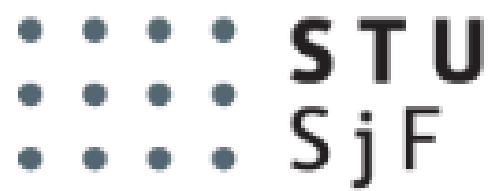


Fyzikálne modelovanie teplotného poľa pri kontinuálnom liatí ocele z hľadiska metrologickej presnosti a mechanizmov prestupu tepla



Sohaibullah Zarghoon a kolektív

Strojnícka fakulta, Slovenská technická univerzita, Bratislava, Slovenská republika



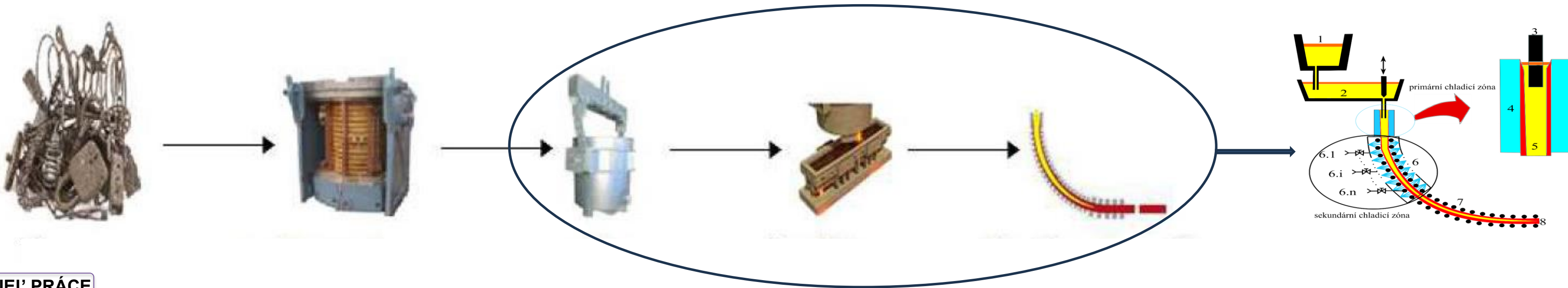
SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
STROJNÍCKA FAKULTA



Ústav automatizácie, informatizácie a merania

1. ÚVOD

Proces kontinuálneho liatia predstavuje komplexný nelineárny fyzikálny systém, v ktorom mechanizmy vedenia, prúdenia a sálania tepla určujú priebeh tuhnutia kovu a výslednú kvalitu odlievaného polotovaru. Primárna a sekundárna chladiaca zóna vytvárajú dynamické teplotné pole, ktorého presná identifikácia je nevyhnutná na pochopenie fyzikálnych dejov prebiehajúcich počas kryštalizácie [1]. Predkladaný príspevok sa zameriava na aplikáciu fyzikálne založených numerických modelov prestupu tepla s cieľom analyzovať časovo aj priestorovo závislú distribúciu teploty počas procesu kontinuálneho liatia. Model rešpektuje základné zákony termodynamiky, energetickej bilancie systému, teplotne závislé materiálové vlastnosti a latentné teplo tuhnutia, čím umožňuje realistickú simuláciu vývoja teplotného poľa v jednotlivých fázach procesu. Osobitná pozornosť je venovaná metrologickým aspektom validácie modelu, analýze neistoty vstupných parametrov a hodnoteniu presnosti predikcie teplotných polí vo vzťahu k experimentálnym meraniam. Výsledky poukazujú na význam fyzikálne konzistentného modelovania pri optimalizácii chladiacich podmienok, minimalizácii tepelných gradientov a obmedzení vzniku vnútorných i povrchových defektov odliatkov [2]. Prezentovaný prístup vytvára predpoklady na efektívnejšie riadenie procesu kontinuálneho liatia prostredníctvom presnejšieho opisu fyzikálnych javov a predstavuje významný prínos pre experimentálnu aj aplikovanú fyziku materiálových technológií.



2. CIEĽ PRÁCE

Cieľom práce je analyzovať časovo a priestorovo závislú distribúciu teploty počas kontinuálneho liatia pomocou fyzikálne založeného numerického modelu prestupu tepla. Dôraz je kladený na metrologické zabezpečenie simulácie, validáciu modelu experimentálnymi údajmi a hodnotenie neistoty vstupných parametrov s cieľom zvýšiť spoľahlivosť predikcie teplotného poľa.

3. FYZIKÁLNE ZÁKLADY MODELU

Numerický model rešpektuje základné zákony termodynamiky, energetickej bilancie systému a teplotne závislé materiálové vlastnosti ocele. Pri simulácii procesu sú zohľadnené všetky dominantné mechanizmy prestupu tepla:

- vedenie tepla vo vnútri materiálu,
- konvekčný prestup tepla v primárnej a sekundárnej chladiacej zóne,
- tepelné sálanie do okolitého prostredia,
- latentné teplo uvoľnené počas tuhnutia.

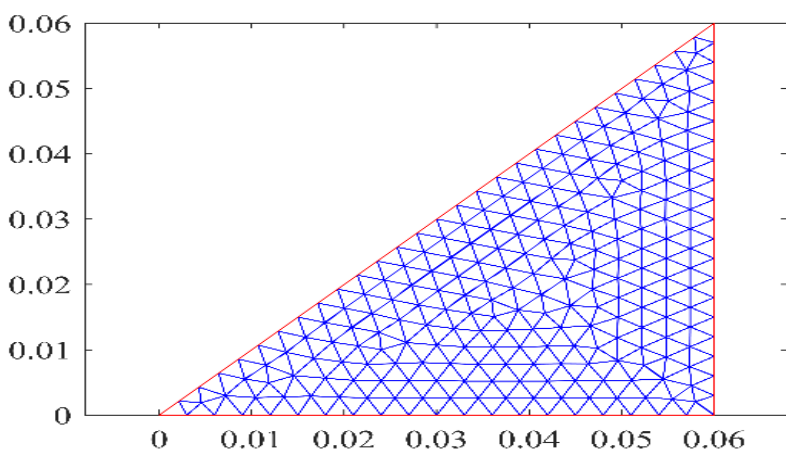
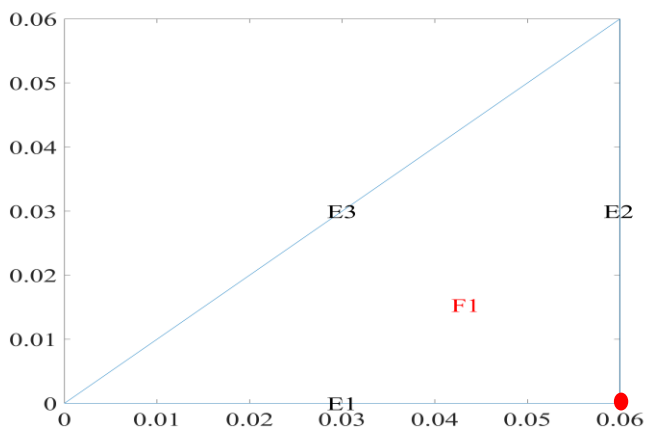
$$q_{con} = -k \times \frac{\partial T}{\partial n}$$

$$-q = k \times \frac{\partial T}{\partial n} = h \times (T_s - T_a) + \epsilon \times \sigma (T_s^4 - T_{inv}^4)$$

4. NUMERICKÝ MODEL

Simulácia bola realizovaná v prostredí MATLAB® Partial Differential Equation Toolbox metódou konečných prvkov. Vzhľadom na geometrickú symetriu prierezu ocelového prameňa bol vytvorený dvojrozmerný model využívajúci jednu osminu prierezu, čím sa podstatne skrátil výpočtový čas pri zachovaní presnosti riešenia.

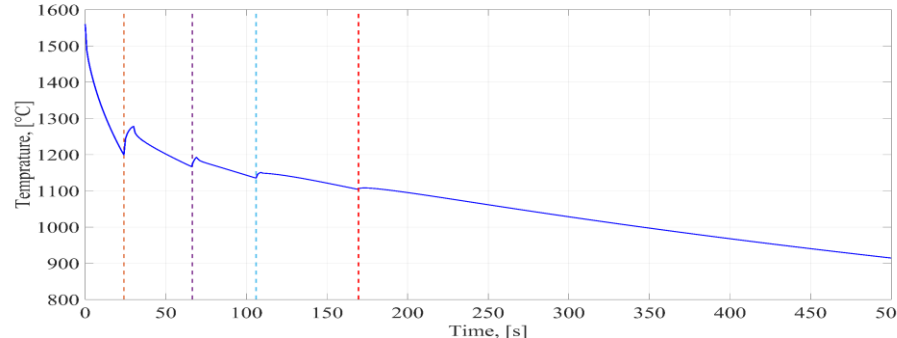
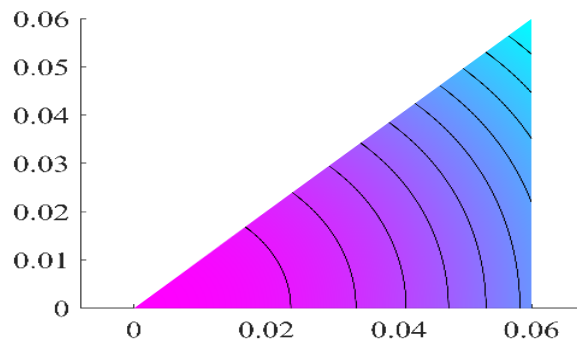
Model zahŕňa okrajové podmienky primárneho aj sekundárneho chladenia, kontaktný prestup tepla medzi prameňom a podpornými valcami, ako aj tepelné sálanie medzi jednotlivými chladiacimi sekciami.



5. VÝSLEDKY SIMULÁCIE

Výsledky numerickej simulácie poskytujú podrobný obraz o vývoji teplotného poľa počas procesu kontinuálneho liatia. Najvyššie teplotné gradienty vznikajú bezprostredne za kryštalizátorom, pričom medzi jednotlivými sekciami sekundárneho chladenia dochádza k lokálnemu prehrievaniu povrchu prameňa.

Analýza rozloženia teploty umožňuje identifikovať kritické oblasti procesu a poskytuje podklady pre optimalizáciu intenzity chladenia s cieľom zabezpečiť rovnomernejší priebeh tuhnutia a obmedziť vznik vnútorných aj povrchových defektov.



6. METROLOGICKÁ VALIDÁCIA

Dôležitou súčasťou práce je metrologická validácia numerického modelu. Hodnotená bola presnosť predikcie teplotného poľa, citlivosť modelu na neistotu vstupných parametrov a zhoda medzi numerickými výsledkami a experimentálnymi meraniami.

Metrologická analýza potvrdzuje, že fyzikálne konzistentný model poskytuje spoľahlivý opis teplotného poľa a vytvára vhodný základ pre podporu riadenia technologického procesu kontinuálneho liatia.

7. ZÁVER

- Numerický model rešpektuje fyzikálne mechanizmy prestupu tepla počas kontinuálneho liatia.
- Simulácia umožňuje spoľahlivú predikciu časového aj priestorového rozloženia teploty.
- Metrologická validácia potvrdzuje vhodnosť modelu na analýzu teplotného poľa.
- Optimalizácia chladiacich podmienok prispieva k zníženiu tepelných gradientov a obmedzeniu vzniku defektov.
- Prezentovaný prístup predstavuje významný prínos pre experimentálnu aj aplikovanú fyziku materiálových technológií.

Podakovanie

Táto práca bola vypracovaná s finančnou podporou projektu KEGA číslo 028STU-4/2026. Autori ďakujú Strojníckej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave za podporu výskumnej činnosti a za vytvorenie vhodných podmienok na riešenie prezentovanej problematiky.

Literatúra

[1] RAMÍREZ, A. & AGUILAR-LÓPEZ, R. & PALOMAR, M. & ROMERO-ROMO, M. & MUÑOZ, D. (2010). Simulation of heat transfer in steel billets during continuous casting. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 17. 403-416. 10.1007/s12613-010-0333-5.

[2] Q. HE, Z. SU, Z. XIE, Z. ZHONG & Q. YAO, „A Novel Principle for Molten Steel Level Measurement in Tundish by Using Temperature Gradient“ in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 7, pp. 1809-1819, July 2017.