



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

Mikus Milgrāvis

**KOMBINĒTAS MAGNĒTISKĀ
LAUKA IEDARBĪBAS
METALURĢISKIEM
PIELIETOJUMIEM**

Rīga 2023



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Mikus Milgrāvis

KOMBINĒTAS MAGNĒTISKĀ LAUKA IEDARBĪBAS METALURĢISKIEM PIELIETOJUMIEM

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

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 2018. gada līdz 2022. gadam.

Darbs sastāv no ievada, trīs nodaļām, secinājumiem un literatūras saraksta.

Darba forma: publikāciju kopa fizikas un astronomijas nozarē, šķidrumu un gāzu mehānikas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: *Dr. phys.* **Andris Bojarevičs**.

Darba recenzenti:

- 1) *Dr. phys.* **Guntars Kitenbergs**, Latvijas Universitāte;
- 2) *Dr.* **Egbert Baake, Hanoveres** Leibnica Universitāte, Vācija;
- 3) *Dr.* **Andrew Kao**, Griničas Universitāte, Lielbritānija.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2023. gada 26. maijā Latvijas Universitātes fizikas un astronomijas nozares promocijas padomes atklātā sēdē.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulvārī 19.

LU fizikas un astronomijas
zinātņu nozares promocijas
Padomes priekšsēdētājs

Andrejs Cēbers

Promocijas padomes sekretāre

Sintija Silīņa

© Latvijas Universitāte, 2023

© Mikus Milgrāvis, 2023

ISBN 978-9934-18-968-5

ISBN 978-9934-18-969-2 (PDF)

Anotācija

Pasaulē plaši tiek pielietotas dažādas pastāvīgu vai mainīgu magnētisko lauku iedarbības uz šķidru metālu, bet kombinētu magnētisko lauku iedarbības ir maz pētītas, jo īpaši uzdevumos ar praktisku nozīmi. Darbā pētīts kā kombinētas magnētiskā lauka iedarbības izmantot trīs dažādām praktiskiem pielietojumiem.

1. Darbā piedāvāts uzlabot metalurģiskā silīcija attīrīšanas procesu, palielinot silīcija virsmas laukumu efektīvākai piemaisījumu aizvadīšanai, izmantojot elektromagnētiski ierosinātus virsmas viļņus. Darbā, izmantojot fizikālu modeli, parādīta viļņu veidošanās atkarībā no tīģeļa diametra un pieliktā mainīgā un pastāvīgā magnētiskā lauka. Eksperimentāli parādīti ierosināto virsmas viļņu intensitātes limiti, kā arī izstrādāts laboratorijas prototips viļņu ierosināšanai uz šķidra silīcija virsmas.

2. Izstrādāts jauns risinājums daļiņu iemaisīšanai sakausējumā, lai iegūtu metāla matricas kompozītus, izmantojot elektromagnētiskās metodes. Darbā gaitā attīstīta šķidra alumīnija maisīšanas tehnoloģija ar rotējošu pastāvīgo magnētu. Maisīšanas tehnoloģija pielāgota mikro un nano daļiņu iemaisīšanai sakausējumā. Pētījumā parādīts, ka, izmantojot izstrādāto pastāvīgo magnētu maisītāju kombinācijā ar indukcijas sildīšanu, alumīnija sakausējumos var iemaisīt iekšā daļiņas un iegūt kompozītmateriālu bezkontakta veidā.

3. Darbā pētīts kā šķidrā metālā elektromagnētiski ierosināt kavitāciju, lai izkļiedētu daļiņu veidotos aglomerātus metāla matricas kompozītos. Izstrādātā metode pētīta kā bezkontakta alternatīva mehāniskai skaņas ierosmei metālā. Eksperimentāli darbā parādīts kā ar mainīga un pastāvīga magnētiskā lauka kombināciju šķidrā metālā tiek ierosināta kavitācija, kā arī, analizējot paraugus, novērots uzlabojums daļiņu sadalījumā. Izstrādātā metode attīstīta tālāk, parādot magnētiskā lauka impulsu ietekmi uz daļiņu sadalījumu metāla matricas kompozītos. Darbs noslēdzas ar nepārtrauktas liešanas kristalizatora pētījumiem, kas nākotnē paredzēts metāla matricas kompozītu stieņu iegūšanai.

Abi pētījumu virzieni par metāla matricas kompozītiem uzrādījuši perspektīvus rezultātus un tiek attīstīti tālāk.

Saturs

Anotācija	3
Saturs	4
Vispārīgs darba raksturojums	5
Ievads	5
Promocijas darba mērķis un uzdevumi	8
Rezultātu aprobācija	8
Promocijas darba saturs	12
1 Elektromagnētiski ierosināti virsmas viļņi	16
1.1 Motivācija un piedāvātais risinājums	16
1.2 Teorētiskais pamatojums	17
1.3 Eksperimentālā sistēma	22
1.4 Eksperimentu rezultāti	24
1.5 Secinājumi un pētījuma turpmākā attīstība	27
2 EM metode daļiņu iemaisīšanai sakausējumā	29
2.1 Motivācija un piedāvātais risinājums	29
2.2 Tehnoloģijas attīstība un pielāgošana daļiņu iemaisīšanai	31
2.3 Daļiņu iemaisīšanas sakausējumā rezultāti	33
2.4 Secinājumi un turpmākā pētījuma attīstība	35
3 Daļiņu aglomerātu izkliede šķidrā metālā	37
3.1 Literatūras apskats	37
3.2 EM ierosināta kavitācija daļiņu izkļedei MMC	39
3.3 EM lauka impulsi sakausējuma mikrostrukturās uzlabošanai	42
3.4 EM iedarbība uz sakausējumu tā kristalizācijas laikā	46
3.5 Secinājumi un pētījuma turpmākā attīstība	48
Secinājumi un tēzes	50
Pateicība	51
Literatūras saraksts	52

Vispārīgs darba raksturojums

Ievads

Metalurģisko procesu attīstība vēsturiski tiešā veidā ietekmējusi cilvēces attīstību un kļuvusi par vienu no galvenajām nozarēm rūpniecībā. Elektromagnētiskās (EM) metodes mūsdienu metalurģijā tiek uzskatītas kā vienas no perspektīvākajām ražošanas procesu uzlabošanai, tāpēc pētījumi šajā tematikā ir svarīgi nozares kopējai attīstībai. Šķidra metāla nepieciešamo apstrādi tā ražošanas laikā veikt ar mehāniskām metodēm aprūtinā karstā un agresīvā vide, kas rezultējas ar detaļu paātrinātu nolietojumu, siltuma zudumiem un būtiskiem drošības aspektiem. Ar elektromagnētiskām metodēm apstrādi var veikt bezkontakta veidā, gūstot priekšrocības visos no minētajiem aspektiem.

EM metodes metalurģijā jau tiek pielietotas, piemēram, šķidra metāla transportam, maisīšanai, sildīšanai, plūsmas mērījumiem un citiem pielietojumiem. EM lauka radīšanai šiem pielietojumiem galvenokārt izmanto induktoru sistēmas [1,2]. Pastāvīgajiem magnētiem kļūstot pieejamākiem, ar vien vairāk tiek ieviestas arī rotējošu pastāvīgo magnētu sistēmu risinājumi, kuru galvenā priekšrocība ir tā, ka magnētiskā lauka ģenerēšanai nav nepieciešami strāvas ģeneratori [3–5].

Industriālos pielietojumos un pat pētījumos reti izmantotas un apskatītas magnētisko lauku (m.l.) kombinācijas, lai arī šādu iedarbību režīmi var būt unikāli un rast ar vien jaunus praktiskus pielietojumus [6–8].

Šajā disertācijā veikti pētījumi par kombinētām magnētiskā lauka iedarbībām praktiskiem pielietojumiem metalurģijā, tai skaitā meklējot pašas m.l. kombinācijas attiecīgo uzdevumu veikšanai, kā arī izstrādājot tehniskus risinājumus nepieciešamo m.l. kombināciju praktiskai un efektīvai realizācijai. Eksperimentu realizācijai kā būtiska darba sastāvdaļa ir arī unikālo eksperimentālo sistēmu izstrāde, kas ietver pētījuma specifikai atbilstošu induktoru un pastāvīgo magnētu sistēmu izveidi.

Darbā pēfītas jaunas magnētiskā lauka kombināciju pielietošanas iespējas trīs tehnoloģisku procesu uzlabošanai jeb trīs apakšvirzienos. Kopsummā pētījumi aprakstīti 7 zinātniskās publikācijās [dis1–dis7]. Pētījuma apakšvirzieni iedalīti sekojoši:

1. Darbā pēfīta elektromagnētiska virsmas viļņu ierosināšana uz šķidra metāla virsmas, palielinot tā virsmas laukumu. Pētījums aprakstīts 1. nodaļā. Virsmas laukuma palielināšana pētīta ar perspektīvu to izmantot metalurģiskā silīcija attīrīšanas procesa uzlabošanai. Ar zemfrekvences mainīgu magnētisko lauku ierosinātie virsmas viļņi uz šķidra dzīvsudraba virsmas plaši pētīti SIMAP laboratorijā, kur analītiski un eksperimentāli parādīta viļņu veidošanās un to ierosināšana [9–11]. Palielinot mainīgā magnētiskā lauka frekvenci vai palielinoties tīģeļa diametram, sistēmu būtiski sāk ietekmēt skinefekts, kas

ierobežo viļņu veidošanos pa visu metāla virsmu. Mainīgā magnētiskā lauka radītās virsmas deformācijas pastāvīgais magnētiskais lauks var gan palielināt, gan slāpēt. Līdz šim, ir veikti pētījumi tieši ar mērķi slāpēt mainīgā lauka radītās virsmas deformācijas, kas ir būtiski citos metalurģiskos procesos [12,13]. Šajā darbā piedāvāts mainīgajam magnētiskajam laukam (B_{AC}) pievienot pastāvīgu magnētisko lauku (B_{DC}), lai ierosinātu viļņus pa visu metāla virsmu arī gadījumos, kad sistēmu izteikti ietekmē skinslānis. Virsmas viļņu eksperimentālai pētīšanai izmantots galinstāns, kas ir šķidrš metāls istabas temperatūrā. Darbs ietver, pirmkārt, eksperimentālās sistēmas izstrādi [dis1], tai skaitā jauna tipa induktoru B_{AC} lauka radīšanai un atbilstošu pastāvīgo magnētu sistēmu. Otrkārt, iegūtos rezultātus no elektromagnētiski ierosinātiem virsmas viļņu eksperimentiem [dis2]. Treškārt, izstrādātās metodes attīstīšanu līdz laboratorijas prototipam priekš viļņu ierosmes uz šķidra silīcija virsmas, sasniedzot 4. tehnoloģijas attīstības līmeni (angliski *Technology readiness level* jeb TRL 4)[14].

2. Kā otrais pētījuma apakšvirziens ir elektromagnētisko (EM) lauku izmantošana daļiņu iemaisīšanai metālā, lai iegūtu metāla matricas kompozītus. Pētījums aprakstīts 2. nodaļā. Metāla matricas kompozīti (MMC) ir salīdzinoši jauna un strauji augoša metalurģijas apakšnozare. MMC ir materiāls, kurš sastāv no metāla ar tajā iemaisītām daļiņām, tādējādi iegūstot kompozītmateriālu ar uzlabotām mehāniskajām, termiskajām u.c. īpašībām. Tā piemēram, alumīnija matricas kompozītiem (AMC) stiepes izturību var uzlabot par vairāk kā 30%, salīdzinot ar bāzes sakausējumu [15–17]. Lai arī viena no plašāk izmantotajām MMC ražošanas metodēm ir pulvermetalurģija [18,19], būtiski ir turpināt attīstīt MMC ražošanu metalurģiskā ceļā, tādējādi ražošanu padarot efektīvu un mērogojamu. Šobrīd kā viena no perspektīvākajām metodēm AMC metalurģiskā ražošanā tiek uzskatīta maisīšanas-liešanas (angliski *stir-casting*) metode [20–23], kurā daļiņas metālā tiek iemaisītas ar rotējošu lāpstiņu. Metode ir efektīva, bet nav paredzēta lieliem ražošanas apjomiem, kā arī mehāniskās maisīšanas rezultātā, rodas materiāla zudumi un pati lāpstiņa noārdās. Kā risinājums literatūrā tiek piedāvāts rotējošo lāpstiņu aizstāt ar elektromagnētisko maisītāju [24,25], kur šķidrā metāla plūsmu ierosina maiņstrāvas induktoru sistēmas, līdzīgi metalurģijā izmantotie indukcijas maisītāji priekš alumīnija krāsnīm [1]. Pētījumi LU Fizikas institūtā ir parādījuši, ka līdzīgu plūsmu var radīt arī ar rotējošiem pastāvīgo magnētu dipoliem, kuru izmantošanai nav nepieciešama specifiska dzesēšana un transformatori kā tas ir induktoru sistēmām [26]. Šī darba ietvaros pastāvīgo magnētu maisītājs ir attīstīts līdz industriālam mērogam un testēts rūpnīcā uz 20 tonnu alumīnija krāsns [dis3]. Pēc tam pastāvīgo magnētu maisītājs pielāgots daļiņu iemaisīšanai alumīnijā un veiktas eksperimentu sērijas ar dažādiem alumīnija sakausējumiem un daļiņām [dis4]. Rezultātā, izstrādāta kombinēta pastāvīgo magnētu maisītāja un indukcijas sildīšanas metode daļiņu iemaisīšanai alumīnija sakausējumos.

3. Trešais pētījumu apakšvirziens ir daļiņu veidoto aglomerātu izkliede metāla matricas kompozītos. Pētījums aprakstīts 3. nodaļā. Lai arī ir izstrādātās metodes daļiņu iemaisīšanai metalurģiskā ceļā, bieži vien daļiņu sadalījums pēc to iemaisīšanas nav viendabīgs [27]. Daļiņām metāla matricas kompozītos ir tieksme veidot aglomerātus, kas noved pie nevienmērīgam materiāla īpašībām. Ir parādīts, ka samazinoties daļiņu izmēram, materiāla mehānisko īpašību uzlabojums pieaug. Tai pat laikā, tieši nanodaļiņu viendabīga izkliede kļūst par tehnisku izaicinājumu MMC ražošanā [18,28]. Kā risinājums MMC ražošanā bieži vien tiek izmantota mehāniska skaņas ierosināšana metālā. Intensīvu spiediena svārstību rezultātā, ko rada mehāniska zonde jeb sonotrods, tiek ierosināta kavitācija, kas tiek uzskatīta kā vadošais mehānisms aglomerātu izjaukšanai [17,29]. Šajā darbā pētīta līdzīgu spiediena svārstību ierosināšana, izmantojot elektromagnētiskās metodes, lai veiktu daļiņu izkliedi MMC materiālā bezkontakta veidā. Kā arī ar perspektīvu daļiņu izkliedi veikt ātrāk un lielākam metāla tilpumam. Kavitācijas ierosināšanu ar elektromagnētiskām metodēm ir pētījis Vives [30], savukārt Grants [31] piedāvājis uzlabot daļiņu sadalījumu ODS tēraudos, ierosinot kavitāciju ar kombinētu B_{AC} un B_{DC} magnētisko lauku. Tā kā kavitācijas uzsākšanās sliksni ietekmē gan sakausējuma sastāvs, gan citi sistēmas parametri, nepieciešamie EM lauka parametri alumīnija sakausējumos ir neskaidri. Lai noteiktu elektromagnētiskā lauka parametrus pie kuriem metāla sākas kavitācija un pārbaudītu, vai šāda iedarbība ietekmē daļiņu sadalījumu, veikts pētījums par B_{AC} un B_{DC} lauku kombinācijas izmantošanu alumīnija un alvas paraugiem, kuros iemaisītas daļiņas [dis5]. B_{AC} un B_{DC} lauku intensitātes, pie kurām tika ierosināta kavitācija, industriālā izmērā realizēt nebūtu iespējams, tāpēc izvirzīts priekšlikums spiediena svārstības ierosināt izmantojot EM lauka impulsu (PMF, no angļu valodas *pulsed magnetic field*) un B_{DC} lauku kombināciju. PMF iedarbība līdz šim literatūrā plaši pētīta ar mērķi smalcināt graudu struktūru alumīnija sakausējumu kristalizācijas laikā, kas uzlabo sakausējuma stiepes u.c. mehāniskās īpašības [32–34]. PMF iedarbība metāla matricas kompozītu ražošanai tikusi pētīta daļiņas sintezējot pašā sakausējumā (angliski *in-situ*) [35], bet PMF ietekme uz iemaisītu daļiņu sadalījumu līdz šim apskatīta nav. Kombinētu PMF un B_{DC} ietekmi uz graudu struktūru alvas-svina sakausējumā pētījis Hua [6] – pētījums galvenokārt fokusēts uz izmaiņām sakausējuma mikrostruktūrā, bet magnētiskās hidrodinamikas (MHD) aspekti nav aprakstīti. Šī darba ietvaros [dis6] izstrādāta kombinēta PMF un B_{DC} lauku iedarbība, kas ļauj attīstīt augstas intensitātes spiediena svārstības līdz pat 7 reizēm sekundē, un pētīta šādas iedarbības ietekme uz Sn-PB sakausējuma mikrostruktūru un TiB_2 daļiņu sadalījumu alumīnija 6061 sakausējumā. Lai izveidoto MMC materiālu varētu pilnvērtīgi izmantot kā leģējošo sakausējumu vai materiālu 3D drukai, nepieciešams to kontrolēti kristalizēt stieņos. Sakausējuma kristalizēšana kombinācijā ar elektromagnētisku maisīšanu ļauj iegūt materiālu bez porām un

viendabīgu, smalkgraudainu mikrostruktūru [36,37]. Šim nolūkam darba gaitā ir izstrādāts nepārtrauktas liešanas kristalizators 12-20mm diametra stieņu kristalizācijai, kas aprakstīts [dis7]. Lai iegūtu viendabīgu smalkgraudainu sakausējuma struktūru, kristalizācijas zonā tiek veikta sakausējuma elektromagnētiska maisīšana, ko rada pastāvīgais magnētiskais lauks mijiedarbojoties ar strāvu, kas plūst paralēli kristalizācijas virzienam. Šobrīd ar kristalizatoru eksperimentāli pētīta ietekme uz alumīnija sakausējumu mikrostruktūru, bet nākotnē plānots ar to kristalizēt iegūtos metāla matricas kompozītus, tādējādi izstrādājot un pētot pilnu MMC ražošanas ciklu.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izpētīt kombinētu magnētiskā lauka iedarbību pielietošanas iespējas metalurģisku procesu veikšanai.

Atbilstoši mērķim izvirzīti **darba uzdevumi** pētījuma veikšanai:

1. Izpētīt virsmas viļņu ierosināšanu uz šķidra metāla virsmas, izmantojot kombinētu magnētisko lauku iedarbību.
2. Izstrādāt metodi nemagnētisku mikro un nano daļiņu elektromagnētiskai iemaisīšanai šķidrā metālā.
3. Izstrādāt kombinētu elektromagnētisku iedarbību daļiņu izkliedei metāla matricas kompozītos.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darbā iekļautās zinātniskās publikācijas

Par elektromagnētiski ierosinātiem virsmas viļņiem:

[dis1] **M. Milgrāvis**, A. Bojarevičs, A. Gaile, V. Geža, The Design of a System to Compose 50 Hz Alternating and Static Magnetic Field from Induction Coil and Permanent Magnets, IEEE Magnetism Letters. 11 (2020), Art no. 2104704. doi:10.1109/LMAG.2020.3021364, Scopus – Q3.

[dis2] **M. Milgrāvis**, A. Bojarevičs, A. Gaile, V. Geža, Application of AC and DC magnetic field for surface wave excitation to enhance mass transfer, Journal of Crystal Growth. 534 (2020), 0022-0248. doi:10.1016/j.jcrysro.2019.125409, Scopus – Q2.

Par daļiņu iemaisīšanu metāla matricas kompozītu izveidei, izmantojot elektromagnētiskās metodes:

[dis3] 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 (2018), 1757-899X. doi:10.1088/1757-899X/424/1/012037.

- [dis4] **M. Milgrāvis**, G. Kronkalns, R. Nikoluškins, T. Beinerts, M. Kalvāns, A. Bojarevičs, I.A. Perianu, Electromagnetic Methods for Production of Aluminium Metal Matrix Composites, Solid State Phenomena. Trans Tech Publications, Ltd. 332 (2022). doi:10.4028/p-9shcqm, Scopus - Q3.

Par daļiņu veidoto aglomerātu izkriedi metālā, izmantojot elektromagnētiskās metodes:

- [dis5] I. Kaldre, A. Bojarevičs, I. Grants, T. Beinerts, M. Kalvāns, **M. Milgrāvis**, G. Gerbeth, Nanoparticle dispersion in liquid metals by electromagnetically induced acoustic cavitation. Acta Materialia. 118 (2016), 253-259. doi:10.1016/j.actamat.2016.07.045. Scopus – Q1.
- [dis6] **M. Milgrāvis**, I. Krastiņš, I. Kaldre, M. Kalvāns, A. Bojarevičs, T. Beinerts, Pulsed and Static Magnetic Field Influence on Metallic Alloys during Solidification. Crystals. 13(2):259 (2023). doi:10.3390/cryst13020259. Scopus – Q2.
- [dis7] I. Kaldre, A. Bojarevičs, **M. Milgrāvis**, T. Beinerts, M. Kalvāns, Directional Solidification of Aluminum A360 under Moderate DC Magnetic Field and Electric Current. Materials Research. 26(Mat. Res., 2023 26) (2023). doi:10.1590/1980-5373-MR-2022-0330. Scopus – Q2.

Promocijas darbā neiekļautās 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. 7 (2021). doi:10.1007/s40831-021-00459-8.
2. I. Kaldre, **M. Milgrāvis**, A. Bojarevičs, T. Beinerts, Electromagnetic Processing during Directional Solidification of Particle Strengthened Aluminum Alloys for Additive Manufacturing. Materials Proceedings. 3(1):19 (2021). doi:10.3390/IEC2M-09255.
3. V. Geža, A. Gaile, A. Bojarevičs, **M. Milgrāvis**, Ģ. Zāģeris, S. Pavlovs, Electromagnetically Generated Waves on Free Surface of Liquid Metal for Refinement Process. Conference proceedings: HES - 19 - Heating by Electromagnetic Sources. (2019).
4. I. Kaldre, A. Bojarevičs, T. Beinerts, R. Baranovskis, R. Nikoluškins, **M. Milgrāvis**, M. Kalvāns, Contactless electromagnetic method for aluminium degassing. IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. (2018), ISSN 1757-899X. doi:10.1088/1757-899X/424/1/012057.

5. A. Bojarevičs, I. Kaldre, **M. Milgrāvis**, T. Beinerts, Direct chill casting of aluminium alloys under electromagnetic interaction by permanent magnet assembly. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 355 (2018). doi:10.1088/1757-899X/355/1/012011.
6. O. Budenkova, **M. Milgrāvis**, C. Garnier, A. Gagnoud, Y. Delannoy, S. Semenov, J. Etay, Application of modulated calorimetry to the liquid metals using electromagnetic levitation and static magnetic field. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 424 (2018). doi:10.1088/1757-899X/424/1/012004.
7. **M. Milgrāvis**, I.A. Perianu, A.C. Murariu, A.V. Bîrdeanu, Adhesion Strength Test Comparison for HVOF Nickel-Based Superalloy Powders on Steel Substrates and Layer Characterization. Advanced Materials Research. 1146 (2018). doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1146.126.
8. A. Bojarevičs, R. Baranovskis, I. Kaldre, **M. Milgrāvis**, T. Beinerts, Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metal. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Germany: IOP Publishing Ltd. 228 (2017), 1757-899X. doi:10.1088/1757-899X/228/1/012022.

Dalība konferencēs

Iegūtos rezultātus autors prezentējis starptautiskās un vietējās zinātniskās konferencēs un semināros:

- [conf1] **M. Milgrāvis**, G. Kronkalns, R. Nikoluškins, T. Beinerts, M. Kalvāns, A. Bojarevičs, I.A. Perianu, Electromagnetic methods for production of aluminium metal matrix composites. Innovative Technologies for Joining Advanced Materials, TIMA-21. (2021) Online.
- [conf2] **M. Milgrāvis**, T. Beinerts, A. Bojarevičs, I. Kaldre, M. Kalvāns, I. Krastiņš, Electromagnetic methods for production of aluminium metal matrix composites. LightMat 2021. (2021) Online.
- [conf3] **M. Milgrāvis**, I. Krastiņš, A. Bojarevičs, Līdzstrāvas un ārējā magnētiskā lauka radīta plūsma uz šķidra metāla virsmas cilindriskā traukā, LU 79. starptautiskā zinātniskā konference. (2020) Online.
- [conf4] **M. Milgrāvis**, A. Bojarevičs, V. Geža, A. Gaile, Experiments on Surface Wave Excitation by Electromagnetic Field, International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, ICCGE-19. (2019) Keystone, Colorado, USA.
- [conf5] **M. Milgrāvis**, A. Bojarevičs, T. Beinerts, R. Baranovskis, Electromagnetic method for Aluminium degassing, LightMat 2019. (2019) Manchester, UK.

[conf6] T. Beinerts, A. Bojarevičs, R. Baranovskis, **M. Milgrāvis**, I. Kaldre, Permanent magnet dipole stirrer for aluminium furnaces, The 9th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2018). (2019) Awaji Island, Hyogo, Japan. Referāts ieguva labākās prezentācijas balvu konferencē.

Iesaiste un pateicība zinātniskajiem projektiem

Promocijas darba izstrāde notikusi sekojošu projektu ietvaros. Paldies par pētījumu finansēšanu!

1. 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), Latvijas Universitāte 2021-2022.
2. “Elektromagnētiska tehnoloģija ar nano-daļiņām stiprināta vieglā sakausējuma kristalizēšanas procesam 3D drukas pielietojumam”, Latvijas Universitāte, No. 1.1.1.1/19/A/080. 2020-2022.
3. Metalurģiskā silīcija attīrīšana līdz solārai kvalitātei, izmantojot elektromagnētisko siltuma un masas pārnese kontroli, ERAF projekts nr. 1.1.1.1/16/A/097, Latvijas Universitāte, 2018-2020.
4. Finansējums no Vācijas Helmholtz Asociācijas projektā Helmholtz Alliance Liquid Metal Technologies (LIMTECH), projekta nr. HA-315, Latvijas Universitāte, 2015-2017.

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

Autora ieguldījums

Promocijas darba ietvaros autors bijis iesaistīts visu darbā aprakstīto pētījumu realizācijā, tai skaitā eksperimentu projektēšanā, rezultātu iegūšanā un apstrādē u.c. darba posmos.

Realizējot pētījumu par virsmas viļņiem, autors patstāvīgi izstrādājis skaitliskos modeļus induktoru un pastāvīgo magnētu sistēmas optimizācijai [dis1], veicis analītiskus novērtējumus silīcija kausēšanas kameras izstrādei un elektromagnētiskās iedarbības mērogošanu un tās pielāgošanu darbam ar silīciju. Autors bijis galvenā persona visu eksperimentu realizācijā, rezultātu apstrādē un secinājumu izvirzīšanā, galvenie rezultāti atspoguļoti [dis2]. Abām minētajām

publikācijām autors ir pirmais autors. Autors par šo tematiku vadījis bakalaura darbu studentei Antrai Gailei (vērtējums 10) un par ko piešķirta pirmā K. Ērgļa piemiņas stipendija.

Elektromagnētisko metožu pielietošanas iespējas metāla matricas kompozītu ražošanā autors pēta kopš 2015. gada. Autors piedalījies visu eksperimentālo sistēmu izstrādē un salikšanā, kā arī veicis pats vai iesaistījies visu eksperimentu realizācijā. Minētajās publikācijās parādīta tikai daļa no visa eksperimentu apjoma, kas veikta šajā tematikā. Autors bijis galvenais publikāciju [dis3], [dis4] un [dis6] autors, un iesaistījies publikāciju [dis5] un [dis7] rakstīšanā.

Promocijas darba saturs

Darba struktūra

Darbs sastāv no pētījumiem, kas apkopoti 7 publikācijās. Darbs izklāstīts sadalot pētījumu trīs apakšvirzienos un attiecīgi arī nodaļās – virsmas viļņi silīcija attīrīšanai (1. nodaļa), daļiņu iemaisīšana metālā (2. nodaļa), daļiņu aglomerātu izkliede metālā (3. nodaļa).

1. nodaļas sākumā aprakstīta pētījuma motivācija un līdzšinējie pētījumi šajā tematikā. Nodaļa turpinās ar aprakstu par eksperimentālās sistēmas izstrādi. Iegūtie rezultāti ar EM ierosinātiem virsmas viļņiem uz metāla virsmas apskatīti pie dažādiem sistēmas parametriem. Nodaļas beigās aprakstīti galvenie secinājumi un parādīta tālākā pētījuma attīstība EM metodi pielāgojot darbam ar šķidru silīciju.

2. nodaļā aprakstīts pētījums par daļiņu iemaisīšanu šķidrā metālā. Nodaļā apskatīta MMC tematikas aktualitāte un šobrīd izmantotās MMC ražošanas metodes. Nodaļas turpinājumā aprakstīta pastāvīgā magnēta maisītāja tehnoloģijas attīstība līdz industriālam mērogam un turpmākā tehnoloģijas attīstība to pielāgojot daļiņu iemaisīšanai šķidrā metālā.

3. nodaļā aprakstīts pētījums par daļiņu izkliedi MMC. Nodaļa sākas ar nelielu literatūras apskatu, parādot aktuālos pētījumus šajā tematikā. Turpinājumā, izklāstīts veiktais pētījums ar B_{AC} un B_{DC} iedarbību, kam seko pētījums par EM lauka impulsu iedarbības izmantošanu daļiņu izkliedei MMC. Nodaļas noslēgumā, aprakstīti rezultāti, kas iegūti izstrādājot ar EM iedarbību aprīkoto nepārtrauktas liešanas kristalizatoru, aprakstīti galvenie secinājumi un turpmākā pētījuma attīstība.

Darba noslēgumā ir atspoguļoti galvenie darba secinājumi. Darba beigās ir izteikta pateicība un izmantotās literatūras saraksts.

Pētījuma novitāte

Virsmas viļņu eksperimentiem izveidotā eksperimentālā sistēmas ir izstrādāta specifiski šim pētījumam. Sistēma sastāv no jauna dizaina induktora, kurā par principu izmantots Bitera induktors [38] un jaunas gredzenveida pastāvīgo magnētu sistēmas, par principu izmantojot Halbaha salikumu [39]. Ar EM sistēmu iegūstamie parametri ir unikāli un līdz šim literatūrā nav atrasti. Mainīga magnētiskā lauka ierosināti virsmas viļņi pētīti Francijā, SIMAP laboratorijā [9,10]. Šajā darbā novitāte ir izmantot magnētisko lauku kombināciju, kas ļāvis sasniegt līdz šim nepētītus viļņu ierosmes režīmus.

Latvijas Universitātes Fizikas institūta pētnieku grupa ir vieni no pionieriem pasaulē pastāvīgo magnētu maisītāju tehnoloģiju izstrādē metalurģijai [26,40–42]. Daļiņu iemaisīšanas pētījumi ir kā turpinājums maisīšanas tehnoloģiju attīstībā. Kā vienīgo pastāvīgo magnētu tehnoloģiju attīstītāju, kas varētu veikt līdzīgus pētījumus, var minēt uzņēmumu Zmag Ltd, kuri izstrādā kanālveida maisītājus ar pastāvīgajiem magnētiem. Pasaulē tiek pētīta EM metode daļiņu iemaisīšanai, izmantojot indukcijas maisītājus [24,25], kas kalpo kā tieša alternatīva mehāniskai lāpstiņas izmantošanai metāla maisīšanas-liešanas (angliski *stir-casting*) procesā. Induktoru izmantošana daļiņu iemaisīšanai līdz šim ir agrīnā tehnoloģijas attīstības stadijā un industriāli izmantota netiek. Pētījumi par pastāvīgo magnētu maisītāju daļiņu iemaisīšanai literatūrā nav atrastas un ir uzskatāma par jaunumu.

Tematiski mainīga (B_{AC}) un pastāvīga (B_{DC}) kombinācijas izmantošana daļiņu veidoto aglomerātu izkļidei metālā aizsākta ar pētījumiem par ODS tēraudu [31,43]. EM metožu izmantošana alumīnija matricas kompozītu ražošanā daļiņu dispersijai, ir jauns apakšvirziens, kas aizsācies LU Fizikas institūtā un darba autors bijis viens no šī virziena aizsācējiem. Kavītācijas ierosināšanu ar EM lauku šķidros metālos ir pētīta salīdzinoši maz [7,30,44], tāpēc kavītācijas ierosināšana konkrētos alumīnija un alvas sakausējumiem un pašu fizikālo parametru noteikšana priekš efekta uzsākšanās ir uzskatāms par jaunumu [30,43,45,46]. EM lauka impulsu izmantošana daļiņu izkļidei metāla matricas kompozītos līdz šim pētīta tikai gadījumos, kad daļiņas šķidrā metālā tiek sintezētas. Kombinēta impulsu un pastāvīgā magnētiskā lauka iedarbība metalurģiskiem pielietojumiem literatūrā atrasta tikai vienā pētījumā [6], apskatot iedarbības ietekmi uz sakausējuma mikrostruktūru. Šajā darbā gan pati izstrādātā EM impulsu iedarbība, gan tās pielietojums ir uzskatāms par jaunumu, kas līdz šim literatūrā nav apskatīts.

Izmantotās metodes

Tā kā šķidrums metāls ir necaurspīdīgs un to kušanas temperatūra bieži vien ir salīdzinoši augsta, tad metožu skaits, lai raksturotu metāla notiekošos procesus,

ir ierobežots. Tabula 1 attēlotas izmantoto šķidro metālu īpašības. Silīcijs šķidrā stāvoklī pēc īpašībām līdzinās metālam. Lai pakāpeniski attīstītu EM metodes attiecīgajiem praktiskajiem pielietojumiem, izmantoti dažādi skaitliski un fizikāli modeļi. Izstrādājot analītiskus un skaitliskus modeļus ar Wolfram Mathematica, Mathcad un Comsol Multiphysics, aprēķināti elektromagnētisko sistēmu parametri un to inducētais spēks, spiediens un plūsma šķidrajā metālā. Balstoties uz aprēķiniem, izveidoti fizikālie modeļi ar galinstānu, kas ir šķidrns metāls istabas temperatūrā. Galinstāna modeļi izmantoti pētījumos par virsmas viļņiem un pastāvīgo magnētu maisītāju daļiņu iemaisīšanai, lai daudz **vienkāršāk, detalizētāk un drošāk** analizētu fizikālos procesus šķidrumos.

Tabula 1 Izmantoto šķidro metālu īpašības.

Parametrs	Simbols	Galinstāns (šķidrns)	Silīcijs (šķidrns)	Alumīnijs (šķidrns)	Alva (šķidra)
Kušanas temp., °C	T_m	~10	1410	660	232
Blīvums, Kg/m³	ρ	6360	2570	2360	6974
El. vadītspēja, S/m	σ	$3.3 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^6$	$4.1 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^6$
Virsmas spraigums, N/m	γ	0.3-0.7	0.75	1.0	0.6

Šķidrā metāla plūsmas analīzei izmantota impulsu Doplera ultraskaņas ātruma noteikšana (Angliski *Pulsed Ultrasound Doppler Velocimetry*), metāla virsmas fotografēšana un filmēšana, tai skaitā ar ātrdarbīgām kamerām līdz 1000 fps. Virsmas deformāciju mērīšanai izmantota optiskā attāluma mērīšana ar lāzera sensoru.

Atbilstoši eksperimentu rezultātiem tika validēti analītiskie un skaitliskie modeļi, kā arī, izmantojot bezdimensionālos kritērijus, EM metodes pielāgotas attiecīgajiem praktiskajiem pielietojumiem priekš silīcija un alumīnija. Bezdimensionālie kritēriji ļauj magnētiskās hidrodinamikas (MHD) sistēmas mērot un pielāgot citiem metāliem. Kā galvenos bezdimensionālos kritērijus darbā aprakstīto uzdevumu risināšanā var minēt MHD mijiedarbības parametru N , bezdimensionālo frekvenci Ω_d , Hartmana skaitli Ha , Reinoldsas skaitli Re . Daļiņu aglomerātu izkļiedes eksperimentos fizikāls modelis netika veidots, bet B_{AC} un B_{DC} eksperimenta gaitā tika mērīts skaņas signāls no šķidrā metāla, ļaujot eksperimenta laikā sekot līdzī kavitācijai raksturīgajam signālam. EM impulsu gadījumā tika analizēta metāla virsmas deformācijas un salīdzinātas ar skaitlisko modeli, ļaujot novērtēt inducēto spēku un spiedienu.

Paraugu analīzei izmantoti optiskie mikroskopi, rentgenstaru fluorescences mikroskopija (XRF) un skenējošais elektron-mikroskops (SEM). Ar nepārtrauktas liešanas kristalizatoru iegūtie alumīnija paraugiem veikti stiepes testi atbilstoši ASTM E8 standartam [47].

1 Elektromagnētiski ierosināti virsmas viļņi

1.1 Motivācija un piedāvātais risinājums

Pasaulē uzstādīto saules paneļu kopējā jauda desmit gadu laikā no 2009-2019 pieaugusi 30 reizes [48]! Silīcijs ir viens no saules bateriju izejmateriāliem, kas tiešā veidā ietekmē saules bateriju cenu. Tradicionāli silīcijs priekš pusvadītāju industrijas tiek ražots izmantojot Siemens procesu (iegūstot EG-Si ar piemaisījumu daudzumu $\approx 10^{-9}$ – 10^{-11}), tai pat laikā šo silīciju izmanto arī saules bateriju ražošanai, kur tik tīrs silīcijs nav nepieciešams. Ar vien vairāk tiek attīstīta alternatīva solāras kvalitātes silīciju (SoG-Si, piemaisījumu daudzums $\approx 10^{-6}$) ražot caur metalurģisko ceļu, kas ir lētāk. Izmantojot metalurģisko ceļu lielākā daļa metālisko piemaisījumu ar zemu segregācijas koeficientu no kausējuma tiek aizvadīti izmantojot atkārtotu silīcija pārkausēšanu. Izaicinājumus metalurģiskā silīcija attīrīšanā sagādā fosfora un bora piemaisījumi. Tiem izmanto atsevišķas attīrīšanas procedūras [49,50].

Fosfora un bora attīrīšanu veic caur šķidrā silīcija virsmu, attiecīgi fosfora attīrīšanai silīciju vakuumējot, bet bora aizvadīšanai, uz šķidrā silīcija pūšot argona gāzi, kas bagātināta ar ūdens tvaiku ($\text{Ar}+3\% \text{H}_2\text{O}$). Bora koncentrāciju silīcijā attīrīšanas procesa laikā var aprakstīt ar vienādojumu (1), kur $C_{B,0}$ ir bora koncentrāciju sākumā, $C_{B,t}$ – bora koncentrācija pēc laika t , A - virsmas laukums, V – tilpums, t - laiks. Koeficientu k_B tiek noteikts eksperimentāli un ir atkarīgs no gāzes tipa, plūsmas daudzuma un metāla temperatūras. Literatūrā atrastās k_b vērtības ir 6-40 $\mu\text{m/s}$.

$$\ln \left[\frac{C_{B,0}}{C_{B,t}} \right] = k_b \frac{A}{V} t \quad (1)$$

Šī pētījuma motivācija ir uzlabot bora aizvadīšanu no silīcija, palielinot silīcija virsmas laukumu ar EM ierosinātiem virsmas viļņiem. Bora aizvadīšanai nepieciešamā silīcija temperatūra ir virs 1500 °C [50]. Pie šādām temperatūrām mehāniska viļņu ierosināšana būtu tehniski sarežģīta. Elektromagnētiskai virsmas viļņu ierosināšanai būtu priekšrocības, jo viļņi tiktu ģenerēti bezkontakta veidā, turklāt nebūtu potenciāli citu piesārņojuma avotu saskarē ar šķidro silīciju.

Šīs EM metodes attīstību var iedalīt sekojošos posmos:

- 1) Analītisko un skaitlisko modeļu izstrāde.
- 2) Fizikālā modeļa iekārtas izstrāde un eksperimenti ar galinstānu.
- 3) EM metodes pielāgošana silīcijam un laboratorijas prototipa izstrāde.

1.2 Teorētiskais pamatojums

Lai labāk izprastu plūsmas, kas rodas šķidrā metālā uz to iedarbojoties ar magnētisko lauku, var izmantot elektromagnētisma un plūsmas dinamikas vienādojumus. Vispārīgā gadījumā elektromagnētismu šādās sistēmās apraksta ar Maksvela vienādojumiem (2-5):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_q}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (5)$$

Vienādojumos \vec{E} – elektriskais lauks, \vec{B} – magnētiskā lauka indukcija, \vec{j} – strāvas blīvums, ρ_q – lādiņa blīvums, μ_0 – magnētiskā caurlaidība vakuamam, ϵ_0 – elektriskā konstante, t – laiks.

Elektriski vadošā vidē strāvas tiek inducētas atbilstoši Faradeja indukcijas likumam (4). Uz kustīgu, lādētu daļiņu darbojas Lorencas spēks (6), kas sastāv no daļiņas mijiedarbības ar elektrisko un magnētisko lauku. Vienādojumā q – lādiņš, \vec{u} – ātrums.

$$\vec{f} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (6)$$

Nepārtrauktā vidē ērtāk ir izmantot nevis Lorencas spēku uz individuālu daļiņu, bet gan spēku uz tilpuma vienību. Lorencas spēka izteiksmi var pārveidot (7) – individuālo lādiņu var aizstāt ar lādiņa blīvumu q_e un lādiņa blīvuma un apgabala ātruma reizinājumu ar strāvas blīvumu $\vec{j} = \rho_e \vec{u}$, kur ρ_e – pilnais lādiņa blīvums, σ – elektriskā vadītspēja. Strāvas blīvums tiek iegūts no Oma likuma (8).

$$\vec{f} = \rho_e \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (7)$$

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (8)$$

Var pieņemt, ka elektriskais lauks \vec{E} tilpumā tiecas uz nulli [10,51], attiecīgi Lorenca spēka izteiksmē dominē tikai otrais saskaitāmais, kā rezultātā vienādojums (7) reducējas uz (9):

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (9)$$

Strāvai spēkā ir nepārtrauktības vienādojums (10), kas izriet no lādiņa nezūdamības likuma. Tā kā ρ_e ir mazs, tad vienādojuma labā puse tiecas uz 0.

$$\nabla \cdot \vec{j} = \frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad (10)$$

Ampēra likumā var neņemt vērā nobīdes strāvas $\epsilon_0 \frac{\partial B}{\partial t}$, attiecīgi arī šis vienādojums vienkāršojas. Apkopojot veiktos pieņēmumus, ir izveidota vienādojumu sistēma (11) ar ko var aprakstīt elektromagnētismu darbā turpmāk izklāstītajos pētījumos [51].

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \\ \nabla \cdot \vec{j} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \\ \vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \end{array} \right. \quad (11)$$

Apvienojot Oma, Faradeja un Ampēra likumus, var iegūt magnētiskā lauka transporta vienādojumu (12), kas raksturo magnētiskā lauka izmaiņu laikā. Vienādojuma labajā pusē pirmais saskaitāmais atbild par magnētiskā lauka adektīvo pārnesei, jeb kā elektriski vadoša šķidruma plūsma ar ātrumu u pārnese magnētisko lauku, savukārt otrais saskaitāmais raksturo m.l. difūzu pārnesei, kur $1/\sigma\mu$ ir difūzijas koeficients.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}) + \frac{1}{\sigma\mu} \nabla^2 \vec{B} \quad (12)$$

Nesaspiežama šķidruma plūsmas dinamiku var aprakstīt ar Navjē-Stoksa vienādojumu (13), kurā vienādojuma kreisā puse ir plūsmas ātruma konvektīvais atvasinājums, savukārt labajā pusē pirmais loceklis ir spiediena gradients. Otrais loceklis raksturo ātruma lauka difūziju, trešais loceklis raksturo gravitācijas

spēku, bet ceturtais – Lorenca spēku. Vienādojumā ρ – blīvums, η – dinamiskā viskozitāte, \vec{g} – gravitācijas konstante.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (13)$$

Virsmas viļņu fizikālai modelēšanai izmantots galinstāns. Turpmākajā izklāstā pieņemts, ka metāls atrodas cilindriskā tīgelī un uz to iedarbojas aksiāli simetrisks magnētiskais lauks. Kā viens no kritērijiem izvirzīts, ka mainīgā m.l. radišanai jāizmanto 50 Hz tīkla strāva, lai metodei būtu potenciāls izmantošanā industriāliem pielietojumiem. Lai arī šķidra silīcija un galinstāna sakausējuma īpašības atšķiras (Tabula 1), ar bezdimensionālajiem parametriem var savstarpēji salīdzināt un prognozēt fizikālos procesus abos šķidrums. Viens no šādu sistēmu raksturojošiem parametriem ir MHD mijiedarbības parametrs N (14), kurš raksturo elektromagnētisko un inerces spēku attiecību.

$$N = \frac{\sigma B^2}{\rho \omega} \quad (14)$$

Silīcija un galinstāna gadījumā N ir gandrīz vienāds, jo abiem šķidrumiem elektrovadītspējas σ un blīvuma ρ attiecības ir līdzīgas. Vienādojumā ω ir cikliskā frekvence.

Kā otru bezdimensionālo parametru var izmantot bezdimensionālo frekvenci Ω_d (15), ar ko var raksturot cik daudz sistēmu ietekmē skinslānis $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \sigma \omega}}$. Vienādojumā (15) R ir sistēmas rādiuss un μ_0 ir magnētiskā konstante.

$$\Omega_d = \sigma \omega \mu_0 R^2 \quad (15)$$

Šādas sistēmas aprakstā jāņem vērā arī Hartmana skaitlis un magnētisko lauku attiecība B_{DC}/B_{AC} .

Ir zināms, ka gravitācijas viļņus uz šķidruma virsmas var ierosināt ar laikā mainīgu spēku. Īsiem viļņiem $h \cdot k \gg 1$, var izmantot formulu (16), kur h – šķidruma dziļums, k – viļņa skaitlis, g – gravitācijas konstante un γ – virsmas spraigums [52].

$$\omega^2 = gk + \frac{\gamma k^3}{\rho} \quad (16)$$

Galinstāna virsmu eksperimentos klāj oksīda slānis, kuram virsmas spraigums var variēt plašā diapazonā no 0.3 līdz 0.7 N/m, attiecīgi viļņa garums $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ variē diapazonā 5–7 mm.

Teorētiskus un eksperimentālus pētījumus EM ierosinātiem virsmas viļņiem un būtisku ieguldījumu ierosināto viļņu aprakstīšanā veikuši J. M. Galpin, I. Fautrelle un A. D. Sneid [9–11]. Šajos pētījumos parādīts, ka uzspiestie stāvviļņi būs ass simetriski un ar frekvenci $2f$, ja mainīgā magnētiskā lauka frekvence ir f , kā arī apskatot viskozitātes un virsmas spraiguma nozīmi. Pētot mainīga magnētiskā lauka iedarbību uz šķidru dzīvsudrabu zemo frekvenču diapazonā (2 – 20 Hz), eksperimentāli tika parādīts kā atkarībā no bezdimensionālās frekvences mainās sistēmā dominējošais spēks. Skinefekta dēļ var izšķirt divus gadījumus, pirmkārt, ja bezdimensionālā frekvence $\Omega_d \leq 1$, laikā vidējotais spēks salīdzinot ar spēka amplitūdu ir mazs, otrkārt, ja $\Omega_d > 1$, laikā vidējotais spēks kļūst dominējoši liels, neveidojot virsmas viļņus [9,10]. Izmantojot konstantās temperatūras plūsmas mērītājus, dzīvsudraba eksperimentos Galpin un Fautrell mērījuši metāla plūsmu, tādējādi raksturojot traukā radīto vidējo plūsmas ātrumu un turbulenci. Uz dzīvsudraba virsmas eksperimentos ir novēroti stāvviļņi, kas iedalīt divās kategorijās – koncentriskos un azimutālos. Ierosināto viļņu raksti tika iedalīti četros režīmos: (I) ass simetriski stāvviļņi ar dominējošo frekvenci $2f$, (II) ass simetriski stāvviļņi un azimutāli viļņi, (III) koncentriskos viļņus aizstāj lielas amplitūdas azimutāli viļņi, (IV) haotiskas brīvās virsmas deformācijas.

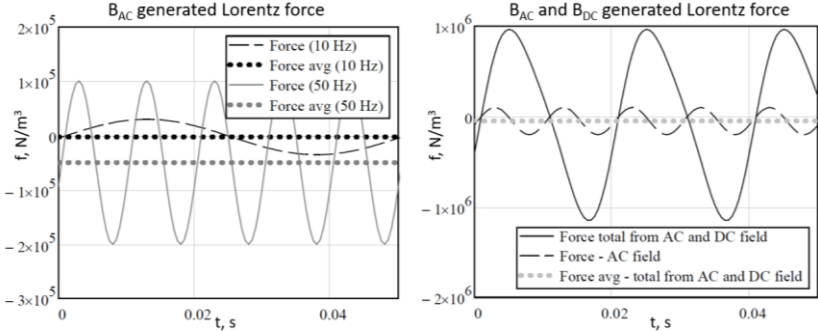
Metalurģiskos procesos virsmas deformācijas bieži vien nav vēlamas, jo var veicināt, piemēram, metāla oksidēšanos, tāpēc praktiskiem pielietojumiem plaši tiek pētīti mehānismi kā slāpēt vai stabilizēt metāla plūsmu un attiecīgi arī radītās virsmas deformācijas. Kā risinājums literatūrā tiek piedāvāts izmantot pastāvīgu magnētisko lauku [12,13,53]. Minētajos rakstos pētītas virsmas deformācijas, ko ierosina gan EM lauks, gan mehāniskas vibrācijas. Ja virsmas deformācijas rada ar elektromagnētisko lauku, tad pastāvīgais magnētiskais lauks sistēmu ietekmē divos veidos – pirmkārt, tas mijiedarbojas ar strāvām metālā, radot Lorenca spēku, otrkārt, tas slāpē šķidrā metāla plūsmu. Minētajos pētījumos galvenokārt apskatīts tieši plūsmas slāpēšanas efekts, savukārt šajā darbā fokuss ir uz virsmas viļņu radīšanu pa visu metāla virsmu.

Elektromagnētiskais spēks uz sāna virsmas aksiāli simetriskam šķidra metāla apgabalam pēc Jura Krūmiņa atrisinājuma [54] attēlots Attēls 1.

Lai virsmas viļņi tiktu ģenerētu arī tad, ja bezdimensionālā frekvence ir lielāka par 1, darbā tiek piedāvāts izmantot mainīga (B_{AC}) un pastāvīga (B_{DC}) magnētisko lauku kombināciju. Tādā gadījumā metālā radītā spēka blīvums (17) sastāv no 2 daļām – inducētās strāvas \vec{j} mijiedarbības ar mainīgo m.l. un pastāvīgo m.l.

$$\vec{f} = \vec{j} \times (\vec{B}_{AC} + \vec{B}_{DC}) \quad (17)$$

Ja $\vec{B}_{AC} \ll \vec{B}_{DC}$, tad dominē tieši inducēto strāvu un B_{DC} reizinājums un spēka frekvence sakrīt ar mainīgā lauka B_{AC} frekvenci, savukārt spēka amplitūda ir ievērojami lielāka – skatīt Attēls 1 pa labi.



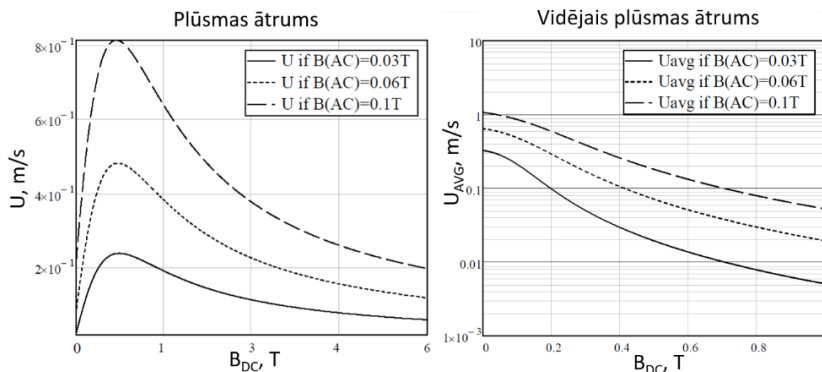
Attēls 1 Aksiāli simetriskā šķidra metāla apgabalā inducētais spēks pie apgabala sienas. Pa kreisi - laikā mainīgais un laikā vidējotais spēks pie 10 Hz un 50 Hz; Pa labi - spēka amplitūda bez un ar pastāvīgo magnētisko lauku.

Neņemot vērā viskozos un kapilāros spēkus, plūsmas ātrumu U tīģelī var novērtēt izmantojot Navje-Stoksa vienādojumu (18).

$$\rho \vec{U} \omega + \rho \frac{\vec{U}^2}{\delta} = \sigma (\omega \delta \vec{B}_{AC} - \vec{U} \vec{B}_{DC}) (\vec{B}_{AC} + \vec{B}_{DC}) \quad (18)$$

Vienādojuma (6) labā puse apraksta elektromagnētiskos spēkus. Pirmajās iekavās pirmais saskaitāmais atbild par inducēto strāvu, kas ģenerē plūsmu, savukārt otrais par bremsējošo efektu, kas rodas metālam plūstot magnētiskajā laukā. Ja sistēmu raksturojošā bezdimensionālā frekvence $\Omega_d \geq 1$, sistēmas aprakstam tīģeļa rādiusa R vietā jāizmanto skinslāņa biezuma vērtība δ .

Attēlojot plūsmas ātrumu U atkarībā no pastāvīgā magnētiskā lauka, skatīt Attēls 2, var redzēt, ka maksimālais plūsmas ātrums ir pie $B_{DC} \approx 0.4$ T lauka. B_{DC} pieaugot, plūsmu slāpējošie efekti sāk dominēt un ātrums samazinās.



Attēls 2 Mainīga un pastāvīga magnētiskā lauka radītais plūsmas ātrums.

Kā pastāvīgā magnētiskā lauka vērtība eksperimentālajā sistēmā izvēlēta $B_{DC} \approx 0.4$ T, savukārt tīģeļa izmēri tā, lai atbilstu gadījumiem $\Omega_d > 1$ un $\Omega_d < 1$.

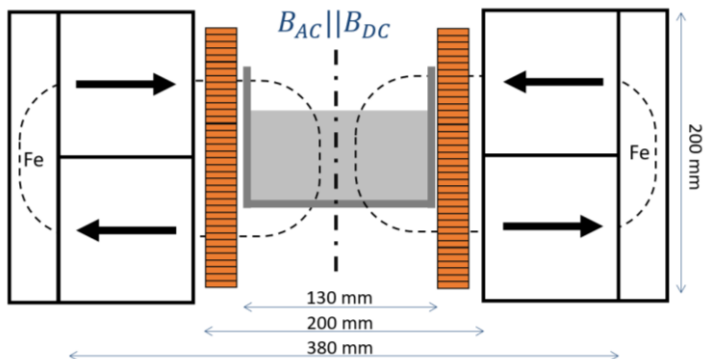
1.3 Eksperimentālā sistēma

Eksperimentālās sistēmas izveidei tika izvirzīti sekojoši kritēriji:

- 1) Sistēmai jāparedz tīģeļa ievietošanu, kura izmēri atbilst situācijai, kad $\Omega_d < 1$ un $\Omega_d > 1$. $\Omega_{d,max} = 4$.
- 2) Sistēmas centrā $B_{DC} \approx 0.4$ T.
- 3) Lai novērtētu viļņu ierosināšanas limitus, kā maksimālā mainīgā m.l. amplitūda izvēlēta $B_{AC} \approx 0.3$ T.
- 4) Telpai virs tīģeļa jābūt brīvai, lai varētu iegūt foto un video materiālus.

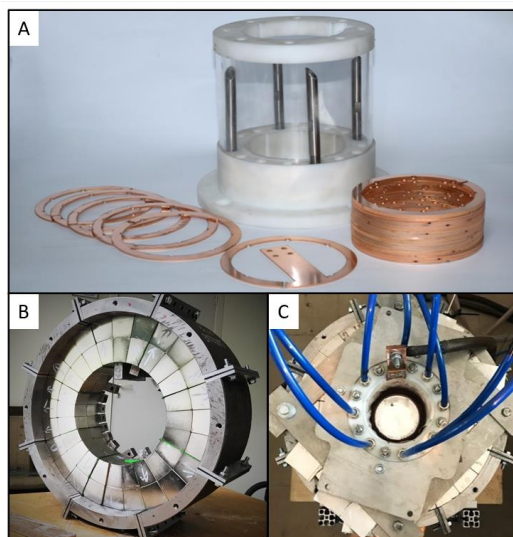
Eksperimentālās iekārtas skice attēlota Attēls 3 - tīģeļi ieskauj induktors kā B_{AC} avots un pastāvīgo magnētu sistēma kā B_{DC} avots. Sistēmas centrā B_{DC} vērsts perpendikulāri metāla virsmai (paralēli B_{AC} virzienam).

Induktoru veidots no 60 gredzeniem, kuriem secīgi nodrošināts elektriskais kontakts, veidojot elektrisko ķēdi spirāles formā kā Bittera induktoriem [38]. Induktoru veido 56 elektriskie vijumi, kas tiek dzesēti no ārējās virsmas ar ūdeni. Ar induktoru iespējams sasniegt $B_{AC, max} = 0.33$ T lauku. B_{DC} lauku nodrošina gredzenveida pastāvīgo magnētu sistēma. Sistēma balstās uz Halbaha magnētu salikuma principu [39]. Magnētu bloku magnetizācijas virziens attēlots Attēls 3, magnētiskā lauka līniju noslēgšanās ilustrēta ar melno raustīto līniju.



Attēls 3 Eksperimentālā sistēma virsmas viļņu ierosināšanai galinstānā, shematisks attēls. Oranžie taisnstūri ilustrē izveidoto Bitera induktoru. Ar melnajām bultām attēlots pastāvīgo magnētu magnetizācijas virziens; melnā raustītā līnija ilustrē magnētiskā lauka līnijas. Gan B_{AC} , gan B_{DC} vērsti perpendikulāri metāla virsmai.

Magnētu sistēma sastāv no 192 Nd-Fe-B pastāvīgajiem magnētiem, ko ietver feromagnētisks jūgs. B_{DC} lauka intensitāte sistēmas centrā ir $B_{DC}=428$ mT. Izveidotais induktors, magnētu sistēma un pati eksperimentālā sistēma parādīta Attēls 4.



Attēls 4 Attēlā A un B parādīts induktors un pastāvīgo magnētu sistēma izgatavošanas laikā. Attēlā C attēlota salikta eksperimentālā sistēma no augšas.

Detalizētāks sistēmas apraksts, tai skaitā iegūtie magnētisko lauku sadalījumi iekļauti rakstu kopas publikācijā [dis1].

1.4 Eksperimentu rezultāti

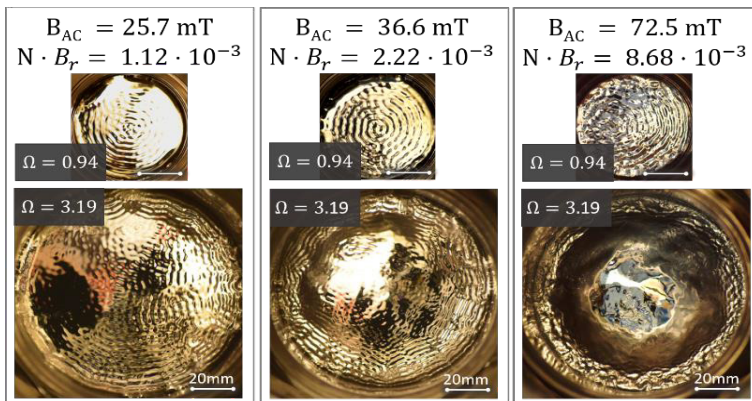
Eksperimentāli apskatītas divu veidu elektromagnētiskās iedarbības:

- Šķidrās metāls atrodas mainīgā magnētiskajā laukā (B_{AC}), lauks vērsts perpendikulāri metāla virsmai
- Šķidrās metāls atrodas mainīgā un pastāvīgā magnētiskajā laukā ($B_{AC}+B_{DC}$), abi lauki ir paralēli un vērsti perpendikulāri metāla virsmai.

Abas no EM iedarbībām apskatītas pie diviem tīģeļu izmēriem:

- Tīģeļa diametrs 52.6 mm, $\Omega_d=0.94$.
- Tīģeļa diametrs 96.7 mm, $\Omega_d=3.19$.

Ja $\Omega_d=0.94$, izmantojot tikai B_{AC} iedarbību, virsmas viļņi tika novēroti pa visu metāla virsmu, skatīt Attēls 5 augšējo rindu. Pieaugot lauka intensitātei viļņi pakāpeniski no koncentriskiem ($B_{AC}=25$ mT) pāriet nelineāros ($B_{AC}=72$ mT). Var novērot līdzības ar Fautrelle [9] veiktajiem eksperimentiem, kur detalizēti tika pētīta viļņu režīmu maiņu no koncentriskiem uz nelineāriem.

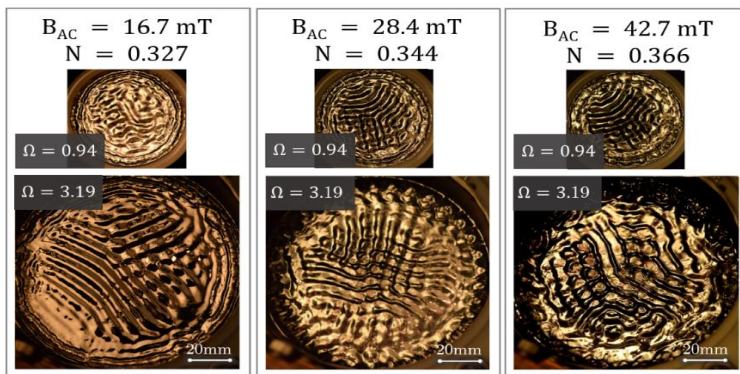


Attēls 5 Virsmas viļņu struktūra atkarībā no B_{AC} iedarbības intensitātes (50 Hz), divu dažādu izmēru tīģeļiem.

Apskatot gadījumu ar lielāku tīģeļa diametru ($\Omega_d=3.19$), var redzēt, ka viļņu veidošanās norit tīģeļa sienu tuvumā. Pie mazām intensitātēm ($B_{AC}=25$ mT), viļņi novērojami pa visu virsmu, bet viļņu amplitūda virzienā uz centru samazinās. Palielinot B_{AC} intensitāti virs 30 mT, uz metāla virsmas novērojama intensīva turbulenta metāla plūsma un meniska veidošanās centrā. Pieaugot B_{AC} ,

menisks veidojas ar vien lielāks, savukārt ierosinātie viļņi ar vien mazāk novērojami uz centrā uz meniska virsmas, skatīt Attēls 5 apakšējās rindas attēlus. Meniska augstums no 5 mm pie $B_{AC}=50$ mT, pakāpeniski pieaug, sasniedzot 15 mm pie $B_{AC}=90$ mT. Iegūstot video ierakstu ar 960 fps kameru, fiksēts ka viļņi uz virsmas ir koncentriski un pārvietojas virzienā uz centru. Veicot video ierakstu analīzi nomērīts, ka viļņu ātrums ir 70-90 cm/s robežās un to ātrums ir atkarīgs no pozīcijas, kur veikts mērījums.

Ekspperimentu sērijā ar kombinētu B_{AC} un B_{DC} magnētisko lauku novērojams vairākkārtīgs viļņu intensitātes pieaugums. Uzsākot eksperimentu sēriju ar kombinēto iedarbību, pie $B_{AC}=146$ mT tika iegūti tik augstas intensitātes viļņi, ka pilieniem atdaloties no viļņu virsotnēm, veidojās šļakatas. $B_{AC} + B_{DC}$ iedarbības rezultātā virsmas viļņi veidojas jau pie $B_{AC}=10$ mT. Viļņu augstums pie $B_{AC}=16$ mT un $B_{DC}=428$ mT ir pat lielāks kā visos apskatītajos gadījumos ar augstākas intensitātes, bet tikai B_{AC} iedarbību, skatīt Attēls 6. Video ieraksts ar 960 fps parāda, ka līdz $B_{AC}=12$ mT **viļņi ir koncentriski un pārvietojas virzienā uz centru**. Viļņu pārvietošanās ātrums ir 45-55 cm/s robežās. Pie abiem tīģeļa izmēriem ($\Omega_d=0.94$ un $\Omega_d=3.19$) meniska veidošanās uz metāla virsmas netika novērots. Meridionālā plūsma uz simetrijas ass šajā gadījumā bija niecīga un nebija nomērāma arī izmantojot impulsu Doplera ultraskaņas ātruma noteikšanu (PUDV).



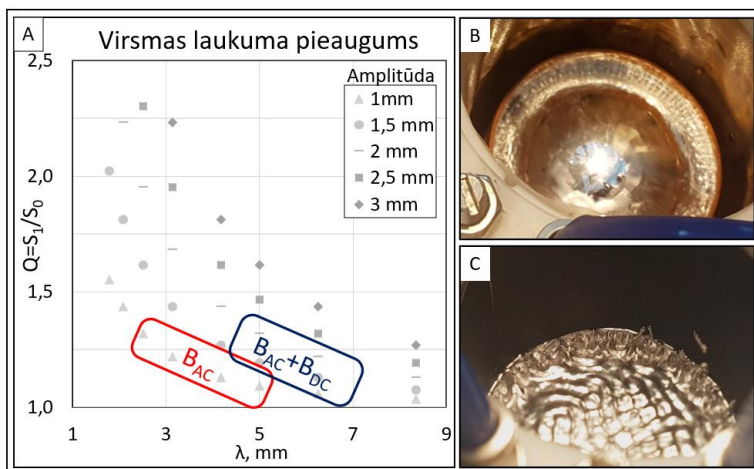
Attēls 6 Virsmas viļņu struktūra atkarībā no B_{AC} intensitātes, kombinācijā ar paralēlu $B_{DC} = 428$ mT.

Ar kombinētu B_{AC} un B_{DC} iedarbību iegūti līdzīgas intensitātes viļņi kā ar četras reizes lielāku tikai B_{AC} iedarbību. No elektroenerģijas aspekta, izmantojot kombinēto iedarbību viļņi iegūstami ar aptuveni ~16 reizes mazāka elektroenerģijas patēriņu.

Viļņa garums B_{AC} iedarbībā bija diapazonā no 2-5 mm, bet $B_{AC} + B_{DC}$ no 5-7 mm. Rezultāti plašāk aprakstīti publikācijā [dis2]. Pieņemot, ka virsmas viļņi ir koncentriski un to virsmu var aprakstīt ar analītisku izteiksmi $y(x) = d \sin \frac{\pi nx}{L}$, līnijas garumu no centra līdz malai var noteikt ar formulu (19), kur d apzīmē viļņu augstumu, bet n viļņu skaitu.

$$b = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{\pi nd}{L} \cos \frac{\pi nd}{L}\right)^2} dx \quad (19)$$

Ja uz virsmas nav viļņu, līnijas b garums ir sistēmas rādiuss $b_0 = L$. Ar iegūto virsmas laukumu attiecību $Q = s/s_0$ var raksturot cik pieaudzis ir virsmas laukums pie attiecīgā viļņa garuma un amplitūdas, skatīt Attēls 7. Šāds novērtējums neņem vērā menisku, kas rodas tikai B_{AC} iedarbības gadījumā.



Attēls 7 A) Grafiks parāda B_{AC} un $B_{AC} + B_{DC}$ virsmas laukuma pieauguma diapazonu pie dažādām viļņu amplitūdām. B) B_{AC} viļņu ierosmes limits – pārāk intensīva meniska veidošanās. C) $B_{AC} + B_{DC}$ viļņu ierosmes limits – šķidrā metāla šļakatu veidošanās.

Maksimālais virsmas laukuma pieaugums ar abu veidu iedarbībām ir ierobežots. B_{AC} iedarbības gadījumā, pieaugot B_{AC} , meniska augstums palielinās, bet viļņi pakāpeniski uz tā vairs nav novērojami. Pie $B_{AC} = 90$ mT meniska augstums sasniedza 15 mm. $B_{AC} + B_{DC}$ iedarbības gadījumā ap $N = 0.366$ viļņu amplitūda vairs nepieaug, bet veidojas šļakatu pilieni. Kā potenciālais skaidrojums šīm šļakatām varētu būt dziedošās bļodas (angliski *singing bowl*) efekts, kas rodas arī mehāniski ierosinātu virsmas viļņu gadījumā [55]. Viļņu amplitūda eksperimentos ar B_{AC} iedarbību nepārsniedza 1 mm, bet $B_{AC} + B_{DC}$

nepārsniedza 2 mm, attiecīgi maksimālais virsmas laukuma pieaugums ar izstrādāto metodi ir ap 1.3 reizes.

1.5 Secinājumi un pētījuma turpmākā attīstība

1.5.1 Secinājumi

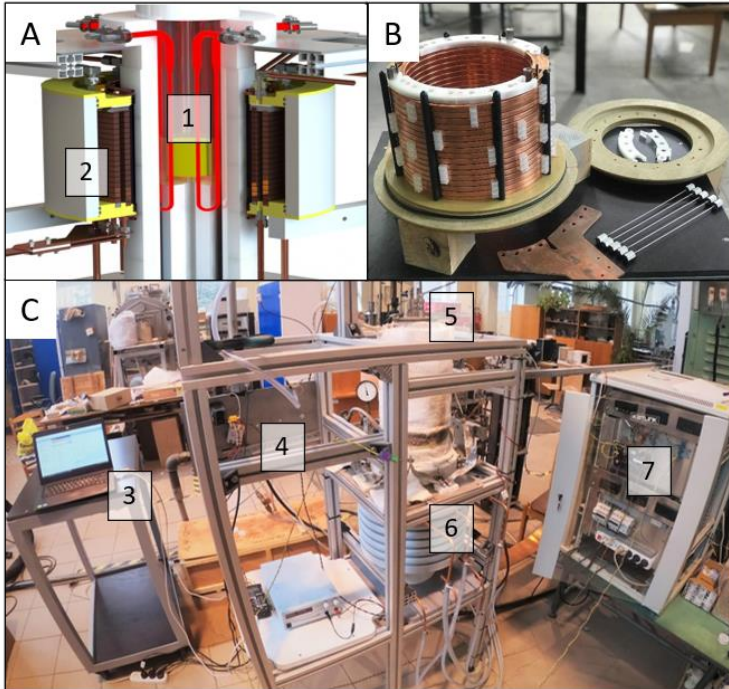
1. Iegūtie virsmas viļņu attēli (Attēls 5, Attēls 6) parāda, ka izstrādātā B_{AC} un B_{DC} magnētisko lauku kombinācija ļauj ģenerēt intensīvus virsmas viļņus gadījumos, ja bezdimensionālā frekvence Ω_d ir diapazonā 0.5 – 4.
2. Ar 960 fps video ierakstu parādīts, ka gan B_{AC} , gan kombinēta B_{AC} un B_{DC} iedarbība pie zemām B_{AC} intensitātēm rada koncentriskus virsmas viļņus, kas ir skrejoši virzienā uz centru.
3. Pastāvīgais magnētiskais lauks ļauj būtiski samazināt mainīgā magnētiskā lauka nepieciešamo intensitāti virsmas viļņu ierosmei. Ar kombinētu iedarbību līdzīgas intensitātes viļņi iegūti pie 4x zemākas B_{AC} lauka vērtības - elektroenerģijas patēriņš ir ~16x zemāks!
4. Ar kombinētu B_{AC} un B_{DC} iedarbību ierosināto virsmas viļņu maksimālo intensitāti ierobežo pilienu veidošanās, kas rezultējas metāla šļakatās. Iegūtais maksimālais virsmas palielinājums ir ~30 %.
5. Oksīda slāņa veidošanās uz šķidrā metāla virsmas ietekmē ierosināto virsmas viļņu formu un intensitāti. Biezs oksīdu slānis samazina virsmas viļņu amplitūdu, bet palielinot B_{AC} intensitāti, viļņi ilgāk saglabā koncentriskumu.

1.5.2 Turpmākā pētījuma attīstība - prototips silīcijam

Atbilstoši fizikālajam modelim, laboratorijā izstrādāts prototips šķidra silīcija attīrīšanai no bora. Prototips aprīkots ar specifiski šim mērķim izveidotu induktoru. Eksperimentālā realizācija šādai sistēmai ir tehniski sarežģīta, jo tiek izpildīta virkne kritēriju. Sistēma paredz:

1. Silīcija pārkarsēšanu līdz 1600 °C.
2. Bora attīrīšanai nepieciešamo atmosfēras nodrošināšanu – kontrolēta Ar+3wt%H₂O plūsma uz virsmas.
3. Induktors aptver kausēšanas krāsni. $B_{AC,max}=170$ mT, dzesēšanas sistēma aizvada vijumos izdalīto džoula siltumu un siltumstarojumu no krāsns.
4. Sistēma paredz šķidra silīcija paraugu paņemšanu eksperimentu gaitā.

Sistēma izveidota aksiāli simetriska un sastāv no 6 MoSi₂ sildītājiem, ko ietver cirkonija keramikas siltumizolācija, skatīt Attēls 8. No augšas silīcija kamerā var ievadīt kvarca nūjiņu ar kuru uzsūkt šķidrā silīcija paraugu.



Attēls 8 Laboratorijas prototipa iekārta silīcijam. A) Eksperimentālās sistēmas shematisks attēls - 1. krāsns kamera ar MoSi_2 sildelementiem un tīģelis silīcijam; 2. induktors ar ūdens dzesēšanas sistēmu; B) Induktors salikšanas laikā, baltās un melnās detaļas ir 3D drukātas. C) Eksperimentālā sistēma – 3. temperatūras un kameras atmosfēras vadība; 4. gāzes sildīšana un mitrināšana; 5. silīcija kausēšanas kamera; 6. gāzes ievads un paraugu paņemšanas vieta; 7. sildelementu vadība.

Induktors ir izveidots no divām vara spirālēm kopā veidojot 34 vijumus. Ar maksimālo strāvu 1300 A induktora centrā var sasniegt $B_{AC}=170$ mT. Galvenais izaicinājums induktora izstrādē bija termiskais starojums no silīcija krāsns, ko ir efektīvi jāaizvada, lai nepieļautu sistēmas pārkaršanu. Dzesēšana realizēta nodrošinot intensīvu ūdens plūsmu gar vijumiem ar caurplūdi >10 L/min. Kā induktoru mehāniski stiprinošie elementi izmantoti 3D drukātas detaļas maksimālai ūdens caurplūdei.

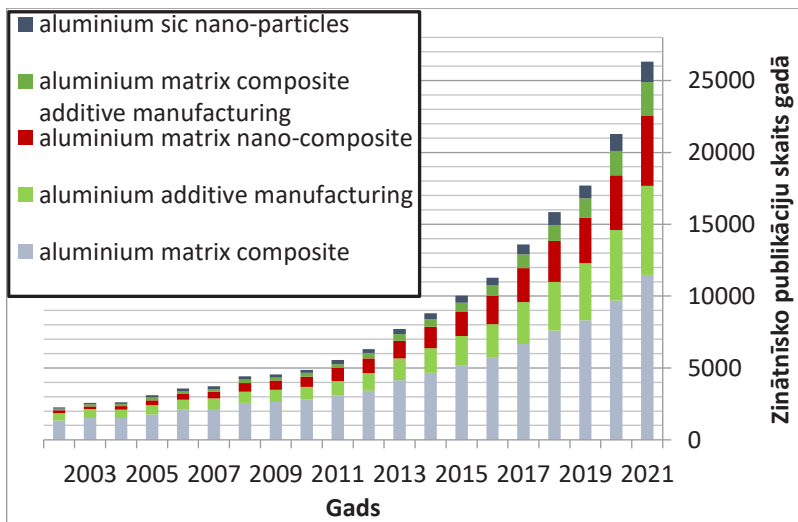
Attīstītā elektromagnētiskā tehnoloģija virsmas viļņu ierosmei sasniegusi 4. tehnoloģijas gatavības līmeni (angliski *technology readiness level*, TRL 4)[14].

2 EM metode daļiņu iemaisīšanai sakausējumā

2.1 Motivācija un piedāvātais risinājums

Ar vien pieaugošais pieprasījums pēc zemas izmaksas un augstas veiktspējas materiāliem ir veicinājis pāreju no sakausējumiem uz kompozītmateriāliem. Metāla matricas kompozīti (MMC) ir materiāli, kuros ar metāla iemaisītām nemagnētiskām daļiņām var būtiski uzlabot sākotnējā metāla termiskās vai mehāniskās īpašības, piemēram, stiepes izturību, cietību, nodilumizturību un noturību pret plaisu veidošanos.

Kalvenokārt tieši alumīnijs un tā sakausējumi ir piesaistījuši plašu interesi kā bāzes metāls, iegūstot alumīnija matricas kompozītus (AMC). AMC ir plaši pielietojami avio, auto un citās industrijās, kur ir svarīga attiecība starp detaļu svaru un to mehāniskajām īpašībām [18,56,57]. Kā viens no potenciāli perspektīviem pielietojumiem tiek uzskatīts AMC izmantošana 3D drukā. Attēls 9 atspoguļo zinātnisko publikāciju skaitu pēdējos 20 gados atkarībā no meklētajiem atslēgas vārdiem, izmantojot Scopus datubāzi. Meklējuma rezultāti parāda gan ievērojamu pieaugumu pētījumiem, kas saistīti ar AMC un 3D drukā, kā arī ar abām šīm tematikām kopā. Viens no meklējumiem ir par alumīniju un silīcija karbīda (SiC) nano-daļiņām, kas tiek uzskatīts par vienu no perspektīvākajiem metāla un daļiņu pāriem [18,58,59].



Attēls 9 Zinātnisko publikāciju skaits pēdējos 20 gados, meklējot pēc atslēgvārdiem, kas raksturo pētījuma virziena aktualitāti. Izmantoti dati no Scopus datubāzes.

AMC ražošanai var izšķirt divus veidus - ražošana caur sakausējuma cieto un šķidro jeb metalurģisko fāzi. Visplašāk izmantotā metode caur cieto fāzi ir pulvermetalurģija. Lai arī metode tiek plaši pielietota industrijā, tās galvenais trūkums ir nepieciešamība izmantot alumīnija pulveri. Metalurģiska AMC ražošana tiek attīstīta jau vairāk kā 50 gadus un ir vairākkārt izdevīgāka, proti, 4-11 \$/kg, salīdzinot ar pulvermetalurģijas izmaksām 22-37 \$/kg, ko galvenokārt sastāda pašu izejmateriālu cena [60]. No metalurģiskajām ražošanas metodēm visplašāk ražošanā tiek izmantota AMC maisīšanas-liešanas (angliski *stir-casting*) metode. Maisīšanai šajā gadījumā tiek izmantota rotējoša lāpstiņa, kas iemērcta sakausējumā. Maisīšanas-liešanas metodes galvenais trūkums ir tas, ka maisīšana ir mehāniska, kā rezultātā lāpstiņa gan nodilst piesārņojot sakausējumu, kā arī ap lāpstiņu mēdz aplīpt sakausējums un veidojas intensīvas virsmas deformācijas, kas veicina sakausējuma oksidēšanos un rezultējas ar būtiskiem materiāla zudumiem [18,60,61]. Salīdzinoši līdzīga daļiņu iemaisīšanas metode, kas tiek plaši pētīta, ir daļiņu iemaisīšana ar rotējošu lāpstiņu pusšķidrā kausējumā (angliski to sauc par *compo-casting*). Daļiņas, ko iemaisa sakausējumā, lai iegūtu AMC, var raksturot pēc to izmēra, ķīmiskā sastāva, formas, to pievienošanas daudzuma u.c. parametriem. Efektīvākā daļiņu iemaisīšanas metode bieži vien ir atkarīga no tā, kādas daļiņas un sakausējumu izmanto, jo to nosaka sakausējuma un daļiņu pāra slapināšanās spēja, blīvums utt. AMC ražošanas metodi nosaka arī gala materiāla pielietojums [18,60]. Literatūrā izšķir AMC ar mikro un nano izmēra daļiņām, jo sakausējuma īpašības atkarībā no daļiņu izmēra un to sadalījuma būtiski mainās. Piemēram, Zhao [62] publikācijā ir parādījis kā uzlabojas materiāla stiepes izturība samazinoties SiC daļiņu izmēram no 10 μm, 1 μm un 50 nm AZ61 alumīnija sakausējumā. Samazinoties daļiņu izmēram, ar vien aktuālāka kļūst problēma ar daļiņu aglomerēšanos, kas noved pie neviendabīga materiāla. Elektromagnētiska metode daļiņu aglomerātu izkliedei tiek pētīta 3. nodaļā. Plašāks literatūras apraksts par AMC ražošanas metodēm sniegts [dis4].

Elektromagnētiskās metodes AMC sakausējumu ražošanai, maisot metālu ar indukcijas spolēm, pētījuši Indijas un citu pētnieku grupas. Metode ir perspektīva, bet tā vēl aizvien ir agrīnā attīstības stadijā [24,25]. Konceptijas ideja ir līdzīga kā indukcijas maisītājiem, ko izmanto metalurģijā, piemēram, uzņēmums ABB [1].

Šajā darbā tiek pētīta jauna EM metode daļiņu iemaisīšanai, kas kalpotu kā alternatīva maisīšanas-liešanas metodei, daļiņu iemaisīšanu padarot efektīvāku. Darba gaitā izstrādāta pastāvīgo magnētu maisīšanas tehnoloģija lielizmēra alumīnija krāsniem [dis3], kas pēc tam pielāgota arī daļiņu iemaisīšanai alumīnija sakausējumos. Daļiņu iemaisīšanai izmantots pastāvīgo magnētu maisītājs kombinācijā ar indukcijas sildīšanu [dis4].

Uzdevumu par EM metodes attīstīšanu daļiņu iemaisīšanai var iedalīt sekojošos posmos:

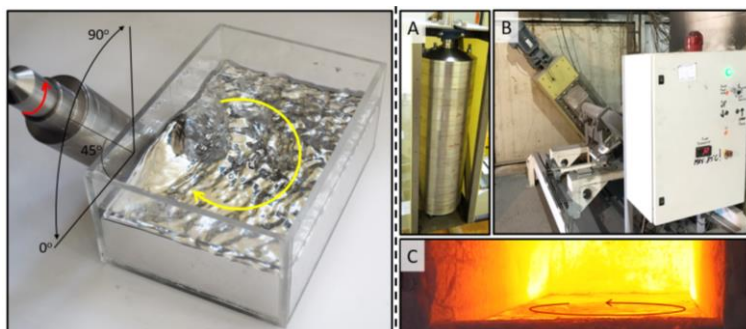
- 1) Fizikālais modelis ar galinstānu plūsmas pētījumiem.
- 2) Analītisko un skaitlisko modeļu validēšana, kā arī tehnoloģijas pielāgošana alumīnijam.
- 3) Industriālas mēroga iekārtas izveide alumīnijam.
- 4) Izstrādātās maisīšanas metodes pielāgošana daļiņu iemaisīšanai, kā arī eksperimenti ar dažādām daļiņu ievadīšanas metodēm.

2.2 Tehnoloģijas attīstība un pielāgošana daļiņu iemaisīšanai

2.2.1 Pastāvīgo magnētu maisītāju tehnoloģijas attīstība

Pētījumos par daļiņu iemaisīšanu metālā, darbā izmantota zinātniskās iestrādes par cilindriskas formas pastāvīgo magnētu maisītājiem, kas attīstīta Fizikas institūta MHD Tehnoloģiju laboratorijā. Darba autors bijis viens no metodes attīstītājiem [26,40,42].

Šķidra metāla maisīšana pēti izmantojot galinstāna modeli, kas parādīts Attēls 10 pa kreisi. Sistēma sastāv no trauka ar galinstānu, kas ir kā modelis šķidra alumīnija krāsnij.



Attēls 10 Pa kreisi - modeļiekārta šķidra galinstāna maisīšanai ar pastāvīgo magnētu maisītāju (1-1.5 Litri). Pa labi - mērogots pastāvīgo magnētu maisītājs priekš 20 tonnu alumīnija krāsns (~7 000 Litri). A) Pastāvīgo magnētu sistēma, B) Iekārta pie krāsns sienas. Magnēts novietots 45° leņķī. C) Krāsnī redzama izteikta alumīnija plūsma.

Pastāvīgo magnētu maisītājs ir cilindriskas formas pastāvīgo magnētu rotors, kas magnetizēts radiālā virzienā un rotē ap asi. Maisītāju ir iespējams novietot dažādos leņķos pie trauka sienas vai zem trauka. Darba gaitā ar PUDV iegūti plūsmas ātruma mērījumi, ko rada pastāvīgā magnēta rotors (50 mm diametrā, 100 augsts) pie dažādiem rotācijas ātrumiem un metāla slāņa biezumiem. Ar šādu modeli iegūtie mērījumi paredzēti, lai uzlabotu analītiskos un skaitliskos modeļus šķidrā metāla plūsmas aprēķiniem, ko izstrādājuši

laboratorijas kolēģi Andris Bojarevičs, Didzis Berenis un Ivars Krastiņš, izmantojot brīvpiekļuves programmas OpenFoam, Elmer u.c.

Atbilstoši attīstītajiem skaitliskajiem modeļiem, tehnoloģija pārnesta uz industriālu mērogu – izveidots pastāvīgo magnētu maisītājs priekš 20 tonnu alumīnija krāsns, kas uzstādīts alumīnija rūpnīcā, skatīt Attēls 10 pa labi. Atšķirībā no kanālveida sistēmām, alumīnija metalurģijā krāsns sienas biezums var sasniegt 20-30 cm, tāpēc nevar tikt izmantoti klasiskie MHD sūkņi ar multipolu rotoriem [63]. Darbā izstrādātie modeļi veiksmīgi izmantoti arī pētījumus par alumīnija degazēšanas tehnoloģiju un lūžņu iemaisīšanu šķidrā metālā [64,65].

Publikācijā aprakstītā pētījuma [dis3] būtiskākais rezultāts ir tieši tehnoloģijas pārņemšana uz industriālo vidi, jo alumīnija metalurģijā šāda tehnoloģija un arī tik liela pastāvīgo magnētu sistēma tiek izmantota pirmo reizi! Ar šādiem industriāliem testiem parādīts, ka pastāvīgo magnētu tehnoloģijas var pielāgot alumīnija metalurģijai. Tehnoloģija attīstīta līdz TRL 7 [14]. Publikācijas rezultātā par šo tehnoloģiju izrādījuši interesi vairāki alumīnija un tērauda ražotāji (Borbet Austria GmbH, M.D.Steels, u.c.), kā arī zinātniskas institūcijas, piem., Research Institute of Industrial Science & Technology, Koreja).

Pētījums turpināts attīstot izstrādāto pastāvīgo magnētu maisītāja tehnoloģiju daļiņu iemaisīšanai alumīnijā, iegūstot AMC.

2.2.2 Daļiņu iemaisīšana alumīnija sakausējumos

Sākotnēji apskatīta koncepcija, kurā metālu izkausē un intensīvi maisa ar pastāvīgo magnētu maisītāju, daļiņas uzberot uz metāla virsmas. Eksperimentālā sistēma ļāva novietot magnētu zem tīģeļa vai pie tā sāna, ierosinot intensīvu plūsmu tīģelī. Sākotnēji daļiņu iemaisīšana testēta ar A356, A360 un 6061 sakausējumiem un dažādām daļiņām – silīcija karbīdu SiC (20 μm), SiC (50 nm) un volframa karbīdu WC (50 nm). Visos gadījumos daļiņu iemaisīšanu apgrūtināja oksīdu slānis uz metāla virsmas, kurā daļiņas ielīp vai paliek uz tā, veidojot lielus aglomerātus. Bieži vien pat pie intensīvas maisīšanas oksīdu plēve netiek sarauta un daļiņas paliek uz virsmas. Ja oksīdu plēve tika pārrauta, daļiņas netika noslapinātas ar sakausējumu un tika izspiestas atpakaļ uz virsmas.

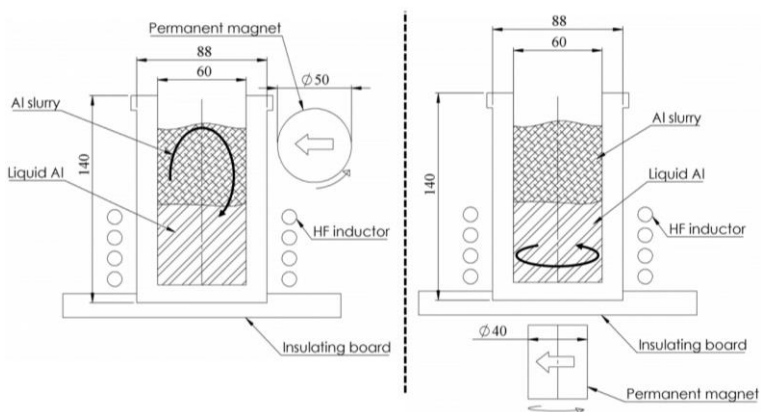
Nav novērots, ka daļiņu iemaisīšanu veicinātu kāda no literatūrā rekomendētajām metodēm:

- 1) daļiņu iepriekšēja izkarsēšana 2-4 h, 700 °C [21,66]
- 2) metāla pārkarsēšana līdz 900 °C [67]
- 3) argona atmosfēras nodrošināšana [60,68]
- 4) sakausējuma leģēšana ar 3-5%wt magnija [69,70]

Pēc neveiksmīgā rezultāta, izstrādāta koncepcija daļiņu iemaisīšanai pusšķidrā nevis šķidrā sakausējumā. Kā motivācija tam kalpoja, pirmkārt, pētījumi par daļiņu iemaisīšanu pusšķidrā sakausējumā (angliski *compo-casting*) [71], kur līdzīgi kā maisīšanas-liešanas metodē tiek izmantota maisīšanas lāpstiņa, bet metāls ir pusšķidrums un, otrkārt, laboratorijas cita pētījuma ietvaros veiktie neitronu radiogrāfijas eksperimenti, kurā fiksēta gadolīnija daļiņu iemaisīšana alvas sakausējumā – efektīva daļiņu iemaisīšana no virsmas noritēja brīdī, kad sakausējums bija daļēji sasalis [72].

Daļiņu iemaisīšanai pusšķidrā kausējumā apskatītas divas koncepcijas - ja plūsma tiek radīta ar pastāvīgo magnētu rotoru, kas novietots pie tīģeļa sāna, un ja rotors novietots apakšā, skatīt Attēls 11. Plūsmas aprēķinus atkarībā no magnēta novietojuma veicis Ilmārs Grants [73].

Metāls tiek uzturēts karsts ar augstfrekvences induktora pievadīto jaudu. Induktors ļauj nodrošināt temperatūru nepieciešamajās robežās, lai sakausējums ilgstoši būtu pusšķidrums. Izmantotajiem A360, A356 un 6061 sakausējumiem šis diapazons ir 10-20 grādu robežās. Induktors novietots tīģeļa apakšā, lai pusšķidrā daļa veidotos augšdaļā kur veic daļiņu iemaisīšanu.



Attēls 11 Eksperimenta shēma daļiņu iemaisīšanai pusšķidrā kausējumā. Pa kreisi – maisīšana no sāna; Pa labi – maisīšana no apakšas.

2.3 Daļiņu iemaisīšanas sakausējumā rezultāti

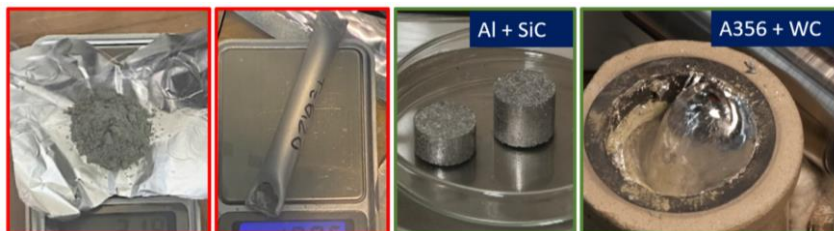
Ar visiem testētajiem sakausējumiem - A356, A360 un 6061 - bija iespējams atrast stacionāru stāvokli, kad metāls ilgstoši saglabājas pusšķidrums. Ar termopāri nomērīts, ka veidojas ~20 °C temperatūras gradients starp tīģeļa augšdaļu un apakšdaļu. Ar abām maisīšanas konfigurācijām vizuāli novērota efektīva maisīšanās arī pusšķidram sakausējumam, skatīt Attēls 12. Metāla plūsma apstājās vien mirkli pirms pilnīgas sasalšanas.



Attēls 12 Pusšķidra (~610 °C) A360 sakausējuma maisīšana – intensīvas virsmas deformācijas, ko rada PM maisītājs tīģeļa sēnā (pa kreisi), virpuļveida plūsma, ko rada maisītājs zem tīģeļa (pa labi).

Eksperimentāli testētas četras metodes daļiņu ievadīšanai metālā, skatīt Attēls 13:

- 1) Daļiņas ietītas alumīnija folijā un ievadītas metālā. Process veikts argona atmosfērā.
- 2) Ar daļiņām pildītu alumīnija cauruliņu ievadīšana metālā. Tai skaitā cauruliņu izveide argona atmosfērā un to izkarsēšana pirms ievadīšanas šķidrā metālā.
- 3) Tablešu izveide no daļiņu un alumīnija pulvera, izmantot 5t hidraulisko presi. Tabletes veidotas no alumīnija un SiC (20 μm) pulvera argona atmosfērā un pēc tam izkarsētas 350 °C.
- 4) Daļiņu uzbēršana uz virsmas. Tai skaitā daļiņu iepriekšēja izkarsēšana un argona atmosfēras nodrošināšana daļiņu iemaisīšanas laikā.



Attēls 13 Eksperimentāli pārbaudītie daļiņu ievadīšanas veidi. No kreisās – daļiņas folijā, daļiņas caurulītē, daļiņu un alumīnija pulvera tabletes, daļiņas uzbērtas uz virsmas.

No visām minētajām daļiņu iemaisīšanas metodēm, tikai ar trešo un ceturto eksperimentos varēja pilnībā vai daļēji iemaisīt daļiņas metāla tilpumā. XRF paraugu analīzes parāda volframa un silīcija koncentrācijas izmaiņu pēc daļiņu iemaisīšanas, skatīt Tabula 2.

Tabula 2 Paraugu analīzes ar XRF – ar bultiņām attēlots SiC un WC koncentrācijas pieaugums.

Sakausējums	Daļiņas	Daļiņas, wt%	XRF: WC	XRF: Si	Maisīšana
6061 ref	-	0%	0	0,65 %	
6061	SiC (20µm)	1%	0	1,09 %	No apakšas
A360 ref	-	0%	0	8,01 %	
A360	SiC (20µm)	2%	0	9,56 %	No apakšas
A360	WC (50nm)	1%	0,23 %	7,99 %	No sāna
A360	WC (50nm)	2%	0,75 %	8,04 %	No sāna

WC (50 nm) daļiņas tika iemaisītas A360 sakausējumā tās uzberot uz virsmas ar maisīšanu no sāna. Iemaisīšanās norit aptuveni 10-15 minūšu laikā un pēc atkārtotas sakausējuma izkausēšanas daļiņas neparādās uz virsmas.

Eksperimentāli SiC (20 µm) daļiņas izdevās iemaisīt sakausējumā tablešu formā, metālu maisot no apakšas. Izmantojot konfigurāciju, kad magnēts atrodas zem tīģeļa, iespējams sasniegt līdz pat 400 Hz magnēta rotācijas frekvenci. Šāda iedarbība šķidrā metālā rada plūsmu līdz pat 10 cm/sekundē. Lai tabletes iemaisītos, tās mehāniski nepieciešams iespiest zem metāla virsmas, intensīvā plūsmas apgabalā. Tabletes metālā pakāpeniski izjūk, bet daļiņas uz virsmas izspiestas netiek. Daļiņas netika izspiestas no metāla tilpuma arī pēc atkārtotas pārkausēšanas.

2.4 Secinājumi un turpmākā pētījuma attīstība

2.4.1 Secinājumi

1. Prototipa izstrāde priekš 20 tonnu alumīnija krāsns lāvusi parādīt, ka pastāvīgo magnētu sistēmas var tikt mērogotas un efektīvi pielietotas alumīnija metalurģijā.
2. Ar pastāvīgo magnētu maisītāju pusšķidrā sakausējumā var radīt intensīvu plūsmu tilpumā un oksīdu plēves pārraušanu līdz pat brīdim, kad metāls pilnībā sasilst.
3. XRF mērījumi apstiprina SiC daļiņu iemaisīšanos 6061 sakausējumā un WC un SiC daļiņu iemaisīšanos A360 sakausējumā, izmantojot indukcijas sildīšanu un pastāvīgā magnēta maisītāja kombināciju. Daļiņu iemaisīšanas process ir atkarīgs no daļiņu un sakausējuma pāra, sakausējuma maisīšanas veida un daļiņu ievades metodes.

2.4.2 Turpmākā pētījuma attīstība – detalizētas iemaisīšanas metodikas izveide

Iegūtie rezultāti kvalitatīvi parāda, ka ar izstrādāto metodi var veikt daļiņu iemaisīšanu. Pētījuma turpinājumā plānots šos rezultātus kvantificēt, konkrētiem sakausējuma un daļiņu pāriem nosakot nepieciešamos maisīšanas parametrus, iemaisīšanas ilgumu, maksimālo daļiņu iemaisīšanas daudzumu un precīzi atstrādājot daļiņu ievades metodiku. Būtiski ir atstrādāt šo metodiku arī lielākiem kausējuma tilpumiem.

3 Daļiņu aglomerātu izkliede šķidrā metālā

3.1 Literatūras apskats

Šajā nodaļā aprakstītā motivācija sakrīt ar 2. nodaļas sākumā aprakstīto, jo abos tiek pētītas EM metodes MMC materiālu ražošanai, bet atšķirīgiem ražošanas posmiem.

Iemaisot daļiņas šķidrā metālā, tām ir tendence veidot aglomerātus virsmas spraiguma un Van der Vālsa spēku dēļ [17]. Mikro izmēra daļiņām ir rasti veidi daļiņu aglomerātu izkliedei, savukārt mazām daļiņām, kuru raksturīgais izmērs ir $<1 \mu\text{m}$, to viendabīga izkliede metāla tilpumā aizvien ir aktuāla problēma. Alumīnija un citiem zemas kušanas temperatūras sakausējumiem daļiņu viendabīgu izkliedi var panākt ar mehānisku skaņas ģenerāciju šķidrā metālā [74,75]. Ar ultraskaņas zondi jeb sonotrodu metālā ierosina intensīvas spiediena svārstības, kas šķidrumā var radīt kavitāciju. Kā metodes lielāko trūkumu var minēt lēno iedarbību, jo kavitācijas zona ir tikai zondes tuvumā.

Elektromagnētiski inducētas intensīvas spiediena svārstības tiek uzskatītas kā viena no alternatīvām mehāniskai kavitācijas ierosināšanai [76,77]. Spiediena svārstību rezultātā gāzu ieslēgumi šķidrā metālā rada burbuli, kuram sasniedzot kritisko spiediena intensitāti, tas kavitē. Kavitācija laikā lokāli rodas mikrostrūklas ar ātrumu līdz 400 m/s, spiediens sasniedz līdz pat 1000 atm, temperatūra var sasniegt 20000 K un temperatūras izmaiņa 10^9 K/s. Burbuļu veidošanās norit ap gāzu un piemaisījumu ieslēgumiem, tāpēc kavitācijas slietnis vienam un tam pašam materiālam var būt atšķirīgs [74]. Tipisks veids kavitācijas detektēšanai ir skaņas signāla ierakstīšana no šķidruma apgabalā. Kavitācijas signāls satur sub-harmonikas un ultra-harmonikas no pamatfrekvences f , ko izmanto kavitācijas ierosināšanai. Attiecīgi, frekvenču spektrā kavitācija novērojama kā $\frac{1}{2}f$ un $\frac{3}{2}f$, savukārt pilnā kavitācijas režīmā, signāls aptver visu spektru [30,31,77].

Abramov [44] pētījis kavitāciju šķidros metālos spiediena svārstības radot mehāniski, kavitācijas uzsākšanos iegūstot alumīnijā virs 550 kPa, bet alvā pie 280 kPa. Vives [30] parādījis elektromagnētisku kavitācijas ierosināšanu izmantojot maiņstrāvu un perpendikulāru pastāvīgo magnētisko lauku, iegūstot kavitāciju alumīnijā pie 65 kPa. Bojarevics [78] pētījis 2 induktoru sistēmu, kurā viens induktors izmantots induktīvai sildīšanai, bet otrs no augšas tiek likts klāt metāla virsmai, radot spiediena svārstības un kavitāciju.

Iedvesma par kombinētu mainīga un pastāvīga magnētiskā lauka pielietošanu daļiņu aglomerātu izkliedei metālā nāk no ilgstošās sadarbības ar Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, kuras laikā pētītas EM metode daļiņu aglomerātu izkliedei ODS tēraudā [7,43]. Šo pētījumu rezultātā attīstījies apakšvirziens par metodes izmantošanu arī zemākas kušanas temperatūras metāliem, kas aprakstīts nodaļā 3.2 un [dis5].

Smalkgraudaina un viendabīga sakausējuma mikrostruktūra ir svarīgs priekšnosacījums augstas kvalitātes sakausējumam ar labām un viendabīgām tā mehāniskajām īpašībām. Elektromagnētiskā lauka impulsu iedarbība (PMF) literatūrā plaši pētīta sakausējuma mikrostruktūras uzlabošanai tā kristalizācijas laikā, iegūstot smalkāku graudu un dendrītu struktūru [34,37,79]. Tā, piemēram Zhang pētījumā [33] iegūvis par 18% uzlabotu stiepes izturību A357 sakausējumā. Kā vienīgo atrasto literatūru, kur izmantota kombinēta PMF un B_{DC} iedarbība var minēt Hua pētījumu [6], kurā parādīts kā ar šādu iedarbību var uzlabot mikrostruktūru alvas sakausējumā. Nodaļā 3.3. un [dis6] aprakstīts pētījums par PMF iedarbības izmantošanu priekš daļiņu izkliedes MMC, kas līdz šim literatūrā nav piedāvāts. Līdzīgi kā Hua pētījumā, tika eksperimentēts arī ar EM iedarbības ietekmi uz alvas sakausējuma mikrostruktūru, bet šajā darbā detalizētāk paskaidrota pašu impulsu iedarbība uz šķidro metālu.

Sakausējumu ražošanas šķidrā fāze noslēdzas ar kausējuma kristalizāciju. Kristalizācijas apstākļi ir būtiski, lai būtu viendabīgs materiāla ķīmiskais sastāvs, mikrostruktūras sadalījums, kā sakausējumā iemaisīto daļiņu sadalījums. Viens no veidiem kā kontrolēti kristalizēt sakausējumu ir ar nepārtrauktas liešanas kristalizatoru, kurā metāls tiek vilkts cauri dzesējamam apgabalam, tādējādi nodrošinot vienādu kristalizācijas apstākļus visā kausējuma sasalšanas laikā. Lai arī dažāda veida elektromagnētiska maisīšana nepārtrauktas liešanas kristalizatoros ir pētīta iepriekš [80,81], darbā izstrādāts ar elektromagnētisku iedarbību aprīkots kristalizators laboratorijas apstākļiem. Ar šo kristalizatoru plānots veikt pētījumus gan par ietekmi uz sakausējumu mikrostruktūru, gan arī turpināt MMC tehnoloģijas izstrādi, veicot to kristalizāciju. Līdz šim vēl nav skaidrs vai daļiņas kristalizācijas laikā neuzpeldēs, vai neaglomerēsies. Šādu potenciālu problēmu risināšanā arī varētu palīdzēt EM maisīšana. Pētījums par izstrādātās EM iedarbības ietekmi uz A360 sakausējumu tā kristalizācijas laikā aprakstīts nodaļā 3.4 un [dis7].

Uzdevumu par EM metožu pielietošanu daļiņu aglomerātu izkliedei metālā var iedalīt sekojošos posmos:

- 1) Analītiska un skaitliska modeļa attīstīšana dominējošo fizikālo efektu aprakstam.
- 2) Eksperimentālās sistēmas ar supramagnētu izstrāde un paraugu sagatavošana pulvermetaluģijas ceļā.
- 3) Eksperimentu sērija veicot paraugu apstrādi ar B_{AC} un B_{DC} iedarbību.
- 4) Elektromagnētiskā lauka impulsu (PMF) iedarbības izstrāde.
- 5) Eksperimentu sērija, pakļaujot paraugus PMF un B_{DC} iedarbībai.
- 6) Nepārtraukta liešanas kristalizatora izstrāde, kas aprīkota ar elektromagnētisku maisīšanu.
- 7) Eksperimentu sērija ar nepārtrauktu liešanas kristalizatoru.

3.2 EM ierosināta kavitācija daļiņu izkliedei MMC

3.2.1 Kavitācijas ierosināšana ar mainīgu un pastāvīgu magnētisko lauku

Šajā darbā piedāvāts kavitācijai nepieciešamās spiediena svārstības radīt izmantojot mainīga B_{AC} un pastāvīga B_{DC} magnētiskā lauka kombināciju (abi lauki ir vērsti paralēli). Šāda koncepcija izvēlēta, lai metode būtu mērogojama arī lieliem metāla tilpumiem. Eksperimentos kā B_{DC} avots izvēlēts supravadošs magnēts līdz $B_{DC,max}=4$ T. Kā B_{AC} lauka avots izmantots augstfrekvences induktors, mainīga magnētiskā lauka radīšanai līdz 0.13 mT. Maksimālo oscilējošā spiediena amplitūdu var novērtēt kā $B_{AC}B_{DC}/\mu_0 \approx 400$ kPa. Šāda amplitūda balstoties uz literatūras apskatu ir pietiekami, lai sasniegtu kavitāciju sakausējumos.

Mazu burbuļu oscilācijas šķidrumā, ko rada mainīgs ārējais spiediens $p_\infty(t)$, var aprakstīt ar Releja-Pleseta vienādojumu (20), kur mainīgu burbuļa rādiuss ir $R(t)$, P_0 ir ārējā spiediena nemainīgā komponente, R_0 - burbuļa sākotnējais rādiuss, c ir gāzes burbuļa īpatnējais siltums (c_p/c_v), ρ , γ , un μ ir attiecīgi blīvums, virsmas spraigums, šķidruma viskozitāte [25, 26].

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\gamma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3c} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} - \frac{2\gamma}{R} - p_\infty(t) \right] \quad (20)$$

Mazam burbulim, kuru galvenokārt ietekmē virsmas spraigums, kritisko spiedienu P_T pie kura sāksies kavitācija var noteikt izmantojot izteiksmi (21).

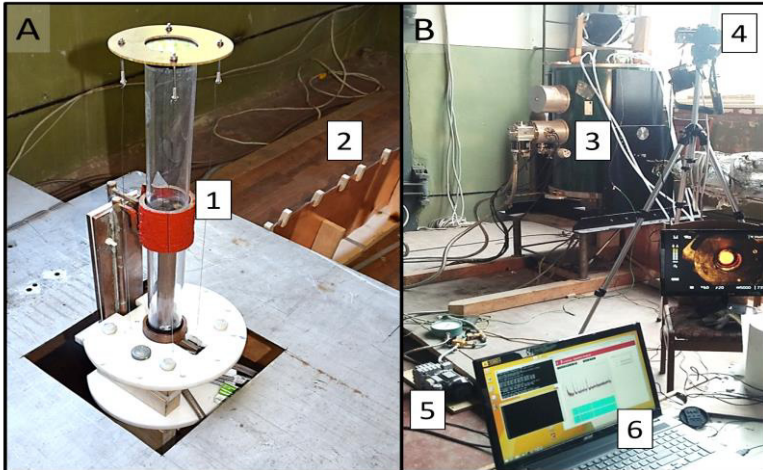
$$P_T = P_0 + \frac{4}{3} \left[\frac{3\gamma^3}{3R_0^3(P_0 + 2\gamma/R_0)} \right]^{1/2} \quad (21)$$

Ja izteiksmē (21) apkārtējā spiediena vērtība ir ap 0.5 kPa, to var neņemt vērā, salīdzinot ar spiedienu, ko rada akustiskais spiediens un Laplasa spiediens. Zinot alumīnija virsmas spraigumu 1.007 N/m, var novērtēt, ka minimālais kavitācijas burbuļu izmērs ir ap 2 μ m.

Mainīgais magnētiskais lauks rada šķidrā metāla kustību, savukārt pastāvīgais lauks slāpē rotāciju, kas ir perpendikulāra magnētiskā lauka līnijām [45]. Kustības slāpēšanu var raksturot ar MHD mijiedarbības parametru (22), kura vērtība ir šajā gadījumā ir vismaz 400, kas nozīmē, ka makroskopiska plūsma statiskā 4 T laukā tiek būtiski slāpēta.

$$N = \frac{\sigma B^2 R}{\rho u} \quad (22)$$

Paraugs šajos eksperimentos ir tablete (30 mm diametrā), kura sapresēta no Al-6wt%Mg sakausējuma vai alvas (Sn) un SiC daļiņu (100 nm) pulvera. Eksperimenta laikā tablete atrodas uz ūdens dzesējama statīva. Eksperimenta gaitā paraugs 9-18 kHz AC laukā tiek izkausēts, uz to iedarbojas ar elektromagnētisko iedarbību (B_{AC} un B_{DC}). Pēc eksperimenta, samazinot B_{AC} intensitāti, paraugs uz dzesējošās pamatnes sasilst. Eksperimentālā sistēma parādīta Attēls 14. Veicamo eksperimentu apjoms bija ierobežots, jo bija ierobežots laiks supravadošā magnēta izmantošanai.



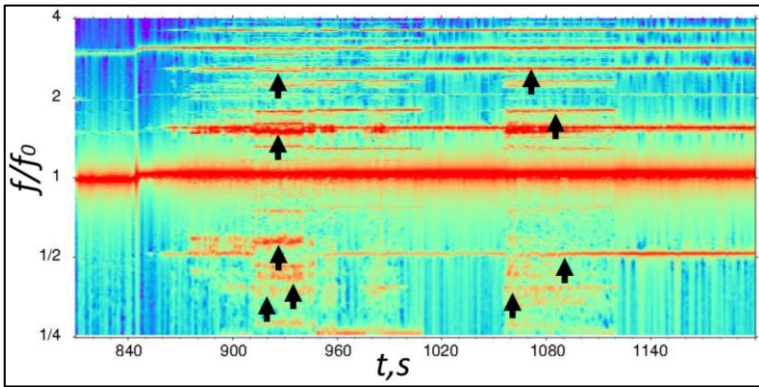
Attēls 14 Eksperimentālā iekārta: A: paraugs (1) un to aptverošs induktors, maiņstrāvas pievada līnija (2); B: supravadošs magnēts (3), kamera (4), vakuumsūknis (5), skaņas signāla ierakstīšana (6).

Eksperimentālo kameru ietver maiņstrāvas induktors, bet visa šī sistēma ir ievietota supravadošā magnētā. Pjezo sensori skaņas ierakstam ir pielīmēti pie dzesējošās pamatnes uz kuras atrodas MMC paraugs. Skaņas signālam varēja sekot līdz eksperimenta gaitā, tādējādi uzreiz redzot kuros brīžos parādās kavitācijas raksturīgais signāls.

3.2.2 Daļiņu aglomerātu izkliedes rezultāti

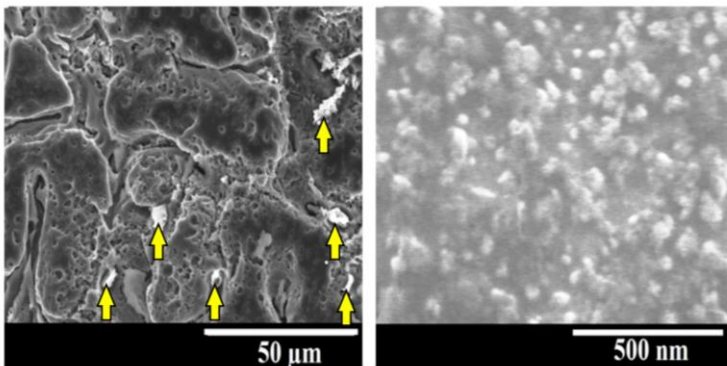
No visiem paraugiem eksperimenta laikā tika fiksēts kavitācijai raksturīgais sub un ultra harmonikas signāls. Kavitācijas signāls eksperimentos parādījās pēc mainīgā spēka intensitātes izmaiņas aptuveni ar 10-20 s aizkavēšanos. Signāls tika fiksēts gan pie intensitātes palielināšanas, gan samazināšanas. Novērota arī kavitācijas signāla maiņa, reaģējot uz ārējā gaisa spiediena izmaiņām. Vienā no eksperimentiem ar alvu un SiC daļiņām reģistrēts

signāls ar daudzām sub un ultra harmoniskām, kas raksturīgs pilnas kavitācijas režīmam, skatīt Attēls 15 ap 920 eksperimenta sekundi.



Attēls 15 Skaņas ieraksts no alvas un SiC parauga B_{AC} un B_{DC} magnētiskajā laukā. Ar bultiņām norādītas kavitācijai raksturīgais signāls.

Ar skenējošo elektronu mikroskopu Al-Mg paraugos redzams, ka daļiņām, veidojot aglomerātus, ir tieksme atrasties uz grauda robežām, Attēls 16. Savukārt, daļiņu sadalījums graudā ir vienmērīgs un daļiņas ir pilnībā izkliedētas, to parāda elektronmikroskopa sistēmā iebūvētā EDX analīze. Novērtēts, ka paraugā SiC ir 4.2%vol - šāda koncentrācija ir raksturīga legējošajiem sakausējumiem, kas arī būtu tiešais praktiskais pielietojums šādam materiālam.



Attēls 16 SiC daļiņas Al-Mg paraugā: A) Daļiņu aglomerāti uz grauda robežām; B) Pilnībā izkliedētas individuālas daļiņas metāla graudos.

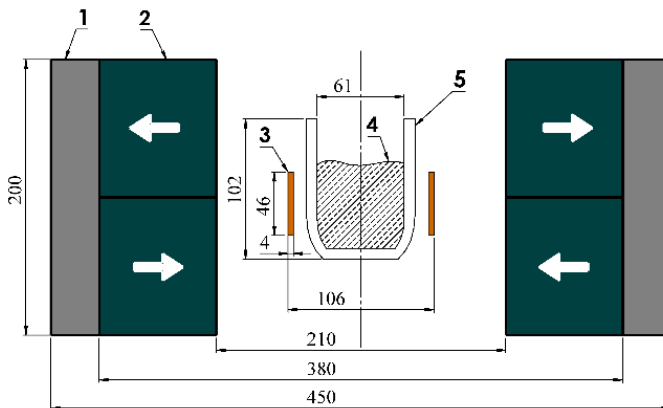
Zemākā elektromagnētiskā spiediena amplitūda, pie kuras iegūts kavitācijas signāls ir alvas paraugā pie 120 kPa.

3.3 EM lauka impulsi sakausējuma mikrostruktūras uzlabošanai

3.3.1 Kombinētas impulsu un pastāvīgā magnētiskā lauka iedarbības izstrāde

Tā kā supravadošu magnētu kā 3.2. nodaļā aprakstītajos eksperimentos priekš industriāliem procesiem izmantot būtu dārgi un sarežģīti, darbā tiek piedāvāts līdzīgas amplitūdas spiediena svārstības radīt ar EM lauka impulsiem (PMF) un pārbaudīt vai šāda iedarbība arī ietekmē daļiņu izkliedi MMC.

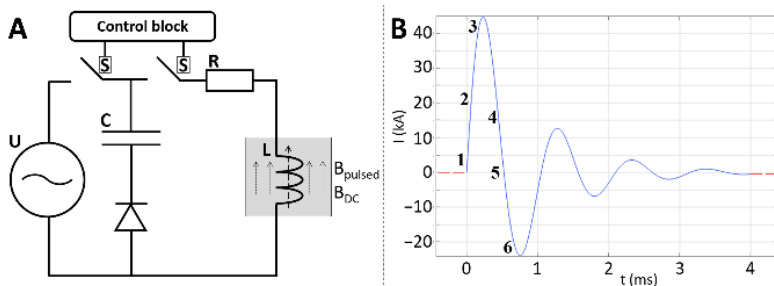
Līdzīgi kā iepriekš aprakstītajos pētījumos, arī šoreiz apskatīts risinājums impulsu iedarbību izmantot kombinācijā ar pastāvīgo magnētisko lauku. Eksperimentālās sistēmas shēma parādīta Attēls 17. Sistēma veidota aksiāli simetriska un sastāv no elektriski nevadoša grafīta tīģeļa, kas ievietots viena vijuma induktorā. Tīģeļa augšējais diametrs 95 mm, apakšējais diametrs 61 mm, augstums 109 mm. Tīģelis un induktors atrodas pastāvīgā magnētiskajā laukā, kas šķidrā metāla apgabalā ir vērsts normāles virzienā ($B_{DC} = 0.46 \text{ T}$). Tiek izmantota virsmas viļņu eksperimentiem izstrādāta pastāvīgo magnētu sistēma, kas aprakstīta promocijas darba 1. nodaļā.



Attēls 17 Eksperimentālās sistēmas shematiskais attēls (aksiāli simetrisks). Sistēmas izmēri attēloti milimetros. 1 - tērauda magnētiskā lauka jūgs. 2 – pastāvīgo magnētu sistēma, baltās bultiņas parāda magnētu magnetizācijas virzienu. 3 – vara induktors. 4 – šķidrās metāls. 5 – grafīta tīģelis.

Elektriskā shēma impulsu ģenerēšanai parādīta Attēls 18 A. Induktors L ir pieslēgts kondensatoru sistēmai C, kurus izlādējot, spolē tiek radīts impulsu magnētiskais lauks. Kondensatorus uzlādē maiņstrāvas transformators U.

Vadības bloks ar tiristora slēdžiem S kontrolē kondensatoru uzlādi un izlādi. Nomērītā pīķa strāva impulsa izlādes laikā uz induktora pievades līnijas ir 40 kA, parādīts Attēls 18 B. Impulsa signālu var iedalīt 6 tā raksturīgajos posmos: 1 – sākuma stāvoklis, 2 – augšana, 3 – pīķis, 4 – dilšana, 5 – nulles vērtības šķērsošana, 6 – otrais pīķis. Inducētā spēka un spiediena sadalījums šajos posmos apskatīts publikācijā [dis6].



Attēls 18 A: Impulsa magnētiskā lauka avota elektriskā shēma. B: Nomērītā impulsa strāva spolē.

Nomērītais impulsa signāls var tikt aprakstīts ar slāpētu svārstību vienādojumu (23).

$$I = I_0 \cdot \exp(-\beta t) \cdot \sin(\omega t) \quad (23)$$

Vienādojumā $\beta = \frac{R}{2L}$ ir slāpēšanas koeficients, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ir frekvence, bet $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ rezonanses frekvence. Izveidotajai sistēmai ir sekojoši parametri: $C = 50 \text{ mF}$, $U = 150 \text{ V}$, $L = 1 \text{ } \mu\text{H}$, $R = 2.4 \text{ m}\Omega$, un $I_0 = U/R = 60 \text{ kA}$. Ievietojot šīs vērtības vienādojumā (23), iegūst, ka slāpējošo svārstību signāls ir (24).

$$I = 60000 \cdot \exp(-1200t) \cdot \sin(6000t) \quad (24)$$

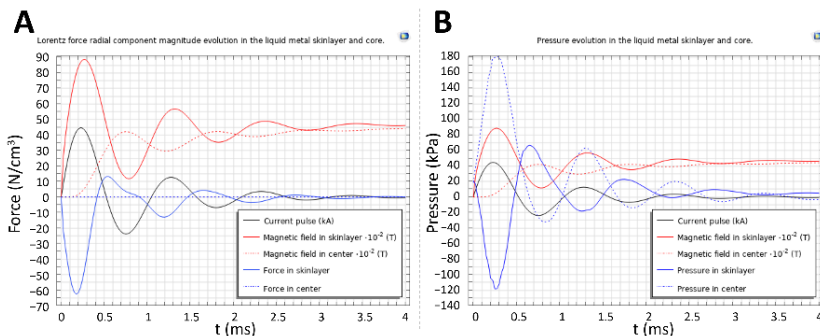
Impulsa radītais magnētiskais lauks spolē var tikt novērtēts kā $B_{PMF} = \frac{\mu_0 I}{2R} = 0.5 \text{ T}$. Elektromagnētiskā lauka impulsa iespīšanas elektriski vadošā šķidrumā aprakstījis Grants [82]. Eksperimentos izmantots alumīnija 6061 un alvas-svina Sn-10%wt.Pb sakausējumi.

Ierosināto spiediena svārstību amplitūda, ko rada kombinēta PMF un B_{DC} iedarbība, novērtējama kā $P = \frac{B_{PMF}(B_{DC} + B_{PMF})}{2\mu_0} = 190 \text{ kP}$. Ja tiek izmantoti tikai impulsi bez B_{DC} , impulsa laikā šķidrā alumīnijā tiek ierosināta spēcīga plūsma, kas rada šķidrā metāla virsmas deformācijas un metāla šlakatas. Pastāvīgais

magnētiskais lauks savukārt šīs deformācijas slāpē, bet palielina inducētā spēka un spiediena amplitūdu.

3.3.2 Eksperimentu un skaitlisko aprēķinu rezultāti

Ar skaitliskās modelēšanas programmu Comsol Multiphysics 6.0. novērtēts inducētais spēks, spiediens un virsmas deformācijas, ko rada EM iedarbība uz šķidru 6061 alumīnija sakausējumu. Attēls 19 parāda magnētisko lauku, EM spēku (A) un spiedienu (B) šķidra alumīnija skinslānī un centrā. Vienkāršības labad, strāva induktorā, magnētiskais lauks un spēks vai spiediens visi ir parādīti uz vienas vertikālās ass.



Attēls 19 Grafiki parāda elektrisko strāvu induktorā un rezultējošo magnētisko lauku. A: EM spēks šķidrā metāla skinslānī un centrā. B: spiediens šķidrā metāla skinslānī un centrā.

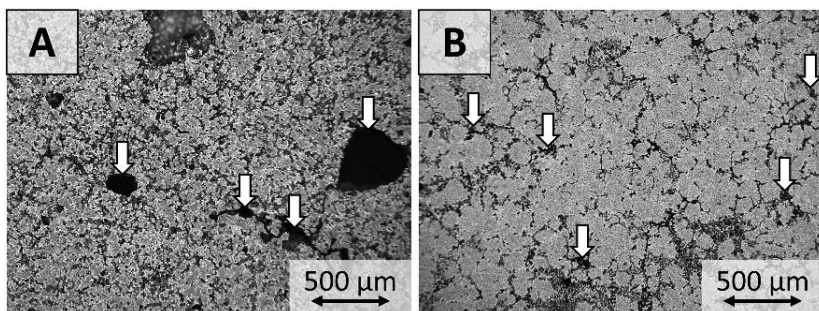
Impulsa sākumā, EM spēka radiālā komponente skinslānī ir ar mīnuss zīmi, kas nozīmē, ka šķidrā metāla tiek saspīests, radot zema spiediena apgabalu tīģeļa sienas tuvumā un augsta spiediena apgabalu centrā. Pēc tam norit svārstības ap nulles vērtību līdz iedarbība norimst. Spiediena svārstības EM iedarbības laikā metālā ir diapazonā no -100 kPa līdz 150 kPa, kas pēc B_{AC} un B_{DC} eksperimentos iegūtajiem rezultātiem parādīts, ka ir pietiekami, lai ierosinātu metālā kavitāciju.

Skaitliskais modelis tika validēts, salīdzinot skaitliski un eksperimentāli iegūtās brīvās virsmas deformācijas. Brīvās virsmas deformācijas PMF un B_{DC} iedarbības laikā parāda labu kvantitatīvu un kvalitatīvu sakrītību starp eksperimentu un aprēķinu, detalizētāk skatīt [dis6].

Tika veikti divu veidu eksperimenti. Pirmais, apskatīta EM iedarbības ietekme uz Sn-Pb sakausējuma mikrostruktūru, sakausējumam sasilstot iedarbības laikā. Otrkārt, apskatīta EM iedarbības ietekme uz TiB₂ daļiņu sadalījumu alumīnija 6061 sakausējumā, sakausējumam sasilstot iedarbības laikā.

Šķidrās Sn-10%wt.Pb sakausējums tika tīģelī pārkaršēts 100 °C grādus virs kušanas temperatūras un tad pakļauts EM iedarbībai. Kausējuma sasaldēšana norit aptuveni 10 minūšu laikā. Paraugi tika izgriezti no garenvirziena šķērsriezuma centra un salīdzināta to mikrostruktūra. Vidējais grauda izmērs references paraugos un ar tikai B_{DC} iedarbību ir 220 μm, savukārt ar kombinētu PMF un B_{DC} iedarbību tas ir 140 μm. Nav novērtots, ka mikrostruktūra mainītos atkarībā no tā vai tiek izmantots 1 vai 3 impulsi sekundē.

Lai pārbaudītu EM iedarbības ietekmi uz daļiņu izkliedi, tika izmantotas 2-12 μm TiB₂ daļiņas. Paraugi tika sagatavoti ar *compo-casting* metodi, 6061 sakausējumā iemaisot ~ 8 wt% daļiņu. Sakausējums tika pārkaršēts līdz 750 °C grādiem un pakļauts EM iedarbībai līdz sasaldēšanai. Sasaldēšana norit aptuveni 5 min laikā. Ar optisko mikroskopu iegūtie attēli parāda daļiņu sadalījuma uzlabošanos pēc EM iedarbības, parādīts Attēls 20. Bez EM iedarbības daļiņu aglomerātu izmērs bija līdz 1 mm diametrā. Lai arī pēc PMF un B_{DC} apstrādes daļa daļiņu bija aglomerātos, tik lieli daļiņu aglomerāti kā references paraugos nav novēroti – lielāko aglomerātu izmērs bija zem 100 μm.



Attēls 20 Optiskā mikroskopa bildes. Baltās bultiņas parāda daļiņas sakausējumā. A: bez EM iedarbības – daļiņas ir aglomerātos. B: ar PMF un B_{DC} iedarbību.

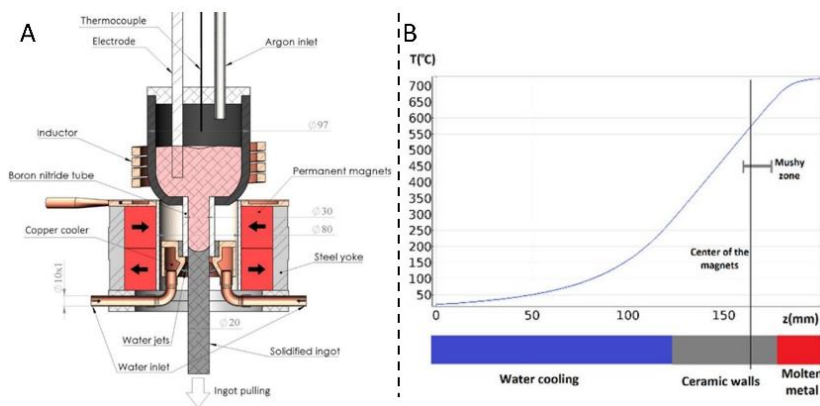
Uzlabojumu daļiņu sadalījumā var ietekmēt divi faktori. Pirmkārt, EM iedarbības laikā šķidrās metāls tiek maisīts aptuveni 5 minūtes. Daļiņu aglomerātus attiecīgi izkliedē intensīvā un straujā plūsmā. Otrkārt, ierosinātās spiediena svārstības ir gana lielas, lai sasniegtu šķidrā metāla kavitāciju, kas savukārt ir mehānisms, kas izkliedē daļiņu aglomerātus. Šajos eksperimentos kavitācijas efektu fiksēt nebija iespējams, tāpēc galveno daļiņu sadalījumu ietekmējošais mehānisms nav zināms.

3.4 EM iedarbība uz sakausējumu tā kristalizācijas laikā

3.4.1 Nepārtrauktas liešanas kristalizatora izstrāde

Šajā darbā eksperimentāli pētīta ietekme uz sakausējuma kristalizāciju, ja to kristalizē pastāvīgā magnētiskā laukā un caur to tiek laista līdzstrāva. Pētījumā izmantots A360 alumīnija sakausējums, kuram raksturīga dendrītu struktūra un plašs temperatūras diapazons, kurā sakausējums sasilstot ir pusšķidr [83].

Izstrādātā eksperimentālā sistēma paredz sakausējuma dzesēšanu ar ūdens strūklu (angliski *direct chill casting*). Nepārtrauktā liešanas kristalizatora shēma parādīta Attēls 21 A. Temperatūras sadalījums pa simetrijas asi parādīts Attēls 21 B, aksiāli simetrisks modelis izveidots programmatūrā Comsol Multiphysics.



Attēls 21 Kristalizatora shēma. A: Eksperimentālās sistēmas šķērs griezumus. B: Temperatūras sadalījums pa simetrijas asi.

Kristalizators paredzēts 12-20 mm diametra alumīnija stieņu iegūšanai. Magnētiskais lauks kristalizācijas apgabalā ir vērsts aksiālā virzienā, $B_{DC}=0.45$ T. Magnētu sistēmas salikums konceptuāli ir līdzīgs kā sistēmai, kas aprakstīta virsmas viļņu un impulsu iedarbības eksperimentos. Strāvas nodrošināšanai caur paraugu, apakšējais strāvas elektrodus ir piestiprināts pie stieņa ar kuru uzsāk vilkšanas procesu, savukārt augšējais elektrodus ir iemērkts šķidrā metālā. Eksperimenta laikā metāls ar indukcijas spoli tiek uzkaršēts līdz 700 °C. Tīģelim no augšas tiek uzlikts vāks ar 0.25 bar argona spiedienu, lai uzlabotu metāla caurplūdi un pārvarētu virsmas spraigumu tad, kad metāla līmenis tīģelī ir zems.

Kristalizācijas laikā izmantota 157 A elektriskā strāva, kas 20 mm diametra stieņa gadījumā atbilst 0.5 A/mm². Kristalizācijas apgabalā B_{DC} ir paralēls strāvas virzienam, tāpēc Lorenca spēks rodas vien vietās, kur strāva konverģē vai diverģē. Izmantojot A360 sakausējumu, temperatūras gradients

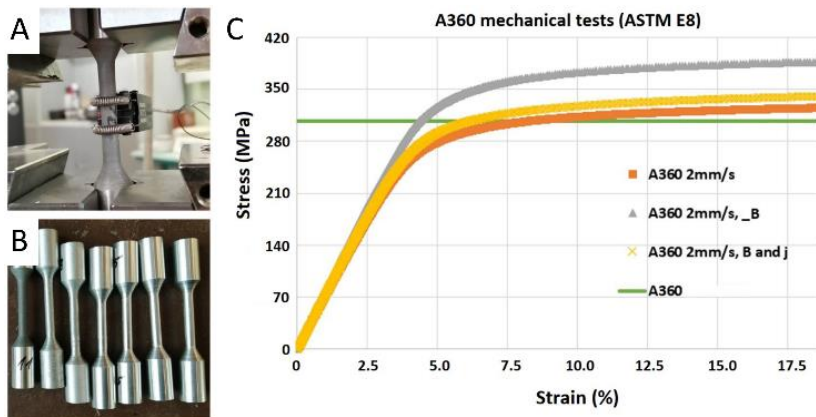
kristalizācijas laikā ir 7 K/mm, kas attiecīgi nozīmē, ka pusķidrās zonas biezums ir aptuveni 3,5 mm. Mijiedarbības parametra $N=2000$ un Hartmana skaitļa $Ha=60$ vērtības parāda, ka inerciālie un viskozie spēki ir mazi un metāla plūsmu galvenokārt nosaka EM spēki. Izmantojot Navjē-Stoksa vienādojumu, var novērtēt plūsmas ātrumu ap dendrītiem, kas ir 0.8 mm/s, kas plūsma ap dendrītu apriņķo aptuveni divas reizes sekundē. Detalizētāks sistēmas apraksts izvērst [dis7].

3.4.2 Sakausējumu kristalizācijas rezultāti

Eksperimentos A360 sakausējums tika kristalizēts ar ātrumu 2 mm/s. Pēc stieņu iegūšanas, paraugi tika izgriezti un analizēti ar optisko mikroskopu. Paraugiem tika noteikta arī mikrociētība un stiepes izturība atbilstoši ASTM E8 standartam.

Mikrostrukturā analīzes tika veiktas no stieņu garenvirziena un šķērsvirziena paraugiem. Bez EM iedarbības sakausējumam ir kolonveida mikrostrukturā. Pēc kristalizācijas pastāvīgā magnētiskā lauka klātbūtnē, garenvirziena struktūra pazūd. Ja izmanto gan strāvu caur metālu, gan B_{DC} lauku, tiek iegūta maza mēroga plūsma ap dendrītiem. Šāda plūsma būtiski palielina siltuma pārnesei starp cieto un šķidro fāzi, kas rezultējas smalgraudainā viendabīgā mikrostrukturā.

Pirms paraugu mehāniskās stiepes testiem, paraugi tika termiski apstrādāti atbilstoši T6 termiskās apstrādes procesam. Stiepes testu rezultāti parādīti Attēls 22.



Attēls 22 Stiepes testu rezultāti. A: Pagarinājuma mērīšanas sensors uz parauga. B: Paraugi sagatavoti atbilstoši ASTM E8 standartam. C: Stiepes testos iegūtās līknes no dažādiem A360 paraugiem.

A360 sakausējuma stiepes izturība atbilstoši standartam ir 317 MPa [84]. Visu paraugu stiepes izturība pārsniedz literatūrā atrasto standarta vērtību, skatīt Tabula 3.

Tabula 3 Mehānisko īpašību salīdzinājums paraugiem, kas kristalizēti dažādos režīmos

	A360 [84]	2mm/s	2mm/s ($B_{DC}=0.4T$)	2mm/s ($B_{DC}=0.4T$, $j=0,5 \text{ A/mm}^2$)
Tecēšanas robeža (MPa)	170	242	315	236
Junga modulis (GPa)	70	70.6	71.0	70.8
Stiepes izturība (MPa)	317	322	395	346

Stienis, kas kristalizēts tikai B_{DC} laukā, uzrādījis visaugstāko stiepes izturību. B_{DC} un strāvas iedarbība arī uzrādījusi par 7% augstāku stiepes izturību, bet zemāku tecēšanas robežu. Detalizētākai mehānisko īpašību analīzei būtu nepieciešams lielāks paraugu apjoms, tai pat laikā ir redzams, ka EM apstrāde mehānisko stiepes izturību uzlabo. Visu paraugu mikrociētības testos tika iegūts, ka Vikersa ciētība ir 128 HV. Detalizētāks rezultātu apraksts parādīts publikācijā [dis7]

3.5 Secinājumi un pētījuma turpmākā attīstība

3.5.1 Secinājumi

- Izmantojot B_{AC} un B_{DC} magnētisko lauku, sasniegts kavitācijai raksturīgs signāls alumīnija magnija sakausējumā un alvā. Mazākā spiediena vērtība, pie kuras iegūts signāls alvā – 120 kPa (Attēls 15). Novērots, ka kavitācijas uzsākšanos ietekmē:
 - ārējā spiediena izmaiņa
 - materiāla ķīmiskais sastāvs
 - elektromagnētiskās iedarbības intensitātes izmaiņa
- SEM un EDX analīzes parāda, ka mainīgā un pastāvīgā magnētiskā lauka iedarbība ietekmē daļiņu sadalījumu Al+SiC (100 nm) sakausējumā, salīdzinot ar references paraugiem. Daļiņas redzamas gan uz graudu robežām, gan iekšā graudā (Attēls 16).
- Eksperimentāli parādīts, ka arī impulsu un pastāvīgā magnētiskā lauka iedarbība ietekmē daļiņu sadalījumu MMC materiālā, daļēji izjaucot to aglomerātus un to sadalījumu padarot viendabīgāku.

4. Pastāvīgais magnētiskais lauks slāpē šķidrā metāla virsmas deformācijas EM impulsa iedarbības laikā, kā arī būtiski palielina šķidrumā ierosinātā spēka un spiediena amplitūdu.
5. Pastāvīgs magnētiskais lauks kombinācijā ar strāvu caur kristalizācijas apgabalu ietekmē sakausējuma mikrostruktūru. Ierosinātais Lorenca spēks izjauc kolonveida struktūru, padarot to viendabīgu, kā arī uzlabo sakausējuma stiepes izturību.

3.5.2 Pētījuma turpmākā attīstība – MMC paraugu kristalizācija

Detalizētai iegūto MMC materiālu analīzei ir nepieciešams veikt apjomīgākas eksperimentu sērijas, lai kvantitatīvi varētu spriest par iegūto materiālu īpašībām. Tiek plānots veikt pilna eksperimentālu ciklu MMC ražošanas procesam, daļiņas elektromagnētiski iemaisot, izkļiedējot to aglomerātus un kristalizējot nepārtrauktā liešanas kristalizatorā. Kā viens no galvenajiem rezultātiem šādos testos būtu paraugu mehāniskās stiepes testi un iegūto stieņu testēšana 3D drukai, no tiem izvalcējot stiepli.

Secinājumi un tēzes

Promocijas darba galvenie secinājumi

Šajā darbā pētītas kombinētu magnētisko lauku metodes praktiskiem pielietojumiem metalurģijā. Darbā kombinētās iedarbības piedāvātas trīs uzdevumu veikšanai. Atbilstoši uzdevumiem, izstrādātas arī jaunas eksperimentālās sistēmas sasniedzot EM iedarbības, kādas literatūrā iepriekš nav aprakstītas. Darba gaitā iegūti jauni un perspektīvi rezultāti turpmākai tehnoloģiju attīstībai. Kā galvenos šī darba sasniegumus un secinājumus var minēt:

1. **Par virsmas viļņiem:**

- 1.1. Salīdzinot ar mainīga magnētiskā lauka ierosinātiem viļņiem, kombinētās iedarbības gadījumā uz virsmas neveidojas menisks un viļņus iegūst pa visu virsmu. Eksperimentāli tas parādīts bezdimensionālās frekvences diapazonā no 0.5 līdz 4.
- 1.2. Gan mainīga, gan mainīga un pastāvīga magnētiskā lauka iedarbības gadījumā viļņi uz virsmas ir skrejoši virzienā uz centru pie zemas mainīgā magnētiskā lauka intensitātes.

2. **Par daļiņu iemaisīšanu metāla matricas kompozītu ražošanai:**

- 2.1. Pastāvīgo magnētu dipola maisītājs industriāla mēroga krāsnī var radīt šķidrā alumīnijā plūsmu un veikt sakausējuma maisīšanu.
- 2.2. Izmantojot pastāvīgo magnētu maisītāju kombinācijā ar indukcijas sildīšanu, alumīnija sakausējumos var iemaisīt mikro un nano izmēra daļiņas. Iemaisīšanas efektivitāte atkarīga no izvēlētā daļiņu un sakausējuma pāra.

3. **Par daļiņu izkliedi metāla matricas kompozītos:**

- 3.1. Izmantojot mainīga un pastāvīga magnētiskā lauka superpozīciju, šķidrā metālā var ierosināt kavitāciju, ko apstiprina nomērītais kavitācijai raksturīgais skaņas signāls.
- 3.2. Izstrādātā kombinēta mainīgā un pastāvīgā magnētiskā lauka, kā arī kombinēta impulsa un pastāvīgā magnētiskā lauka iedarbība ietekmē daļiņu sadalījumu MMC, padarot to viendabīgāku, samazinot veidoto aglomerātu apjomu un to raksturīgo izmēru.
- 3.3. Pastāvīgais magnētiskais lauks slāpē šķidrā metāla virsmas deformācijas EM impulsa iedarbības laikā, kā arī būtiski palielina šķidrumā ierosinātā spēka un spiediena amplitūdu.

4. **Secinājumi par kombinētu EM lauku izmantošanu:**

- 4.1. Kombinētu magnētisko lauku iedarbība ļauj iegūt jaunus režīmus šķidra metāla bezkontakta apstrādei ar praktiskiem pielietojumiem.
- 4.2. Kombinētu magnētisko lauku sistēmām raksturojošo parametru skaits, salīdzinot ar viena veida iedarbību, ievērojami pieaug, tāpēc parametru izvēle un optimizēšana kļūst darbietilpīgāka.
- 4.3. Pastāvīgo magnētus un to salikumus var efektīvi izmantot statiska un lēni mainīga (līdz 100 Hz) magnētiskā lauka radīšanai. Kā galveno priekšrocību var minēt to, ka nav nepieciešami jaudīgi strāvas avoti, salīdzinot ar elektromagnētiem vai zemfrekvences induktoriem.
- 4.4. Kombinētu magnētisko lauku iedarbību tehniskā izstrādē jāņem vērā magnētiskā lauka avotu savstarpējo mijiedarbību. Savstarpēji kombinējot induktoru un pastāvīgos magnētus, var samazināt tehniskos riskus, kas saistīti ar avotu savstarpēji inducētajām strāvām un savstarpējo pievilkšanos / atgrūšanos.

Izvirzītās tēzes

1. Izmantojot pastāvīgā un mainīgā magnētiskā lauka kombināciju, var ierosināt virsmas viļņus pa visu šķidrā metāla virsmu arī tad, ja sistēmas rādiuss ir lielāks par skinslāni.
2. Pastāvīgo magnētu maisītājs kombinācijā ar indukcijas sildīšanu var radīt plūsmu, kas nodrošina nemagnētisku daļiņu iemaisīšanu metālā metalurģiskā ceļā.
3. Kavītāciju šķidrā metālā var ierosināt, izmantojot mainīga un pastāvīga magnētiskā lauka superpozīciju.

Pateicība

Vēlos pateikt lielu paldies LU Fizikas institūta MHD Tehnoloģiju laboratorijas kolēģiem un īpaši darba vadītājam Andrim Bojarevičam par ieguldīto darbu un palīdzību šī darba tapšanā.

Paldies saku arī ģimenei un draugiem, jo īpaši Lindai, par neizsīkstošo atbalstu.

Literatūras saraksts

- [1] ABB, Optimised electromagnetic stirring in melting and holding furnaces, (n.d.). <https://new.abb.com/metals/abb-in-metals/references/optimised-ems-in-aluminium-melting-and-holding-furnaces>.
- [2] W.H. Macintosh, Induction furnaces for melting secondary aluminium, *Conservation & Recycling*. 6 (1983) 41–48. doi:10.1016/0361-3658(83)90015-2.
- [3] I. Bucenieks, High pressure and high flowrate induction pumps with permanent magnets, *MAGNETOHYDRODYNAMICS*. 39 (2003) 411–418.
- [4] D. Buchenau, V. Galindo, S. Eckert, The magnetic flywheel flow meter: Theoretical and experimental contributions, *Applied Physics Letters*. 104 (2014). doi:10.1063/1.4881330.
- [5] M.G. Hvasta, W.K. Nollet, M.H. Anderson, Designing moving magnet pumps for high-temperature, liquid-metal systems, *Nuclear Engineering and Design*. 327 (2018) 228–237. doi:10.1016/j.nucengdes.2017.11.004.
- [6] J. Hua, Y. Zhang, C. Wu, Grain refinement of Sn–Pb alloy under a novel combined pulsed magnetic field during solidification, *Journal of Materials Processing Technology*. 211 (2011) 463–466. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.023>.
- [7] M. Sarma, I. Grants, T. Herrmannsdörfer, G. Gerbeth, Contactless generation of cavitation in high temperature liquid metals and its impact on particle dispersion in solidified iron and steel samples, *Journal of Materials Processing Technology*. 291 (2021) 117041. doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117041.
- [8] O. Budenkova, M. Milgravis, C. Garnier, A. Gagnoud, Y. Delannoy, S. Semenov, P. Chometon, S. Rivoirard, M. Alamir, J. Etay, Application of modulated calorimetry to the liquid metals using electromagnetic levitation and static magnetic field, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 424 (2018) 12004. doi:10.1088/1757-899X/424/1/012004.
- [9] Y. Fautrelle, A.D. Sneyd, Surface waves created by low-frequency magnetic fields, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. 24 (2005) 91–112. doi:10.1016/J.EUROMECHFLU.2004.05.005.
- [10] J.M. Galpin, Y. Fautrelle, A.D. Sneyd, Parametric resonance in low-frequency magnetic stirring, *Journal of Fluid Mechanics*. 239 (1992) 409–427. doi:10.1017/S0022112092004464.
- [11] J.M. Galpin, Y. Fautrelle, Liquid-metal flows induced by low-frequency alternating magnetic fields, *Journal of Fluid Mechanics*. 239 (1992) 383–408. doi:10.1017/S0022112092004452.

- [12] C. Karcher, V. Minchenya, Control of free-surface instabilities during electromagnetic shaping of liquid metals, *Magneto hydrodynamics*. (2009) 511.
- [13] A. Deng, E. Wang, Y. XU, X. Zhang, J. He, Oscillation Characteristics of Molten Metal Free Surface Under Compound Magnetic Field, *Journal of Iron and Steel Research, International*. 18 (2011) 25–37. doi:10.1016/S1006-706X(11)60060-5.
- [14] M. Héder, From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation, *The Innovation Journal*. 22 (2017) 1–23. <https://eprints.sztaki.hu/9204/>.
- [15] A.J. Knowles, X. Jiang, M. Galano, F. Audebert, Microstructure and mechanical properties of 6061 Al alloy based composites with SiC nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*. 615 (2014) S401–S405. doi:10.1016/j.jallcom.2014.01.134.
- [16] A. Mazahery, H. Abdizadeh, H.R. Baharvandi, Development of high-performance A356/nano-Al₂O₃ composites, *Materials Science and Engineering: A*. 518 (2009) 61–64. doi:10.1016/j.msea.2009.04.014.
- [17] Y. Yang, J. Lan, X. Li, Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*. 380 (2004) 378–383. doi:10.1016/j.msea.2004.03.073.
- [18] A. Mussatto, I.U.I. Ahad, R.T. Mousavian, Y. Delaure, D. Brabazon, Advanced production routes for metal matrix composites, *Engineering Reports*. 3 (2021) e12330. doi:10.1002/eng2.12330.
- [19] N. Panwar, A. Chauhan, Fabrication methods of particulate reinforced aluminium metal matrix composite - a review, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 5933–5939. doi:10.1016/j.matpr.2017.12.194.
- [20] S. Sarkar, A. Bhirangi, J. Mathew, R. Oyyaravelu, P. Kuppan, A.S.S. Balan, Fabrication characteristics and mechanical behavior of rice husk ash-silicon carbide reinforced Al-6061 alloy matrix hybrid composite, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 12706–12718. doi:10.1016/j.matpr.2018.02.254.
- [21] J.P. Vanam, R. Chiranjeevi, R.S. Kumar, V.V. Ramana, A.S. Kumar, Effect of SiC on Mechanical, Microstructure and Tribological properties of Aluminum MMC processed by Stir Casting, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 455 (2018). doi:10.1088/1757-899X/455/1/012017.
- [22] S. Sachinkumar, S. Narendranath, D. Chakradhar, Studies on microstructure and mechanical characteristics of as cast AA6061/SiC/fly ash hybrid AMCs produced by stir casting, *Materials Today: Proceedings*. 20 (2020) A1–A5. doi:10.1016/j.matpr.2020.01.266.
- [23] P.G. Karandikar, T.W. Chou, Characterization of aluminium-matrix

- composites made by compocasting and its variations, *Journal of Materials Science*. 26 (1991) 2573–2578. doi:10.1007/BF02387719.
- [24] S.P. Dwivedi, S. Sharma, R.K. Mishra, Electromagnetic stir casting and its process parameters for the fabrication and refined the grain structure of metal matrix composites – a review, *International Journal of Advance Research and Innovation*. 2 (2014) 639–649. doi:10.51976/ijari.231421.
- [25] A. Kumar, S. Lal, S. Kumar, Fabrication and characterization of A359/Al₂O₃ metal matrix composite using electromagnetic stir casting method, *Journal of Materials Research and Technology*. 2 (2013) 250–254. doi:10.1016/j.jmrt.2013.03.015.
- [26] 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 (2017) 12022. doi:10.1088/1757-899X/228/1/012022.
- [27] S. Kant, A.S. Verma, Stir casting process in particulate aluminium metal matrix composite: a review, *International Journal of Mechanics and Solids*. 9 (2017) 61–69.
- [28] D. Zhou, F. Qiu, H. Wang, Q. Jiang, Manufacture of nano-sized particle-reinforced metal matrix composites: A review, *Acta Metallurgica Sinica*. 27 (2014) 798–805. doi:10.1007/s40195-014-0154-z.
- [29] U. Pandey, R. Purohit, P. Agarwal, S.K. Dhakad, R.S. Rana, Effect of TiC particles on the mechanical properties of aluminium alloy metal matrix composites (MMCs), *Materials Today: Proceedings*. 4 (2017) 5452–5460. doi:10.1016/j.matpr.2017.05.057.
- [30] C. Vivès, Crystallization of aluminium alloys in the presence of cavitation phenomena induced by a vibrating electromagnetic pressure, *Journal of Crystal Growth*. 158 (1996) 118–127. doi:10.1016/0022-0248(95)00344-4.
- [31] I. Grants, G. Gerbeth, A. Bojarevičs, Contactless magnetic excitation of acoustic cavitation in liquid metals, *Journal of Applied Physics*. 117 (2015) 204901. doi:10.1063/1.4921164.
- [32] Z. Zhao, Y. Liu, L. Liu, Grain Refinement Induced by a Pulsed Magnetic Field and Synchronous Solidification, *Materials and Manufacturing Processes*. 26 (2011) 1202–1206. doi:10.1080/10426914.2011.564251.
- [33] L. Zhang, W. Zhan, F. Jin, Q. Zhou, Microstructure and properties of A357 aluminium alloy treated by pulsed magnetic field, *Materials Science and Technology*. 34 (2018) 698–702. doi:10.1080/02670836.2017.1410925.
- [34] X. Bao, Y. Ma, S. Xing, Y. Liu, W. Shi, Effects of Pulsed Magnetic Field Melt Treatment on Grain Refinement of Al-Si-Mg-Cu-Ni Alloy Direct-Chill Casting Billet, *Metals*. 12 (2022). doi:10.3390/met12071080.
- [35] Y. ZHAO, S. ZHANG, G. CHEN, Aluminum matrix composites

- reinforced by in situ Al₂O₃ and Al₃Zr particles fabricated via magnetochemistry reaction, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 20 (2010) 2129–2133. doi:[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60429-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60429-5).
- [36] Y.D. Yu, C.X. Li, The effect of alternative low frequency electromagnetic field on the solidification microstructure and mechanical properties of ZK60 alloys, *Materials & Design*. 44 (2013) 17–22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.034>.
- [37] T. Campanella, C. Charbon, M. Rappaz, Grain refinement induced by electromagnetic stirring: A dendrite fragmentation criterion, *Metallurgical and Materials Transactions A*. 35 (2004) 3201–3210. doi:[10.1007/s11661-004-0064-1](https://doi.org/10.1007/s11661-004-0064-1).
- [38] O. Zaitov, V.A. Kolchuzhin, Bitter coil design methodology for electromagnetic pulse metal processing techniques, *Journal of Manufacturing Processes*. 16 (2014) 551–562. doi:[10.1016/j.jmapro.2014.07.008](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.07.008).
- [39] K. Halbach, Specialty magnets, *AIP Conference Proceedings*. 153 (1987) 1277–1295. doi:[10.1063/1.36378](https://doi.org/10.1063/1.36378).
- [40] A. Bojarevičs, T. Beinerts, Y. Gelfgat, I. Kaldre, Permanent magnet centrifugal pump for liquid aluminium stirring, *Journal International Journal of Cast Metals Research*. 29 (2016) 154–157. doi:[10.1080/13640461.2015.1120998](https://doi.org/10.1080/13640461.2015.1120998).
- [41] T. Beinerts, R. Bojarevics, Andris Baranovskis, M. Milgravis, I. Kaldre, Permanent magnet dipole stirrer for aluminium furnaces, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 424 (2018). doi:[10.1088/1757-899X/424/1/012037](https://doi.org/10.1088/1757-899X/424/1/012037).
- [42] A. Bojarevics, T. Beinerts, Experiments on liquid metal flow induced by a rotating magnetic dipole, *Magneto hydrodynamics*. 46 (2010) 333–338.
- [43] M. Sarma, I. Grants, A. Bojarevics, G. Gerbeth, Magnetically Induced Cavitation for the Dispersion of Particles in Liquid Metals BT - Metal-Matrix Composites Innovations, Advances and Applications, in: T.S. Srivatsan, Y. Zhang, J. Harrigan William C. (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 183–192. doi:[10.1007/978-3-319-72853-7_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72853-7_12).
- [44] O. V Abramov, Action of high intensity ultrasound on solidifying metal, *Ultrasonics*. 25 (1987) 73–82. doi:[10.1016/0041-624X\(87\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0041-624X(87)90063-1).
- [45] A. Bojarevics, T. Beinerts, I. Grants, I. Kaldre, A. Sivars, G. Gerbeth, Y. Gelfgat, Effect of superimposed DC magnetic field on an AC induction semi-levitated molten copper droplet, *Magneto hydrodynamics*. 51 (2015) 437–443. doi:[10.22364/mhd.51.3.4](https://doi.org/10.22364/mhd.51.3.4).
- [46] H.B. Henderson, O. Rios, Z.L. Bryan, C.P.K. Heitman, G.M. Ludtka, G. Mackiewicz-Ludtka, A.M. Melin, M. V Manuel, Magneto-Acoustic

- Mixing Technology: A Novel Method of Processing Metal-Matrix Nanocomposites, *Advanced Engineering Materials*. 16 (2014) 1078–1082. doi:10.1002/adem.201300534.
- [47] ASTM, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials. 03.01 (n.d.). doi:10.1520/E0008_E0008M-22.
- [48] V. Benda, L. Černá, PV cells and modules – State of the art, limits and trends, *Heliyon*. 6 (2020). doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05666.
- [49] J. jun Wu, W. hui Ma, B. Yang, Y. nian Dai, K. Morita, Boron removal from metallurgical grade silicon by oxidizing refining, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 19 (2009) 463–467. doi:10.1016/S1003-6326(08)60296-4.
- [50] F. Chigondo, From Metallurgical-Grade to Solar-Grade Silicon: An Overview, *Silicon*. 10 (2018) 789–798. doi:10.1007/s12633-016-9532-7.
- [51] P.A. Davidson, *An Introduction to Magnetohydrodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001. doi:DOI: 10.1017/CBO9780511626333.
- [52] W. Thomson, 2. On the Motion of Free Solids through a Liquid, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*. 7 (1872) 384–390. doi:10.1017/S037016460004222X.
- [53] G. Alcalá, M. Rivero, S. Cuevas, Effect of the magnetic field orientation on the damping of liquid metal free surface waves in the processing of materials, *Applied Thermal Engineering*. 75 (2015) 1296–1301. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.015.
- [54] J. Krumiņš, Travelling magnetic field interaction with conducting media, *Zinatne*. (1969) 258–262.
- [55] D. Terwagne, J.W.M. Bush, Tibetan singing bowls, *Nonlinearity*. 24 (2011) R51. doi:10.1088/0951-7715/24/8/R01.
- [56] P. Garg, A. Jamwal, D. Kumar, K.K. Sadasivuni, C.M. Hussain, P. Gupta, Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications, *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (2019) 4924–4939. doi:10.1016/j.jmrt.2019.06.028.
- [57] F. Nturanabo, L.M. Masu, J.B. Kirabira, Novel Applications of Aluminium Metal Matrix Composites, *Aluminium Alloys and Composites*. (2020). doi:10.5772/intechopen.86225.
- [58] R.N. Rao, S. Das, Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites, *Materials & Design*. 32 (2011) 1066–1071. doi:10.1016/j.matdes.2010.06.047.
- [59] J.-P. Chen, L. Gu, G.-J. He, A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites, *Advances in Manufacturing*. 8 (2020) 279–315.

- doi:10.1007/s40436-020-00313-2.
- [60] P. Ajay Kumar, P. Rohatgi, D. Weiss, 50 Years of Foundry-Produced Metal Matrix Composites and Future Opportunities, *International Journal of Metalcasting*. 14 (2020) 291–317. doi:10.1007/s40962-019-00375-4.
- [61] J.J. Moses, I. Dinaharan, S.J. Sekhar, Characterization of silicon carbide particulate reinforced AA6061 aluminum alloy composites produced via stir casting, *Procedia Materials Science*. 5 (2014) 106–112. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.247.
- [62] W. Zhao, S.-J. Huang, Y.-J. Wu, C.-W. Kang, Particle Size and Particle Percentage Effect of AZ61/SiCp Magnesium Matrix Micro- and Nano-Composites on Their Mechanical Properties Due to Extrusion and Subsequent Annealing, *Metals*. 7 (2017). doi:10.3390/met7080293.
- [63] I. Buceniekis, Perspectives of using rotating permanent magnets for electromagnetic induction pump design, *Magneto hydrodynamics*. 36 (2000) 151–156. doi:10.22364/mhd.
- [64] R. Baranovskis, D. Berenis, I. Grants, A. Bojarevics, T. Beinerts, M. Milgravis, Contactless Aluminum Degassing System—GaInSn Model Experiments and Numerical Study, *Journal of Sustainable Metallurgy*. 7 (2021) 1899–1909. doi:10.1007/s40831-021-00459-8.
- [65] K.K. Berga, D. Berenis, M. Kalvāns, I. Krastiņš, T. Beinerts, I. Grants, A. Bojarevičs, Model Experiment for Molten Metal Temperature Homogenization with Rotating Permanent Magnet, *JOM*. 74 (2022) 2450–2460. doi:10.1007/s11837-022-05288-y.
- [66] P.K. Ghosh, S. Ray, Effect of porosity and alumina content on the high temperature mechanical properties of compocast aluminium alloy-alumina particulate composite, *Journal of Materials Science*. 22 (1987) 4077–4086. doi:10.1007/BF01133361.
- [67] M. Vedani, E. Gariboldi, G. Silva, C. Di Gregorio, Influence of interface properties on mechanical behaviour of particle reinforced metal matrix composite, *Materials Science and Technology*. 10 (1994) 132–140. doi:10.1179/mst.1994.10.2.132.
- [68] S. Gopalakrishnan, N. Murugan, Production and wear characterisation of AA 6061 matrix titanium carbide particulate reinforced composite by enhanced stir casting method, *Composites Part B: Engineering*. 43 (2012) 302–308. doi:10.1016/j.compositesb.2011.08.049.
- [69] B.C. Pai, G. Ramani, R.M. Pillai, K.G. Satyanarayana, Role of magnesium in cast aluminium alloy matrix composites, *Journal of Materials Science*. 30 (1995) 1903–1911. doi:10.1007/BF00353012.
- [70] J. Hashim, L. Looney, M.S.J. Hashmi, The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*. 119 (2001) 329–335.

doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00919-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00919-0).

- [71] A. Awasthi, N. Panwar, A.S. Wadhwa, A. Chauhan, Mechanical characterization of hybrid aluminium composite - a review, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 27840–27844. doi:10.1016/j.matpr.2018.10.021.
- [72] R. Baranovskis, M. Sarma, M. Ščėpaniskis, T. Beinerts, A. Gaile, S. Eckert, R. D., K. Lehmann, E.H. Thomsen, T. P., Investigation of particle dynamics and solidification in a two-phase system by neutron radiography, *MAGNETOHYDRODYNAMICS*. 56 (2020) 43–50. doi:10.22364/mhd.56.1.4.
- [73] I. Grants, Rotating magnetic dipole-driven flows in a conducting liquid cylinder, *Physics of Fluids*. 33 (2021). doi:10.1063/5.0047240.
- [74] P. Padhi, S.K. Kar, A Novel Route for Development of Bulk Al/SiC Metal Matrix Nanocomposites, *Journal of Nanotechnology*. 2011 (2011) 1–5. doi:10.1155/2011/413512.
- [75] X. Li, Y. Yang, D. Weiss, Theoretical and experimental study on ultrasonic dispersion of nanoparticles for strengthening cast Aluminum Alloy A356, *Metallurgical Science and Technology*. 26 (2008) 12–20.
- [76] G. Feyder, E. Kartheuser, L.R.R. Mohan, S. Rodriguez, Direct generation of ultrasound by electromagnetic radiation in metals in a magnetic field, *Phys. Rev. B*. 25 (1982) 7141–7156. doi:10.1103/PhysRevB.25.7141.
- [77] E. Kartheuser, L.R. Ram Mohan, S. Rodriguez, Theory of electromagnetic generation of acoustic waves in metals, *Advances in Physics*. 35 (1986) 423–505. doi:10.1080/00018738600101931.
- [78] V. Bojarevics, G.S. Djambazov, K.A. Pericleous, Contactless ultrasound generation in a crucible, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 46 (2015) 2884–2892. doi:10.1007/s11661-015-2824-5.
- [79] X. Ma, Y. Li, Y. Yang, Grain refinement effect of a pulsed magnetic field on as-cast superalloy K417, *Journal of Materials Research*. 24 (2009) 2670–2676. doi:10.1557/jmr.2009.0326.
- [80] C.E.H. Tonry, V. Bojarevics, G. Djambazov, K. Pericleous, Contactless Ultrasonic Treatment in Direct Chill Casting, *JOM*. 72 (2020) 4082–4091. doi:10.1007/s11837-020-04370-7.
- [81] I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, A. Bojarevics, L. Buligins, Thermoelectric current and magnetic field interaction influence on the structure of directionally solidified Sn–10wt.%Pb alloy, *Journal of Alloys and Compounds*. 571 (2013) 50–55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.211>.
- [82] I. Grants, A. Bojarevičs, G. Gerbeth, Analytical solution for the diffusion of a capacitor discharge generated magnetic field pulse in a conductor,

- AIP Advances. 6 (2016) 65014. doi:10.1063/1.4954400.
- [83] M. Safari, M.M. Keikha, A. Kamarei, An investigation on semi-solid forming of A360 aluminium alloy by mechanical stirring, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 226 (2011) 205–215. doi:10.1177/0954408911411808.
- [84] C.D. Clement, J. Masson, A.S. Kabir, Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Fabricated by Selective Laser Melting Process, Journal of Manufacturing and Materials Processing. 6 (2022). doi:10.3390/jmmp6030052.

