

CFD simulace odstraňování nekovových vměstků při proudění za různých výšek hladiny oceli v mezipánvi

CFD Simulation of Non-Metallic Inclusion Removal during Flow at Different Steel Levels in the Tundish

Jiří Cupek jr.^{1,2}, Markéta Tkadlečková¹, Jiří Cibulka¹, Tomáš Huczala¹, Petr Klus¹

¹ TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Třinec. E-mail: jiri.cupek2@trz.cz

² VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálůvě-technologická, Katedra metalurgických technologií, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba

Abstrakt

Příspěvek se zabývá analýzou proudění a distribucí nekovových vměstků v mezipánvi během nestacionárních podmínek, které vznikají při výměně licích pánví, při plynulém odlévání oceli. V tomto období dochází k poklesu hladiny oceli, což snižuje ferostatický tlak a zpomaluje přítok oceli do mezipánve a krystalizátorů. Následné doplnění mezipánve je doprovázeno neizotermickým prouděním (je přiváděna ocel s vyšší teplotou než ta, která se již v mezipánvi nachází), což vytváří kladný teplotní rozdíl. Vyšší teplota na vstupu ovlivňuje charakter proudění, podporuje odstraňování vměstků, snižuje náchylnost ke zkratovému proudění a zvyšuje podíl pístového objemu taveniny.

Pokles hladiny zároveň podstatně mění tvar proudového pole, zvyšuje náchylnost ke zkratovému proudění a negativně ovlivňuje retenční časy mezi jednotlivými licími proudy. Také může přispět ke stržení strusky do oceli. Příspěvek se proto zabývá hodnocením vlivu různých výšek hladiny oceli v mezipánvi na proudění a distribuci nekovových vměstků v těchto podmínkách. Pro numerické simulace byl použit software ANSYS Fluent. Výsledky byly hodnoceny především na základě retenčních časů a modelu DPM (Discrete Phase Model).

Klíčová slova: ocel; výška hladiny oceli; ANSYS Fluent; nekovové vměstky; mezipánve

Abstract

The paper deals with the analysis of flow behaviour and the distribution of non-metallic inclusions in the tundish during non-steady casting conditions that arise when ladles are being changed in continuous steel casting. During this period, the steel level decreases, which reduces the ferrostatic pressure and slows down the inflow of steel into the tundish and moulds. Subsequent refilling of the tundish is accompanied by non-isothermal flow (steel with a higher temperature than that already present in the tundish is supplied), creating a positive temperature difference. The higher inlet temperature affects the flow pattern, promotes inclusion removal, reduces the tendency to short-circuit flow, and increases the plug volume of the melt.

The drop in the steel level also significantly alters the flow field, increases the tendency to short-circuit flow, and affects residence times between individual casting strands. It may also contribute to slag entrainment into the steel. Therefore, this paper focuses on evaluating the influence of different steel levels in the tundish on flow behaviour and the distribution of non-metallic inclusions under these conditions. ANSYS Fluent software was used for numerical simulations. The results were evaluated mainly on the basis of RTD analysis (residence time distribution) and the DPM model (Discrete Phase Model).

Key words: steel; steel level height; ANSYS Fluent; non-metallic inclusions; tundish

1. Úvod

Mezipánve představuje klíčový prvek plynulého odlévání oceli. Jeho hlavní funkcí je tvořit zásobník tekuté oceli a současně rozdělovat ocel mezi jednotlivé lící proudy. Mezipánve významně ovlivňuje výslednou kvalitu odlévané oceli, zejména obsah nekovových vměstků nebo homogenitu oceli [1-3].

Jedním z hlavních úkolů mezipánve je zajištění čistoty oceli. Metalografická čistota je definována obsahem nekovových vměstků v oceli, jejich velikostí a množstvím. Nekovové vměstky se obecně klasifikují podle několika kritérií, především podle jejich chemického složení, původu a velikosti. Základní dělení však vychází z jejich původu, a to na:

- *Exogenní vměstky* – vznikají při reoxidaci oceli, například při kontaktu taveniny se vzduchem nebo oxidující struskou. Dalším zdrojem je stržení strusky nebo vyzdívky do taveniny. Tyto vměstky mají obvykle větší velikost a obtížně se odstraňují.
- *Endogenní vměstky* – vznikají v pánvi reakcí mezi kyslíkem rozpuštěným v tavenině a dezoxidačním prvkem, jako je hliník nebo křemík, přidaným do oceli. Tyto vměstky jsou obvykle malé, a proto nemusí významně ovlivnit vlastnosti oceli, pokud nedojde k jejich shlukování.

Nekovové vměstky mohou výrazně zhoršit mechanické vlastnosti oceli a způsobovat vady v produktech. V mezipánvi dochází k flotaci vměstků a tím, ke snížení jejich množství v tavenině. Použití modifikátorů proudění jako jsou přepážky nebo porézní tvárnice pro dmýchání argonu může účinnost odstraňování vměstku nadále zvýšit [1-3].

Teplota je dalším klíčovým faktorem ovlivňující kvalitu odlévané oceli. Udržení vhodné teploty a požadovaného přehřátí je nezbytné pro minimalizaci defektů. Stabilní teplotní podmínky jsou žádoucí pro dosažení vysoké kvality výroby [3-5].

Výkonnost mezipánve dále souvisí s hydrodynamickým chováním tekuté oceli. Charakter proudění je ovlivněn konstrukcí nebo použitými prvky řízení toku. Tyto prvky zásadně určují účinnost odstraňování vměstků i míru teplotní a chemické homogenizace.

Rovněž změna výšky hladiny oceli (zejména její pokles) v mezipánvi může mít několik zásadních dopadů na proces plynulého odlévání:

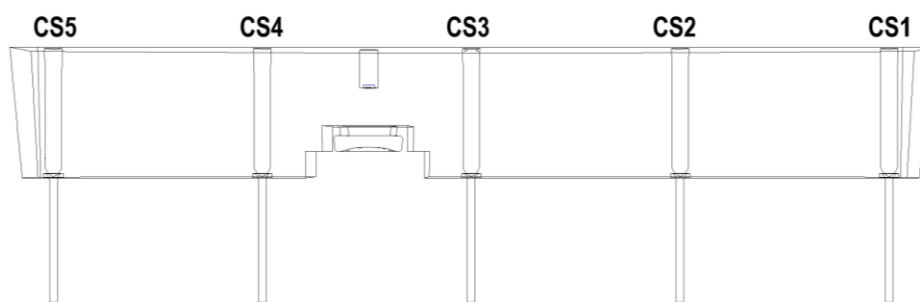
- Pokles hladiny snižuje ferostatický tlak, což způsobuje nestabilní přítok oceli do krystalizátorů. Tento nestabilní tok může vést k nepravidelné krystalizaci a vzniku povrchových vad, jako jsou trhliny. Nižší hladina oceli také zvyšuje kontakt taveniny s atmosférou, což podporuje povrchovou oxidaci a následnou tvorbu oxidických vměstků, které dále snižují kvalitu oceli.
- Dalším důsledkem poklesu hladiny je zkrácení retenčního času oceli v mezipánvi, což vede k nerovnoměrnému rozložení teploty a neoptimálním podmínkám odlévání. Tím může být negativně ovlivněna homogenita i mechanické vlastnosti odlévané oceli. Navíc při nižších hladinách roste riziko nasávání plynů a strhávání vměstků do proudu oceli, což způsobuje další vady.
- Při výrazně nízké hladině může dojít až k přerušování odlévání, což vede k prostojům a zvýšeným nákladům. Z těchto důvodů je nezbytné pečlivě řídit výšku hladiny oceli v mezipánvi, aby byla zajištěna stabilita procesu, optimální teplotní podmínky a vysoká kvalita konečného produktu.

Pro analýzy proudění oceli v mezipánvi se mohou použít nástroje numerického modelování a mezi nejčastěji využívané metody patří tzv. CFD simulace (Computational Fluid Dynamics). Při numerickém modelování je skutečné provozní zařízení nahrazeno matematickým modelem. V modelu je možné pomocí parciálních diferenciálních rovnic popsat například přestup tepla, proudění kapalin a plynů či chemické reakce. Jednotlivé děje jsou v matematickém modelu vyjádřeny jako funkce času. Pro systém diferenciálních rovnic se následně hledá řešení ve výpočetní síti. Rovnice jsou řešeny samostatně v každé buňce této sítě. S jemností sítě a rostoucí přesností modelu se také zvyšuje počet řešených rovnic. Proudění kapalin zde představuje zásadní proces, protože ovlivňuje průběh chemických reakcí, odstraňování nekovových vměstků i homogenizaci oceli. Nalezení vhodného konstrukčního řešení pomocí numerického modelování může významně intenzifikovat proudění a odstraňování vměstků [1-7]. Výsledky numerických simulací je vhodné dále verifikovat pomocí metod fyzikálního modelování a také provozními experimenty.

Pro optimalizaci provozu je nutné zajistit ideální proudění oceli v mezipánvi, použitím dříve zmíněných přepážek, poréznic tvárnic nebo dopadového místa. Mezipánev představuje poslední metalurgický prvek ve kterém je ještě možné ovlivnit výslednou kvalitu a čistotu odlévané oceli, a proto je její optimalizace nezbytná. Přímé sledování proudění oceli v provozní mezipánvi je obtížné, a proto se využívá kombinace numerického a fyzikálního modelování. Tento příspěvek se soustředí na numerické modelování a jedná se o děj, při kterém je provozní zařízení nahrazeno matematickým modelem, jenž je popsán soustavou parciálních diferenciálních rovnic [1-7].

2. Použitá metodika

Veškeré simulace a přípravy na simulace probíhaly v softwarovém prostředí ANSYS 2022 R2. Prostředí ANSYS zahrnuje software ANSYS Fluent, ve kterém byly řešeny CFD simulace. 3D geometrie pětiproudé mezipánve byla vytvořena v CAD systému ANSYS DesignModeler. Pro numerické simulace byla vytvořena pouze vnitřní geometrie mezipánve. Schématické zobrazení vytvořené geometrie s popsánými licími proudy (CS1-CS5) je zobrazeno na **obr. 1**.



Obr. 1 Geometrie pětiproudé mezipánve

Fig. 1 Geometry of a five-strand tundish

V **tab. 1** jsou zobrazené nastavené okrajové podmínky pro numerické modelování. Pro řešení numerické simulace byla použita metoda konečných objemů, jako materiál proudění byla nastavená ocel s definovaným přestupem tepla přes stěny mezipánve a hladinu oceli. Standardní výška hladiny oceli v mezipánvi je 925 mm (konfigurace A). V této publikaci byl zkoumán pokles hladiny na úrovně: 875, 825, 775 a 725 mm (konfigurace B-E).

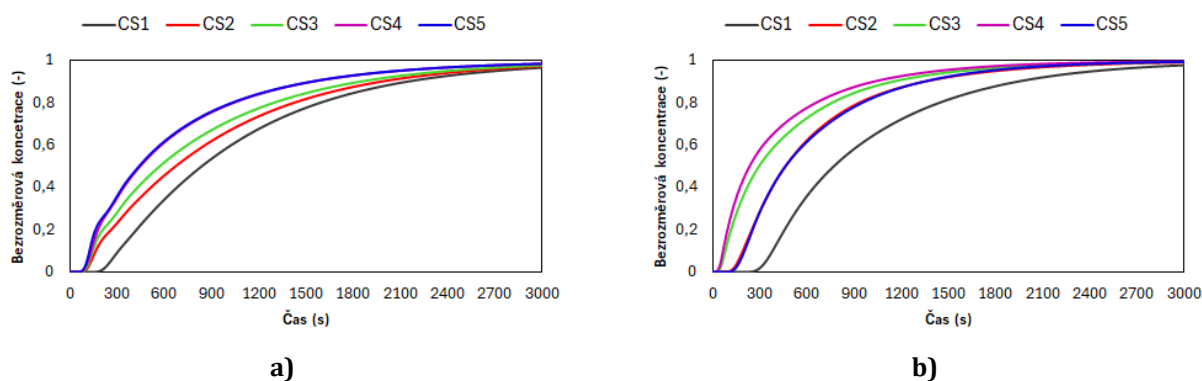
Tab. 1 Okrajové podmínky pro numerické simulace

Tab. 1 Boundary conditions for numerical simulations

Parametr	Hodnota
Objemový průtok ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	6,62
Licí teplota	1 500
Gravitace ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	-9,81
Provozní tlak (Pa)	101 325
Ztráta tepla přes hladinu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	15 000
Ztráta tepla přes stěny mezipánve ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	2 500

3. Výsledky a diskuze

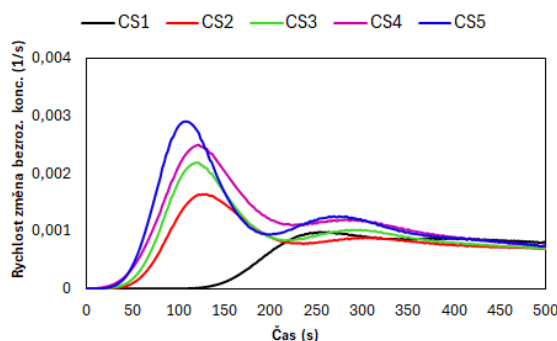
Hlavním výsledkem je analýza retenčních časů. Retenční čas je doba, která popisuje, jak dlouho stráví jednotlivý element taveniny v mezipánvi. Retenční čas je zásadní pro další optimalizaci proudění. Výsledky RTD analýzy jsou zobrazeny na **obr. 2**. Pro stanovení retenčních křivek byl použit model species. Na **obr. 2** jsou srovnány konfigurace A a E.



Obr. 2 RTD F analýza: a) A - 925; b) E - 725

Fig. 2 RTD F analysis: a) A - 925; b) E - 725

Získané křivky (**obr. 2**) byly derivovány a byly z nich stanoveny křivky, které odpovídají Diracovu impulsu (C křivka). Na **obr. 3** je uveden příklad C křivky pro konfiguraci A - 925. Z křivky byly odečteny minimální (doba od vstupu po první detekci na výstupu) a maximální (doba od vstupu po detekování maximální koncentrace) retenční čas. Hodnoty všech retenčních časů z C křivek jsou uvedeny v **tab. 2**.



Obr. 3 RTD C analýza: A - 925

Fig. 3 RTD C analysis: A - 925

Tab. 2 Minimální a maximální retenční časy všech konfigurací

Tab. 2 Minimum and maximum retention times for all configurations

Konfigurace	Minimální retenční čas (s) - $\tau_{\min}$					Maximální retenční čas (s) - $\tau_{\max}$				
	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5
A - 925	208	96	88	78	78	250	128	120	122	108
B - 875	216	100	74	72	80	270	134	110	118	116
C - 825	402	104	68	58	110	634	158	122	106	177
D - 775	390	102	50	40	94	616	224	98	72	138
E - 725	290	118	34	26	130	396	180	60	52	210

Jelikož retenční čas na nejbližších licích prouděch (CS3 a CS4) má největší vliv na kvalitu oceli a jsou nejvíce náchylné na zkratové proudění, byly vyhodnoceny retenční časy právě na těchto licích prouděch.

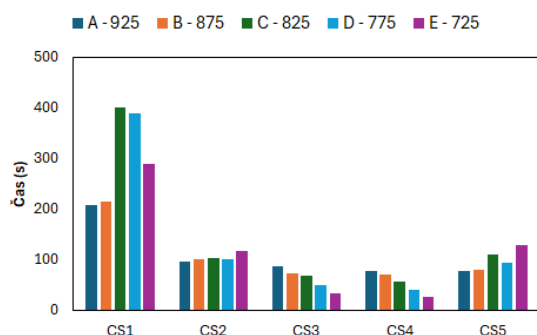
Tab. 3 uvádí průměrné retenční časy na všech licích prouděch a průměrné retenční časy licích proudů CS3 a CS4. Je patrné, že dochází k souvislému poklesu retenčních časů na nejbližších licích prouděch. Z výsledku je zřejmé, že při nižší hladině v mezipánvi ocel téměř okamžitě mezipánve opouští bez potřebné homogenizace.

Tab. 3 Minimální a maximální retenční časy všech konfigurací

Tab. 3 Minimum and maximum retention times for all configurations

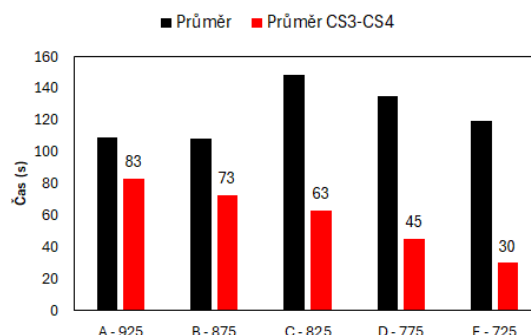
Konfigurace	$\tau_{\min}$ (s)		$\tau_{\max}$ (s)	
	Průměr	Průměr CS3-CS4	Průměr	Průměr CS3-CS4
A - 925	110	83	146	121
B - 875	108	73	150	114
C - 825	148	63	239	114
D - 775	135	45	230	85
E - 725	120	30	180	56

Obdobné výsledky lze pozorovat i z **obr. 4**, kde jsou zobrazeny všechny licí proudy pro všechny konfigurace. Zejména je patrný pravidelný pokles retenčního času na licích prouděch CS3 a CS4 a výrazné zvýšení retenčního času na nejvzdálenějším licím proudě CS1, což dokládá značnou heterogenitu proudění. Na **obr. 5** je vidět, že i když průměrný retenční čas roste (zejména vlivem odchylky CS1), retenční časy na nejbližších licích prouděch CS3 a CS4 stále klesají, což představuje negativní vliv na kvalitu procesu.



Obr. 4 Minimální retenční časy pro všechny konfigurace

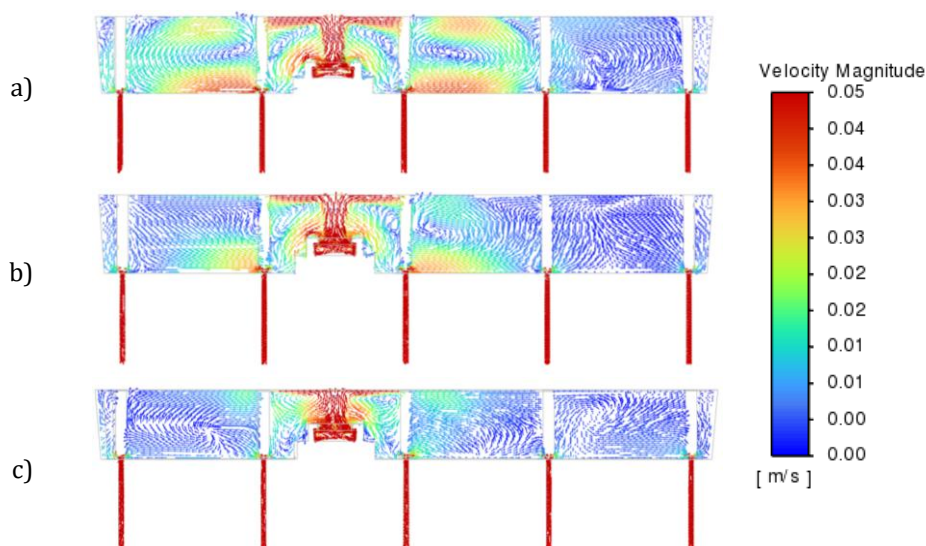
Fig. 4 Minimum retention times for all configurations



Obr. 5 Min. průměr. retenční časy pro všechny konfigurace

Fig. 5 Min. average retention times for all configurations

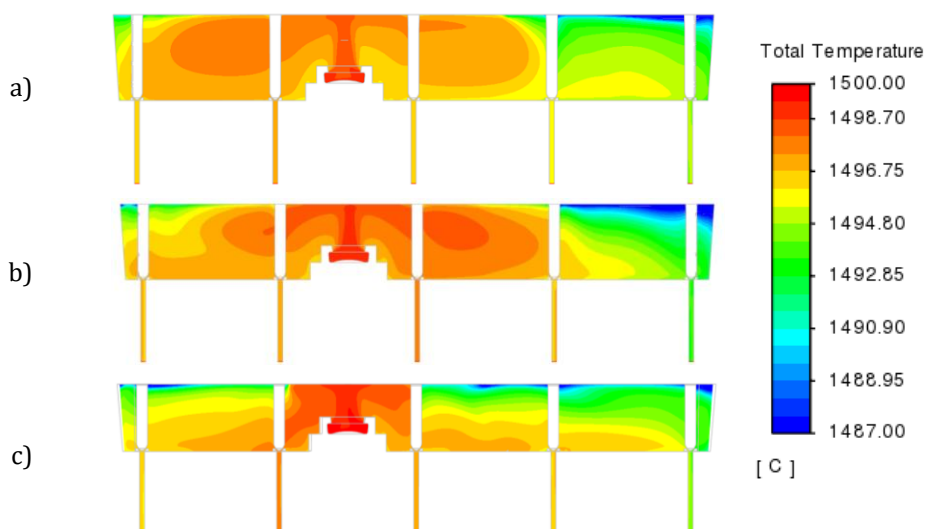
Na **obr. 6** jsou zobrazena proudová pole pomocí vektorů rychlosti. Největší oblasti aktivního proudění jsou patrná při zaplnění mezipánve na standardní provozní hladinu (**obr. 6a**), kdy lze pozorovat rozsáhlé oblasti cirkulace taveniny. Tyto oblasti podporují intenzivní promíchávání oceli, čímž přispívají k lepší teplotní homogenizaci i flotaci vměstků. S klesající hladinou oceli se však charakter proudění výrazně mění a začíná převažovat zkratové proudění. V nejnižší konfiguraci (**obr. 6c**) je aktivní objem zmenšený, což vede ke snížení promíchávání a vysokému riziku heterogenity teploty i strhávání vměstků do licích proudů.



Obr. 6 Vektory proudění v mezipánvi: a) A - 925; b) C - 825; c) E - 725

Fig. 6 Flow vectors in the tundish: a) A - 925; b) C - 825; c) E - 725

Podobné výsledky jsou zřejmé i z **obr. 7**, kde jsou zobrazena teplotní pole. Při plné hladině lze rozlišit dvě výrazné cirkulační oblasti. S poklesem hladiny se však tyto oblasti výrazně zmenšují, což opět vede ke zkratovému proudění a ke zhoršení teplotní homogenizace. To poukazuje na nutnost udržování standardní hladiny v mezipánvi, které je klíčové pro dosažení stability odlévání.

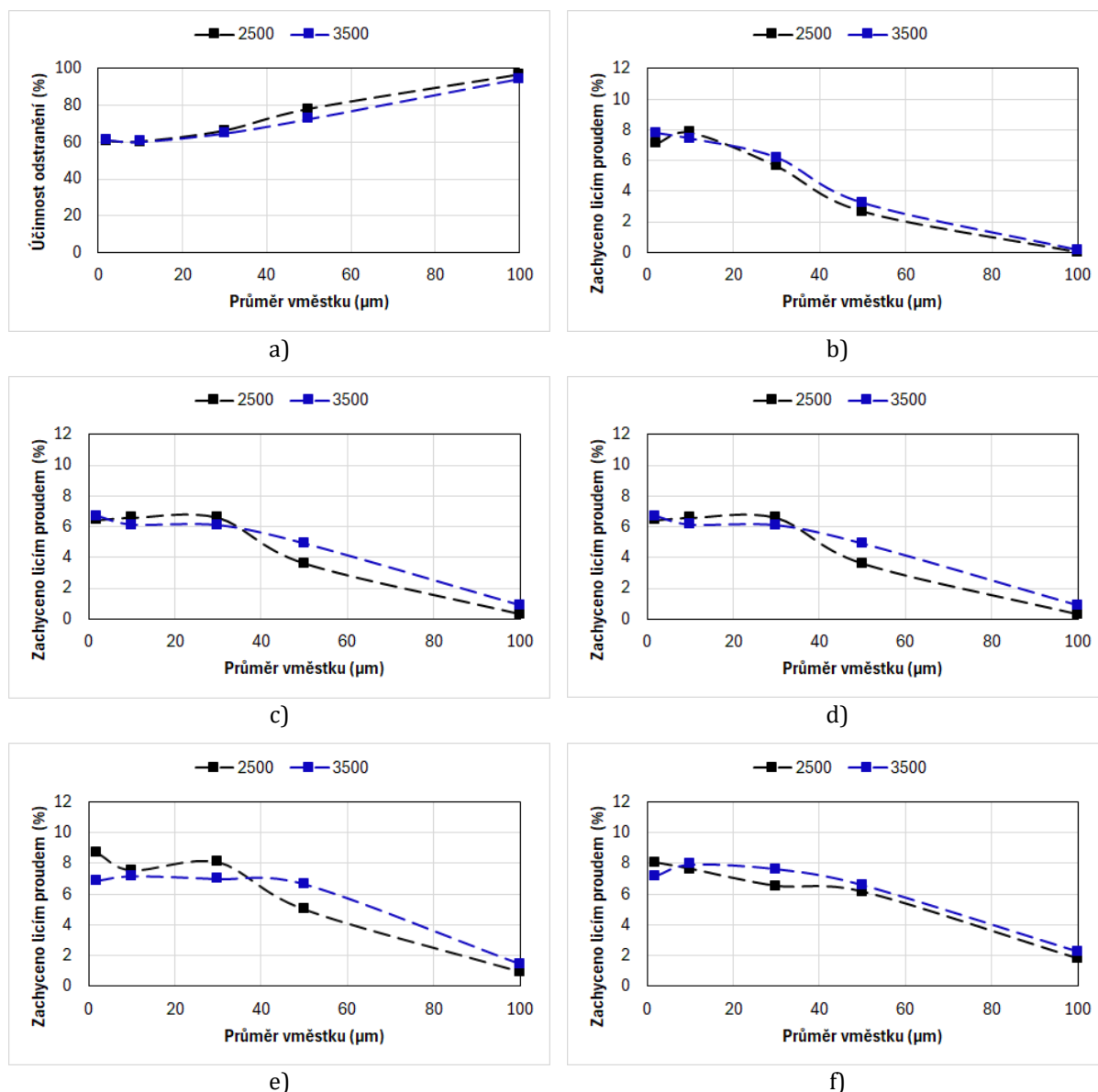


Obr. 7 Teplotní pole v mezipánvi: a) A - 925; b) C - 825; c) E - 725

Fig. 7 Temperature fields in the tundish: a) A - 925; b) C - 825; c) E - 725

Distribuce nekovových vměstků byla analyzována podle modelu DPM. Bylo hodnoceno chování vměstků při hladinách 925, 825 a 725 mm. Byly také porovnány vměstky s hustotami 2500 a 3500 g·m⁻³.

Na **obr. 8** je zobrazeno porovnání hustot vměstků pro konfiguraci 925 mm. Je patrné, že vměstky s vyšší hustotou měly větší tendenci být strhávány licími proudy. Vměstky s nižší hustotou byly snáze odstraňovány.

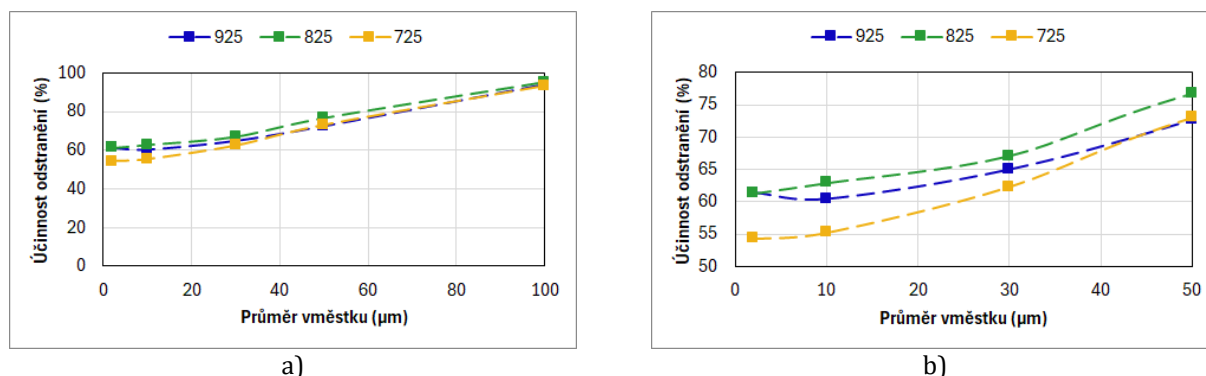


Obr. 8 Distribuce nekovových vměstků: a) celková účinnost odstraňování vměstků přes strusku; b) vměstky strženy licím proudem CS1; c) CS2; d) CS3; e) CS4; f) CS5

Fig. 8 Distribution of non-metallic inclusions: a) total efficiency of inclusion removal via slag; b) inclusions removed by casting stream CS1; c) CS2; d) CS3; e) CS4; f) CS5

Jelikož hustota vměstků neprokázala výrazný vliv, byla následná analýza výšky hladiny provedena pouze s hustotou 3500 g·m⁻³ (**obr. 9**). **Obr. 9a** znázorňuje odstraňování vměstků při různých výškách hladiny oceli, **obr. 9b** uvádí graf se zúženým rozsahem pro lepší přehlednost.

S rostoucí velikostí vměstků docházelo k jejich snazšímu odstranění. Projevoval se také vliv výšky hladiny. Nižší hladina oceli v mezipánvi měla negativní dopad, jelikož zabráňovala odstraňování nekovových vměstků. Odstraňování nekovových vměstků bylo omezené, zejména z důvodu zkratového proudění a nízkých retenčních časů. To potvrzuje nutnost udržovat optimální výšku hladiny oceli v mezipánvi.



Obr. 9 a) Účinnost odstraňování nekovových vměstků za různých výšek hladiny; b) Detail na užší oblast grafu

Fig. 9 a) Effectiveness of removing non-metallic inclusions at different steel height levels; b) Detail of a narrower area of the graph

4. Závěr

Z provedené analýzy vyplývá, že změna hladiny oceli v mezipánvi má výrazný vliv na proudění i účinnost odstraňování nekovových vměstků. Při snižování hladiny se sice projevil efekt navýšení retenčních časů, avšak současně došlo ke snížení retenčních časů na nejbližších licích proudech, což vede k nestabilnímu a nehomogennímu proudění oceli do krystalizátorů.

Při poklesu hladiny dochází ke zhoršení podmínek odstraňování nekovových vměstků, a to zejména z důvodu nedostatku aktivního objemu a času pro jejich odstranění. Numerické simulace potvrdily, že vměstky s vyšší hustotou jsou méně ovlivňovány vztlakem a jejich rychlost vyplavání je nižší. V důsledku toho se snáze pohybují spolu s proudem kovu a mohou být častěji strhávány licím proudem, zatímco velké nízkohustotní vměstky se díky vyššímu vztlaku naopak lépe odlučují směrem k hladině.

Nedostatečné promíchávání oceli v mezipánvi vede k patrné teplotní heterogenitě a může vést až k nutnosti zastavit odlévání. Celkově je tedy udržování optimální hladiny oceli v mezipánvi klíčové pro stabilní proudění, efektivní odstraňování vměstků a dosažení vysoké čistoty oceli.

LITERATURA

- [1] Ferreira, F. Continuous casting tundish inertization: a comparative study. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5151/2594-5300-34883>
- [2] Ferreira, F., Klug, J., Pereira, J., Bielefeldt, W., Vilela, A. Laboratory evaluation of tundish covering powders and rice hull ash on cleanliness for a sae 1055 modified steel. Materials Research, 26. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2022-0216>
- [3] Zhao, S., Zhu, S., Ge, Y., Wang, J., Xu, D., Li, Z., Chen, C. Simulation of fluid flow and inclusion removal in five-flow t-type tundishes with porous baffle walls. Metals, 13(2), 215. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13020215>
- [4] Ye, M., Zhao, M., Chen, S., Yang, S., Li, J. Influence of plasma heating on the metallurgical effects of a continuous casting tundish. (2020). DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202010.0422.v1>
- [5] Wang, Y., Song, J., Nai-liang, C., Guo, Z., Li, J., Yang, S., ... & Wang, C. Application of graphite electrode plasma heating technology in continuous casting. Materials, 15(7), 2590. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072590>
- [6] Li, Q., Qin, B., Zhang, J., Dong, H., Li, M., Tao, B., Liu, Q. Design improvement of four-strand continuous-casting tundish using physical and numerical simulation. Materials, 16(2), 849. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16020849>
- [7] Jin, Y., Dong, X., Fu, Y., Cheng, C., Li, Y., Wang, W. Removal mechanism of microscale non-metallic inclusions in a tundish with multi-hole-double-baffles. Metals, 8(8), 611. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8080611>