



Projekta “Skaitliskās modelēšanas pieeju izstrāde kompleksu multifizikālu mijiedarbības procesu izpētei elektromagnētiskajās šķidrā metāla tehnoloģijās” (Nr. 1.1.1.1/18/A/108) pārskats par paveikto projekta ietvaros laika posmā no 01.10.2021– 31.12.2021

Šajā laika posmā projekta grupa ir paveikusi sekojošo:

1. Projekta ietvaros notikuši zinātniskie semināri:
21.10.2021 projekta zinātniskais seminārs “Circuit coupled FEM simulations for MHD applications”, uzstājās vadošais pētnieks Vadims Geža.
2. Komandējumi:
3. Projekta ietvaros publicēts raksts:
- M. Birjukovs, P. Trtik, A. Kaestner, J. Hovind, M. Klevs, D.J.Gawryluk, K. Thomsen, A. Jakovičs “Resolving Gas Bubbles Ascending in Liquid Metal from Low-SNR Neutron Radiography Images”, *Applied Sciences (Switzerland)* 2021, 11(20)
4. Šajā periodā tika īstenotas darbības nr. 1., 1.1., 1.2., 6., 6.1., 6.2., 6.3., 7., 7.1., 7.2., 7.3., 7.4., 8., 9., 10. 12., 12.1, 12.2, 12.3.
Tajās šajā periodā paveikts sekojošais:

6. Izveidoto modeļu un skaitlisko metodiku eksperimentāla verifikācija (04.2020 – 12.2021)

6.1. Elektrovadoša šķidrums un tā virsmas dinamika mijiedarbībā ar EM lauku

Detalizētai šķidrā metāla virsmas dinamikas detektēšanai rotējošu cilindrisku magnētu iedarbībā rezultātā tika veikti sistemātiski mērījumi ar iepriekš izveidoto optisko mērījumu sistēmu, kura nodrošina iespēju uzņemt lielu kadru skaitu sekundē ar uzlabotu telpisko izšķirtspēju, pie kam veikt mērījumus vertikālās plaknēs gan magnētu ass virzienā, gan perpendikulāri tām. Tas ļauj daudz precīzāk nekā iepriekšējos eksperimentos izšķirt turbulento plūsmas struktūru dinamiku uz šķidrums virsmas un ar tām saistītās virsmas deformācijas divos virzienos. Izmantojot šo sistēmu pie dažādām procesa parametru vērtībām (t.sk. magnētu rotācijas ātruma) tika iegūti dati, kas tika izmantoti izveidoto aprēķinu modeļu un metodiku eksperimentālai verifikācijai, kā rezultātā tika konstatēta laba sakritība, ja aprēķinos tika izmantots LES turbulences modelis.

6.2 Šķidra metāla un gāzes burbuļu divfāzu plūsmas mijiedarbība ar EM lauku

Tika Pabeigta iepriekš veiktajās eksperimentu sērijās PSI (Šveice) ar NEUTRA un ICON ar neitronu staru kļūmēm iegūto rezultātu sistemātiskā analīze un

salīdzināšana ar atbilstošu skaitlisko modeļu OpenFOAM un papildinātajā PSI-BOIL programmu vidēs iegūtajiem rezultātiem to verifikācijai. Eksperimentālo datu apstrāde tika veikta izmantojot īpaši šim mērķim izstrādātos programmatūras rīkus, kas nodrošina maksimālu kvantitatīvās informācijas iegūvi par burbuļu formas un plūsmas dinamiku no ļoti “trokšņainajiem” īsas ekspozīcijas attēliem. Kopumā tika konstatēts, ka gan uz VOF pieejas bāzētās skaitliskās programmatūras OpenFOAM vidē, gan modelis PSI-BOIL programmatūrā nodrošina labu atbilstību šiem eksperimentālajiem datiem. Otrajā gadījumā tika iegūta arī augstāka aprēķinu efektivitāte, kas paver iespējas komplicētāku modeļu ar vairākām gāzes ieplūdes atverēm skaitliskai realizācijai – tas būtiski industriālu iekārtu/tehnoloģiju izpētei.

6.3. Elektrovirpuļplūsmas

Tika pabeigtas eksperimentu sērijās sadarbībā ar Maskavas Augsttemperatūru institūtu (MAI) un SIA Latvo uzstādītajās laboratorijas iekārtās ar zemas kušanas temperatūras metālu leģējumiem. Tika iegūti rezultāti dažādas konfigurācijas elektrovirpuļplūsmām un veikta sistemātiska to salīdzināšana ar ANSYS Fluent un OpenFoam vidē izveidoto skaitlisko modeļu aprēķinu rezultātiem. Arī šeit tika konstatēta laba rezultātu atbilstība plūsmai metāla tilpumā un uz virsmas. Tika panākta arī apmierinoša vidējā temperatūras līmeņa saskaņošana starp eksperimentu un aprēķinu, kas termiskajā aprēķinā sākotnēji sagādāja grūtības.

Visu šo 3 apakšaktivitāšu darbi tika pabeigti plānotajā termiņā - 2021.g. 4. kvartālā.

7. Industriālu EM tehnoloģiju kompleksu un būtiski nelineāru modeļu izveide, implementācija un pārbaude (07.2020 – 12.2021)

7.1. Elektromagnetiska lentas liešana

Pabeigta kausējuma tiešās elektromagnetiskās lentas liešanas (*electromagnetic strip casting*) procesa OpenFOAM/Elmer atvērtā koda programmatūras vidēs implementēto skaitlisko modeļu izmēģināšana un aprēķinu veikšanas pie dažādiem procesa parametriem. Lai nodrošinātu pilnvērtīgu 3D nestacionārā modeļa realizāciju ar nepieciešamo laiku un telpas izšķirtspēju, kā arī precizitāti, tas tika pārņemts uz augstāzīgu Skaitliskās modelēšanas institūta datorklasteri, kas nodrošināja aprēķinu ātrdarbībai nepieciešamo skaitļošanas procesu paralelizāciju. Tika pabeigtas procesa parametriskās studijas. Līdztekus plūsmai ar dažādiem turbulences modeļiem (k-eps, w-SST, LES), virsmas dinamikai, temperatūras laukam, aprēķinā iekļauts arī kristalizācijas procesa apraksts, ievērojot kristalizācijas siltuma daudzumu. Iegūtie rezultāti tika izvērtēti salīdzinājumā ar literatūras publikāciju datiem.

7.2. Burbuļu plūsmas EM vadība šķidrā metālā reaktorā ūdeņraža ražošanai

Tika pabeigta cilindriskas ķīmiskā reaktora kolonnas ar šķidro metālu un 2 gāzes ieplūdes vietām matemātiskā modeļa izstrāde un implementācija atvērtā koda programmatūru OpenFOAM/Elmer un PSI-BOIL vidēs. Izvēlēta reaktora kolonas ģeometrija un plūsmas parametri ar pilnvērtīgu 3D procesa aprakstu skaitliskajā modelī var tikt mērogoti uz industriāla rakstura iekārtām. Izmantojot iepriekš vienkāršotai sistēmai veikto eksperimentu datus (skat. sadaļu 6.2), tika pabeigta

izmantoto skaitlisko pieeju precizitātes pārbaude. Tika veikti aprēķini, kas parādīja, ka magnētiskā lauka iedarbība būtiski ietekmē strūklu mijiedarbību – praktiski tiek novērsta burbuļu koaliscence (saplūšana) un palielinās burbuļu rezidences laiks šķidrā metālā. Abi šie faktori pozitīvi ietekmē ķīmisko reakciju rezultātus, kas atkarīgi no burbuļu kopējā virsmas laukuma un burbuļu atrašanās laika reakcijai piemērotos apstākļos. Tādējādi principiāli tika parādīts magnētiskā lauka iedarbības nozīmīgums tehnoloģiskā procesa vadībai. Aprēķini, kas kļūst ļoti resursietilpīgi pieaugot gāzes ieplūdes atveru skaitam, tika veikti uz ļoti augstražīga datorklastera pie sadarbības partnera HZDR (Vācija).

7.3. Metālu kausēšana līdzstrāvas loka krāsnī

Tika pabeigti EM, HD un temperatūras lauku skaitliskie pētījumi industriālā mēroga līdzstrāvas loka krāsnij ar diviem sarežģītas konfigurācijas un dažādi pret vannas pamatni orientētiem apakšējiem elektrodiem. Pētījumi tika veikti izmantojot iepriekš izstrādāto un pārbaudīto krāsns matemātisko modeli, kas implementēts gan atvērta koda programmatūras OpenFOAM/Elmer (ar platformas EOF starpniecību), gan savstarpēji saistītās ANSYS Maxwell un CFX vidēs. Veiktās parametriskās studijas parādīja kausējuma homogenizācijai vispiemērotākās elektrodu konfigurācijas (novietojumu, orientāciju un ģeometriju). Šie pētījumi veidoja arī daļu no priekšizpētes iesniegtajam patenta pieteikumam. Atbilstoši modelēšanas rezultātiem tika izveidota un izmēģināta arī maza izmēra loka kausēšanas iekārta industriāliem apstākļiem.

7.4. Elektrovadošu kausējumu homogenizācija, attīrīšana un reakciju intensifikācija, izmantojot EM iedarbību

Tika pabeigta ķīmisko reakciju solvera izstrāde OpenFOAM programmā, kas bija nepieciešams, lai pētītu elektrovadošu kausējumu (piem., silīcijs, izkausēti metāli) homogenizācijas un attīrīšanas no nevēlamiem piemaisījumiem procesus. OpenFOAM programmas vidē tika izmēģināts un pilnveidots šī solvera pamatvariants, kas bāzēts uz virpuļu disipācijas modeļpieejas. Tas ļauj skaitliski atrisināt saistītas šķidrums mehānikas, termisko, difūzijas un ķīmisko reakciju problēmas. Veiktie skaitliskie eksperimenti ļāva noteikt risināšanai piemērotu skaitlisko parametru diapazonu un novērtēt fizikālo un ķīmisko reakciju aprēķinos pieļaujamo parametru diapazonus. Tādējādi tika pabeigts solvera testēšanas un aprēķinu rezultātu validācijas darbs, kā arī parādīta piemaisījumu difūzijas un pārneses procesu būtiskā loma attīrāmā kausējuma robežvirsmas ar gāzveida vidi tuvumā.

Visu šo 4 apakšaktivitāšu darbi tika sekmīgi pabeigti 2021.g. 4. kvartālā.

8. Kompleksajiem tehnoloģiju modeļiem atbilstošo modelēšanas metodiku un rīku (programmu) komplektācija un dokumentācija (7.2021 – 6.2022)

Tika turpināta izstrādāto aprēķinu rīku (programmatūras) dokumentēšana, t.sk., publicējot to struktūru un darbību raksturojošo informāciju zinātniskas publikācijās. Vairāki izstrādātie programmatūras rīki, kas saistīti ar attēlu apstrādi un aprēķinu rezultātu specifisku vizualizāciju jau ir padarīti arī publiski pieejami, tos publicējot repozitorijā GitHub, kur tos var izmēģināt visi interesenti:

- https://github.com/Mihails-Birjukovs/Low_C-SNR_Particle_Detection
- https://github.com/Mihails-Birjukovs/Low_C-SNR_Bubble_Detection
- <https://github.com/Peteris-Zvejnieks/MHT-X>
- <https://github.com/MartinKleivs/PyDMD>
- <https://github.com/MartinKleivs/MOSES-SVD>

Tika turpināta arī citu atvērtā koda programmatūras vidēs OpenFOAM un PSI-BOIL izstrādāto skaitliskās modelēšanas programmu komplektācija, t.sk. padarot tos pieejamus lietotājiem ārpus projekta grupas.

9. Izvēlētu pētāmo komplekso procesu modeļu rezultātu verifikācija, izmantojot industriāla mēroga iekārtu prototipus (7.2021 – 6.2022)

Atbilstoši iepriekš izstrādātajam mazgabarīta industriālas iekārtas prototipa kausēšanai ar līdzstrāvas elektrisko loku projektam, SIA “Latvo” tika veikta iekārtas komplektēšana un montāža un tā tika sagatavota praktiskiem izmēģinājumiem, kas plānoti 2022.g. janvārī. Tika sagatavots veicamo elektromagnētiskā lauka un temperatūru sadalījumu mērījumu, izmantojot industriālu kontaktmēriekārtu un termogrāfijas iekārtu, plāns. Tika analizētas iespējas izmantot šajos eksperimentos dažādus metālu sakausējumus ar atšķirīgu kušanas temperatūru.

10. Būtisko multifizikālās mijiedarbības procesu izveidotajos kompleksajos modeļos likumsakarību parametriska izpēte un modeļu ierobežojumu noteikšana (7.2021 – 6.2022)

Tika turpināta 7. aktivitātē izveidoto komplekso modeļu ar būtisku EM, HD un termisko procesu savstarpējo mijiedarbību likumsakarību izpēte, t.sk.,

- šķidrajam metālam (kausējumam) aksiāli simetriskā apgabalā ārējā augstfrekvences induktora laukā, iekļaujot semilevitāciju un levitāciju;
- plūsmai un virsmas dinamikai dziļā taisnstūrveida konteinerā rotējošu pastāvīgo magnētu laukā;
- plūsmai un virsmas nestabilitātēm plānā metāla slānī uz plakanas virsmas augstfrekvences laukā;
- plūsmai un kristalizācijai uz kustīgas un dzesētas virsmas;
- līdzstrāvas elektrovirpuļplūsmām, kuras rada atšķirīgas elektrodu sistēmas. .

Aktivitāšu 8 – 10 darbi tiks turpināti 2022.g.

Projekta zinātniskais vadītājs A. Jakovičs, e-pasts: andris.jakovics@lu.lv
 Administratīvais vadītājs: L. Bandeniece, e-pasts: liene.bandeniece@lu.lv

31.12.2021