un paātrinātu degazēšanas procesu. Saskaņā ar karsto un ķīmiski agresīvo alumīniju veicina paātrinātu detaļu nolietojumu, kas atkal paaugstina uzturēšanas izmaksas.

Savā darbā piedāvāju pētīt jaunu degazēšanas metodi, kas izmanto bezkontakta elektromagnētisku maisīšanas sistēmu, lai radītu degazēšanas procesam piemērotu plūsmu. Izaicinošs uzdevums šeit ir nodrošināt pietiekami intensīvu un turbulentu plūsmu, kas spēj sagraut un izkļiedēt ievadītos burbuļus un kas tajā pašā laikā neradītu lielas brīvās virsmas deformācijas. Realizējot elektromagnētisku maisīšanu bezkontakta veidā, process potenciāli var kļūt energoefektīvāks, jo tiktu samazināti termiskie zudumi, kas saistās ar mehānisko maisīšanu, kuru realizē šobrīd izmantotajās metodēs. Papildus tiktu samazināts detaļu skaits, kas ir tiešā saskarē ar turbulento alumīnija plūsmu. Uzlabojot tik svarīgu alumīnija ražošanas posmu, ietekmētas būtu ap 2500 alumīnija kausēšanas rūpnīcas, kurās ir aptuveni 25000 degazēšanas vienību, tādējādi potenciāli uzlabojot enerģijas patēriņu, samazinot inertās gāzes patēriņu un kopumā palielinot efektivitāti.

1.2. Darba mērķi

Darba mērķis ir izstrādāt jaunu degazēšanas sistēmu, izmantojot elektromagnētiski radītu plūsmu kausējumā.

Izvirzītie **darba mērķi**:

- Veikt literatūras analīzi, lai izprastu burbuļu sagraušanas kritērijus

un mērīšanas metodes degazēšanas rezultātu kvantitatīvai noteikšanai.

- Izstrādāt zemas temperatūras eksperimentu, izmantojot GaInSn eitektisko sakausējumu, kas ļauj veikt plūsmas mērījumus dažādām degazēšanas konfigurācijām. Izmantot šo modeli, lai pētītu burbuļu sasmalcināšanu ar elektromagnētiski izveidotu plūsmu, lai apstiprinātu dažādu konfigurāciju degazēšanas potenciālu.
- Izstrādāt vidēja mēroga alumīnija eksperimentus, lai pētītu burbuļu sasmalcināšanu un demonstrētu burbuļu sašķaidīšanu ar elektromagnētiski virzītu plūsmu.
- Iegūt eksperimentālos rezultātus MHD skaitliskā modeļa validācijai. Izstrādāt metodi, kas izmanto skaitliskā modeļa rezultātus, lai prognozētu burbuļa izmēru elektromagnētiski maisītā alumīnijā.
- Paredzēt rūpnieciskās degazēšanas iekārtas darbības parametrus, pamatojoties uz eksperimentāliem novērojumiem.

1.3. Kopsavilkuma struktūra

Lai izprastu degazēšanas procesu, vispirms sadaļā 2 ir aprakstīta tā pamatā esošā fizika, ietverot gāzes burbuļu veidošanos, stabilitāti un dinamiku šķidrumā. Īpaša uzmanība tiek pievērsta procesiem esošajās degazēšanas metodēs un skaitliskajos aprēķinos izmantoto vienādojumu izklāstam.

Sadaļā 3 tiek apkopota literatūras analīze, koncentrējoties uz esošajām degazēšanas metodēm, jaunākajiem sasniegumiem tajās un jaunākajiem pētījumiem, lai piedāvātu metodi iekļautu pašreizējās rūpniecības un zinātnes situācijas kontekstā. Pēdējā apakšnodaļa iepazīstina ar pastāvīgo magnētu mašīnām un to salīdzinājumu ar citām metāla transportēšanas elektromagnētiskajām metodēm.

Sadaļā 4 ir aprakstīta eksperimentālā iekārta, ko darbā izmanto, lai modelētu degazēšanas procesu laboratorijas mērogā, un rūpīgi izskaidroti mērāmie parametri, to nozīme un metodes, kas izmantotas rezultātu iegūšanai.

Rezultātu analīze un diskusija ir parādīta sadaļā 5, kur katras mērīšanas metodes rezultāti tiek parādīti kopā ar bezdimensiju analīzi kā daļu no tehnoloģiju mērogošanas procesa.

Pēdējā sadaļā, sadaļā 6, ir apkopoti iegūtie rezultāti, izceltas piedāvātās tehnoloģijas priekšrocības un ierobežojumi, kā arī izvīzītas hipotēzes par iespējamo izmantošanu vieglo sakausējumu ražošanas nozarē.

1.4. Novitāte

Pastāvīgo magnētu sūkņi un maisītāji šķidra metāla plūsmas radīšanai ir šaura nozare, kurā bieži vien katra sūkņa dizains un parametri paši par sevi ir unikāli. Līdzīgs tehniskais risinājums kā darbā izstrādātajai MHD mašīnai kopā ar feromagnētiskajam uzlikām literatūrā nav atrasts. Attiecībā par alumīnija degazāciju: pētījumi šajā virzienā galvenokārt tiek veikti ar alumīniju (kur tiek mērīts iegūtais gāzes saturs) vai ar ūdens modeļiem (kur novēro burbuļus). Šajā pētījumā tiek izmantots fizikāls modelis ar šķidra metāla (GaInSn) sakausējumu, kas ļāvis novērot burbuļu kustību šķidrā metālā, kas citviet realizēts tikai ar tādām sarežģītām metodēm kā rentgenogrāfiju un neitronu staru attēlveidošanu.

Līdzīgs degazēšanas risinājums kā šajā disertācijā literatūrā nav atrasts. Šajā darbā pirmo reizi tiek vizuāli novērota burbuļu sašķelšana ar turbulentu plūsmu šķidrā metālā un tiek izmantota jauna pieeja burbuļa izmēra prognozēšanai. Eksperimentāli validētais skaitliskais modelis aprēķina turbulences raksturlielumus, ko var izmantot, lai izteiktu burbuļa izmēru saskaņā ar empīrisku sakarību izotropā turbulencē. Šī aprēķinu metode tālāk tiek izmantota, lai paredzētu apstākļus alumīnija prototipa iekārtā.

2. Teorētiskais pamatojums

Burbuļu sadalīšanās šķidrā metālā elektromagnētisko spēku ietekmē ir multifizikāla problēma, kas ietver vairākas nepārtrauktas vides mehāniskās nozares. Šajā sadaļā ir apskatīti teorijas galvenie aspekti.

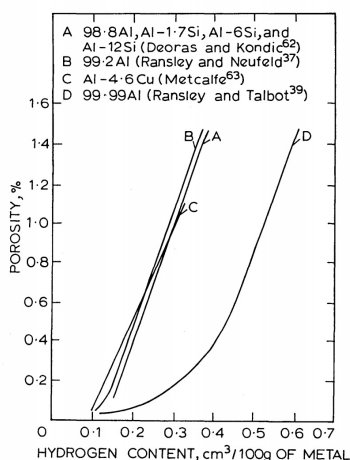
1. Pirmkārt, ir apkopots, kā gāzes šķīdība metālā nosaka nepieciešamību pēc degazešanas, identificējot un norādot piesārņojuma avotus un izskaidrojot udeņraža klātbūtni alumīnijā.
2. Otrkārt, tā kā lielākā daļa degazešanas metožu balstās uz inertas gāzes iepūšanu sakausējumā, tiek analizēta gāzes burbuļu stabilitāte šķidrā metālā, lai saprastu nepieciešamos kritērijus burbuļu sadalīšanai.
3. Treškārt, zinātniskajā literatūrā sistēmas raksturošanai un dažādu modeļu salīdzināšanai izmantoti vairāki bezdimensionāli skaitļi. Tiek apspriesti visbiežāk lietotie, un šī pētījuma bezdimensionālo vērtību diapazons ir izcelts Greisa diagrammā.
4. Visbeidzot, tiek apspriesti elektromagnētisma un šķidrums mehāniskās vienādojumi, kas veido vienādojumu pamatu, ko izmanto skaitliskās metodes, lai atrisinātu pētīto problēmu. Turklāt ir noteiktas galvenās bezdimensiju grupas, kas raksturo elektromagnētisko maišīšanu.

2.1. Gāzu šķīstība metālos

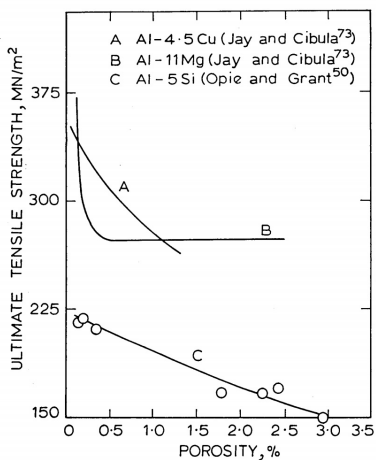
Rūpnieciskajos procesos alumīnijs neizbēgami izšķīdina ūdeņradi no ūdens tvaikiem vidē. Šajos rakstos [1, 3] ir rūpīgi izskaidrota dažādos sakausējumos izšķīdināta udeņraža nelabvēlīgā ietekme. Alumīnijs savāc ūdeņradi no ūdens tvaikiem un gaisa tā uzglabāšanas un apstrādes laikā. Protams, process ir krasi ātrāks, ja alumīnijs ir izkausēts un tā brīva virsma ir dinamiska. Tādējādi viskritiskākā fāze, kurā kausējums var tikt piesārņots ar ūdeņradi, ir alumīnija kausēšana ar gāzi, kur viens no sadegšanas produktiem ir ūdens.

Alumīnija industrijā udeņraža koncentrācija tiek mērīta salīdzinoši divainās mērvienībās: $\frac{\text{cm}^3}{100 \text{ g}}$. Pirmkārt, izšķīdušais ūdeņradis rada porainību pat esot nelielā daudzumā, kas pasliktina kausējuma mehāniskās īpašības, kā attēlots 2.1. attēla grafikos. Slietnis, kurā izšķīdušais ūdeņradis rada ievērojamu porainību, ir atkarīgs no sakausējuma un izmantotās

ražošanas metodes, tas ir robežās no 0.1 līdz 0.4 $\frac{\text{cm}^3}{100 \text{ g}}$ (sk. 2.1a grafiku). Pārveidojot uz masas daļas vērtībām, robeža ir niecīga, robežās no $8.5 \cdot 10^{-5}$ līdz $3.5 \cdot 10^{-4}$. Tomēr porainība ir atkarība no tilpuma daļas, kas ir ar kārtas lielumu 10^{-2} . Grafiks 2.1b attēlā skaidri parāda, ka porainība 1 % apmērā ievērojami samazina stiepes izturību. Tāpēc udeņraža satura samazināšana (vai vienkārši degazēšana) ir nepieciešams solis pirms gala alumīnija izstrādājuma ražošanas.



(a) Porainības atkarība no udeņraža koncentrācijas



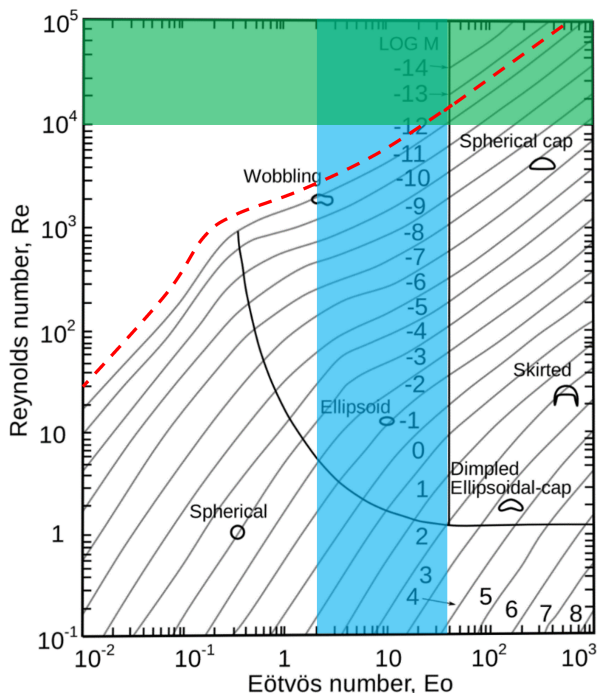
(b) Stiepes izturības atkarība no porainības

2.1. attēls: Izšķīdušā udeņraža ietekme uz porainību un mehāniskajām īpašībām alumīnija un alumīnija sakausējuma stieņos [1]

2.2. Burbuļu sadalīšanās mehānismi

Attēlā 2.2 Grace diagramma - Reinoldsa, Etvosa un Mortona skaitļu vērtību ietekme uz novērojamajiem burbuļiem. Ar iekrāsotajiem apgabaliem un raustīto līniju tajā ir norādīti vērtību intervāli, kas atbilst šī darba ietvaros veiktajiem eksperimentiem. Saskaņā ar to mēs redzēsim svārstīgas formas, kas ir saprātīgi, jo tas tiek novērots pirms burbuļa sabrukšanas.

Paredzams, ka Froda skaitlis būs ievērojami lielāks par viens - $Fr \gg 1$. Tas nozīmē, ka dominē inerciālie un centrālās spēki un plūsma ir superkritiska (plūsma, kuras ātrums ir lielāks par viļņa ātrumu). Reinoldsa



2.2. attēls: Formas tuvinājums atkarībā no Reinoldsa, Etvosa un Mortona skaitļiem [4]; Zaļais ēnojums ir Reinoldsa skaitļa diapazons mūsu eksperimentu laikā, zilais ēnojums ir Etvosa skaitlis burbuļiem no 4 līdz 20 mm, un sarkanā raustītā līnija ir Mortona skaitļa logaritms, ņemot vērā GaInSn īpašības

skaitlis garuma skalā ir lielāks par 10^3 , tāpēc mēs sagaidām turbulentu plūsmu. Etvosa skaitlis sasniedz viens ap aptuveni 4 mm.

Šādos apstākļos vienīgais burbuļu sabrukšanas mehānisms ir radīt spiediena starpību šķidrums un gāzes saskarsnes vietā. Turbulentas plūsmas gadījumā spiediena izmaiņas rodas no šķidrums plūsmas dinamiskā spiediena, kas haotiski mainās laikā. Burbuļa sadalīšanās pamatmehānisms ir sarežģīts. Saskaņā ar ļoti citēto Hinzes rakstu [5] plūsmā ir divi spēku avoti, trīs deformācijas veidi un seši galvenie plūsmu veidi apkārt lodītei. Plūsmas stāvokli raksturo divi bezdimensionāli skaitļi. Pirmais ir Vēbera skaitlis (2.1), kas raksturo pretestības spēka attiecību pret virsmas spraiguma spēku.

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\gamma} \quad (2.1)$$

Vēbera skaitlis ir atkarīgs no blīvuma, ātruma, mēroga un virsmas sprauguma. Katram burbuļa izmēram ir kritisks Vēbera skaitlis, pie kura mēs sagaidām, ka 95 procenti no burbuļiem būs ar izmēru zem minētā burbuļa izmēra. Kritērijs ir empīriski atrasts, tas ir atkarīgs no plūsmas veida un parasti ir aptuveni 0.585–2.35 [6].

$$We_{critical} = \frac{\rho \bar{v}^2 D_{max}}{\gamma} \quad (2.2)$$

Otrs izaicinājums parādās, kad mēs zinām savu mērķa Vēbera skaitli un mēģinām to sasniegt, pārbaudot ātruma lielumu \bar{v} raksturotu (2.2) vienādojumā. Šo lielumu definē kā vidējo vērtību visā plūsmas laukā ātruma starpību kvadrātiem attālumā, kas vienāds ar D_{max} ! Tas kļūst vēl problemātiskāks, ja burbuļa izmērs ir salīdzināms ar robežslāņa biezumu. Tāpēc autors izsaka ātrumu ar (2.3) formulu enerģijas ievades kontekstā, pieņemot izotropu viendabīgu turbulenci.

$$\bar{v}^2 = C_1(\epsilon D_{max})^{2/3} \quad (2.3)$$

kur ϵ ir turbulences kinētiskā enerģijas (TKE) izkļiedes ātrums, kas ir pamatparametrs, kas norāda uz turbulences stiprumu, ko mēra W/kg . Iz-
mantojot vēl pieņēmumus, piemēram, mazu Vi , eksperimentāli atrastās konstantes un ņemot vērā burbuļa sadalīšanās statistisko raksturu, maksimālo burbuļa izmēru var izteikt kā vienādojumu (2.4):

$$D_{max95} = 0.725 \left(\frac{\gamma}{\rho_c} \right)^{3/5} (\epsilon)^{-2/5} \quad (2.4)$$

Iegūtajam rezultātam var izvirzīt divas interpretācijas:

1. Divas nepārtrauktās vides materiāla īpašības - virsmas spraugums un blīvums - veido svarīgu attiecību. Pielāgojot to, mēs varam interpretēt ūdens modeļu rezultātus un paredzēt, kā šie paredzējumi mainītos pie šķidrā metāla blīvuma un viskozitātes.
2. Turbulences izkļiedes ātruma palielināšana sadalīs burbuļus smalkākos.

3. Literatūras apkopojums

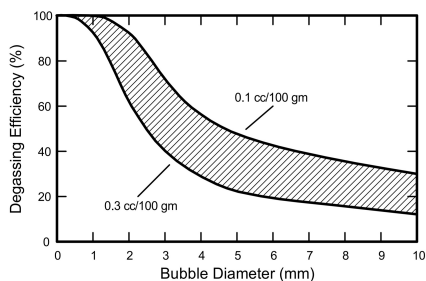
3.1. Alumīnija degazēšanas metodes

Pastāv vairākas degazēšanas metodes, kas tehnoloģiski atšķiras, bet ūdeņraža atdalīšanas apakšmehānismi vienmēr ir difūzijas ceļā. Ja uz alumīnija tīģeli lieki neiedarbojas, izšķīdušais ūdeņradis pārvietojas koncentrācijas gradienta virzienā uz metāla brīvo virsmu (pieņemot zemāku H_2 koncentrāciju gaisā). Šāds scenārijs ir nepraktiski lēns alumīnija krāsns gadījumā, kuras raksturīgais izmērs ir 1 m. Tātad visu esošo metožu mērķis ir paātrināt difūzijas ātrumu, mainot spiedienu, virsmas laukumu un/ vai attālumu līdz zemākas koncentrācijas zonai. Četras vizizplatītākās metodes ir uzskaitītas zemāk:

1. Gāzes skalošana ar rotējošu gāzes injektoru [2], kur rotējošs rats nodrošina gāzes ievadi un maisīšanu. Kopumā gāzes skalošana ir visvairāk pētītā metode, un pēdējo 40 gadu laikā tai veiktas vairākas uzlabojumu iterācijas [7]. Ir optimizēta ģeometrija, īpaši sprauslu konstrukcija, kas var griezties un ievadīt gāzi vai pulveri, lai sašķeltu gāzes burbuļus līdz noteiktam izmēram. Primitīvākais gāzes attīrīšanas veids ir gāzes ievade caur šauru uzgali, kas rada centimetru lielus burbuļus, kuru termodinamiskā efektivitāte ir ap 10..20 %. Smalkākus burbuļus var iegūt, izmantojot porainu aizbāzni uzgaļa galā, palielinot efektivitāti līdz 30..40 %. Strauja gāzes attīrīšanas metožu attīstība notika 1966. gadā [8], kad tika ieviests rotējošs sprauslas inertās flotācijas (SNIF) process. Tā degazēšanas efektivitāte ir tuvu 100% [9], jo tas rada milimetra izmēra burbuļus. SNIF procesa galvenais uzdevums ir izmantot statoru, kas aptver rotoru. Spraugā starp rotoru un statoru tiek radīti spēcīgi bīdes spēki, un gāze tiek ievadīta tieši tur.
2. Ultraskaņas degazēšana, kas izmanto mehāniskus viļņus, radot spiediena svārstības metālā. Izmantojot mehānisko ultraskaņu, notiek tūlītējās vietējās spiediena izmaiņas. Zema spiediena fāzē veidojas sīki gāzes burbuļi, kas augstspiediena fāzē sabrūk un rada triecienviļņus. Šīs svārstības ievērojami palielina masas pārnese ātrumu, izmantojot rektificētu difūziju [10], kā rezultātā difūzijas ātrums ir ievērojami uzlabots salīdzinājumā ar gadījumu, kad nekas netiek darīts. Piemēram, alumīnija degazēšana paraugiem no 0.2–2.0 kg ir diapazonā no vienas līdz septiņām minūtēm atkarībā no apstākļiem [11]. Ultraskaņas degazēšana ir ļoti efektīva maziem tilpumiem, bet zaudē

pielietojamību, kad alumīnija tilpums tiek mērogots, jo ultraskaņas intensitāte ātri samazinās līdz ar attālumu, liekot degazēšanai lokalizēties tikai ap zondi.

3. Vakuuma degazēšana, kur spiediens uz brīvo virsmu tiek samazināts, lai paātrinātu gāzes izvadišanu. Kad parciāls spiediens tiek samazināts, ūdeņraža maksimālā šķīdība samazinās saskaņā ar Zīverta likumu. Praktiska līdzība ir pirmā reize atverot gāzēta ūdens pudeli. Tur CO_2 ir izšķīdināts ūdenī un ir stabils paaugstinātā spiedienā apm. 2 – 3.5 atm. Atverot pudeli, spiediens tiek izlīdzināts līdz atmosfēras spiedienam, un CO_2 sāk izplūst. Tomēr, neskatoties uz augstu piesātinājuma pakāpi, ja ūdens netiek kustināts, CO_2 izplūst lēni ar raksturīgo laiku ap stundu. Tāpēc vakuuma degazēšanas metode bieži tiek apvienota ar ultraskaņas degazēšanu [12]. Piemēram, 800 g alumīnija paraugam degazēšanas process aizņem 20–30 minūtes [11], un ilgums tikai palielināsies, palielinoties alumīnija tilpumam. Pievienojot virsmas perturbāciju ultraskaņas veidā, palielinātos procesa laiks par vienu kārtu.
4. Ķīmiskā degazēšana, kurā vielas tiek pievienotas kausējumam, tādējādi reaģējot ar alumīniju un radot gāzes, kas atdala ūdeņradi līdzīgi kā ar gāzes attīrīšanas metodē. Piemēram, heksahloretāns (C_2Cl_6) tiek pievienots kā cieta viela, un notiek dažādas reakcijas [13], kuru galaprodukti ir gāzveida formā. Iegūtās gāzēs tiek izmantotas tādā pašā veidā kā gāzes skalošanā, un izšķīdušo ūdeņradi aizvada ar nešķīstošām gāzēm, kas virzās uz zemākas koncentrācijas reģioniem ārpus metāla.



3.1. attēls: Degazācijas efektivitāte divos ūdeņraža koncentrācijas līmeņos [9]

Degazācijas efektivitātes un degazēšanas burbuļa izmēra korelācija 250 kg tīģeļa krāsnī ir parādīta attēlā 3.1. Pamatojoties uz to, par mērķi tiek uzstādīts iegūt burbuļus ar diametru 2 mm.

3.2. Burbuļu veidošanās šķidros metālos

Plašs šķidro metālu burbuļu dinamikas pārskats ir atrodams Hasa u.c. pārskata rakstā [14]. Tajā aplūkotas mērīšanas metodes, akcentējot šķidros metālus un apspriežot to nepilnības un izaicinājumus. Šajā darbā visatbilstošākā ir diskusija par burbuļu veidošanās mehānismu pie sprauslām un attīrīšanas aizbāžņiem.

Pirmkārt, tiek parādīts, ka gāzes ieplūdes vietas virsmas īpašības nosaka burbuļu veidošanās procesu. Ja burbuļi veidojas caur sieta slāni, samitrinātas un nesamitrinātas virsmas rada radikāli atšķirīgus rezultātus. Mitrināts siets rada mazākus burbuļus, kas ir viendabīgāk izkļiedēti rodoties caur vairāk caurumiem [15]. Rakstā ir arī uzsvērtas izmantotā gāzes plūsmas ātruma robeža, pirms burbuļi no blakus esošajiem caurumiem savienojas un atsevišķu burbuļu vietā veido gāzes segu. Laboratorijas eksperimentos šajā promocijas darbā gāzes ievadīšanai tiek izmantota viena atvere, tomēr mazāka izmēra dēļ šī tīģeļa sienīņu mitrināšana kļūst būtiska. Ja plūsma nav pietiekami spēcīga un gāzes ieplūde atrodas tuvu sienai ($< 1\text{ cm}$), var veidoties gāzes kabata, kas virzīsies uz augšu, slidot starp sienu un metālu.

Otrkārt, burbuļa izmēru nosaka gan gāzes plūsmas ātrums, gan gāzes ieplūdes lielums. Nesenaajā rakstā [6] ir apkopoti kritiski Vēbera skaitļi dažādiem turbulentas plūsmas iestatījumiem. Parasti tie ir diapazonā no 0.585 līdz 2.35. Rakstā eksperimentāli parādīts lielāks burbuļu skaits uzreiz pēc to rašanās, bet vēlāk tie saplūst un sasniedz stabilu skaitu turbulentās caurules plūsmā. Burbuļa lieluma spektri (novēroto burbuļu skaits salīdzinājumā ar burbuļa izmēru) atbilst funkcijai ar pakāpi $-10/3$.

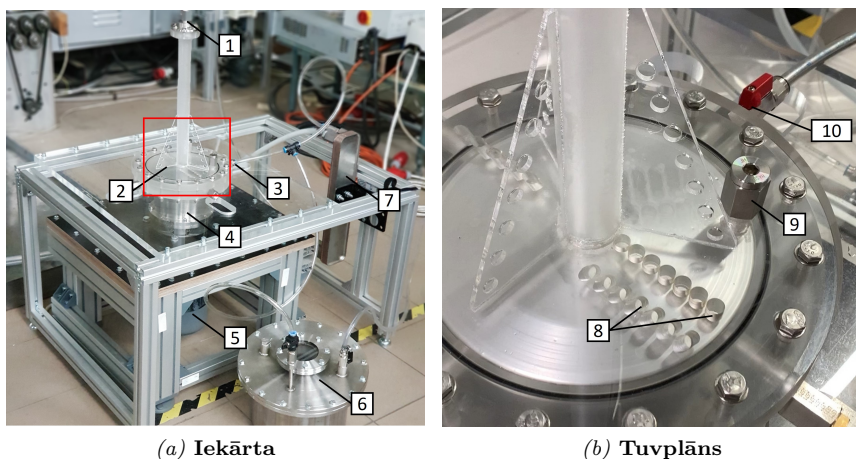
Treškārt, gāzes burbuļa diametrs mēreni palielinās, palielinoties gāzes plūsmas ātrumam [16]. Gāzes burbuļa vidējais tilpums ir aptuveni proporcionāls gāzes ievades plūsmas ātrumam. Ievēribas cēlonis ir fakts, ka, kontrolējot plūsmas ātrumu (piemēram, ar masas plūsmas regulatoru), var izmērīt burbuļa atdalīšanas procesa biežumu un prognozēt burbuļa izmēru. Frekvences un plūsmas ātruma korelāciju piemērus var redzēt šajā pētījumā [17].

Ceturtkārt, gāzes burbuļa diametrs ir atkarīgs no gāzes atveres izmēra [18]. Tika pētīta burbuļu veidošanās dinamika no iegremdētām atverēm, kuru izmērs ir no 0.04 līdz 0.80 mm, un atklāti citi burbuļu veidošanās mehānismi, salīdzinot ar milimetru diapazona atverēm. Neatkarīgi no tā, korelācija paliek nemainīga - jo mazāka ir atvere, jo smalkāki burbuļi var veidoties.

4. Eksperimenti

Eksperimenti ir šī darba pamats, tāpēc šajā nodaļā ir iepazīstināti un detalizēti aprakstīti eksperimentālie modeļi. Vispārīgi runājot, tos var iedalīt eksperimentālajās sērijās ar GaInSn sakausējumu un alumīniju. Šeit ir minētas visas izmantotās mērījumu metodes abos gadījumos. Lielākā daļa darba tiek veikta ar GaInSn sakausējumu vienu eksperimentālo iekārtu, kas tika pielāgots daudziem eksperimentiem. Lielākā daļa rezultātu un diskusijas par tiem ir atrodamas nākamajā nodaļā nr. 5.

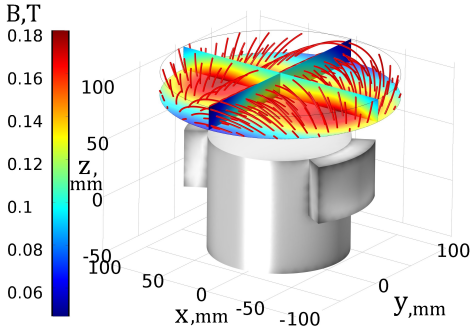
4.1. GaInSn eksperimentu modelis



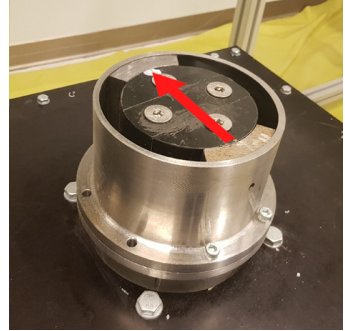
4.1. attēls: GaInSn eksperimentāla iekārta: 1 - (metāla) ieeja 2 - noslēgts organiskā stikla rezervuārs; 3 - (metāla) izeja; 4 - pastāvīgo magnētu rotors; 5 - elektriskais motors; 6 - GaInSn uzglabāšanas tvertne; 7 - siltummainis; 8 - ātruma mērīšanas urbumi; 9 - argona ievades ports; 10 - (metāla) izeja

Ierosinātajai degazēšanas iekārtai ir izveidots mērogots eksperimentālais modelis, lai labāk izprastu elektromagnētiski radīto plūsmu un pārbaudītu mūsu skaitlisko modeli. Modelim (sk. att. 4.1) ir GaInSn rezervuārs, kas veidots no akrila stikla ar iestrādātiem mērīšanas caurumiem ultraskaņas Doplera ātruma mērījumiem (UDV). Mērīšanas caurumu izvietojums ir parādīts attēlā 4.1b. Zem šķidruma tvertnes pastāvīgā magnēta

rotors ir novietots koaksiāli pret trauku, un to dzen elektromotors, izmantojot mainīgas frekvences piedziņu. Pastāvīgā magnēta rotors ir magnetizēts radiāli (sk. att. 4.2b), un šāds uzstādījums konteinerā rada magnētisko lauku, kā parādīts attēlā 4.2. Modelis nodrošina iespēju cirkulēt šķidro me-



(a) Magnētiskais lauks



(b) Magneta rotors

4.2. attēls: Magnētiskais lauks konteinerā un relatīvais novietojums pret magnētu, sarkanā bultiņa norāda magnetizācijas virzienu

tālu caur izveidotām cilpām vai ierobežot maisīšanu GaInSn rezervuārā, lai modelētu visus iespējamus lietošanas gadījumus. Rezervuāra izmēri ir norādīti tabulā 4.1.

4.1. tabula: Eksperimentālās un industriālās iekārtas dimensijas

Veids	Metāls	Diam., m	Augst., m	Rotors, m	Sprauga, m
Lab.	GaInSn	0.20	0.03	0.12	0.038
Indust.	Al	0.60	0.14	0.36	0.11

Gallija sakausējums GaInSn tiek izmantots kā metāls mērogotajam modelim. Tā un izkausēta alumīnija īpašības ir salīdzinātas tabulā 4.2. GaInSn ir 2.7 reizes blīvāks, tam ir aptuveni 70% elektriskās vadītspējas, un aptuveni tāda pati dinamiskā viskozitāte kā parastajam alumīnija sakausējumam. Alumīnija īpašības atšķiras atkarībā no temperatūras un izmantotā sakausējuma veida. Šeit mēs aprakstām vērtības tieši virs kušanas temperatūras. No visām īpašībām leģējošie materiāli visvairāk ietekmē elektrisko vadītspēju, pasliktinot to. Tas notiek pat zemās koncentrācijās zem 1%. Dažu alumīnija sakausējumu elektriskā vadītspēja var atšķirties līdz pat 3 reizēm, salīdzinot ar tīru alumīniju elementārā formā. Tas mums ir svarīgi, jo elektromagnētiskie spēki ir proporcionāli elektrovadītspējai. Leģējošie elementi var gan samazināt, gan palielināt viskozitāti.

Piemēram, tīra alumīnija dinamiskā viskozitātē kušanas temperatūrā ir aptuveni $2 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, bet alumīnija sakausējumu viskozitātes diapazons ir no $1 \cdot 10^{-3}$ Pa·s līdz $4 \cdot 10^{-3}$ Pa·s.

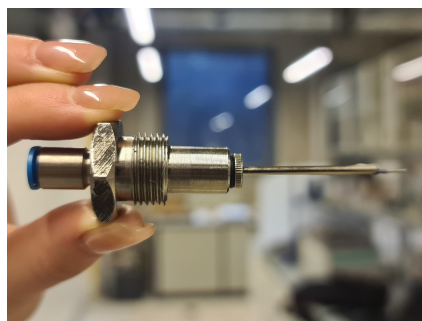
4.2. tabula: GaInSn un alumīnija īpašības

Metāls	$T_m, ^\circ C$	$\rho, kg/m^3$	$\sigma, S/m$	$\nu, m^2/s$	$\eta, Pa \cdot s$
GaInSn [19]	-19	6400	$3.46 \cdot 10^6$	$3.75 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$
Al [20, 21]	660	2391	$4.85 \cdot 10^6$	$1.55 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$

Viens no parametriem, kas nosaka ievadītās gāzes burbuļa izmēru šķidrumā, ir ievades atveres diametrs [18]. Vispārīgi runājot, mazākus burbuļus var radīt mazāka injekcijas atvere. Rūpnieciskajos risinājumos izmanto vai nu porainu materiālu, vai materiālu ar maziem (submilimetru) caurumiem. Šajā eksperimentā mēs atkārti testējam sprauslas dizainu un kā labāko risinājumu atzinām izmantot medicīnisko adatu ar adapteri, kas parādīts attēlā 4.3b. Ievades vieta atrodas tuvu cilindra ārējai sienai (sk. att. 4.3a), jo burbuļi šajā sistēmā virzās uz centru. Šeit ir arī svarīgi, lai iesmidzināšanas uzgalis neatrastos sienā, bet izvirsās metālā, lai sasniegtu maksimālos bīdes spēkus.



(a) Adatas novietojums



(b) Injekcijas adapteris ar adatu

4.3. attēls: Galējais gāzes ievades sistēmas atkārtojums, argona burbuļu ievadīšanai kausējumā izmantota 0.4 mm adata

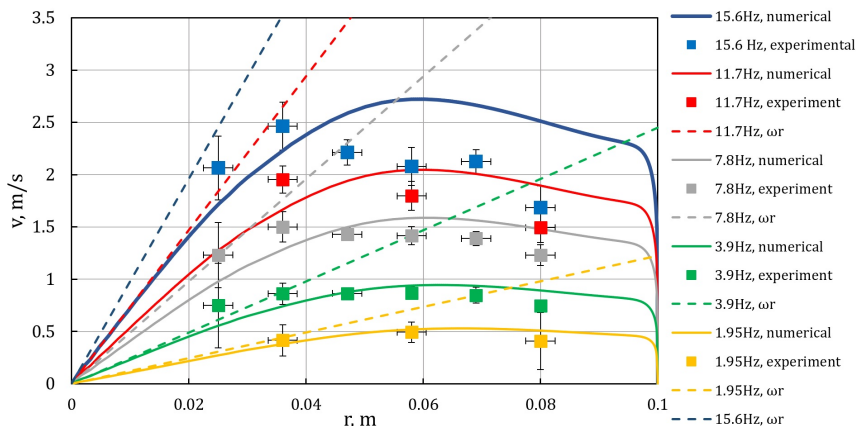
4.2. Mērījumu metodes

Lai raksturotu GaInSn modeli tiek mērīti vairāki fizikālie lielumi: plūsmas ātrums, attīstītais spiediens, caurtece, inducētā jauda, burbuļu izmērs un burbuļu dinamika. Vispārīgi mēs vēlamies kvantificēt, kā plūsmas dinamiku ietekmē tādi mainīgie kā magnētiskā lauka rotācijas frekvence, trauka un magnēta ģeometriskie izmēri. Lai to izdarītu, tika izmantotas vairākas eksperimentālās metodes:

- Ultraskaņas Doplera anemometrija (angļu val. - UDV) jeb plūsmas ātruma mērīšana. Izmantojot šo ne-intruzīvo metodi, ir iespējams izmērīt ātruma projekciju uz zondes ass. Respektīvi, iekārta spēj izmērīt vienu ātruma komponenti, kas ir paralēla zondei. Plūsmas ātrums tiek mērīts vairākos dziļumos, izveidojot ātruma profilu, kas sastāv no aptuveni 100 punktiem atkarībā no iestatījumiem.
- Hidrostatiskā spiediena mērījumi. Tos iegūst, mērot šķidrā metāla kolonnas augstumu ar precizitāti 2 mm. Attīstītais spiediens ir vienāds ar $\rho g \Delta h$, kur augstumu starpība tiek mērīta pret references līmeni, kad nenotiek maisīšana. Piemēram, lai radītu 0.1 atm lielu spiedienu, ir vajadzīga 160 mm augsts GaInSn stabs, kas, ziņot mērījuma precizitāti, rada 1.2 % lielu kļūdu pie piemēra izvēlētā spiediena.
- Caurteces un jaudas mērījumi tika iegūti, analizējot izdalīto siltuma daudzumu metālā. Metāla temperatūra mainās un tiek mērītā pie dažādām magnētiska lauka frekvencēm. Ja metāla masa un īpatnēja siltumietilpība ir zināma un sistēma ir termiski izolēta, tad ir iespējams aprēķināt izkliedēto enerģiju ar vienādojumu $m \cdot c_p \cdot \Delta T = P \cdot t$, kur c_p ir īpatnējā GaInSn siltumietilpība, m ir GaInSn masa, ko maisa, un P ir kopējā inducētā jauda laikā t .
- Burbuļu attēlveidošana turbulētā plūsmā, kas tiek realizēta, novērojot šķidrā metāla brīvo virsmu ar augstas kadru ātrumā atsvaides kameru. Šķidrā metāla virsmas filmēšanā tiek sastaptas vairākas grūtības, galvenokārt, jo šķidrā metāls ir necaurspīdīgs un kļūst par spoguļvirsmu, kad metāla virsma ir ļoti tīra. Šajā darbā burbuļu novērošana pamatā tika veikta GaInSn sakausējumā, taču tika arī realizēti eksperimenti ar alumīnija maisīšanu un gāzes ievadīšanu.
- Alumīnija paraugu šķērsriezumu analīze, kas tika veikta, lai vizualizētu porainību. Skaitot poru daudzumu noslīpēta parauga šķēlumam, ir iespējams kvantificēt porainību. Šī ir vienkārša metode, ar kuras palīdzību ir iespējams parādīt udeņraža klātbūtni.

5. Rezultāti un diskusija

Šajā sadaļā ir izklāstīti galvenie promocijas darba rezultāti. Metāla plūsma ir raksturota, analizējot ātrumu, spiedienu, caurplūdi ātrumu un jaudu, kas visi tiek iegūti ar GaInSn eksperimentālo modeli. Lielākā daļa mērījumu ir arī attēloti kopā ar skaitliski modelētiem plūsmas rezultātiem, ko veicis kolēģis doktorants Didzis Berenis projekta ietvaros. Salīdzinājums ar skaitliskajiem modeļiem ir svarīgs, jo nepieciešams analizēt TKE izkliedes ātrumu, kas ir labākais burbuļa izmēra prognozētājs un ko nevar eksperimentāli izmērīt šķidrās metālos. Šim nolūkam mēs pašļaujamies tikai uz sniegtajiem modelēšanas rezultātiem, kas savā ziņā tiek apstiprināti ar eksperimentālajiem mērījumiem, ko mēs varam iegūt (piemēram, ātrums un spiediens).



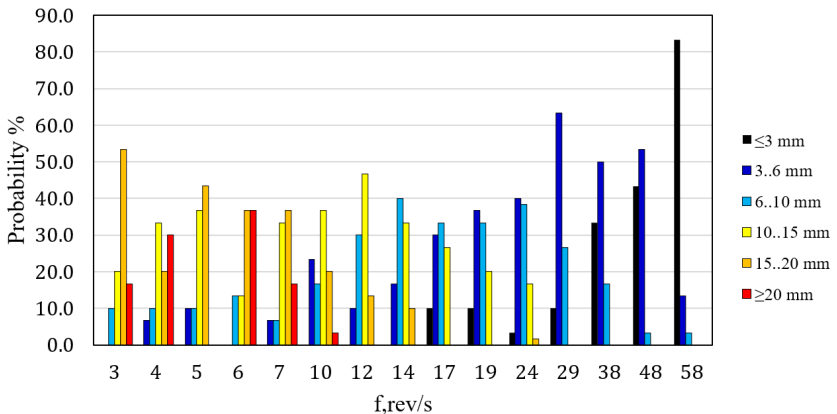
5.1. attēls: Plūsmas profili pie dažādām magnētu rotācijas frekvencēm, līnijas apzīmē skaitliskos aprēķinus, kvadrāti ir eksperimentālie mērījumi un raustītās līnijas ir ωr - magnētiskā lauka ātrums noteiktā rādiusā; Ātruma kļūdas marķieris ir viena plūsmas ātruma standarta novirze, pozīcijas kļūdas intervāls norāda platumu, kurā tiek aprēķināts vidējais ātrums

Gāzes ievades eksperimenti GaInSn sniedza ieskatu burbuļa izmēra sadalījumā, kas ir rets, ja ne unikāls pētījums šķidrā metālā. Alumīnija eksperimenti pēc būtības nodrošina mazāk mērījumu un vairāk ir kā demonstrējums. Tomēr tie ir ļoti svarīgi, jo tajos pārbauda grūti paredzamas problēmas, piemēram, gāzes ievadi. Visbeidzot, bezdimensiju analīze tiek veikta kā daļa no tehnoloģijas mērogošanas procesa, kurā tiek pārbaudīti

galvenie bezdimensionālie skaitļi un tiek veiktas prognozes par rūpnieciska izmēra sistēmām.

Ātruma mērījumu veikšana bija iespējama azimutālajai plūsmai līdz 3 m/s, ļaujot mērīt plūsmu pētītajā frekvenču diapazonā no 2 līdz 20 Hz. Kopā ar spiediena mērījumiem tie veidoja pamatu rezultātiem, ko izmantoja skaitliskā modeļa apstiprināšanai. Jaudas mērījumi radīja dažus nepārliecinošus rezultātus. Neatbilstība starp skaitliskiem un eksperimentālajiem mērījumiem bija lielāka nekā spiediena un ātruma mērījumiem. Kristalizēta alumīnija šķērsriezumu analizēšana arī izrādījās izaicinošāka nekā gaidīts, un nenoteiktības dēļ netika iztirzāti šajā darbā. Burbuļa izmēra mērījumu veikšana izdevās labāk nekā iecerēts.

Tangenciālais ātrums vairākās radiālās pozīcijās ir parādīts attēlā 5.1, kur salīdzināti eksperimentāli mērītais, skaitliski aprēķinātais plūsmas ātrums un magnētiskā lauka ātrums. Pirmkārt, maksimālais ātrums skaitliskos aprēķinos tiek novērots radiālajā pozīcijā $R = 58$ mm un eksperimentā pozīcijā $R = 38$ mm. Sākumā tas šķiet neintuitīvi, jo skrejošā magnētiskā lauka ātrums ir proporcionāls rādiusam $v = \omega R$, tāpēc ir sagaidāms lielāks ātrums pie ārsienas. Tikpat negaidīts ir fakts, ka zemas rotācijas frekvences gadījumos tiek novērots, ka šķidrums pārvietojas tikpat ātri kā magnētiskais lauks centram tuvākajā reģionā. Abus šos atklājumus var izskaidrot ar leņķiskā impulsa pārnesanu tilpumā ar radiālo plūsmu.

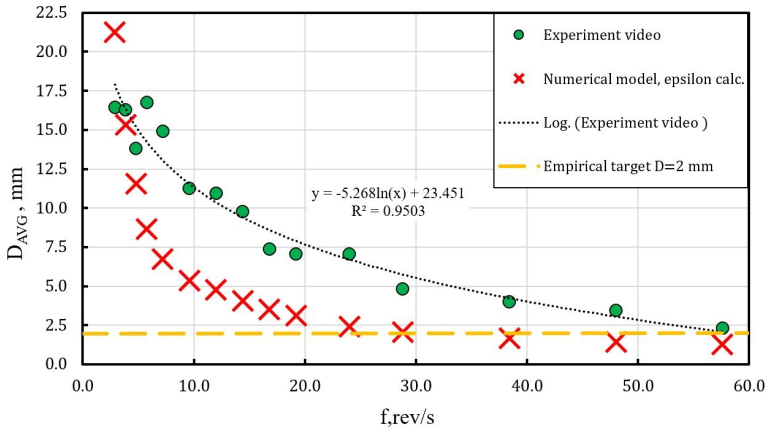


5.2. attēls: Burbuļu lieluma sadalījums dažādās maisīšanas frekvencēs

Attēlā 5.2 attēlots burbuļu izmēra sadalījums visā pārbaudītajā frekvenču diapazonā, izceļot pāreju uz mazākiem burbuļiem, kas apzīmēti ar tumšākām krāsām. Kopumā burbuļu izmērs var atšķirties par kārtu neatkarīgi no maisīšanas ātrumu. Šis fakts sarežģī teorētisko analīzi, jo lielāko

daļu gāzes tilpuma varēja atrast salīdzinoši maz, bet lielos burbuļos, savukārt lielāko daļu virsmas var veidot daudzi sīki burbuļi.

Attēlā 5.3 ir parādīts, ka eksperimentāli noteiktais vidējais burbuļa izmērs ir samazinājies no 16 līdz 2.3 mm, sasniedzot minimālo vēlamo sliekšni (ideālā gadījumā būtu jāsasniedz 1 - 2 mm burbuļa izmērs) [9]. Skaitliskie rezultāti paredz līdzīgu izmēra samazināšanos no 22 līdz 1.2 mm, palielinoties frekvencei.



5.3. attēls: Vidējais burbuļa izmērs kā funkcija no magnēta rotācijas frekvences, eksperimentāli izmērīto vērtību salīdzinājums ar analītiskiem/ skaitliskajiem aprēķiniem; Pārtrauktā oranžā līnija norāda empīrisko mērķi

Galvenie sistēmas parametri un bezdimensiju skaitļi ir apkopoti tabulā 5.1. Šeit tiek salīdzināts GaInSn modelis, laboratorijas alumīnija modelis un alumīnija industriālais prototips. Lineārā izmēra ziņā alumīnija prototips ir trīs reizes lielāks, un tā tilpums ir aptuveni 50 reizes lielāks nekā laboratorijas eksperimentos. Ātrums, ko paredz skaitliskā modelēšana, ir 5 m/s GaInSn modelim un 6 m/s industrijas prototipam. Lielāka izmēra dēļ Reynoldsa skaitlis joprojām būs ievērojami lielāks industrijas prototipā. Izmantotās frekvences lielākā mērogā dabiski ir mazākas. Zemākas frekvences un lielāka izmēra dēļ skinslāņa dziļums ir lielāks absolūtā izteiksmē. Salīdzinot ar mazāko izmēru, šī attiecība ir vairāk vai mazāk nemainīga, jo tā ir viens no galvenajiem elektromagnētiskās maisīšanas ierobežojošajiem faktoriem. Hartmaņa skaitlis visos gadījumos ir lielāks par viens, tāpēc elektromagnētiskie spēki dominē viskozos spēkos. Stjuarta numurs visos gadījumos ir mazāks par viens, un rūpnieciskajam prototipam ir vislielākā vērtība. Tas norāda, ka elektromagnētiskie spēki labākajā gadījumā ir salīdzināmi ar inerces spēkiem. Magnētiskais Reynoldsa skaitlis ir aptuveni

5.1. tabula: Laboratorijas modeļa un skaitliskā prototipa bezdimensionālie skaitļi

	vienība	GaInSn mo- delis	Al lab. mo- delis	Al industr. prototips
R	m	0.10	0.05	0.30
V	L	1	1	50
u	m/s	5	2.5	6
f	Hz	57.6	57.6	10
Re	-	$4.4 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^6$
Re _m	-	$2.1 \cdot 10^0$	$7.6 \cdot 10^{-1}$	$1.1 \cdot 10^1$
Ha	-	$6.1 \cdot 10^2$	$3.7 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^3$
N	-	$3.2 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$7.3 \cdot 10^{-1}$
Pe	-	$1.3 \cdot 10^8$	$3.1 \cdot 10^7$	$4.5 \cdot 10^8$
Ω_D	-	$1.5 \cdot 10^1$	$5.6 \cdot 10^0$	$3.4 \cdot 10^1$
δ	m	0.037	0.030	0.072
ε	W/kg	5	N/A	1
D _{max}	mm	2.2	10	5
τ	s	13	N/A	26

viens laboratorijas modeļiem un 10^1 industriālajam prototipam. Tas nozīmē, ka elektrovadošā šķidrums ātrums būtiski ietekmēs magnētiskā lauka sadalījumu. Maksimālās bezdimensiju frekvences vērtība ir 15 laboratorijas modelim un 34 rūpnieciskajam prototipam. Tas nozīmē, ka magnētiskā lauka difūzija nevar izsekot līdzī straujajām magnētiskā lauka izmaiņām. Tas ir līdzvērtīgs literatūrai, kur optimālā bezdimensiju frekvence maksimālai enerģijas pārnesei ir aptuveni $\Omega_D = 10 \dots 50$. TKE izkliedes ātrums industrijas prototipā ir zemāks nekā laboratorijas eksperimentā (vērtības tilpum). Tādējādi paredzamais burbuļa izmērs ir aptuveni 5 mm. Raksturīgais sajaukšanas laiks palielinās līdz ar izmēru, un tas ir divas reizes ilgāks industrijas prototipam. Tas norāda, ka pastāvīgā magnēta mašīna šajā konfigurācijā labi darbojas kā elektromagnētiskais maisītājs. To apstiprina arī Peklē skaitlis, kas norāda, ka masas pārnese dominēs piespiedu konvekcija.

6. Kopsavilkums

Lielākā daļa uzdevumu tika veiksmīgi izpildīti un promocijas darba mērķi sasniegti. Procesa gaitā tika izdarīti šādi secinājumi:

1. Burbuļus var sašķelt ar elektromagnētiski radītu turbulentu plūsmu. Eksperimenti, kuros uzņemti GaInSn virsmas attēli, pierāda burbuļu izmēra samazināšanos līdz ar intensīvāku maisīšanu.
2. Burbuļa izmērs metāla plūsmā ir sasaistīts ar plūsmas parametriem, galvenokārt ϵ - turbulentās kinētiskās enerģijas disipācijas ātrumu. Skaitliskie modeļi, kas aprēķina ϵ vērtības, tiek pārbaudīti, izmantojot eksperimentāli izmērāmus lielumus, piemēram, plūsmas ātrumu un spiedienu.
3. Autors piedāvā metodi burbuļu sašķelšanas problēmas mērogošanai uz alumīniju. Skaitliskās modelēšanas rīki var aprēķināt TKE disipācijas ātrumu, ko kopā ar empīriskām formulām izmanto, lai prognozētu burbuļa izmēru alumīnijā.
4. Laboratorijas mēroga eksperimenti ar alumīniju norāda uz ievērojamām burbuļu uzvedības izmaiņām, kad tiek veikta maisīšana. Brīvās virsmas attēlveidošana uzrāda burbuļa izmēra samazināšanos, palielinot maisīšanas intensitāti.
5. Attīstītais spiediens ir pietiekami augsts, lai sistēma darbotos kā elektromagnētiskais sūknis. Tā ir papildu priekšrocība, kas nav nevienai no esošajām degazešanas metodēm.
6. Dzelzs uzlikas var izmantot kā rentablu instrumentu magnētiskās plūsmas koncentrēšanai pat uz rotējošām pastāvīgo magnētu mašīnām. Šis uzlabojums nodrošina vismaz 30 % spiediena pieaugumu, kas nozīmē intensīvāku plūsmu vai iespēju izmantot par 27 % mazāk magnētisko materiālu, lai nodrošinātu tādu pašu hidrodinamisko veiktspēju.
7. Jaudas mērījumi parāda, cik daudz enerģijas var pārnest uz sistēmu ar EM spēkiem. Tie uzrādīja, ka pārbaudītajā frekvenču diapazonā nav sasniegta frekvences robeža. Tas ir noderīgi, veidojot un mērogojot EM iekārtas metāla maisīšanai.
8. Neskatoties uz to, ka turbulentajā metāla plūsmā ir novēroti pietiekami mazi burbuļi, vertikālajai konfigurācijai burbuļu uzturēšanās laiks metālā bija ļoti īss.

6.1. Publikācijas un dalība konferencēs

Publikācijas

1. R. Baranovskis, D. Berenis, I. Grants, A. Bojarevičs, T. Beinerts, M. Milgrāvis
Contactless Aluminum Degassing System—GaInSn Model Experiments and Numerical Study
Journal of Sustainable Metallurgy (2021)
2. D. Berenis, R. Baranovskis, I. Grants, T. Beinerts, A. Bojarevičs,
Permanent magnet bottom-stirred swirling flow in coaxial shallow cylindrical containers
Physics of Fluids 33 (5), (2021)
3. I. Grants, R. Baranovskis
Experimental observation of metal-electrolyte interface stability in a model of liquid metal battery
Magnetohydrodynamics 57 (2), (2021)
4. R. Baranovskis, M. Sarma, M. Ščepanskis, T. Beinerts, A. Gaile, S. Eckert, D. Rübiger, E.H. Lehmann, K. Thomsen, P. Trtik
Investigation of Particle Dynamics and Solidification in Two-Phase System by Neutron Radiography
Magnetohydrodynamics 56 (1), (2020)
5. I. Kaldre, C. Wang, R. Baranovskis
Experimental investigation of weld pool flow under external DC magnetic fieldy
Magnetohydrodynamics 55 (4), (2020)
6. I. Kaldre, A. Bojarevičs, T. Beinerts, R. Baranovskis, R. Nikoluskins, M. Milgravis, M. Kalvans
Contactless electromagnetic method for aluminium degassing
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 424 (1), (2018)
7. T. Beinerts, A. Bojarevičs, R. Baranovskis, M. Milgrāvis, I. Kaldre.
Permanent magnet dipole stirrer for aluminium furnaces
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 424 (1), (2018)

8. A. Bojarevičs, R. Baranovskis, I. Kaldre, M. Milgrāvis, T. Beinerts
Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metals
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 228 (1),
(2017)

Starptautiskās konferences

1. 12th International PAMIR International Conference - Fundamental and Applied MHD 04. – 08. jūlijs, 2022, Krakova, Polija
R. Baranovskis, D. Berenis, I. Grants, A. Bojarevičs un T. Beinerts
Bubble dispersion in liquid metal flow.
2. 2022 CaNAI Alumina Summer School, 13. – 16. jūlijs, 2022, Tronheima, Norvēģija
R. Baranovskis, D. Berenis, I. Grants, A. Bojarevičs un T. Beinerts
Novel electromagnetic degassing system
3. Electromagnetic processing of materials 2021, 13. - 17. jūnijs, 2021, tiešsaiste
R. Baranovskis, D. Berenis, I. Grants, A. Bojarevičs un T. Beinerts
Experimental modelling of permanent magnet stirrer for aluminum degassing
4. XIX International UIE Congress on Evolution and New Trends in Electrothermal Processes (UIE 2021), 1. – 3. septembris, 2021, Pilzene, Čehija
R. Baranovskis, D. Berenis, I. Grants, A. Bojarevičs un T. Beinerts
New contactless aluminum degassing system - GaInSn model experiments with a numerical study
5. 14th Virtual Congress WCCM and ECCOMAS 2020, 11. - 15. janvāris, 2021.
I.Grants, R. Baranovskis, A. Bojarevičs and T. Kalniņš
Liquid metal battery instability experiment using two-layer gallium-electrolyte model

Patenti

1. LV15144 ELEKTROVADOŠU METĀLISKU UN PUSVADĪTĀJU KAUSĒJUMU MAISIŠANAS IERĪCE
Andris BOJAREVIČS (LV), Jurijs GEĻFGATS (LV), Toms BEINERTS (LV), Matīss KALVĀNS (LV), Reinis BARANOVSKIS (LV)
2. LVP2021000051 IEKĀRTA BEZKONTAKTA PLŪSMAS IEROSINĀŠANAI ELEKTROVADOŠOS ŠĶIDRUMOS
Andris BOJAREVIČS (LV), Jurijs GEĻFGATS (LV), Toms BEINERTS (LV),
Reinis BARANOVSKIS (LV)

6.2. Tālākie pētījuma soļi

Burbuļu dispersijai šķīdros metālos ir lielāka ietekme nekā tikai šķīdro metālu degazēšanai. Citas svarīgas jomas ir:

1. Tērauda krāsnīs maisīšanai un dekarbonizācijai izmanto burbuļu kolonnas. Tur lokāli augošie burbuļi var radīt plūsmu visā krāsnī. Šī procesa burbuļu dinamika ir pētīta skaitliski [22] un eksperimentāli [23]. Tērauda krāsnīs veic arī sēra atdalīšanu [24], kur ķīmiskās vielas tiek pievienotas no augšas vai ievadītas izmantojot sprauslu caur nesējgāzi kausējumā. Pēdējam procesam ir līdzīgi burbuļu izkliedes mērķi, kas ir līdzīgi alumīnija degazēšanai.
2. Ūdeņraža ražošana no dabasgāzes pirolīzes pēdējā laikā ir radījusi interesi pētniecībā un enerģētikas tehnoloģijās. Dabasgāzes pirolīze vēl nav komercializēta ūdeņraža ražošanas aspektā. Tomēr, ja šī procesa oglekļa blakusproduktu var izmantot materiālu ražošanai, iegūtajam ūdeņradim ir zems oglekļa pēdas nospiedums. Šajā rakstā [25] ir aplūkota literatūra par metāna dabasgāzes pirolīzes procesa attīstību un mēģinājumi novērtēt tehnoloģiju gatavības līmeni (TRL). Elektromagnētiskās maisīšanas ieviešana burbuļreaktoros varētu palielināt to efektivitāti un mainīt maksimālo iespējamo reaktoru izmēru. Metāls reakcijā nepiedalās, tas darbojas kā katalizators un nodrošina reakciju norisei pareizo temperatūru un bezskābekļa vidi. Bez katalizatora (piemēram, niķeļa) sadalīšanās joprojām notiek, kaut arī augstākā temperatūrā. Dažādi metāli un kausējumu sāļi ir ierosināti kā katalizators [26]. Metodei varētu izmantot alumīniju, tādējādi

risinot līdzīgu problēmu kā šim darbam "kā sašķaidīt un izkliedēt burbuļus šķidrā metālā".

3. Attīrīšana no ieslēgumiem, izmantojot mikroburbuļus, ir alumīnija un tērauda rūpniecībā interesanta tēma [27]. Burbuļi aizvada ieslēgumus, piesaistot tos burbuļa virsmas un šķidrums saskarnē un pēc tam transportējot ieslēgumu uz metāla virsmu, kur tos var nosmelt. Problēma ir, kā izveidot izkliedētu mikroburbuļu mākonī, lai tie nesaplūstu viens ar otru. Citējot autorus: "*... šķidro metālu sistēmās mikroburbuļu veidošanās patiešām ir iespējama, ja ir uzstādīti šādi elementi: strauji bīdāma plūsmas sistēma, spēcīgas konvekcijas plūsmas, izkliedēta burbuļu plūsma, kā arī pārpilnība turbulences kinētiskās enerģijas.*". Izpētītās elektromagnētiskās tehnoloģijas darbā var izmantot, lai radītu turbulentu plūsmu šķidro metālu sistēmās.

Varētu izmantot pārīs idejas, lai uzlabotu pētāmās tehnoloģijas koncepciju:

1. Pirmkārt, ir jāuzlabo iekārtas ģeometrija, kur iespējamas vairākas optimizācijas iespējas. Palielinot tvertnes augstumu esošajā iekārtā, tiktu uzlabots burbuļu uzturēšanās laiks kausējumā. Skaitliskās modelēšanas rezultāti parādīja, ka ieplūdes un izplūdes atverē ir ievērojami augstāks TKE izkļiedes ātrums. Līdzīgi, gāzes ievades pozīcijā var radīt kanāla šķērsriezuma laukuma sašaurinājumu. Visbeidzot, cilindrisko trauku ar šķidra metāla uzstādījumu var paškiebt par 90 grādiem, tādējādi atgādinot monētu, kas stāv uz malas. Tas neietekmēs EM spēkus un šķidrums dinamiku vienfāzes plūsmā, bet krasi mainītu burbuļu ceļu metālā, kad tiek ievadīta gāze.
2. Otrkārt, tiek izmantots nevis viens, bet divi rotējoši magnēti, kas rotē pretēji. Paredzams, ka šis uzstādījums veidos līdzīgu plūsmu starp diviem koaksiāliem rotējošiem diskām [28] (šāda konfigurācija lielā mērogā pētīta arī ar šķidro metālu Fonkarmana nātrija eksperimentā [29]). Tas rada pretējas azimutālās plūsmas reģionus pie apakšējās un augšējās sienas. Lai gan vidējie plūsmas ātrumi ir mazāki nekā salīdzinājumā ar vienu magnētu (vai vienu rotējošu sienu), šis uzstādījums rada lielus bīdes spēkus plaknē, kas šķērso iekārtu horizontāli tās vidū.
3. Treškārt, plūsmā varētu ievietot šķēršļus. Šķēršļa pievienošana straujai kustīgai plūsmai izraisītu turbulentu apgabalu aiz tā. Šis apgabals varētu būt laba vieta gāzes ievadei. Tomēr alumīnija gadījumā priekšmetam vajadzētu būt no keramikas materiāla, kas savukārt būtu pakļauts erozijai. Tomēr spēcīgs lokalizēts magnētiskais lauks ir intriģējošs veids, kā izveidot virtuālu šķērslī. Piemērs tam ir redzams Romana rakstā [30], kurā viņi eksperimentāli pēta virpuļu

astes, ko seklā elektrolīta slānī rada lokalizēts Lorencas spēks. Pat ja stacionārs magnētiskais lauks bremsē šķidrums, autori ir parādījuši, ka šādi magnētiski šķēršļi var, piemēram, veicināt siltuma pārneši, padarot plūsmu turbulentāku. Teorētiski šādu koncepciju varētu izmantot netālu no gāzes ievades zonas, lai padarītu plūsmu turbulentāku un, cerams, palīdzētu burbuļu sadalīšanas procesā.

6.3. Autora ieguldījums

Nemot vērā eksperimentu raksturu šajā pētniecības jomā, lielākā daļa no tiem tiek veikti komandā. Promocijas darba autors piedalījās un vadīja visus šī pētījuma laboratorijas eksperimentus. Kopumā laboratorijā veikti vairāk nekā 30 GaInSn eksperimenti un pieci alumīnija eksperimenti.

Projekta komanda izgatavoja rūpniecisko prototipu un organizēja testu alumīnija rūpnīcā. Autors piedalījās pastāvīgā magnēta rotora projektēšanā, modelējot magnēta lauku, veicot feromagnētiskā jūga aprēķinus un izkļaidētā magnētiskā lauka aprēķinus. Autors piedalījās arī pastāvīgā magnēta rotoru montāžas procesa projektēšanā, kas sastāv no 216 atsevišķiem magnētiem, kas problēmas sarežģītības dēļ bija jāveic pašu spēkiem. Autors veica plūsmas attēlveidošanu un alumīnija paraugu iegūšanu rūpnieciskajos alumīnija testos.

Autors veica magnētiskā lauka aprēķinus dzelzs jūga optimizācijai, izmantojot programmatūru COMSOL Multiphysics. Plūsmas modelēšanu ERAF projekta ietvaros veica Didzis Berenis. Rūpnieciskās degazēšanas iekārtas prototipu izstrādāja projekta komanda. Bezdimensionālo skaitļu aprēķinus un to analīzi mērogošanas procesā patstāvīgi veica darba autors.

Iepriekš minētajās publikācijās autoru secība norāda katra autora relatīvo ieguldījumu.

Literatūras saraksts

- [1] D. E. J. Talbot, Effects of hydrogen in aluminium, magnesium, copper, and their alloys, *International Metallurgical Reviews* 20 (1) (1975) 166–184. doi:[10.1179/imt1r.1975.20.1.166](https://doi.org/10.1179/imt1r.1975.20.1.166).
- [2] E. Mancilla, W. Cruz-Méndez, I. E. Garduño, C. González-Rivera, M. A. Ramírez-Argáez, G. Ascanio, Comparison of the hydrodynamic performance of rotor-injector devices in a water physical model of an aluminum degassing ladle, *Chemical Engineering Research and Design* 118 (2017) 158 – 169. doi:[10.1016/j.cherd.2016.11.031](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.11.031).
- [3] D. P. N. Anyalebechi, Techniques for determination of the hydrogen content in aluminium and its alloys—a review, *Cast Metals* 3 (4) (1990) 182–201. doi:[10.1080/09534962.1990.11819039](https://doi.org/10.1080/09534962.1990.11819039).
- [4] T. Wairegi, J. Grace, The behaviour of large drops in immiscible liquids, *International Journal of Multiphase Flow* 3 (1) (1976) 67–77. doi:[10.1016/0301-9322\(76\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(76)90036-7).
- [5] J. O. Hinze, Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes, *AIChE Journal* 1 (3) (1955) 289–295. doi:[10.1002/aic.690010303](https://doi.org/10.1002/aic.690010303).
- [6] W. Zhao, H. Wang, R. Bai, W. Wei, H. Wang, Bubble characteristics and turbulent dissipation rate in horizontal bubbly pipe flow, *AIP Advances* 11 (2) (2021) 025125. doi:[10.1063/5.0035816](https://doi.org/10.1063/5.0035816).
- [7] L. Zhang, X. Lv, A. T. Torgerson, M. Long, Removal of impurity elements from molten aluminum: A review, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 32 (3) (2011) 150–228. doi:[10.1080/08827508.2010.483396](https://doi.org/10.1080/08827508.2010.483396).
- [8] A. G. Szekely, Degassing molten metals, Google Patents, US Patent 3,227,547 (1966).
- [9] G. K. Sigworth, E. M. Williams, D. C. Chesonis, *Gas Fluxing of Molten Aluminum: An Overview*, Springer International Publishing, Cham, 2016, Ch. Furnaces, Melting, Fluxing, and Alloying, pp. 65–70. doi:[10.1007/978-3-319-48228-6_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48228-6_9).
- [10] T. Leong, M. Ashokkumar, S. Kentish, *The Growth of Bubbles in an Acoustic Field by Rectified Diffusion*, Springer Singapore, Singapore, 2016, Ch. Fundamental Aspects, pp. 69–98. doi:[10.1007/978-981-287-278-4_74](https://doi.org/10.1007/978-981-287-278-4_74).

- [11] H. Xu, Q. Han, T. T. Meek, Effects of ultrasonic vibration on degassing of aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A* 473 (1) (2008) 96 – 104. doi:[10.1016/j.msea.2007.04.040](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.040).
- [12] H. Xu, X. Jian, T. Meek, Q. Han, *Ultrasonic Degassing of Molten Aluminum under Reduced Pressure*, John Wiley and Sons, Ltd, 2013, Ch. Melt Quality: Degassing, Filtering, and Analysis, pp. 246–250. doi:[10.1002/9781118647783.ch30](https://doi.org/10.1002/9781118647783.ch30).
- [13] K. Strauss, Chapter 7 - the treatment of aluminium and aluminium alloys, in: K. Strauss (Ed.), *Applied Science in the Casting of Metals*, Pergamon, 1970, pp. 268 – 270. doi:[10.1016/B978-0-08-015711-5.50018-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-015711-5.50018-X).
- [14] T. Haas, C. Schubert, M. Eickhoff, H. Pfeifer, A review of bubble dynamics in liquid metals, *Metals* 11 (4) (2021). doi:[10.3390/met11040664](https://doi.org/10.3390/met11040664).
- [15] T. Loimer, G. Machu, U. Schaffinger, Inviscid bubble formation on porous plates and sieve plates, *Chemical Engineering Science* 59 (4) (2004) 809–818. doi:[10.1016/j.ces.2003.10.020](https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.10.020).
- [16] G. Kocamustafaogullari, W. Huang, J. Razi, Measurement and modeling of average void fraction, bubble size and interfacial area, *Nuclear Engineering and Design* 148 (2) (1994) 437–453. doi:[10.1016/0029-5493\(94\)90124-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90124-4).
- [17] S. Arias, R. González-Cinca, X. Ruiz, L. Ramírez-Piscina, J. Casademunt, Characterization of the performance of an injector for the controlled generation of microbubbles, 59th International Astronautical Congress 2008 proceedings (09 2008).
- [18] E. Mohseni, J. Jose Kalayathine, S. F. Reinecke, U. Hampel, Dynamics of bubble formation at micro-orifices under constant gas flow conditions, *International Journal of Multiphase Flow* 132 (2020) 103407. doi:[10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103407](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103407).
- [19] S. Cheng, Z. Wu, *Microfluidic electronics, Lab on a chip* 12 (2012) 2782–91. doi:[10.1039/c2lc21176a](https://doi.org/10.1039/c2lc21176a).
- [20] A. Dinsdale, P. Quedstedt, The viscosity of aluminium and its alloys—a review of data and models: Special section: Proceedings of the 2003 international symposium on liquid metals (guest editors: P. d. lee, a. mitchell, a. jardy, j.-p. bellot), *Journal of Materials Science* 39 (12 2004). doi:[10.1023/B:JMSE.0000048735.50256.96](https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000048735.50256.96).

- [21] R. Brandt, G. Neuer, Electrical resistivity and thermal conductivity of pure aluminum and aluminum alloys up to and above the melting temperature, *International Journal of Thermophysics* 28 (2007) 1429–1446. doi:[10.1007/s10765-006-0144-0](https://doi.org/10.1007/s10765-006-0144-0).
- [22] G. Chen, S. He, Numerical simulation of argon–molten steel two-phase flow in an industrial single snorkel refining furnace with bubble expansion, coalescence, and breakup, *Journal of Materials Research and Technology* 9 (3) (2020) 3318–3329. doi:[10.1016/j.jmrt.2020.01.026](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.026).
- [23] X. Cui, Y. Xue, D. Zhao, S. Wang, F. Guo, Physical modeling of bubble behaviors in molten steel under high pressure, *High Temperature Materials and Processes* 40 (1) (2021) 471–484. doi:[doi:10.1515/htmp-2021-0045](https://doi.org/10.1515/htmp-2021-0045).
- [24] V.-V. Visuri, T. Vuolio, T. Haas, T. Fabritius, A review of modeling hot metal desulfurization, *Steel Research International* 91 (2020) 1900454. doi:[10.1002/srin.201900454](https://doi.org/10.1002/srin.201900454).
- [25] S. Schneider, S. Bajohr, F. Graf, T. Kolb, State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas, *ChemBioEng Reviews* 7 (5) (2020) 150–158. doi:[10.1002/cben.202000014](https://doi.org/10.1002/cben.202000014).
- [26] B. J. Leal Pérez, J. A. Medrano Jiménez, R. Bhardwaj, E. Goetheer, M. van Sint Annaland, F. Gallucci, Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen production: Proof of concept and techno-economic assessment, *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (7) (2021) 4917–4935. doi:[10.1016/j.ijhydene.2020.11.079](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.079).
- [27] T. Engh, G. Sigworth, A. Kvithyld, *Principles of Metal Refining and Recycling*, Oxford University Press, 2022.
- [28] K. Stewartson, On the flow between two rotating coaxial disks, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 49 (2) (1953) 333–341. doi:[10.1017/S0305004100028437](https://doi.org/10.1017/S0305004100028437).
- [29] R. Monchaux, M. Berhanu, S. Aumaître, A. Chiffaudel, F. Daviaud, B. Dubrulle, F. Ravelet, S. Fauve, N. Mordant, F. Pétrélis, M. Bourgoin, P. Odier, J.-F. Pinton, N. Plihon, R. Volk, The von kármán sodium experiment: Turbulent dynamical dynamos, *Physics of Fluids* 21 (3) (2009) 035108. doi:[10.1063/1.3085724](https://doi.org/10.1063/1.3085724).
- [30] J. Román, A. Figueroa, S. Cuevas, Wake patterns behind a magnetic obstacle in an electrolyte layer, *Magneto hydrodynamics* 53 (2017) 55–66. doi:[10.22364/mhd.53.1.7](https://doi.org/10.22364/mhd.53.1.7).

Pateicības

Šo darbu finansiāli atbalstīja ERAF projekts: "Jauna tipa bezkontakta elektromagnētiskas vieglo sakausējumu degazācijas sistēmas izstrāde" un Latvijas Universitātes fonds ar stipendiju LU doktorantūras studentiem dabaszinātņu, medicīnas un dzīvības zinātņu jomā. Pēdējā gadā šo darbu arī finansēja projekts: "LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā" (identifikācijas Nr. 8.2.2.0/20/I/006.).

Esmu pateicīgs saviem kolēģiem, ar kuriem kopā strādāju MHDTL laboratorijā. Vispirms manam doktora darba vadītājam Dr. Phys. Ilmāram Grantam, kurš man palīdzēja teorētiski saprast darbā sastopamās fizikas problēmas. Diskusijas par šķidrumu mehāniku ļāva izcelt nianšes notiekošajos fizikālajos procesos, un konsultācijas, rakstot darbu, palīdzēja strukturēt promocijas darbu. Didzis Berenis izstrādāja multi fizikālu skaitlisko modeli, kurš risināja plūsmas dinamiku šajā darbā izmantotajā eksperimentālajā modelī. Visi skaitliskie aprēķini, kas ietver plūsmas, ir viņa aprēķināti, kas ļāva iegūt dziļāku ieskātu sistēmā, par lielumiem, kurus nav iespējams izmērīt eksperimentāli. Matīss Kalvāns man palīdzēja eksperimentāli ar GaInSn un alumīnija virsmu attēlu uzņemšanu. Mikus Milgrāvis asistēja daudzos no vairāk nekā 30 veiktajiem eksperimentiem. Dr. Phys. Toms Beinerts organizēja sadarbību starp universitātes pētniekiem un alumīnija industrijas pārstāvjiem. NTNU profesors Robert Fritsch konsultēja mani jautājumos par alumīnija degazāciju no industrijas skatu punkta. Visbeidzot, pateicība manai draudzenei Antrai Gailei, kas ne tikai atbalstīja mani emocionāli, bet arī piedalījās grūtāko LaTeX problēmu risināšanā.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Sociālais
fonds

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

Eiropas Sociālā fonda projekts "LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā" tiek īstenots darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa "Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās" trešās kārtas ietvaros (projekts Nr. 8.2.2.0/20/I/006)