

Laboratorij za dinamiko fluidov in termodinamiko
Fakulteta za strojništvo
Univerza v Ljubljani
Aškerčeva 6, SI-1000 Ljubljana
Slovenija

Štore Steel
Železarska cesta 3
3220 Štore, Slovenija
Slovenija

ARRS L2-3173: NAPREDNA SIMULACIJA IN OPTIMIZACIJA CELOTNE PROCESNE POTI ZA IZDELAVO VRHUNSKIH JEKEL

ARRS L2-3173: ADVANCED SIMULATION AND OPTIMIZATION OF THE ENTIRE PROCESS ROUTE FOR THE PRODUCTION OF PREMIUM STEELS.

1.10.2021 - 30.4.2025

ZAKLJUČNO POROČILO

FINAL REPORT

**B. Šarler, T. Dobravec, J. Dolinar, U. Hanoglu, M. Kovačič, Q. Liu, B.
Mavrič, K. Mramor, M. Perpar, R. Vertnik, G. Vuga**

**Marec 2026
March 2026**



**UNIVERZA
V LJUBLJANI**

FS

**Fakulteta
za strojništvo**

Cilj poročila:

Cilj poročila je pregled dela, opravljenega v okviru projekta L2-3173 ter predlogi za nadaljnje delo.

Vsebina poročila:

- Podroben opis opravljenega dela po projektnih točkah.
- Predlogi za dopolnitev modelov in nadaljnje raziskave.

Financiranje:

- ARIS 300.000,00 €
- Štore-Steel 128.553,00 €

Razdelitev 2726 letnih ur ARIS:

FS	1400 ur	154.076,00 €	51,3 %
IMT	1054 ur	115.994,00 €	38,7 %
ŠS	272 ur	29.930,00 €	10,0 %

Razdelitev ur sofinanciranja:

- Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani 61,3 % sofinanciranja 78.854,00 €
- Inštitut za kovinske materiale in tehnologije 38,7 % sofinanciranja 49.699,00 €

Investicije za nadaljevanje projekta:

- Nabavili smo program Thermo-Calc za jekla in aluminijeve zlitine v vrednosti 69.814,50 €



Kazalo

1. Uvod	5
1.1. Povzetek	5
1.2. Abstract	6
2. WP1 Modeliranje skozi process	7
2.1. WP1.1-1 Razvoj celovitega modela rezine	7
2.2. WP1.1-2 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – kontinuirno ulivanje	8
2.3. WP1.1-3 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – ohlajanje	9
2.4. WP1.1-4 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – ogrevalna peč.....	10
2.5. WP1.1-5 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – valjanje	11
2.6. WP1.1-6 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – hladilna klop.....	12
2.7. WP1.1-7 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – topotna obdelava	13
2.8. WP1.2 Optimizacija in analiza nedoločenosti posameznih procesnih korakov.....	13
3. WP2 Izboljšave fizikalnih modelov	14
3.1. WP2.1 Izboljšave mikroskopskih modelov.....	14
3.2. WP2.2 Izboljšave mezoskopskih modelov.....	15
3.3. WP2.3 Prenos toplote s sevanjem	16
3.4. WP2.4 Mehanika loma.....	17
3.5. WP2.4 Modeliranje defektov	18
4. WP3 Paralelna numerična implementacija.....	19
5. WP4 Eksperimentalna analiza vključkov v vodnem modelu	20
6. WP5 Verifikacija in validacija	21
7. WP6 Uporaba modelov v industriji.....	21

1. Uvod

Poročilo podaja raziskave na projektu ARRS L2-3173 od 1.10.2022 do 30.4.2025.

1.1. Povzetek

Za konkurenčno nastopanje na zahtevnih mednarodnih trgih je kakovost izdelka in učinkovitost proizvodnje izjemno pomembna, še posebej na področju izdelave jekel. Za konsistentno doseganje teh dveh ciljev je potrebno razumeti in obvladati vse korake v postopku izdelave, za kar so posebej priročni numerični modeli. V projektu smo vzpostavili prototip simulacijskega okolja za primer proizvodne verige vrhunškega slovenskega izdelovalca jekel Štore Steel. To je omogočilo uporabo numeričnih modelov vzdolž celotne proizvodne verige na način, ki koherentno poveže numerične modele posameznih korakov proizvodnje in dovoljuje sledljivost lastnosti izdelkov. Rezultati projekta predstavljajo logično nadgradnjo naših uspešno zaključenih aplikativnih projektov “L2-6775 Simulacija industrijskih procesov strjevanja pod vplivom elektromagnetnih polj” in “L2-9246 Večfizikalno in večnivojsko numerično modeliranje za konkurenčno kontinuirno ulivanje” ter z njima povezanimi projekti okvirnih programov EU. S pomočjo pridobljenega znanja smo z naprednimi numeričnimi modeli opremili sofinancerjevi veliki investiciji v novo jeklarno in valjarno in vzpodbudili digitalno preobrazbo podjetja v smeri Industrija 4.0. Namen projekta je bil nadaljnji razvoj modelov v sklopu celotne procesne verige izdelave vrhunskih jekel za razumevanje, napovedovanje in odpravljanje napak proizvodnje kot so: makro izcejanje, vključki, izkrivljanja oblike, poroznost, vroče trganje, zmanjšana kvaliteta površine ter razpoke.

Prvi cilj je bil razvoj modularnega večnivojskega modela skozi proces, ki temelji na predpostavki potujoče rezine za procesno verigo od kontinuirnega ulivanja do toplotne obdelave. Rezina je vključevala termične, koncentracijske, mehanske in mikrostrukturne modele. Iz kombinacije modelov so bile pridobljene informacije o kvaliteti in morebitnih napakah. Že obstoječe modele za kontinuirano ulivanje in vroče valjanje, zgrajene po tem principu, smo dopolnili z moduli, ki povezujejo ta dva procesa in jih podaljšali na toplotno obdelavo, s čimer smo vzpostavili celoten procesni model. V tem modelu smo upoštevali ravnovesje med fizikalno poglobljenostjo in računskim časom. Model omogoča vzpostavitev osnovnih relacij med porabo energije, makroskopskimi polji, mikroskopskimi polji in lastnostmi.

Drugi cilj je bil razvoj manjkajočih in izboljšava obstoječih fizikalnih modulov brez posebnih omejitev glede računskega časa. Ti moduli delujejo na visoko zmogljivih platformah. Razviti manjkajoči modeli vključujejo predvsem prenos toplote s sevanjem in mehaniko loma, izboljšani modeli pa tridimenzionalne modele mikrostrukture. Umetna inteligenca je bila uporabljena za prilagoditev poenostavljenih modelov s podrobnimi modeli ter za več ciljno optimizacijo glede na porabo energije, učinkovitost in kvaliteto izdelka.

Tretji cilj je bil eksperimentalna analiza vključkov na podlagi v predhodnem projektu razvitega vodnega modela za kontinuirno ulivanje in eksperimentalna analiza mikrostrukture, lastnosti izdelka in napak po vsakem procesnem koraku za namen validacije.

Rešitvene postopke v simulacijskem sistemu smo nadalje razvijali na podlagi naše večkrat nagrajene inovativne tehnologije brez mrežnega računanja, konceptov mehanike kontinuuma na makroskopskem nivoju, koncepta točkovnih avtomatov na mezoskopskem nivoju in koncepta faznega polja na mikroskopskem nivoju. Numerična implementacija je izkoriščala vzporedne računalniške zmogljivosti modernih delovnih postaj in superračunalnikov.

Učinki novega znanja so: izboljšana kakovost, izboljšane procesne zmogljivosti in produktivnost. Rezultati so bili neposredno uporabljeni v proizvodnji, objavljeni v revijah z najvišjimi vplivnimi faktorji področja in predstavljeni kot ključna predavanja na velikih mednarodnih srečanjih.

1.2. Abstract

For competitive performance in demanding international markets, product quality and production efficiency are extremely important, especially in steel production. Consistently achieving these two goals requires understanding and controlling all steps of the manufacturing process, for which numerical models are particularly useful. In the project, we established a prototype simulation environment for the production chain of the leading Slovenian steelmaker Štore Steel. This enabled the use of numerical models along the entire production chain in a way that coherently links the numerical models of individual production steps and allows traceability of product properties.

The project results represent a logical upgrade of our successfully completed applied projects “L2-6775 Simulation of Industrial Solidification Processes under the Influence of Electromagnetic Fields” and “L2-9246 Multiphysics and Multiscale Numerical Modelling for Competitive Continuous Casting,” as well as the related EU framework programme projects. With the help of the acquired knowledge, we equipped the co-financier’s major investments in a new steel plant and rolling mill with advanced numerical models and encouraged the company’s digital transformation toward Industry 4.0. The purpose of the project was the further development of models within the entire process chain for producing premium steels in order to understand, predict, and eliminate production defects such as macrosegregation, inclusions, shape distortions, porosity, hot tearing, reduced surface quality, and cracks.

The first objective was the development of a modular multiscale process model based on the assumption of a travelling slice for the process chain from continuous casting to heat treatment. The slice included thermal, concentration, mechanical, and microstructural models.

Information on quality and possible defects was obtained from the combination of these models. The already existing models for continuous casting and hot rolling, built on this principle, were supplemented with modules linking these two processes and extended to heat treatment, thereby establishing a complete process model. In this model, a balance between physical depth and computational time was considered. The model enables the establishment of fundamental relationships among energy consumption, macroscopic fields, microscopic fields, and properties.

The second objective was the development of missing physical modules and the improvement of existing ones without specific constraints regarding computational time. These modules run on high-performance computing platforms. The newly developed models mainly include radiative heat transfer and fracture mechanics, while the improved models include three-dimensional microstructure models. Artificial intelligence was used to adapt simplified models using detailed models and for multi-objective optimization with respect to energy consumption, efficiency, and product quality.

The third objective was the experimental analysis of inclusions based on the water model for continuous casting developed in the previous project, and the experimental analysis of microstructure, product properties, and defects after each process step for validation purposes.

The solution procedures in the simulation system were further developed on the basis of our repeatedly awarded innovative meshless computing technology, continuum mechanics concepts at the macroscopic level, cellular automaton concepts at the mesoscopic level, and phase-field concepts at the microscopic level. The numerical implementation exploited the parallel computing capabilities of modern workstations and supercomputers. The effects of the new knowledge include improved quality, improved process capability, and higher productivity. The results were directly applied in production, published in journals with the highest impact factors in the field, and presented as keynote lectures at major international meetings.

2. WP1 Modeliranje skozi process

2.1. WP1.1-1 Razvoj celovitega modela rezine

Preprosti Lagrangeov model potujoče rezine je bil uspešno uporabljen za napovedovanje temperature gredice pri kontinuiranem litju jekla v odvisnosti od procesnih parametrov. V termični model smo vključili preprost model makrosegregacije, strukture zrn ter mehanskih

napetosti in deformacij. Osnova vseh omenjenih modelov je termični model rezine, ki upošteva kompleksne mehanizme odvajanja toplote v kokili, z razpršili, valji in sevanjem. Njegova glavna prednost je hiter čas izračuna, ki je primeren za časovno povezano krmiljenje livne naprave. Makroskopski modeli temeljijo na teoriji kontinuumske mešanice. Model makrosegregacije temelji na modelu mikrosegrecacije z vzvodnim pravilom. Toplotna prevodnost in difuzivnost kapljevite faze sta umetno izboljšani, da se upošteva konvekcija taline. Model strukture zrn temelji na celičnih avtomatih in konceptih faznega polja. Izračunano toplotno polje se uporablja za oceno toplotnega krčenja trdne lupine, ki v kombinaciji z metalostatičnim tlakom poganja elastično-viskoplastične modele mehanike trdnin. Postopek reševanja vseh modelov temelji na metodi končnih razlik, generirani z radialnimi baznimi funkcijami na makroskopski ravni in konceptu brez mrežnih točkovnih avtomatov na ravni zrnate strukture. Rezultati simulacije kažejo na območja, ki so dovzetna za vroče trganje.

Reference

[1] ŠARLER, Božidar, MAVRIČ, Boštjan, DOBRAVEC, Tadej, VERTNIK, Robert. A meshless multiscale and multiphysics slice model for continuous casting of steel. *Metals*. 2025, vol. 15, no. 9, 16 str., ilustr. ISSN 2075-4701. <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/9/1007>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.3390/met15091007. [COBISS.SI-ID 248938755]

2.2. WP1.1-2 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – kontinuirno ulivanje

V sklopu nadgradnje termo-mehanskega modela potujoče rezine za modeliranje procesa kontinuirnega ulivanja smo uvedli izboljšave, ki omogočajo natančnejše upoštevanje vpliva ravnjanja gredice na deformacijsko stanje. Pri tem smo predpostavili linearno naraščajočo vrednost deformacije, ki je pravokotna na potujočo rezino in se aplicira v območju ravnjanja gredice. Zaradi ostrih skokov linearnega razteznostnega koeficienta pri faznih prehodih smo uvedli povprečni linearni razteznostni koeficient, ki omogoča reševanje na bolj grobi diskretizaciji ter hkrati pravilno akumulativno vključi ves termični skrček tekom samega ohlajanja. Nadaljnje smo v model vključili kokilo, ki je geometrijsko spremenljiva vzdolž smeri ulivanja. Nato smo obstoječi fenomenološko določen profil toplotnega toka znotraj kokile zamenjali z natančnejšim modelom stika med samo kokilo in gredico. Stik s kokilo omogoča bolj realističen predpis toplotnih tokov in posledično pravilnejši termo-mehanski odziv. Model smo umerili za zlitini 16MnCrS5 in C45, pri čemer so rezultati pokazali pomembno izboljšanje v primerjavi s predhodnimi pristopi.

Predlogi za naprej

Predlogi za naprej v prvi vrsti ciljajo na računsko pohitritev. Namreč, zaradi ostrih in visoko frekventnih sprememb toplotnih tokov po robu je potreba po gostoti diskretizacije velika, kar posledično vodi tudi v krajši stabilen časovni korak znotraj termalnega modela. V prihodnje bi lahko izračun pohitrili z naslednjimi ukrepi:

- akumulacija termične obremenitve do $\Delta T_{max} = 1$ K, kar vodi v precej manj mehanskih obremenitvenih korakov,
- optimizacija in paralelizacija računske kode,
- redkejša posodabljanja materialnih lastnosti, ki so računsko zahtevni,
- implementacija implicitnega termičnega modela, ki bi omogočal večji časovni korak in delitev modela v smeri ulivanja na dva dela (kokila – ostalo), kjer se v drugem delu posodobi diskretizacija na manj diskretizacijskih točk.

Nadaljnje bi lahko proces ravnanja nadgradili z vključitvijo izvlečne sile, ki se aplicira preko valjčkov. Pri tem bi bilo potrebno določiti, kako se velikost sile spreminja vzdolž celotne poti samega procesa ter določiti kritične scenarije.

Pri samem ulivanju se izkaže, da tok taline lahko precej razširi območje strjevanja, kar negativno vpliva na vroče trganje. S tem namenom bi lahko obstoječi termični model nadgradili z učinkovito povečanim koeficientom toplotne prevodnosti v talini in tako vključili pojav konvekcije ter prisilnega elektro-magnetnega mešanja.

Reference

[1] VUGA, Gašper, MAVRIČ, Boštjan, DOBRAVEC, Tadej, ŠARLER, Božidar. A hybrid radial basis function-finite difference method for modelling two-dimensional thermo-elasto-plasticity, part 3: application to thermo-mechanical modelling of continuous casting of steel billets. *Engineering analysis with boundary elements*. 2026, vol. 183, DOI: 10.1016/j.enganabound.2025.106619.

[2] MRAMOR, Katarina, VERTNIK, Robert, ŠARLER, Božidar. Meshless approach to the large-eddy simulation of the continuous casting process. *Engineering analysis with boundary elements*. May 2022, vol. 138, str. 319-338, ilustr. ISSN 0955-7997. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955799722000649>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1016/j.enganabound.2022.03.001. [COBISS.SI-ID 100532739]

[3] MRAMOR, Katarina, VERTNIK, Robert, ŠARLER, Božidar. Development of three-dimensional LES based meshless model of continuous casting of steel. *Metals*. Oct. 2022, vol. 12, iss. 10, str. 1-19, ilustr. ISSN 2075-4701. <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/10/1750>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.3390/met12101750. [COBISS.SI-ID 126647811]

[4] VUGA, Gašper, DOBRAVEC, Tadej, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. A new hybrid local radial basis function collocation method for 2.5D thermo-mechanical modelling of continuous casting of steel. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). *Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference*, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. l.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012201, str. 1-6, ilustr. *Journal of physics. Conference series (Online)*, vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012201>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012201. [COBISS.SI-ID 199016963]

2.3. WP1.1-3 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – ohlajanje

Kontinuirno ulite gredice dimenzij 180 mm × 180 mm se lahko v podjetju Štore Steel ohladijo na sobno temperaturo z obračanjem na hladilni klopi. Lahko se ohladijo tudi pod pokrovi ali toplotno obdelajo za zmanjšanje zaostalnih napetosti. Dodatne operacije toplotne obdelave od 36 ur do 72 ur in hlajenje gredic 24 ur, z omejenimi zmogljivostmi (z le dvema pečima za

toplotno obdelavo in le šestimi pokrovi), drastično vplivajo na produktivnost. Zato je potrebno ulivanje skrbno načrtovati (tj. glavna stvar je ulivanje v sekvencah), medtem ko je lahko ogrožena notranja kakovost gredic (tj. pojav notranjih napak). Prav tako se lahko zaloga gredic močno poveča. Posledično je bilo treba razmisliti o opustitvi hlajenja pod pokrovi in toplotne obdelave gredic. Na podlagi zbranih podatkov o izmetu po ultrazvočnem pregledu valjanih palic sta bila za napoved pojava notranjih napak uporabljena linearna regresija in genetsko programiranje. Na podlagi rezultatov modeliranja so pri litju več vrst jekel opustili hlajenje pod pokrovi in toplotno obdelavo gredic. Skladno s tem se je povečalo zaporedje ulivanj, zaloga gredic pa se je drastično zmanjšala, medtem ko je kakovost valjanih palic (pojav notranjih napak) ostala enaka.

Reference

[1] KOVAČIČ, Miha, ZUPANC, Aljaž, VERTNIK, Robert, ŽUPERL, Uroš. Optimization of billet cooling after continuous casting using genetic programming—industrial study. *Metals*. July 2024, vol. 14, iss. 7, [article no.] 819, 12 str., ilustr. ISSN 2075-4701. Digitalna knjižnica Univerze v Mariboru – DKUM, DOI: 10.3390/met14070819. [COBISS.SI-ID 215361027]
projekt: This research was funded by the Slovenian Research and Innovation Agency; grant number I2-3173.

2.4. WP1.1-4 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – ogrevalna peč

Izvedena je simulacija ogrevalne peči v jeklarski proizvodni liniji, kjer se jeklene gredice segrevajo od sobne temperature do 1200 °C. V tem delu so vodilne enačbe rešene v močni obliki z brez mrežno lokalno kolokacijsko metodo radialnih baznih funkcij (LRBFCM) z eksplisitnim časovnim korakom. Rešitev temperaturne difuzijske enačbe je formulirana na dvodimenzionalnem osrednjem prerezu gredice. Temperaturno polje je rešeno z upoštevanjem položajev več gredic v peči ter sevalnih in konvektivnih toplotnih tokov na robovih peči in gredic. Za določitev sevalnega toplotnega toka je uporabljen postopek sledenja žarkom, pri katerem se faktorji vidljivosti izračunajo z metodo Monte Carlo. Izvedena je študija občutljivosti vpliva dveh različnih časov zaustavitve gredic v peči na razvoj temperature.

Reference

[1] LIU, Qingguo, HANOGLU, Umut, REK, Zlatko, ŠARLER, Božidar. Simulation of temperature field in steel billets during reheating in pusher-type furnace by meshless method. *Mathematical and computational applications*. [Online ed.]. Apr. 2024, vol. 29, iss. 3, [article no.] 30, str. 1-16, ilustr. ISSN 2297-8747. <https://www.mdpi.com/2297-8747/29/3/30>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DiRRoS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.3390/mca29030030. [COBISS.SI-ID 193881603]

2] LIU, Qingguo, HANOGLU, Umut, ŠARLER, Božidar. Simulation of temperature field in steel billets moving in the reheating furnace by a meshless method. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). *Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia*. [S. l.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012169, str. 1-6, ilustr. *Journal of physics*.

Conference series (Online), vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012169>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012169. [COBISS.SI-ID 197833731]

2.5. WP1.1-5 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – valjanje

Poglavitni cilj razvoja simulacijskega sistema za vroče valjanje je izdelava in optimizacija planov valjanja in potrditev, ali je končna oblika valjanca znotraj pričakovanih dimenzij. S tem namenom smo v okviru projekta nadomestili idealni plastični model z bolj realističnim, elasto-plastičnim modelom. Rešitev je bila zastavljena na podlagi algoritma povratnega mapiranja. Predpostavili smo, da material upošteva von Misesovo merilo plastičnosti z linearnim utrjevanjem. Fizikalni model temelji na pristopu potujoče rezine. Toplotni in mehanski modeli se izvajajo zaporedno za vsako pozicijo rezine. Vodilne enačbe se rešujejo z lokalno kolokacijsko metodo z multikvadrničnimi radialnimi baznimi oblikovnimi funkcijami. Simulacijski sistem je bil uspešno validiran s številnimi podatki iz podjetja Štore Steel. Primerjali smo rezultate simulacije z opisanim modelom ter z rezultati programa Deform ter eksperimentalnimi podatki iz podjetja ter na podlagi doseženega stanja raziskav formulirali naslednji nadaljni razvoj.

Predlogi za naprej

- Elasto-plastični model usposobiti tako, da bo deloval za poljubno velike strižne in tlačne sile med valji in valjancem.
- Razviti valjanje z vtiki, ki dajejo popolnoma nesimetrično geometrijo valjanca.
- Razviti valjanje za valjance s popolnoma nesimetrično geometrijo na vstopu v predvaljanje.
- Razviti 2,5 dimenzionalni model valjanja, ki bo usposobljen za bolj pravilno računanje velikih deformacij, predvsem pri predvaljanju.
- Vključitev izvlečne sile v numerični model valjanja.
- Sklopitev simulacijskega sistema za valjanje z optimizacijskim algoritmom za avtomatsko iskanje najboljših pogojev valjanja.

Reference

[1] HANOGLU, Umut, VERTNIK, Robert, ŠARLER, Božidar. Elasto-plastic simulation of hot shape rolling of steel by a meshless method. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. l.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012170, str. 1-6, ilustr. Journal of physics. Conference series (Online), vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012170>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012170. [COBISS.SI-ID 197926659]

2.6. WP1.1-6 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – hladilna klop

V sklopu razširitve modela hladilne klopi je bila opravljena sklopitev z modelom za vroče valjanje, kjer prihaja do izmenjave vhodno-izhodnih podatkov. Implementirali smo vmesnik za določitev vhodnih parametrov za model hladilne klopi ter avtomatski izris rezultatov po preseku znotraj vizualizacijskega okolja za vroče valjanje. Program omogoča končni prikaz rezultatov na vsaki poziciji na hladilni klopi. Nadaljnje smo razvili program za napoved faznih deležev in mehanskih lastnosti v profilih, ohlajenih na sobno temperaturo. Model smo računsko optimirali na način, da se izračunane ohlajevalne krivulje, po tem ko material preide vse fazne transformacije, ekstrapolirajo do sobne temperature. Pri tem lahko model hladilne klopi teče precej manj časa kot sicer.

Predlogi za naprej

V obstoječi implementaciji je prisoten izračun faktorjev vidnosti z metodo Monte Carlo, ki je računsko izjemno zahtevna. V prihodnje bomo ta pristop zamenjali z analitičnim izračunom faktorjev vidnosti, ki je računsko precej manj zahteven. Računski postopek za določitev faktorjev vidnosti je trenutno optimiran za palice z izključno pravokotnim presekom. V prihodnje bi bilo potrebno model testirati na različnih geometrijah in uvesti nove algoritme za čim bolj učinkovito diskretizacijo roba poljubnih geometrij. Model trenutno še ni povsem umerjen. V prihodnje bi lahko z izvedbo meritev temperatur na površini model ustrezno validirali ter preko optimizacijskega procesa ustrezno določili parametre, ki določajo moč hlajenja in so trenutno nastavljeni glede na referenčne vrednosti iz literature. V modelu se trenutno uporablja eksplisitna časovna shema, ki ima omejitve glede maksimalnega časovnega koraka. Z namenom pohitritve modela bi lahko v prihodnje implementirali implicitno časovno shemo in s tem pohitrili izračun.

Reference

[1] VUGA, Gašper, MAVRIČ, Boštjan, HANOGLU, Umut, ŠARLER, Božidar. A hybrid radial basis function-finite difference method for modelling two-dimensional thermo-elasto-plasticity. Part 2, Application to cooling of hot-rolled steel bars on a cooling bed. *Engineering analysis with boundary elements*. Feb. 2024, vol. 159, str. 331-341, DOI: 10.1016/j.enganabound.2023.12.001.

[2] VUGA, Gašper, MAVRIČ, Boštjan, HANOGLU, Umut, ŠARLER, Božidar. A meshless numerical solution of thermo-mechanics of hot-rolled steel bars on a cooling bed. V: MADEJ, Lukasz (ur.), SITKO, Mateusz (ur.), PERZYNSKI, Konrad (ur.). *Material forming : ESAFORM 2023 : the 26th International ESAFORM Conference on Material Forming* : April 19-21, 2023, Kraków, Poland. Millersville (PA): Materials Research Forum, cop. 2023. Str. 1611-1620, ilustr. *Materials Research Proceedings*, Vol. 28. ISBN 978-1-64490-246-2, ISBN 978-1-64490-247-9. ISSN 2474-3941, ISSN 2474-395X. DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.21741/9781644902479-174. [COBISS.SI-ID 162681347]

2.7. WP1.1-7 Razvoj manjkajočih procesnih modelov – topotna obdelava

Na podlagi razvitih izboljšanih mikroskopskih modelov smo razvili model perlitske sferoidizacije, ki pa je trenutno, zaradi pomanjkanja podatkov o fizikalnih lastnostih, namenjen zgolj znanstvenim objavam.

Predlogi za naprej

Sklopitev adaptivne metode RBF-FD s programom Thermo-Calc za izračun poljubnih faznih sprememb med neizotermno toplotno obdelavo.

2.8. WP1.2 Optimizacija in analiza nedoločenosti posameznih procesnih korakov

Podjetje Štore Steel proizvaja več kot 200 različnih vrst jekel na podlagi nove naprave za kontinuirno ulivanje, nameščene leta 2016. Iz procesa kontinuiranega litja izvira več napak, večinoma povezanih s termomehanskim obnašanjem v kokili. Za vse vrste jekla je bila uporabljena enaka hitrost litja 1,6 m/min. Maja 2023 se je začel projekt prilagajanja hitrosti litja glede na temperaturo litja. Ta prilagoditev je vključevala vrste jekla z največjim številom površinskih napak in različno vsebnostjo ogljika: 16MnCrS5, C22, 30MnVS5 in 46MnVS5. Za vsakih 10 °C odstopanja od predpisane temperature litja se je hitrost spremenila za 0,02 m/min. V 2-mesečnem obdobju se je razmerje valjanih palic z odkritimi površinskimi napakami (pregledanimi s samodejno kontrolno linijo) za omenjene vrste jekla zmanjšalo. Zmanjšanja so bila z 11,27 % na 7,93 %, z 12,73 % na 4,11 %, z 16,28 % na 13,40 % in z 25,52 % na 16,99 % za 16MnCrS5, C22, 30MnVS5 in 46MnVS5. Na podlagi zbranih podatkov o kemijski sestavi in parametrih litja iz teh dveh mesecev so bili z uporabo linearne regresije in genetskega programiranja pridobljeni modeli. Ti modeli napovedujejo razmerje valjanih palic z zaznanimi površinskimi napakami in dolžino zaznanih površinskih napak. Glede na rezultate modeliranja bi bilo mogoče razmerje valjanih palic z zaznanimi površinskimi napakami in dolžino zaznanih površinskih napak zmanjšati za 14 % oziroma 189 % s prilagajanjem hitrosti litja. Podoben rezultat je bil dosežen od julija do novembra 2023 s prilagajanjem hitrosti litja za ostalih 27 vrst jekel. Enako je bilo napovedano z že pridobljenimi modeli. Genetsko programiranje je preseglo linearni regresijski model.

Reference

[1] KOVAČIČ, Miha, ŽUPERL, Uroš, GUSEL, Leo, BREZOČNIK, Miran. Reduction of surface defects by optimization of casting speed using genetic programming : an industrial case study. *Advances in production engineering & management*. Dec. 2023, vol. 18, no. 4, str. 501-511, ilustr. ISSN 1854-6250. https://apem-journal.org/Archives/2023/APEM18-4_501-511.pdf, Digitalna knjižnica Univerze v Mariboru – DKUM, Digitalna knjižnica Slovenije - dLib.si, DOI: 10.14743/apem2023.4.488. [COBISS.SI-ID 182007555]

3. WP2 Izboljšave fizikalnih modelov

3.1. WP2.1 Izboljšave mikroskopskih modelov

Razvili smo model faznega polja za 2-D simulacijo perlitne sferodizacije jekla Fe-C pri konstantni temperaturi. Simulacija je 2-D ekvivalent 3-D simulacije prehoda cementitne zaobljene ploščice v valj, ki v 2-D ustreza prehodu zaobljene palice v krog. Začetno stanje simulacije je zaobljena palica cementita v feritni matrici. Vhodna podatka simulacije, ki ju nastavi uporabnik sta debelina in širina palice. Vhodni podatki so tudi materialne lastnosti ter prosti energiji feritne in cementitne faze v odvisnosti od koncentracije ogljika pri temperaturi sferodizacije, ki smo jih pridobili iz literature. Izhodna podatka sta fazno in koncentracijsko polje pri različnih časih. Poglavitna informacija, ki jo razviti model napove, je čas sferodizacije v odvisnosti od razmerja med debelino in širino začetne palice. Delo temelji na predhodnih raziskavah na področju simulacij razvoja mikrostrukture z metodo faznega polja, predvsem na simulacijah dendritske rasti med strjevanjem.

Predlogi za naprej

Obstoječa implementacija modela faznega polja za sferodizacijo je omejena na dvosestavinsko jeklo Fe-C in simulacije pri konstantni temperaturi. V prihodnje bomo razvili splošno okolje, ki bo namenjeno simulaciji razvoja mikrostrukture v realnih zlitinah z metodo faznega polja. Splošno okolje bo temeljilo na formulaciji z velekanoničnim potencialom in bo omogočalo direktno povezavo s programom Thermo-Calc. Program Thermo-Calc je namenjen izračunu koncentracijsko in temperaturno odvisnih materialnih lastnosti ter prostih energij prisotnih faz. Splošno okolje bomo uporabili za simulacijo dveh konkretnih primerov: simulacijo dendritske rasti med strjevanjem ter simulacijo perlitne sferodizacije pri podanem temperaturnem režimu.

Reference

[1] DOBRAVEC, Tadej, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. Improved finite difference method for phase-field modelling of dendritic solidification. *Journal of computational physics*. [Print ed.]. 2026, [article no.] 114716, str. 1-46, ilustr. ISSN 0021-9991. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999126000665>, DOI: 10.1016/j.jcp.2026.114716. [COBISS.SI-ID 267350019]

[2] DOBRAVEC, Tadej, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. A study on different implementations of Neumann boundary conditions in the meshless RBF-FD method for the phase-field modelling of dendrite growth. *Engineering analysis with boundary elements*. April 2025, vol. 173, [article no.] 106154, 9 str., ilustr. ISSN 1873-197X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955799725000426?via%3Dihub>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1016/j.enganabound.2025.106154. [COBISS.SI-ID 227519491]

[3] DOBRAVEC, Tadej, MAVRIČ, Boštjan, ZAHOR, Rizwan, ŠARLER, Božidar. A coupled domain–boundary type meshless method for phase-field modelling of dendritic solidification with the fluid flow. *International journal of numerical methods for heat & fluid flow*. Jun. 2023, vol. 33, iss. 8, str. 2963-2981, ilustr. ISSN 0961-5539. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/HFF-03-2023-0131/full/html>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1108/HFF-03-2023-0131. [COBISS.SI-ID 154935811]

[4] DOBRAVEC, Tadej, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. Acceleration of RBF-FD meshless phase-field modelling of dendritic solidification by space-time adaptive approach. *Computers & mathematics with applications*. Nov. 2022, vol. 126, str. 77-99, ilustr. ISSN 1873-7668. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122122003881>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1016/j.camwa.2022.09.008. [COBISS.SI-ID 122502403]

[5] DOBRAVEC, Tadej, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. On different implementations of boundary conditions in the meshless RBF-FD method for phase-field modelling of dendritic solidification. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). *Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference*, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. l.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012162, str. 1-6, ilustr. *Journal of physics. Conference series (Online)*, vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012162>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012162. [COBISS.SI-ID 197919747]

[6] MAVRIČ, Boštjan, DOBRAVEC, Tadej, ŠARLER, Božidar. Lessons from accelerating an RBF-FD phase-field model of dendritic growth on GPUs. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). *Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference*, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. l.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012168, str. 1-6, ilustr. *Journal of physics. Conference series (Online)*, vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012168>, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012168. [COBISS.SI-ID 208869891]

[7] DOBRAVEC, Tadej, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. Application of a meshless space-time adaptive approach to phase-field modelling of polycrystalline solidification. V: PHILLION, André (ur.). *MCWASP 2023 : 16th International Conference on Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes* : 18/06/2023 - 23/06/2023, Banff, Canada. Bristol: IOP Publishing, 2023. Vol. 1281, str. 1-10, ilustr. *IOP conference series, Materials science and engineering*, Vol. 1281, 2023. ISSN 1757-8981. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1281/1/012057>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1088/1757-899X/1281/1/012057. [COBISS.SI-ID 153282819]

3.2. WP2.2 Izboljšave mezoskopskih modelov

V sklopu projekta smo razširili v sklopu prejšnjih projektov razviti 2-D model rezine za napovedovanje razvoja zrnatosti med kontinuiranim litju jekla v 3-D. Model za napovedovanje zrnatosti temelji na metodi točkovnih avtomatov in je enosmerno sklopljen s termičnim modelom rezine. Model simulira nukleacijo in rast dendritskih zrn ter tako učinkovito napoveduje položaj prehoda med stebričastimi in enakoosnimi zrn. Medtem ko 2-D model

omogoča rast zrn samo v smeri pravokotno na smer litja, 3-D model omogoča rast v poljubnih smereh in je tako fizikalno ustrežnejši.

Predlogi za naprej

Usposobitev mezoskopskih modelov za simulacijo poljubnega jekla na podlagi povezave s programom Thermo-Calc.

Reference

[1] RAVNIKAR, Aljaž. Simulacija mikrostrukture pri strjevanju z metodo točkovnih avtomatov v treh dimenzijah : zaključna naloga Univerzitetnega študijskega programa I. stopnje Strojništvo - Razvojno raziskovalni program. Ljubljana: [A. Ravnikar], 2023. XIII, 35 f., ilustr. Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL. [COBISS.SI-ID 165746435]

[2] GOVŽE, Viktor, VUŠANOVIĆ, Igor, ŠARLER, Božidar. Meshless simulation of a macrosegregation benchmark considering the solid motion. V: PHILLION, André (ur.). MCWASP 2023 : 16th International Conference on Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes : 18/06/2023 - 23/06/2023, Banff, Canada. Bristol: IOP Publishing, 2023. Vol. 1281, str. 1-8, ilustr. IOP conference series, Materials science and engineering, Vol. 1281, 2023. ISSN 1757-8981. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1281/1/012039>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1088/1757-899X/1281/1/012039. [COBISS.SI-ID 153238787]

[3] MRAMOR, Katarina, VERTNIK, Robert, ŠARLER, Božidar. Numerical modelling of macrosegregation in three-dimensional continuous casting of steel billets. V: PHILLION, André (ur.). MCWASP 2023 : 16th International Conference on Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes : 18/06/2023 - 23/06/2023, Banff, Canada. Bristol: IOP Publishing, 2023. Str. 1-9, ilustr. IOP conference series, Materials science and engineering, Vol. 1281, 2023. ISSN 1757-8981. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1281/1/012029>, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1088/1757-899X/1281/1/012029. [COBISS.SI-ID 153361923]

3.3. WP2.3 Prenos toplote s sevanjem

Metodo Monte-Carlo za izračun faktorjev pogleda smo povezali z brez mrežnim reševalnikom in prenos toplote s sevanjem uporabili pri simulaciji ogrevalne peči ter hladilne klopi. Faktor pogleda, znan tudi kot faktor oblike, konfiguracije ali kota, je brezdimenzijski geometrijski parameter v območju od 0 do 1, ki kvantificira delež sevanja, ki zapušča površino in neposredno zadene površino. Uporablja se v izračunih sevalnega prenosa toplote za določitev količine izmenjane toplotne energije, neodvisno od temperature ali emisivnosti materiala.

Predlogi za naprej

Faktorje vidnosti določenih preprostejših konfiguracij geometrije je možno izračunati analitično. Analitična rešitev je v primerjavi z rešitvijo na podlagi metode Monte Carlo bistveno hitrejša.

Reference

Enake kot pri 2.4 in 2.6.

3.4. WP2.4 Mehanika loma

Analiza nastanka in širjenja razpok uporablja metodo faznega polja četrtega reda (PFM) v kombinaciji z močno metodo lokalne kolokacije z radialnimi baznimi funkcijami (LRBFCM). Stopenjski pristop izmenično posodablja model faznega polja (PF) in mehanski model ter rešuje sklopljene mehanske enačbe in enačbe PF. Začetna faza raziskav je potrdila, da metoda PF učinkovito modelira širjenje razpok pri nateznih obremenitvah [1]. Dosegla je natančne napovedi razpok, ohranila dobro konvergenco in se tesno ujemala z referenčnimi in analitičnimi rešitvami tako pri pravilnih kot nepravilnih razporeditvah vozlišč.

Razviti model je bil nadalje razširjen tako, da je zajemal širjenje razpok v mešanem načinu, kar je omogočilo fizikalno natančno analizo loma [2]. Uvedena je bila spektralno razdeljena dekompozicija deformacij, ki omogoča realistično rast razpok pri nateznih, strižnih in tlačnih obremenitvah. Poleg tega je bila implementirana nova prilagodljiva strategija korakov obremenitve za izboljšanje računske učinkovitosti. To je bilo narejeno z odpravo dragih notranjih iteracij ob hkratnem ohranjanju natančnosti. Model je bil potrjen na podlagi izračuna številnih referenčnih problemov. S tem smo potrdili, da metodologija deluje z visoko natančnostjo pri različnih scenarijih obremenitve.

Raziskave so bile nadalje posplošene tako, da vključujejo toplotno obremenitev, pri čemer so bile prvič integrirane toplotne, mehanske ter enačbe faznega polja (FP) v enotni brez mrežni okvir [3]. Ta metodologija olajša analizo razvoja razpok pri toplotnih šokih, kombiniranih obremenitvah in procesih kaljenja, pomembnih za inženirske aplikacije. Rezultati termomehanskega modela kažejo, da so razpršene razporeditve vozlišč izjemno učinkovite za kompleksne poti razpok, s čimer poudarjajo robustnost razvite močne metode v zahtevnih večfizikalnih pogojih.

Pomemben izziv pri modeliranju širjenja razpok na podlagi metode FP je potreba po visoki gostoti vozlišč. Za ublažitev te težave smo raziskali dodatno, prilagodljivo strategijo časovnih korakov v povezavi s spremenljivim razmikom med razpršenimi vozlišči [4]. Ta metodologija, ki računalniške vire koncentrira izključno na območje širjenja razpok, znatno skrajša računski čas, hkrati pa ohranja natančnost. Izdelane študije [1–4] zagotavljajo prvo sistematično analizo loma z uporabo formulacij LRBFCM in FP, s posebnim poudarkom na širjenju razpok v krhkih materialih, s čimer vzpostavljajo trdne temelje za nadaljnje raziskave.

Izdelali smo več študij pokanja površine gredice ob prisotnosti razogljčenja in brez.

Predlogi za naprej

V prihodnjih raziskavah si bomo prizadevali razširiti uveljavljeni model krhko-elastične FP, da bi zajel širjenje duktilnih razpok. Priporočljivo je, da se v prihodnje delo vključi obnašanje duktilnega loma z integracijo brez mrežnega modela FP s konstitutivnimi enačbami, ki se nanašajo na plastičnost in poškodbe. Takšna razširitev bo olajšala simulacijo nastanka in širjenja razpok v duktilnih materialih, saj bo učinkovito zajela tako elastične kot plastične mehanizme disipacije energije.

Reference

- [1] I. Ali, G. Vuga, B. Mavrič, U. Hanoglu, B. Šarler, Fourth-order phase field modelling of brittle fracture with strong form meshless method, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 169 (2024) 106025. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.106025>.
- [2] I. Ali, G. Vuga, B. Mavrič, B. Šarler, Meshless solution of the crack propagation in brittle elastic material under shear, compressible and tensile loading, *Engineering Fracture Mechanics* 323 (2025) 111207. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111207>.
- [3] I. Ali, G. Vuga, B. Mavrič, B. Šarler, A fourth-order phase-field model of crack initiation and propagation under thermomechanical loading solved with strong-form meshless method, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* (2025) 105078. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.105078>.
- [4] I. Ali, B. Šarler, B. Mavrič, Efficient Meshless Phase-Field Modeling of Crack Propagation by Using Adaptive Load Increments and Variable Node Densities, *Mathematics* 13 (2025) 3795. <https://doi.org/10.3390/math13233795>.
- [5] ALI, Izaz, VUGA, Gašper, MAVRIČ, Boštjan, HANOGLU, Umut, ŠARLER, Božidar. Fourth-order phase-field simulation of cracks using strong form meshless method. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. l.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012167, str. 1-6, ilustr. *Journal of physics. Conference series (Online)*, vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012167>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012167. [COBISS.SI-ID 197659395]
- [6] ALI, Izaz. Meshless numerical solution of phase-field model of crack initiation and propagation in thermo-mechanical processing of steel : doctoral thesis. Ljubljana: [I. Ali], 2025. XXVIII, 177 str., ilustr. Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL. [COBISS.SI-ID 261796867]
- [7] VUGA, Gašper. Modelling of Thermomechanics of Continuous Casting of Steel by a Meshless Numerical Method : doctoral thesis. Ljubljana: [G. Vuga], 2025. XXXVI, 259 str., ilustr. Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL. [COBISS.SI-ID 224922627]

3.5. WP2.4 Modeliranje defektov

Reference

[1] HANOGLU, Umut, ŠARLER, Božidar. Influence of casting defects on damage evolution and potential failures in hot rolling simulation system. *Metallurgia Italiana*. 2023, n. 2, str. 48-52, ilustr. ISSN 0026-0843. https://www.aimnet.it/la_metallurgia_italiana/2023/febbraio/Hanoglu.pdf, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije. [COBISS.SI-ID 143368451]

[2] DOLINAR, Jure, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of continuous casting of steel from the perspective of waste heat recovery. V: *Akademija strojništva 2025 : inženirstvo - stabilnost v času strateških preobrazb* : Ljubljana, Cankarjev dom ter prek spleta, 17. november 2025. Ljubljana: Zveza strojnih inženirjev Slovenije - ZSIS, 2025. Letn. 14, št. 1/6, str. 186-187, ilustr. Svet strojništva, letn. 14, št. 1/6. ISSN 1855-6493. https://www.zveza-zsis.si/2025/10/29/svet-strojnistva-akademija-strojnistva-2025-november-2025/#dfliip-df_14576/186, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.62020/svet.str.as2025072. [COBISS.SI-ID 261868035]

4. WP3 Paralelna numerična implementacija

Cilj tega dela projekta je bil preučiti možnosti pospeševanja rešavanja na podlagi uporabe več procesorjev. To smo uspešno naredili v programskem jeziku `c#` za valjanje, kjer smo neposredno uporabili možnosti, ki jih ponuja prevajalnik `c#`. Modeliranje rasti dendritov na podlagi formulacije faznega polja sodi med najsodobnejše oblike modeliranja strjevanja. Reševanje se običajno izvaja z uporabo metode končnih razlik v kombinaciji z eksplicitnim časovnim korakom in pospešuje z uporabo grafičnih procesorjev (GPU). Ti so glavni kandidati za takšno pospeševanje, saj zahtevajo veliko aritmetičnih operacij na relativno majhni količini podatkov. Predstavili smo poskus prenosa obstoječe fortranske kode RBF-FD, optimizirane za izvajanje na CPU, za uporabo pospeševanja na GPU, hkrati pa ohranjali prenosljivost nastale implementacije med arhitekturami. Obravnavali smo doseženo pospeševanje, težave s skaliranjem in implementacijo ter kritično obravnavali trenutno stanje ustreznih GPU-jev.

Predlogi za naprej

Postaviti celotni model skozi proces proizvodnje jekla na superračunalniško arhitekturo. To bo omogočilo izračun računsko intenzivnega modeliranja skozi proces v praktično primernem času.

Reference

[1] MAVRIČ, Boštjan, DOBRAVEC, Tadej, ŠARLER, Božidar. Lessons from accelerating an RBF-FD phase-field model of dendritic growth on GPUs. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). *Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences Conference*, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. l.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012168, str. 1-6, ilustr. *Journal of physics. Conference series* (Online), vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012168>, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012168. [COBISS.SI-ID 208869891]

5. WP4 Eksperimentalna analiza vključkov v vodnem modelu

Za posnemanje raztaljenega livnega praška (žlindre) se v vodnih modelih uporablja silikonsko olje. Le-to povzroča onesnaženje kolone, zato smo raziskali možnost uporabe vodnih suspenzij. V ta namen je bil prilagojen obstoječi vodni model, na katerem smo izvedli eksperiment, v okviru katerega so bili narejeni in analizirani posnetki gibanja več vrst delcev suspenzije v kokili. Imitacijski delci, ki posnemajo livni prašek, so bili izbrani glede na gostoto in velikost ter so ustrezali vključkom velikosti med 40 μm in 400 μm , kar sovpada z dimenzijami delcev žlindre v realnem sistemu. Z vodnim modelom smo eksperimentalno potrdili možnost uporabe suspenzije za posnemanje raztaljenega livnega praška (žlindre) na zgornjem robu taline pri kontinuirnem ulivanju jekla. V eksperimentu, smo se osredotočili na določanje kritične potopitve izlivka, to je stanja, ko se delci permanentno potopijo pod izlivek – s tem posnemajo kontaminacijo jekla v realnem sistemu. Delci žlindre med obratovanjem ne zapustijo suspenzije, oziroma se vrnejo v njen sloj, če izbrani delci suspenzije posnemajo dovolj velike vključke v realnem sistemu. Z vizualizacijo tokovnih razmer v vodnem modelu za kontinuirno ulivanje jekla smo pokazali, da so vse uporabljene suspenzije (z delci polietilena in z delci plute) primerne za posnemanje sloja raztaljenega livnega praška (žlindre) v realnem sistemu. Delci, ki posnemajo večje vključke žlindre (npr. pluta), lažje zadostijo željenemu cilju – ne zapustijo sloja suspenzije, če pa že, se vanj vrnejo.

Predlogi za naprej

V nadaljevanju bi za imitacijo žlindre uporabili obarvane ledene kapljice velikosti 0,5 mm. Ledene kapljice so popolnoma okrogle, plavajo na vodi ter bi bile idealni nadomestek za PE delce. Ker bi takšni delci v vodnem modelu nadomestili žlindro, bi lahko pri sobnih temperaturah opazovali topljenje žlindre.

Reference

[1] PERPAR, Matjaž, MRAMOR, Katarina, HODEJ, Blaž, COTIČ, Matic, VERTNIK, Robert, VENGUST, Vid, ŠARLER, Božidar. Vizualizacija vključkov v vodnem modelu kontinuirnega ulivanja jekla. V: GOLOBIČ, Iztok (ur.). Akademija strojništva 2023 : inženirstvo - povezovanje za trajnostni preboj : [zbornik prispevkov 12. Mednarodne konference Zveze strojnih inženirjev Slovenije], Ljubljana, 22. november 2023. Ljubljana; online: Zveza strojnih inženirjev Slovenije - ZSIS, 2023. Letn. 12, št. 3/6, str. 92-93, ilustr. Svet strojništva, letn. 12, št. 3/6. ISSN 1855-6493. <https://www.zveza-zsis.si/2023/11/22/akademija-strojnistva-2023-november-2023/>, DOI: 10.62020/svet.str.as20230092. [COBISS.SI-ID 180743939]

[2] PERPAR, Matjaž, MRAMOR, Katarina, HODEJ, Blaž, COTIČ, Matic, VERTNIK, Robert, VENGUST, Vid, ŠARLER, Božidar. Visualization of inclusions in a water model for continuous casting of steel. V: ŠARLER, Božidar (ur.), VANOLI, Laura (ur.), DOBRAVEC, Tadej (ur.). Eurotherm 2024 : 9th European Thermal Sciences

Conference, 10/06/2024 - 13/06/2024, Lake Bled, Slovenia. [S. I.]: IOP publishing, 2024. Vol. 2766, [article no.] 012084, str. 1-6, ilustr. Journal of physics. Conference series (Online), vol. 2766. ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2766/1/012084>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012084. [COBISS.SI-ID 197875459]

[3] HODEJ, Blaž, 2024, *Eksperimentalna raziskava uporabesuspensij v vodnem modelu za kontinuirno ulivanja jekla kot možnost za posnemanjeraztaljenega livnega praška* [na spletu]. Diplomsko delo. Ljubljana : B. Hodej. [Dostopano 4 marec 2026]. Pridobljeno s: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=160859>

6. WP5 Verifikacija in validacija

Vse razvite modele smo validirali na podlagi eksperimentalnih podatkov iz industrije ali na podlagi primerjave rezultatov z drugimi numeričnimi pristopi.

7. WP6 Uporaba modelov v industriji

Vsi opisani modeli so v standardni uporabi v podjetju Štore Steel. Izjema je le model toplotne obdelave zaradi pomanjkanja fizikalnih lastnosti. Uporabo modelov v podjetju Štore Steel smo predstavili na mednarodni konferenci Akademija strojništva 2024 ter na vabljenem predavanju na mednarodni konferenci ICMSAO.

Začeli pa smo tudi z raziskavami termoekonomske analize proizvodne jekla, kjer smo se za začetek osredotočili na kontinuirno ulivanje. Ta proces je energijsko intenziven z znatnimi izgubami eksergije. Za obravnavo teh izgub smo izvedli demonstracijsko termodinamsko in termoekonomsko analizo. Z numeričnim simulacijskim modelom kontinuirnega ulivanja jeklenih gredic smo izračunali porazdelitev temperature površine ulivanca in porazdelitev gostote toplotnega toka ter ju uporabili za določitev izgubljenega toka eksergije. Izračunali smo stroške, povezane z izgubami eksergije in ocenili ekonomski potencial odvečne toplote z upoštevanjem Curzon-Ahlbornovega toplotnega stroja, ki obratuje pri maksimalni moči. Izračunana polji tokov cene sta predstavljeni grafično.

Povzetek predlogov za naprej

- Izboljševanje fizikalnih modelov na podlagi povratnih industrijskih informacij o ozkih grlih, razvoj novih modelov, npr. elektro-obločne peči, ki še niso razviti.
 - Kontinuirno ulivanje: vključitev izvlečne sile v mehanski model, razvoj pohitrenega termalnega modela rezine zaradi optimizacije, umeritev mehanskega modela kokile.
 - Ogrevalna peč: vključitev analitičnega izračuna faktorjev vidnosti za realno geometrijo (npr. če ena gredica manjka), povazava dekarbonizacijskega modela z modelom pokanja, validacija.

- Valjanje: 2.5D model valjanja, vključitev izvlečne sile, validacija.
- Hladilna klop: vključitev analitičnega izračuna faktorjev vidnosti, validacija.
- Toplotna obdelava: neizotermni razvoj modela sferoidizacije za vse vrste jekel, vhodno izhodni vmesnik.
- Povezovanje modelov z modeli na podlagi umetne inteligence za avtomatsko optimizacijo.
- Razvoj splošnega modela faznega polja za mikrostrukturo (vse komponente, vse faze).
- Povezovanje modelov faznega polja s podatkovnimi bazami snovnih lastnosti JmatPro in Thermo-Calc.
- Razvoj indikatorjev kvalitete za vsak procesni korak.
- Razvoj indikatorjev produktivnosti za vsak procesni korak.
- Razvoj indikatorjev vpliva na okolje (surovine, energija) za vsak procesni korak.
- Razvoj manipulatorja vseh procesnih modelov za modeliranje skozi proces.
- Razvoj inverznih manipulatorjev vseh procesnih modelov za modeliranje skozi proces.
- Razvoj multi-objektnih optimizacijskih postopkov na podlagi umetne inteligence.
- Termoe ekonomska analiza vseh procesnih korakov proizvodnje jekla.

Reference

[1] ŠARLER, Božidar, ALI, Izaz, DOBRAVEC, Tadej, GOŠNIK, Tin, HANOGLU, Umut, KOVAČIČ, Miha, LIU, Qingguo, MAVRIČ, Boštjan, MRAMOR, Katarina, RAVNIKAR, Aljaž, VERTNIK, Robert, VUGA, Gašper. Through process modelling of the steel production path. V: Akademija strojništva 2024 : inženirstvo - inovativen trajnostni razvoj z visoko dodano vrednostjo : Ljubljana, Cankarjev dom ter prek spleta, 10. december 2024. Ljubljana: Zveza strojnih inženirjev Slovenije - ZSIS, 2024. Letn. 13, št. 1/6, str. 160-161, ilustr. Svet strojništva, letn. 13, št. 1/6. ISSN 1855-6493. <https://www.zveza-zsis.si/2024/11/30/svet-strojnistva-akademija-strojnistva-2024-december-2024/>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.62020/svet.str.as2024059. [COBISS.SI-ID 222508035]

[2] ŠARLER, Božidar. Computational modelling of multiphase systems. V: ICMSAO'23 : the 9th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization: April 26–28, 2023 in Marrakech, Morocco. [Marrakech: ICMSAO, 2023]. Str. 9, portret. <http://2021.icmsao.org/program/>, <http://2021.icmsao.org/tutorial-speakers/>. [COBISS.SI-ID 158605315]

[3] DOLINAR, Jure, MAVRIČ, Boštjan, ŠARLER, Božidar. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of continuous casting of steel from the perspective of waste heat recovery. V: Akademija strojništva 2025 : inženirstvo - stabilnost v času strateških preobrazb : Ljubljana, Cankarjev dom ter prek spleta, 17. november 2025. Ljubljana: Zveza strojnih inženirjev Slovenije - ZSIS, 2025. Letn. 14, št. 1/6, str. 186-187, ilustr. Svet strojništva, letn. 14, št. 1/6. ISSN 1855-6493. https://www.zveza-zsis.si/2025/10/29/svet-strojnistva-akademija-strojnistva-2025-november-2025/#dflip-df_14576/186, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.62020/svet.str.as2025072. [COBISS.SI-ID 261868035]

[4] DOLINAR, Jure. Termodinamska in termoe ekonomska analiza kontinuirnega ulivanja jekla z vidika zajemanja odvečne toplote : magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo. Ljubljana: [J. Dolinar], 2025. XXII, 77 str., ilustr. Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL. [COBISS.SI-ID 246962435]

Dodatne informacije

Na podlagi odmevnih rezultatov projektne skupine na področju modeliranja in simulacije metalurških procesov, prikazanih tudi v poročilu tega projekta, smo bili izbrani za organizacijo 9th International Conference on Advances in Solidification Processing, 4.–8. junija 2028 na Bledu.

V okviru projekta sta opravila diplomsko delo Aljaž Ravnikar in Blaž Hudej, magisterij Jure Dolinar ter doktorski disertaciji dr. Izaz Ali in dr. Gašper Vuga.