

# Recenzované vědecké články

## Numerické modelování vyplouvání vměstků za stacionárního stavu proudění oceli v mezipánvi

## Numerical Modelling of floating out of Inclusions under Steady State Steel Flow in a Tundish

doc. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.<sup>1</sup>; Ing. Josef Walek<sup>1</sup>; prof. Ing. Karel Michalek, CSc.<sup>1</sup>; Ing. Tomáš Huczala, Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

<sup>2</sup> TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, 739 61 Třinec-Staré město, Česká republika

*Trvale kvalitní výroba oceli je dnes jedním z klíčových předpokladů konkurenceschopnosti hutních podniků. Největší podíl poloproductů oceli, určený k dalšímu zpracování, představují plynule odlévané předlitky. Kvalita předlitků je předurčována i jejich vnitřní čistotou, kterou ovlivňuje přítomnost nekovových částic – vměstků. Posledním místem v průběhu plynulého odlévání, kde lze ovlivnit finální vnitřní čistotu oceli, je na zařízení plynulého lití oblast mezipánve. Jednou z metod, kterou lze uplatnit při verifikaci proudění oceli v mezipánvi, je numerické modelování. Předkládaný příspěvek se proto věnuje numerickému modelování vyplouvání vměstků za stacionárního stavu proudění oceli v mezipánvi. Numerické řešení vyplouvání vměstků za ustáleného proudění oceli spočívá v návrhu změny konfigurace dopadového místa u asymetrické pětiproudé mezipánve. Simulace procesu byla realizována v CFD programu ANSYS Fluent. Charakter proudění taveniny oceli v mezipánvi je studován pomocí vektorů rychlosti, profilu teplotních polí, RTD křivek, retenčních časů a objemů v mezipánvi (promíchávaný, mrtvý a pístový). K zhodnocení účinnosti odstraňování vměstků byl stanoven tzv. koeficient účinnosti odstraňování vměstků*

**Klíčová slova:** ocel; nekovové vměstky; mezipánev; dopadová deska; numerické modelování; RTD křivky

*To effectively remove non-metallic inclusions from the flowing steel in the 5-strand asymmetric tundish, the novel configuration of impact pad was developed. For analysis, complex numerical modelling in CFD programme ANSYS Fluent was used. The Lagrangian Discrete Phase Model of inclusion tracking was applied. Distribution of inclusions, with sizes of 2  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$  and density from 2500 to 3500  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , was considered only through the shroud. The separation rate of inclusions was used for evaluating the efficiency of inclusion floating out depending on the internal configuration of tundish with impact pad in two construction modification (modification 1 – M1, modification 2 – M2) under steady state condition of steel flow. The preliminary results showed that in the case of asymmetric geometry of the modelled area the control of computational mesh independency plays an important role. The Assembly Method with Cut Cell approach was satisfactory even when the tundish geometry was changed. From the RTD curves with M1 impact pad the short-circuit steel flow was found. In the case with M2 impact pad, the RTD curves are more or less uniform for all casting strands and the separation of inclusions to slag increased approximately from 15% up to 70% in comparing with M1.*

**Key words:** steel; non-metallic inclusions; tundish; impact pad; numerical modeling; RTD curves

V současné době se plynulým způsobem odlévá až 96 % celosvětové produkce oceli. V České republice je technologií plynulého odlévání vyrobeno až 92 % ocelových předlitků [1]. Během plynulého způsobu odlévání oceli je lící pánev umístěna na otočný lící stojan lícího zařízení. Odtud je ocel přes stínící trubici odlévána do mezipánve. Následně je tavenina oceli usměrňována ponornými výlevkami do oscilujících krystalizátorů

(primární zóna chlazení), kde je zajištěno řízené ochlazení a počáteční krystalizace oceli. Pod krystalizátorem je soustava vodicích a opěrných válečků (sekundární zóna chlazení) včetně chladicích trysek, jež zajišťují tažení, přetváření, chlazení a objemové tuhnutí lícího proudu oceli [2, 3].

Mezipánev je důležitým technologickým uzlem zařízení plynulého odlévání oceli. Zajišťuje především [4, 5]:

rozdělení taveniny oceli v průběhu odlévání na jednotlivé lící proudy; reguluje hmotnostní tok oceli do krystalizátorů; snižuje ferostatický tlak tekuté oceli, homogenizuje teplotu taveniny; zajišťuje zásobu oceli při sekvenčním odlévání v průběhu výměny lící pánve; eliminuje turbulenci lícího proudu z lící pánve; napomáhá separaci vměstků.

Vměstky jsou nekovové částice, které mohou být endogenního či exogenního charakteru. Pokud nejsou odstraněny z taveniny oceli v průběhu jejího zpracování, snižují kvalitu hotového ocelového produktu. Posledním místem, kde lze ovlivnit množství nekovových vměstků v tavenině oceli během plynulého odlévání, je mezipánve. Řada studií se proto věnuje optimalizaci proudění v mezipánvi za použití různých přepážek či dopadových desek. Ke studiu proudění autoři obvykle využívají poznatky experimentálního měření nebo metod modelování, a to jak fyzikálního tak numerického. K hodnocení charakteru proudění využívají metody měření koncentrace stopovací látky při jejím průchodu reaktorem a stanovují RTD křivky [6 – 9].

Složitější je situace při ověřování snižování obsahu vměstků v průběhu proudění taveniny oceli v mezipánvi. Protože je ověřování vyplouvání vměstků v mezipánvi pomocí provozního měření nereálné, či u fyzikálního modelování velmi náročné, přistupují autoři publikací k využití numerického modelování. V publikacích věnovaných numerickému modelování vyplouvání vměstků se však jen sporadicky vyskytuje popis komplexní procedury modelování a články se omezují zejména na zhodnocení vyplouvání vměstků v závislosti na zvolených okrajových podmínkách odlévání [10 – 11].

Protože je numerické modelování v metalurgii velmi cenným nástrojem, zvláště pak v případech, kdy není k dispozici fyzikální model zařízení, klade si předkládaný příspěvek za cíl prezentovat proceduru numerického řešení [12]. Numerické řešení vyplouvání vměstků za ustáleného proudění oceli v mezipánvi je demonstrováno při vývoji návrhu změny konfigurace dopadového místa u asymetrické pětiproudé mezipánve. Řešení je specifické složitostí geometrie modelu mezipánve, která má asymetrický tvar komplikovaný navíc dopadovými deskami a zátkovými tyčemi. Charakter proudění taveniny oceli v mezipánvi je studován pomocí vektorů rychlosti, profilu teplotních polí, RTD křivek, retenčních časů a objemů v mezipánvi (promíchávaný, mrtvý a pístový). K zhodnocení účinnosti odstraňování vměstků byl stanoven tzv. koeficient účinnosti odstraňování vměstků. Účinnost odstranění vměstků byla hodnocena pro dvě vnitřní konfigurace dopadového místa v mezipánvi, které jsou označeny jako dopadová deska M1 (modifikace 1) a dopadová deska M2 (modifikace 2).

## 1. Popis numerického modelu

Simulace procesu byla realizována v CFD programu ANSYS Fluent. Aby bylo možné získat RTD křivky a aplikovat DPM (Discrete Phase Model) k analýze

vyplouvání vměstků, bylo nutné nejdříve vypočítat ustálené rychlostní a teplotní pole proudící oceli v mezipánvi. Následně byly u ustáleného proudového pole počítány RTD křivky, trajektorie vměstků a jejich vyplouvání. Při simulaci proudění oceli a vyplouvání vměstků byly uvažovány následující předpoklady:

- Vměstky mají kulovitý tvar a jsou do mezipánve vypouštěny stínicí trubici.
- Mezi taveninou a vměstky nedochází k výměně hmoty, tepla, ani k chemickým reakcím.
- Vměstek je dostatečně malý a jeho přítomnost neovlivňuje rychlostní pole taveniny.
- Nedochází ke spojování vměstků. Pokud vměstek narazí na stěnu, je odražen. Pokud se vměstek dotkne hladiny, je pohlcen (jako do strusky) a opouští doménu.

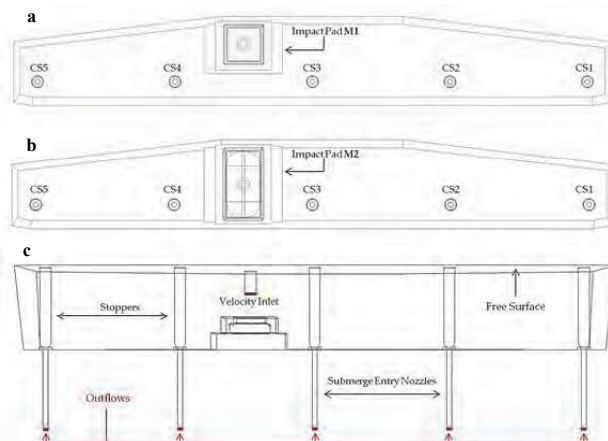
Numerické modelování proudění oceli a vyplouvání vměstků v 5proudé asymetrické mezipánvi bylo dle výše uvedených předpokladů proto provedeno ve třech krocích:

1. základní výpočet ustáleného proudění, získání ustáleného rychlostního a teplotního pole,
2. výpočet RTD křivek za použití Species Modelu,
3. výpočet vyplouvání vměstků aplikací DPM.

Výsledkem výpočtu jsou rychlostní a teplotní pole, RTD křivky, stanovení množství vměstků stržených do výlevky nebo zachycených na hladině.

## 2.1 Nastavení modelu

Základní 3D geometrie 5proudé asymetrické mezipánve představuje vnitřní objekt modelované oblasti (obr. 1).



Obr. 1 3D geometrie modelované oblasti; a – půdorys mezipánve s návrhem dopadové desky M1, b – půdorys dna mezipánve s návrhem dopadové desky M2, c – čelní pohled na mezipánve se zachycením vyvýšené pozice dopadové desky, které je shodné pro oba návrhy (M1 a M2). CS1 – CS5 jsou lící proudy

Fig. 1. 3D geometry of the modelled area; a – the floor plan of the tundish with the impact pad design M1, b – the floor plan of the tundish bottom with the elevated position of the impact pad, which is identical for both designs (M1 and M2). CS1 – CS5 are casting strands.

Do objemu mezipánve zasahuje stínící trubice, která je vzdálena 650 mm ode dna. Pod stínící tubicí je umístěna dopadová deska, která byla pro účely optimalizace vyplouvání vměstků navržena ve dvou konstrukčních modifikacích, a to M1 a M2, jak je patrné z obr. 1a,b. Výška hladiny oceli v mezipánvi odpovídá pracovnímu objemu taveniny o hmotnosti 32 t a činí 925 mm. Vnitřní objem mezipánve je snižován přítomností zátkových tyčí. Součástí modelované geometrie jsou ponorné výlevky označené jako CS1 až CS5 (Casting Strand 1, Casting Strand 5). Vzdálenost mezi jednotlivými výlevkami činí 1500 mm. Celková délka mezipánve je 6387 mm.

Návrh dopadové desky označený jako M1 (obr. 1a) představuje vyvýšená dutá tvárnice o čtvercovém průřezu, která je ohraničená stěnami tak, aby byl dopadající proud oceli ze stínící trubice usměrňován k hladině taveniny oceli v mezipánvi. Druhý návrh dopadové desky označený jako M2 (obr. 1b) představuje dutá tvárnice s obdélníkovým průřezem, která je rozšířená na celý rozměr centrální části dna mezipánve. V obou případech, tedy M1 i M2, se jedná o excentrickou pozici dopadového místa mezi licím proudem č. 3 a 4. Kromě úpravy tvaru dopadové desky byla pozměněna i pozice stínící trubice tak, aby vždy směřovala do středu dna dopadových desek. Vnitřní průměr stínící trubice odpovídá použitému hydraulickému průměru na vstupu (tab. 1).

Některá zaoblení, zejména v přechodu vertikálních vnějších stěn mezipánve do dna, byla z důvodu následné přípravy výpočetní sítě zanedbána. Detaily v oblasti zátkových tyčí a výtokových uzlů, resp. detaily dopadových desek byly zachovány.

Na ústí stínící trubice byla definována okrajová podmínka velocity-inlet s konstantní vstupní rychlostí  $1,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (která odpovídá hmotnostnímu průtoku  $2,0 \text{ t}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a konstantní licí teplotou 1773 K. Turbulence byla definována hydraulickým průměrem 0,085 m a intenzitou turbulence 10 %. Na výstupech bylo uvažováno s okrajovou podmínkou outflow, která představuje obdobu volného lití z mezipánve. Při výpočtu proudění z mezipánve se využívá zadaných operačních podmínek. Na hladině bylo definováno nulové smykové třen.

Výpočet ustáleného proudění zahrnuje vliv přirozené konvekce. Ztráty tepla byly uvažovány přes hladinu krytou struskou a přes stěny mezipánve. Hodnota tepelných ztrát přes dno a stěny mezipánve činila  $2500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Tepelná ztráta přes volnou hladinu mezipánve byla zvolena  $15\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Termofyzikální vlastnosti oceli byly definovány v závislosti na teplotě. Veškeré nezbytné parametry jsou souhrnně uvedeny v obr. 1 a tab. 1–3. Distribuce vměstků, jejich velikost a hustota je shrnuta v tab. 4 a 5.

Tab. 1 Okrajové podmínky nastavení modelu

Tab. 1 Boundary conditions of model setting

| Okrajové podmínky                                            | Hodnota | Okrajové podmínky                                                 | Hodnota |
|--------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------|---------|
| Licí rychlost přes ST ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )       | 1,04    | Pracovní objem mezipánve (t)                                      | 32,4    |
| Hmotnostní průtok přes ST ( $\text{t}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 2,4     | Průtok oceli ponornou výlevkou ( $\text{t}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 0,48    |
| Licí teplota (K)                                             | 1773    | Úroveň oceli v MP (mm)                                            | 925     |
| Operační teplota (K)                                         | 1773    | Intenzita turbulence (%)                                          | 10      |
| Operační tlak (Pa)                                           | 101,325 | Hydraulický průměr (m)                                            | 0,085   |
| Gravitace ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )                   | -9,81   | Tepelný tok přes hladinu ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )         | 15000   |
| Termofyzikální vlastnosti oceli                              | $f = T$ | Tepelný tok stěnami MP ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )           | 2500    |

Tab. 2 Termofyzikální vlastnosti oceli definované jako funkce teploty

Tab. 2 Thermo-physical properties of steel defined as a function of temperature

| Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Density ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Specific Heat ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | Thermal Conductivity ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | Viscosity ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
|------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1520                               | 6970                                      | 821                                                               | 35                                                                      | 0.0055                                                        |
| 1510                               | 6978                                      | 817                                                               | 35                                                                      | 0.0056                                                        |
| 1500                               | 6985                                      | 813                                                               | 35                                                                      | 0.0057                                                        |
| 1490                               | 6993                                      | 809                                                               | 35                                                                      | 0.0058                                                        |
| 1480                               | 7001                                      | 805                                                               | 35                                                                      | 0.0059                                                        |

Tab. 3 Parametry výpočtu

Tab. 3 Calculation parameters

| Type of calculation | Type of results      | Turbulent model                                 | Thermo-physical properties ( $f = T$ ) | Free surface        |
|---------------------|----------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|
| Steady              | Velocity/Temperature | Standard k- $\epsilon$ / Standard Wall Function | Piecewise-linear                       | Specified Shear = 0 |
| Transient           | RTD/Inclusions       | Standard k- $\epsilon$ / Standard Wall Function | Piecewise-linear                       | Specified Shear = 0 |

Tab. 4 Průměry simulovaných vměstků a jejich podíl v celkovém objemu vměstků

Tab. 4 Diameters of simulated inclusions and their distribution in the total volume of inclusions

| Diameter of inclusions ( $\mu\text{m}$ ) | Distribution (%) |
|------------------------------------------|------------------|
| 2                                        | 35               |
| 5                                        | 25               |
| 10                                       | 20               |
| 20                                       | 10               |
| 50                                       | 5                |
| 100                                      | 5                |

Tab. 5 Hustota simulovaných vměstků a jejich podíl v celkovém objemu vměstků

Tab. 5 Density of simulated inclusions and their distribution in the total volume of inclusions

| Density of inclusions ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Distribution (%) |
|---------------------------------------------------------|------------------|
| 2,500                                                   | 20               |
| 3,000                                                   | 60               |
| 3,500                                                   | 20               |

## 2. Výsledky a diskuse

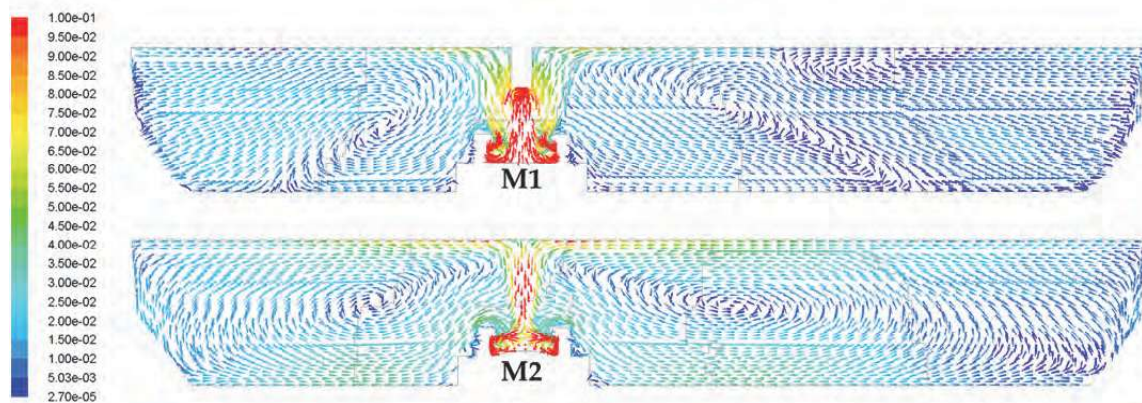
Výsledky numerického modelování predikují rychlostní, teplotní a koncentrační profily za ustáleného proudění oceli v mezipánvi. Velikost pistového, promíchávaného a mrtvého objemu je hodnocena pomocí RTD křivek. Distribuce a vyplouvání vměstků je hodnocena jak retenčními časy a profily distribuce vměstků, tak účinností odstraňování vměstků získanou z datových výpisů výpočtu.

### 2.1 Proudění a teplotní pole

Jak je patrné z podélných a příčných řezů vektorů rychlosti pro konfiguraci M1 na obr. 2 – 4, dopadající proud ze stínicí trubice se odrazí ode dna dopadové desky. Ohraničený dopadový prostor čtvercové dopadové desky M1 usměrní dopadající proud koncentrovaně zpět směrem k hladině. Od hladiny proud směřuje k čelní a zadní stěně

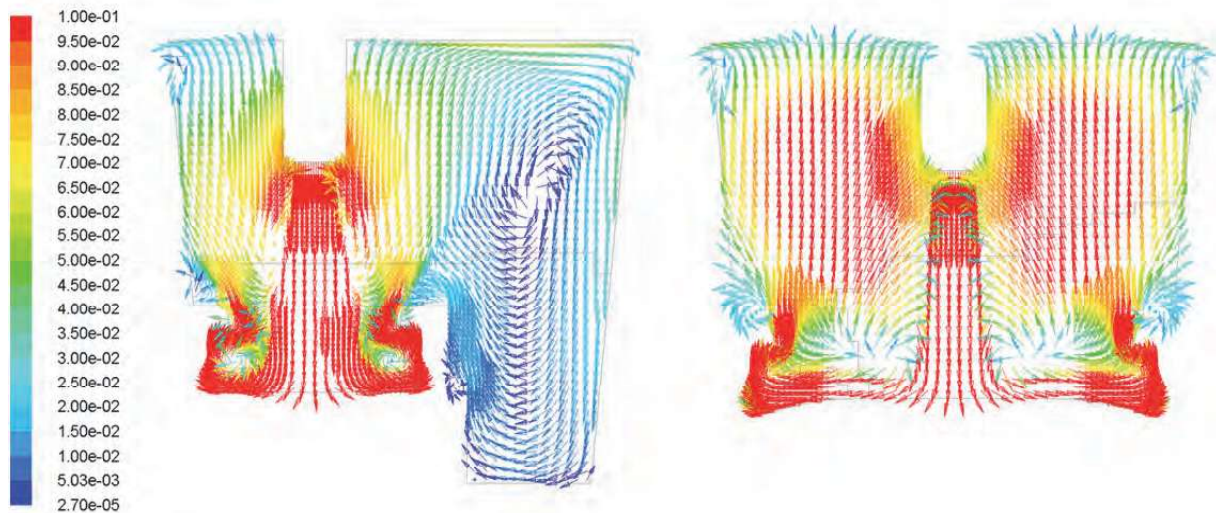
mezipánve. Asymetrické excentrické umístění stínicí trubice a mezera mezi čelní stěnou mezipánve a dopadovou deskou navíc způsobí vznik cirkulační smyčky (jak je naznačeno na obr. 4 pro M1). Po odrazu proudu od čelní stěny mezipánve směřuje dále proud k její zadní stěně, kde se stýká s proudem primárně směřovaným k zadní stěně. Současně při vyplnění čelního prostoru mezipánve začíná ocel proudit do licího proudu č. 3 a 4. Vyšší rychlost proudu u zadní stěny směřuje následně tok oceli podél stěny k výlevce č. 5. Obdobně se chová proud směřující doprava (z čelního pohledu na mezipánve), tedy k výlevkám č. 2 a 1. Delší dráha toku oceli podél zadní stěny mezipánve však vede ke zpomalení rychlosti proudění a v důsledku přítomnosti zátkových tyčí i k ohraničení proudu oceli zejména podél zadní stěny. Za zátkovou tyčí licího proudu č. 1 a u dna za ústím licího proudu č. 2 je patrná stagnující oblast oceli s velmi malou rychlostí proudu.

Aby se zabránilo nepříznivým jevům proudění u konfigurace M1, byla navržena úprava dopadové oblasti, označená jako M2. Jak již bylo v úvodu popisu podmínek výpočtu uvedeno, úprava konfigurace dopadové oblasti spočívala v rozšíření dopadového prostoru desky v příčném pohledu k čelní a zadní stěně mezipánve (a tím vytvoření obdélníkové ohraničené dopadové oblasti) a posunu polohy stínicí trubice tak, aby opět směřovala do středu dopadového místa (obdobně jako u M1). Zatímco u konfigurace M1 dochází po dopadu proudu oceli k nerovnoměrnému rozdělení vstupního toku mezi čelní a zadní částí mezipánve, u konfigurace M2 je dopadající proud po odrazu o dno dopadové desky rovnoměrně směřován k přední i zadní stěně mezipánve a následně vzhůru k hladině. U hladiny se proud dále opět rovnoměrně šíří jak doprava, tak doleva od stínicí trubice, jak je pro M2 na obr. 4 naznačeno šípkami. Větší rychlost proudění u hladiny a blíže k zadní stěně mezipánve směřuje proud od zadní části mezipánve k přední oblasti. Proto nejsou jako první zasaženy výlevky č. 3 a 4, jak tomu bylo u M1, ale výlevky č. 5 a 4. Bezprostředně po zasažení výlevek č. 5 a 4 proudem oceli se dál proud pohybuje k výlevce č. 3 a současně se u zadní stěny mezipánve stáčí už i k výlevce č. 1. Do výlevky č. 3, 1 a 2 proud oceli dorazí prakticky ve shodný okamžik.



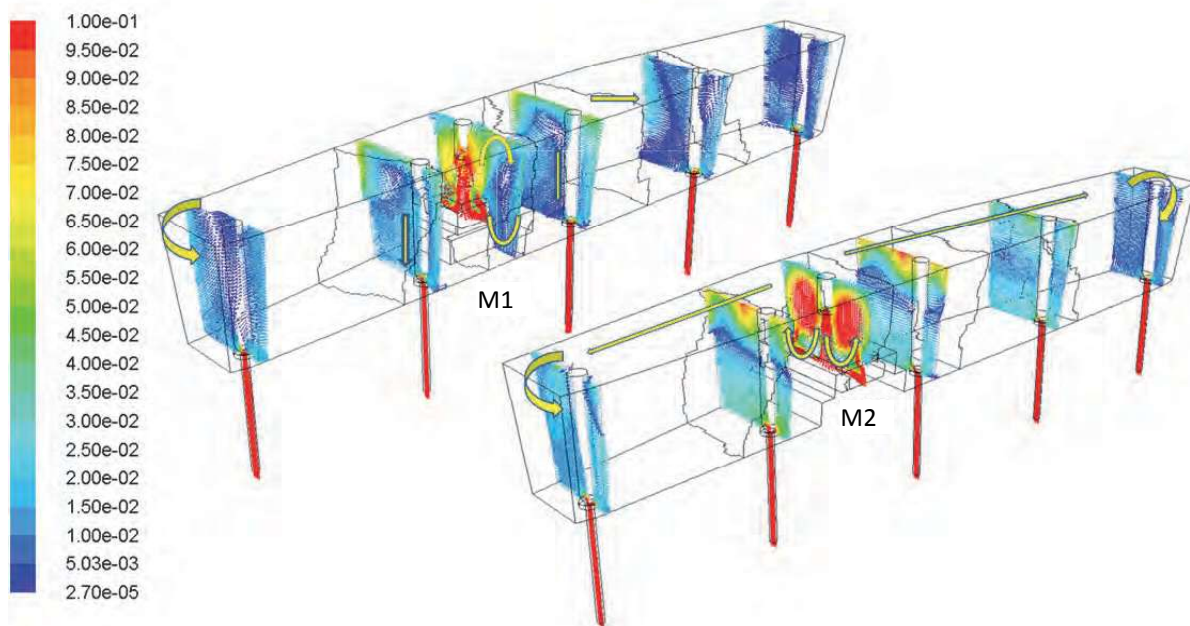
Obr. 2 Srovnání vektorů rychlosti a profilů proudění pro dvě konfigurace mezipánve v podélných řezech středem stínicí trubice

Fig. 2 Comparison of velocity vectors ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) for two tundish configurations in longitudinal sections through the centre of the shroud tube



Obr. 3 Srovnání vektorů rychlosti a profilů proudění pro dvě konfigurace mezipánve v příčných řezech středem stínící trubice (vlevo – M1, vpravo – M2)

Fig. 3 Comparison of velocity vectors ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and flow profiles for two tundish configurations in cross-sections through the centre of the shroud tube (left – M1, right – M2)

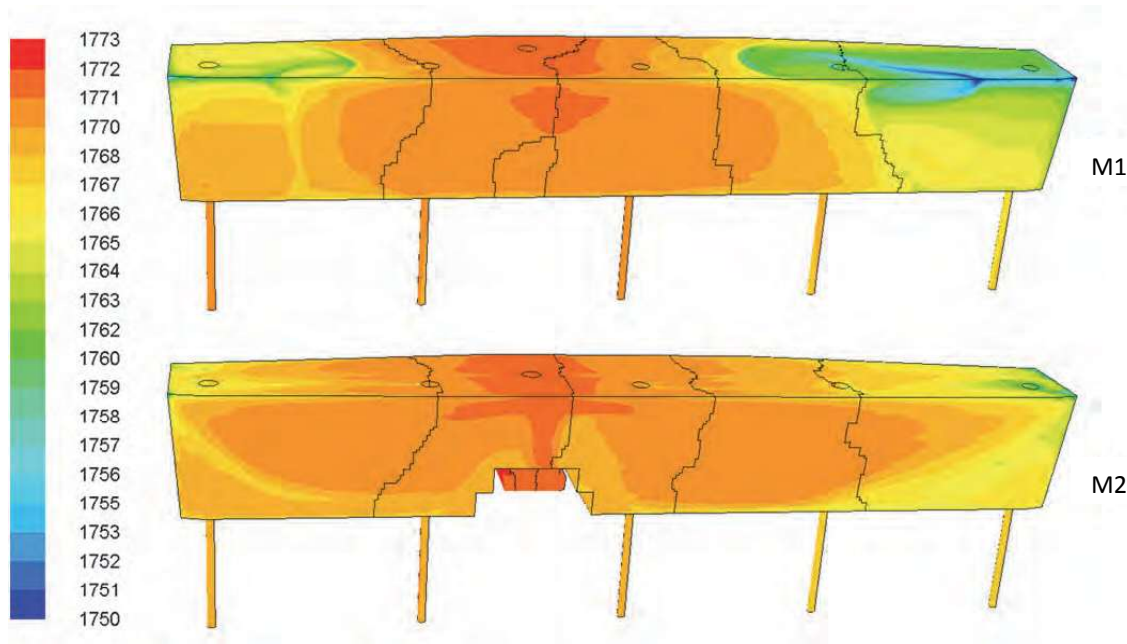


Obr. 4 Srovnání vektorů rychlosti a profilů proudění pro dvě konfigurace mezipánve v příčných řezech středem výlevek

Fig. 4 Comparison of velocity vectors for two tundish configurations in cross-sections through the centre of nozzles

Předpoklad o stagnující oblasti u M1 za licím proudem č. 1 a 2 také potvrzuje výpočet změny teploty v průběhu proudění. Konstantní licí teplota 1773 K klesne v průběhu proudění oceli mezipánví vybavenou dopadovou deskou

M1 lokálně u stěny za licím proudem č. 1 a 2 až takřka o 20 K, jak je patrné z obr. 5. U konfigurace M2 je teplotní pole u stěn mezipánve relativně homogenní a pokles teploty nepřekročí 10 K.



Obr. 5 Srovnání teplotního pole na povrchu modelované oblasti mezipánve pro konfiguraci dopadového místa M1 a M2

Fig. 5 Comparison of a temperature field (in K) on the surface of the modelled area of the tundish for the configuration of the impact area M1 and M2

## 2.2 RTD křivky

Větší proudění oceli v blízkosti hladiny a rovnoměrnější rozdělení taveniny oceli mezi jednotlivé licí proudy u konfigurace M2 dávají tušit výhodnějším podmínkám pro vyplouvání vměstků.

Aby bylo možné kvantifikovat charakter proudění v mezipánvi a zhodnotit efektivitu vyplouvání vměstků do strusky (resp. stržených do licích proudů), je vhodné stanovit tzv. retenční čas, tj. čas setrvání oceli v mezipánvi. Retenční časy jsou přímo závislé zejména na hmotnosti (množství) oceli v mezipánvi, vnitřní konfiguraci mezipánve a na licí rychlosti. Pro reaktory s píستovým tokem je teoretický retenční čas definovaný jako:

$$\bar{\tau} = \frac{V}{Q}, \quad (1)$$

kde  $\bar{\tau}$  je průměrný teoretický retenční čas (s),  $V$  je objem taveniny v reaktoru ( $\text{m}^3$ ) a  $Q$  je objemový průtok taveniny reaktorem ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Pro stanovení retenčních časů ať už ve skutečných provozních podmínkách nebo při fyzikálním či numerickém modelování, většinou používána metoda impuls-odezva či metoda trvalé změny na vstupu do reaktoru a odezvy na výstupu. Princip těchto metod spočívá v injektáži značkovací (stopovací) látky do proudu tekutiny vstupující do reaktoru a vyhodnocování koncentrace či jiné měřitelné veličiny této látky na výstupu z reaktoru. Získaný grafický zápis charakterizující rozložení retenčních dob je označován jako RTD charakteristika (Residence Time Distribution).

Použití metody trvalé změny koncentrace značkovací látky na vstupu do reaktoru se označuje jako Heavisideův

jednotkový skok a znamená, že koncentrace značkovací látky na vstupu skokově vzroste na její maximální hodnotu a setrvá na ní po celou dobu měření, tzn. až do doby, kdy je její maximální koncentrace dosaženo rovněž na výstupu z reaktoru. Výsledkem je tzv. F křivka. Křivka se zobrazuje v bezrozměrových souřadnicích. Koncentrace se vyjadřuje v poměru ke vstupní koncentraci značkovací látky. Čas se vyjadřuje rovněž v bezrozměrovém tvaru, jako poměr času k teoretickému retenčnímu času. Na základě stanovení retenčních časů lze predikovat charakteristické objemy v mezipánvi, tedy objem s píستovým proudem, promíchávaný objem a tzv. mrtvý objem (stagnující oblasti proudění oceli v mezipánvi). Z RTD F křivek lze také stanovit rozsah směšných oblastí během sekvenčního odlévání. Základní tři typy objemů lze kvantifikovat pomocí následujících vztahů.

Podíl objemu s píستovým prouděním:

$$\frac{V_p}{V} = \frac{\tau_{min}}{\bar{\tau}}, \quad (2)$$

kde  $V_p$  je objem s píستovým prouděním ( $\text{m}^3$ ),  $\tau_{min}$  je minimální retenční čas – čas prvního objevení stopovací látky (s).

Pro výpočet podílu mrtvého objemu je uváděn vztah

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{\bar{\tau}_{real}}{\bar{\tau}} \quad (3)$$

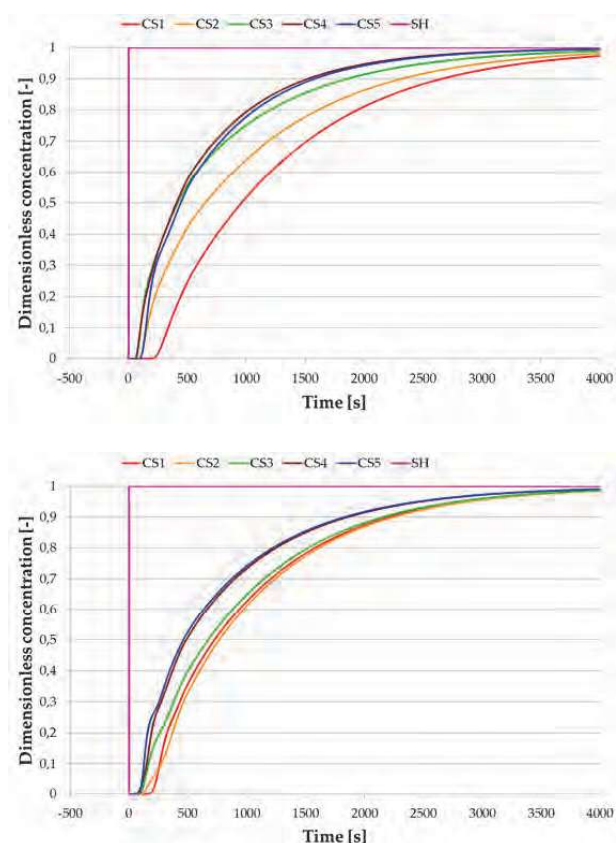
kde  $\bar{\tau}_{real}$  je skutečný průměrný retenční čas tekutiny v reaktoru (s), který lze vyjádřit vztahem:

$$\bar{\tau}_{real} = \frac{\int c \cdot \tau \cdot d\tau}{\int c \cdot d\tau}. \quad (4)$$

V rov. (4)  $c$  je bezrozměrová koncentrace,  $\tau$  je čas (s) a  $d\tau$  je přírůstek času mezi jednotlivými datovými záznamy změny koncentrace. Pro výpočet podílu promíchávaného objemu reaktoru je s ohledem na složitost jeho stanovení nejčastěji používán dopočet do celkového objemu:

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (5)$$

Skoková změna simulující zahájení odlévání nově přiváděné taveniny byla provedena pomocí funkce Species Mass Fraction z hodnoty 0 (původní tavenina) na hodnotu 1 (nová tavenina). Finální RTD křivky získané pro konfiguraci mezipánve s dopadovou deskou M1 a M2 jsou znázorněny na obr. 6. Distribuce stopovací látky v objemu mezipánve v průběhu ustáleného proudění taveniny oceli v mezipánvi vybavené dopadovou deskou M1 a M2 pomocí izoplochy je znázorněna na obr. 7. Porovnání vypočítaných podílů objemů v mezipánvi je uvedeno v tab. 6.



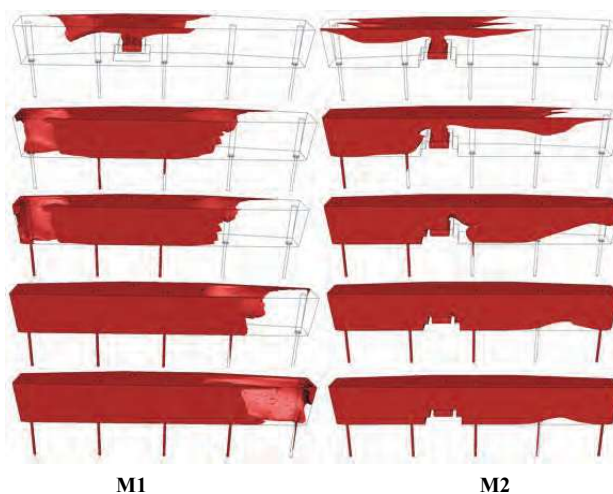
Obr. 6 Srovnání F křivek při monitorování změny koncentrace stopující látky při průchodu mezipánvi během ustáleného proudění oceli (nahore M1, dole M2)

Fig. 6 Comparison of F curves in monitoring of the change in tracer concentration during the passage through a tundish during the steady steel flow (up – M1, down – M2)

Jak je patrné z průběhu RTD křivek na obr. 6 a monitorování změny koncentrace stopovací látky pomocí isoplochy na obr. 7, u konfigurace M1 je potvrzen tok oceli ze stínicí trubice primárně k výlevkám č. 3 a 4. Minimální retenční čas stopovací látky činí pro oba lící proudy

přibližně 70 s. Tomuto času odpovídá vzestup bezrozměrové koncentrace stopovací látky na 0,01 (a následně dále prudce k 0,3). Nejdelsí minimální retenční čas stopovací látky je predikován u lícího proudu č. 1 a činí 240 s. Oproti tomu byly u varianty s konfigurací M2 detekovány pro lící proudy č. 5 až 3 minimální retenční časy okolo 97 s a pro lící proudy č. 1 a 2 v průměru okolo 160 s. Proudění v mezipánvi vybavené dopadovou deskou M2 je tedy rovnoměrnější.

K zajištění dostatečného času pro vyplouvání vměstků je třeba stanovit nejen retenční časy, ale i podíly jednotlivých proudících, promíchávaných či stagnujících objemů v mezipánvi. Průměrný teoretický retenční čas pro mezipánve bez ohledu na typ dopadového místa činí 812 s. Průměrný skutečný retenční čas se u mezipánve s dopadovou deskou M1 pohybuje okolo 631 s. U mezipánve s M2 vzrostl skutečný průměrný retenční čas až na 755 s. Průměrný podíl píستového objemu v mezipánvi vybavené dopadovou deskou M1 činí cca 6,8 % a podíl mrtvého objemu až celých 22,0 %. Při použití dopadové desky s M2 vzrostl píستový objem na 8,2%, ale mrtvý objem klesl až o 15 % na pouhých 7 %. Větší využití pracovního objemu a píستového toku oceli v mezipánvi s konfigurací M2 by mělo vést nejen k zajištění lepších podmínek pro vyplouvání vměstků, ale v případě sekvenčního odlévání oceli i k menšímu rozsahu směšné oblasti u plynule litých předliték.



Obr. 7 Distribuce stopovací látky v objemu mezipánve v průběhu ustáleného proudění taveniny oceli v mezipánvi vybavené dopadovou deskou M1 a dopadovou deskou M2

Fig. 7 Distribution of the tracer in the volume of a tundish during the steady flow of steel melt in the tundish equipped with impact pad M1 and impact pad M2

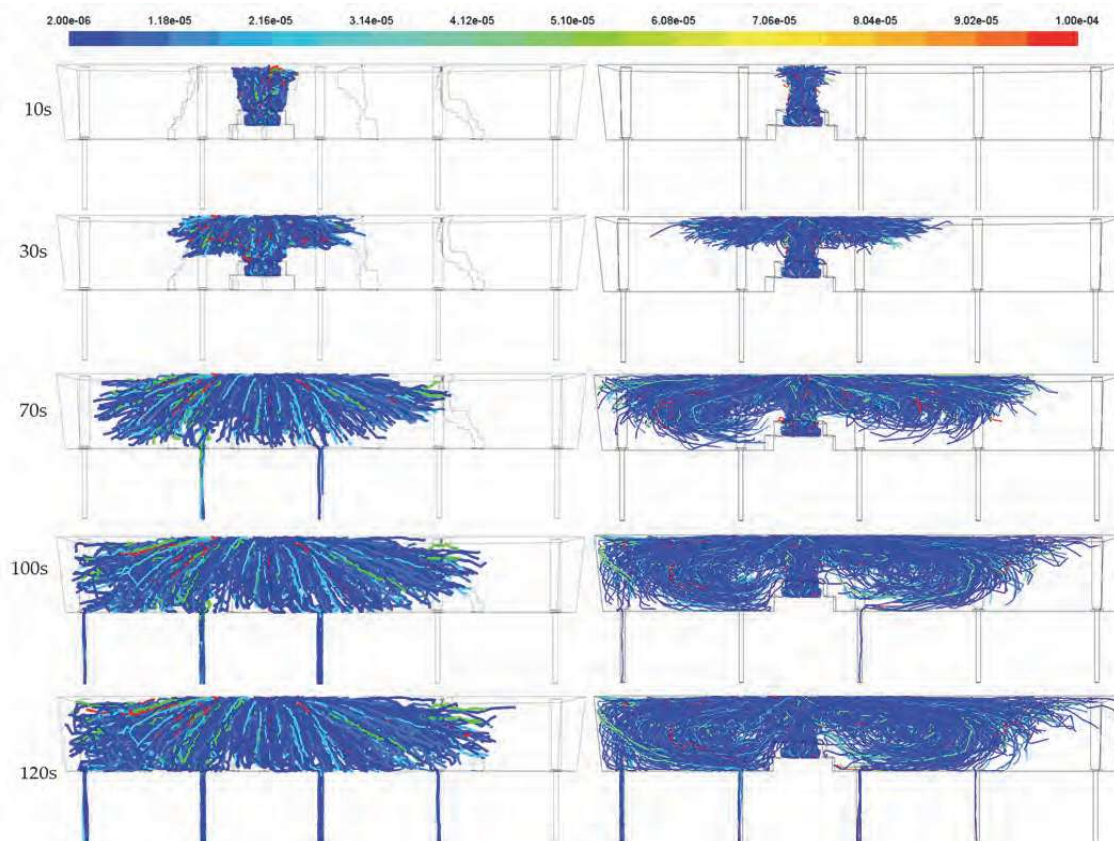
### 2.3 Distribuce a trajektorie vměstků

Podíly distribuce vměstků byly shrnuty výše v tab. 4 a 5. Při modelování vyplouvání vměstků se uvažovalo s velikostí od 2 do 100  $\mu\text{m}$  a hustotou vměstků 2500 až 3500  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Vměstky byly distribuovány přes stínicí trubici. Pokud se vměstek v průběhu proudění dotkl stěny mezipánve, byl zpět odražen do objemu taveniny. Při odrazu vměstku o stěnu se ale předpokládalo utlumení

rychlosti vměstku. Pokud se vměstek dotkl hladiny nebo se dostal do oblasti výlevek, bylo uvažováno s jeho opuštěním výpočetní domény.

Trajektorie vměstků vypočítaná pro všechny podíly uvažovaných vměstků dle jejich velikosti i hustoty je znázorněna pro vybrané časové okamžiky na obr. 8. Jak je z tohoto obrázku patrné, největší podíl při modelování vyplouvání vměstků představují částice o velikosti 2 až 10  $\mu\text{m}$  a s hustotou 3000  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . V malém zastoupení

jsou modelovány ale i vměstky o velikosti 20 až 100  $\mu\text{m}$ . Trajektorie pohybu vměstků koresponduje s charakterem proudění taveniny oceli v mezipánvi i monitorovanou změnou koncentrace stopovacích látek. Pokud srovnáme proud vměstků v čase 100 s, pak u varianty s M1 jsou vměstky strženy už do výlevek č. 3 až 5, zatímco u varianty s M2 se vměstky teprve pozvolna začínají objevovat u výlevek č. 5 a 3. Z trajektorie vměstků je u M2 také patrná delší dráha proudění vměstků v blízkosti hladiny až k výlevce č. 1.



Obr. 8 Srovnání trajektorie vměstků pro konfiguraci mezipánve s M1 (vlevo) a M2 (vpravo)  
Fig. 8 Comparison of inclusions trajectory for tundish configuration with M1(left) and M2 (right)

## 2.4 Retenční časy a efektivita vyplouvání vměstků

Primárně byla numerická analýza vyplouvání vměstků provedena pro distribuci vměstků v proudu o jedné velikosti a hustotě. To znamená, že ve vstupujícím proudu oceli přes stínící trubici byl modelován pouze 100% podíl jedné frakce. Z výsledků flotace nekovových vměstků je možné predikovat procentuální podíl vměstků odstraněných do strusky anebo sražených do lícího proudu. Proto byly následně výsledky zpracovány do distribučních křivek efektivit vyplouvání vměstků, které jsou znázorněny na obr. 9. Retenční časy vměstků odstraněných na hladině do strusky a účinnost odstranění vměstků hladinou jsou uvedeny v tab. 6.

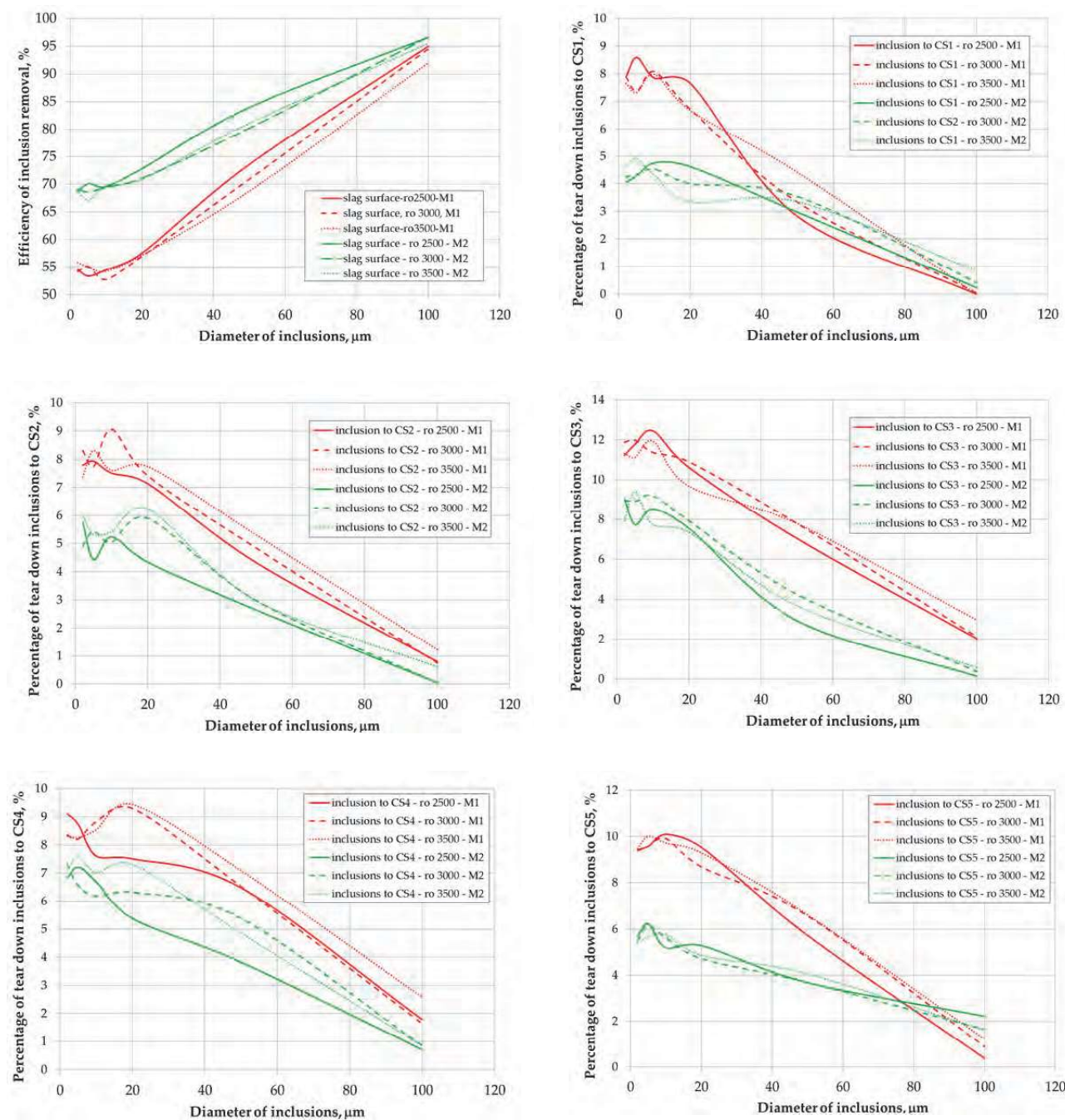
Následně byla provedena numerická analýza vyplouvání vměstků, kdy byly v proudu oceli ze stínící trubice

uvažovány všechny podíly a hustoty vměstků najednou s procentuální distribucí dle tab. 4 a 5. Výsledné vypočítané procentuální podíly vměstků odstraněných hladinou a stržených do jednotlivých výlevek pro varianty s M1 a M2 jsou uvedeny v tab. 7.

Z výsledků výpočtu vyplouvání vměstků hladinou a stržených do výlevek pro modelované verze M1 a M2 lze vyvodit, že u varianty s M1 se účinnost odstranění vměstků hladinou do jejich velikosti 20  $\mu\text{m}$  pohybuje pouze okolo 55 %, zatímco u varianty s M2 se účinnost odstranění vměstků hladinou zvýšila až na cca 70 %, tj o 15% více. Zbýlých 45 % vměstků u M1, resp. 30 % vměstků u M2 je strženo do jednotlivých výlevek lících proudů mezipánve. Vměstky o velikosti 50 až 100  $\mu\text{m}$  jsou u všech modelovaných verzí odstraněny průměrně z 80 % hladinou.

Minimální účinnost odstranění vměstků hladinou vykazuje varianta s M1 pro vměstky o hustotě  $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a průměru  $10 \mu\text{m}$ , a to pouhých 52 %. U verze M2 je přibližně 70 % vměstků odstraněno hladinou a distribuce vměstků do licích proudů činí průměrně okolo 5 %. Uvažuje se však s tím, že podíl těchto velkých vměstků činí pouze 5 % z celkového množství vměstků v objemu taveniny proudící mezipánví. Se zvětšujícím se průměrem vměstků se zlepšují podmínky pro jejich zachycení struskou.

Při zastoupení všech vměstků distribuovaných při výpočtu vyplouvání vměstků najednou proudem oceli ze stínící trubice činí účinnost odstranění vměstků hladinou u varianty s M1 po zaokrouhlení 57 %, resp. u M2 72 %. Ukazuje se tedy, že úprava dopadové desky na konfiguraci M2 výrazně přispěla k usměrněnému proudění oceli v mezipánví a zvýšení účinnosti vyplouvání vměstků, a tedy i následně jejich absorpce krycí struskou.



Obr. 9 Srovnání podílů vměstků odstraněných do strusky a stržených do licích proudů pro frakce zastoupené v licím proudu oceli přes stínící trubici 100% podílem

Fig. 9 Comparison of the proportions of inclusions removed into the slag and brought down into casting strands for the fractions represented in the steel casting strand through a shroud tube by a 100% share

Tab. 6 Srovnání retenčních časů vměstků proudících v mezipánvi a účinnost jejich odstranění hladinou pro jednotlivé frakce zastoupené v licím proudu oceli přes stínici trubici 100% podílem

Tab. 6 Comparison of residence times of inclusions flow in tundish and efficiency of their removal through the melt surface for individual fractions represented in the steel casting strand through a shroud tube by a 100% share

| Inclusion diameter (μm) | The density of inclusion (kg·m <sup>-3</sup> ) | Min. Res. Time (s) |     | Max. Resid. Time (s) |        | Avg. Res. Time (s) |       | Inclusions Removal Efficiency (%) |             |
|-------------------------|------------------------------------------------|--------------------|-----|----------------------|--------|--------------------|-------|-----------------------------------|-------------|
|                         |                                                | M1                 | M2  | M1                   | M2     | M1                 | M2    | M1                                | M2          |
| 2                       | 2500                                           | 7,6                | 6,5 | 3220,0               | 2874,0 | 233,2              | 217,8 | 54,5                              | 68,6        |
| 2                       | 3000                                           | 7,6                | 6,8 | 3726,0               | 3232,0 | 246,6              | 228,3 | 54,2                              | 69,1        |
| 2                       | 3500                                           | 8,0                | 6,8 | 2927,0               | 2386,0 | 234,2              | 228,4 | 55,9                              | 68,9        |
| 5                       | 2500                                           | 7,6                | 6,5 | 3012,0               | 2723,0 | 223,7              | 237,1 | 53,4                              | 70,1        |
| 5                       | 3000                                           | 7,6                | 7,0 | 3090,0               | 2940,0 | 238,7              | 209,8 | 55,1                              | 68,6        |
| 5                       | 3500                                           | 8,0                | 6,9 | 2701,0               | 1925,0 | 215,3              | 201,0 | 54,9                              | 67,1        |
| 10                      | 2500                                           | 7,6                | 7,1 | 2745,0               | 4398,0 | 234,2              | 209,6 | 54,5                              | 69,6        |
| 10                      | 3000                                           | 7,6                | 6,4 | 3494,0               | 2882,0 | 222,7              | 208,8 | <b>52,8</b>                       | 69,4        |
| 10                      | 3500                                           | 8,0                | 6,5 | 3494,0               | 2641,0 | 229,3              | 222,4 | 54,2                              | 69,8        |
| 20                      | 2500                                           | 7,6                | 6,4 | 3465,0               | 2537,0 | 230,5              | 222,2 | 57,6                              | 72,8        |
| 20                      | 3000                                           | 7,6                | 7,4 | 3912,0               | 2301,0 | 234,5              | 212,4 | 56,9                              | 71,1        |
| 20                      | 3500                                           | 8,0                | 6,7 | 4332,0               | 2212,0 | 246,8              | 216,3 | 57,2                              | 70,9        |
| 50                      | 2500                                           | 7,5                | 6,4 | 2224,0               | 1961,0 | 198,1              | 173,1 | 73,6                              | 83,9        |
| 50                      | 3000                                           | 7,4                | 7,1 | 2059,0               | 2371,0 | 199,3              | 167,9 | 70,9                              | 80,2        |
| 50                      | 3500                                           | 8,0                | 6,6 | 2348,0               | 2547,0 | 221,9              | 186,3 | 68,8                              | 81,1        |
| 100                     | 2500                                           | 6,9                | 6,6 | 1024,0               | 1498,0 | 78,4               | 71,7  | 95,0                              | <b>96,7</b> |
| 100                     | 3000                                           | 7,1                | 5,5 | 978,3                | 1303,0 | 87,8               | 83,6  | 94,6                              | <b>96,7</b> |
| 100                     | 3500                                           | 7,0                | 6,6 | 1423,0               | 1458,0 | 102,6              | 88,4  | 92,0                              | 95,6        |

Tab. 7 Srovnání procentuálních podílů vměstků odstraněných hladinou a stržených do jednotlivých výlevků pro varianty s M1 a M2 a s uvažováním distribuce vměstků všech velikostí a hustot dle tab. 4 a 5.

Tab. 7 Comparison of percentage proportions of inclusions removed through the surface and brought down into individual nozzles of casting strands for the variants with M1 and M2 and considering the distribution of inclusions of all sizes and densities as shown in Tab. 4 and 5.

|    | CS1  | CS2  | CS3   | CS4  | CS5  | The removal efficiency of inclusions through the surface |
|----|------|------|-------|------|------|----------------------------------------------------------|
| M1 | 7,46 | 7,48 | 10,70 | 8,35 | 9,20 | <b>56,80</b>                                             |
| M2 | 3,98 | 5,11 | 7,62  | 6,31 | 5,32 | <b>71,66</b>                                             |

## Závěr

Článek pojednává o numerickém modelování vyplouvání nekovových vměstků z oceli za ustáleného proudění oceli pětisproudou asymetrickou mezipánvi. Vyplouvání vměstků bylo numericky analyzováno pro dvě navržené konfigurace dopadového místa: M1 – vyvýšená dutá tvárnice se čtvercovým průřezem, která je ohraničená stěnami tak, aby byl dopadající proud oceli ze stínici trubice usměrňován k hladině taveniny oceli v mezipánvi, a M2 – dutá tvárnice s obdélníkovým průřezem, která je rozšířená na celý rozměr centrální části dna mezipánve. Před zahájením analýzy vyplouvání vměstků bylo vypočítáno ustálené proudění oceli v mezipánvi včetně odvodu tepla stěnami a hladinou mezipánve. Bylo provedeno hodnocení charakteru proudění pomocí RTD F křivek. Konfigurace mezipánve vybavené dopadovou deskou označenou jako M2 vedlo k získání většího podílu pístového toku oceli a lepší účinnosti odstraňování vměstků do strusky, a to až více než o 15 % v porovnání s použitím dopadové desky M1.

## Poděkování

Tento článek byl vytvořen díky projektu č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008399 z finančních fondů EU a ČR poskytovaných "Operačním programem Výzkum, vývoj a vzdělávání, Výzvy 02\_17\_049 Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI, řídicí orgán: Česká Republika - Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy".

## Literatura

- [1] Worldsteel Association. Steel Statistical Yearbook 2018. Available online: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY\\_2018.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY_2018.pdf) (accessed on 9 September 2019).
- [2] MICHALEK, K.: *Využití fyzikálního a numerického modelování pro optimalizaci metalurgických procesů*. 1. vyd. (Učební text) Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-861-5.
- [3] MAZUMDAR, D. et al.: *Modeling of Steelmaking Processes*. CRP Press, 2010. 463 p., ISBN 978-1-4200-6243-4.
- [4] BULKO, B., MOLNÁR, M., DEMETER, P., BARICOVÁ, D., PRIBULOVÁ, A., FUTAS, P. Study of the Influence of Intermix Conditions on Steel Cleanliness. *METALS*, 8 (2018) 852, 1-9. DOI: 10.3390/met8100852.

- [5] MERDER, T. Numerical Simulation of Liquid Flow and Mixing Steel in Multi-strands Tundish. *The Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 55 (2012) 561-566.
- [6] MORALES, R. D., BARRETO, J., De J., LOPEZ-RAMIREZ, S., PALAFOX-RAMOS, J., ZACHARIAS, D. Melt Flow Control in a Multistrand Tundish Using a Turbulence Inhibitor. *Metall Mater Trans.*, 31B (2000) 1505-1515.
- [7] BRAUN, A., WARZECHA, M., PFEIFER, H. Numerical and Physical Modeling of Steel Flow in a Two-strand Tundish for Different Casting Conditions. *Metall Mater Trans.*, 41B (2010) 549-559.
- [8] SIDDIQUI, M. I. H., KIM, M. H. Two-phase Numerical Modeling of Grade Intermixing in a Steelmaking Tundish. *Metals*, 9 (2019) 40; doi:10.3390/met9010040.
- [9] SOWA, L. Numerical Modelling of Fluid Flow and Thermal Phenomena in the Tundish of CSC Machine. *Archives of Foundry Engineering*, 14 (2014) 103-106.
- [10] LOPEZ-Ramirez, S., BARRETO, J. De J., PALAFOX-RAMOS, J., MORALES, R. D., ZACHARIAS, D. Modeling Study of the Influence of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion and Inclusion Trajectories in Tundishes. *Metall Mater Trans.*, 32B (2001) 615-627.
- [11] WARZECHA, M., HUNTY, A. M., WARZECHA, P., MERDER, T., JEDRYSIK, B. Methodology of Inclusions Removing from Steel Flowing through the Tundish. *Metallurgija*, 56 (2017) 291-293.
- [12] TKADLEČKOVÁ, M., WALEK, J., MICHALEK, K., HUCZALA, T. Numerical Analysis of RTD Curves and Inclusions Removal in a Multi-Strand Asymmetric Tundish with Different Configuration of Impact Pad. *METALS*. 10 (2020) 7, DOI: 10.3390/met10070849.

## Třinecké železárny loni hospodařily se ziskem 610 milionů korun

*www.trz.cz, Třinec, Tisková zpráva 1.7.2020*

Se ziskem 610 mil. korun uzavřely hospodaření roku 2019 Třinecké železárny. Jde o nejnižší hospodářský výsledek od ekonomické krize v roce 2008. Výsledek hospodaření schválila v pondělí 29. června valná hromada společnosti. Tržby za prodej výrobků a služeb roku 2019 dosáhly hodnoty 38,405 mld. korun. V roce 2018 to bylo 40,496 miliard. Třinecké železárny (TŽ) v roce 2019 vyrobily 2 508 kilotun oceli, tedy o 75 kilotun méně než v roce předcházejícím.

Výsledek hospodaření firmy odráží složitou tržní situaci druhé poloviny loňského roku. Provázel ji zejména tlak na ceny ocelových produktů vlivem silného konkurenčního boje na evropském trhu. Zásadní vliv měl také růst cen vstupních surovin a energií. Evropská ekonomika se v loňském roce potýkala s důsledky obchodní války mezi USA a Čínou, přílivu levné oceli z třetích zemí a ochabující poptávce v automobilovém průmyslu. V neposlední řadě se na negativním růstu podepsal dramatický růst ceny emisní povolenky.

### Nejprodávanejším výrobkem zůstává drát

Prodeje Třineckých železáren táhl nejvíce tradičně drát, jehož se firmě podařilo prodat 991 kilotun, z nichž téměř 70 % směřovalo do zahraničí. Objem prodeje v sortimentu tyčové a profilové oceli dosáhl 523 kt. Díky investicím do nových zušlechťovacích a úpravářských kapacit jde o výrobky s vyšší přidanou hodnotou, které nacházejí využití hlavně v automobilovém a strojírenském průmyslu. Objem prodeje polotovarů přesáhl 360 kt, kolejnice a železniční příslušenství loni firma prodala v objemu přesahujícím 260 kilotun.

### Investice směřují do automatizace a ekologie

Třinecká huť loni proinvestovala 2,195 mld. korun. Celkové náklady na probíhající ekologické investiční akce v roce 2019 činily 547 mil. korun, směřovaly zejména do dvou projektů odprášení zařízení pro přípravu a zpracování surovin. Třinecké železárny plánovaly v letošním roce proinvestovat 1,4 mld. korun. S ohledem na negativní dopady pandemie koronaviru a ekonomických důsledků bude muset huť i tento plán přehodnotit.

Největší započatou investicí letošního roku je stavba nové loupací linky za 715 mil. korun. V investicích se firma bude orientovat i na problematiku snižování emisí CO<sub>2</sub>. Huť je připravena transformovat a inovovat výrobu tak, aby produkce v co největší míře směřovala do ekologických projektů. V oblasti odprášení železárny dosáhly maxima možného, když díky masivním investicím snížily emise prachu na 128 tun v roce 2019. Emise CO<sub>2</sub> hodlá do roku 2030 snížit o čtvrtinu.

Letošní rok však bude obtížný. Před pandemií se počítalo s vyšší výrobou surové oceli než v roce minulém. Současný odhad ekonomického výsledku především s ohledem na prodejní ceny na trhu ale není nijak příznivý. Na hospodaření bude mít vliv slabý růst evropské ekonomiky, nejistoty spojené se změnami v automobilovém průmyslu, nedostatečná ochrana proti přílivu levné oceli do Evropy tzv. safeguards i dopady pandemie koronaviru.

Roční výroba Třineckých železáren se pohybuje zhruba okolo 2,5 mil. tun oceli. Mezi hlavní produkty patří především dlouhé válcované výrobky – válcovaný drát, tvarová ocel, speciální tyčová ocel, tažená ocel, kolejnice, široká ocel, bezešvé trubky a hutní polotovary. Třinecké železárny jsou v posledních 10 letech největším výrobcem surové oceli v České republice. Za celé své působení v historii od roku 1939 vyrobily Třinecké železárny více než 180 mil. tun oceli. Zaměstnávají přes 7000 lidí.