

Recenzované vědecké články

Fyzikální modelování proudění oceli v asymetrické pětiproudé mezipánvi na základě analýzy RTD křivek

Physical Modeling of the Steel Flow in an Asymmetric Five-Strand Tundish Based on the Analysis of the RTD Curves

Ing. Josef Walek¹; prof. Ing. Karel Michalek, CSc.¹; doc. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.¹; Ing. Jiří Cupek¹; Ing. Tomáš Huczala, Ph.D.²

¹ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálůvě-technologická, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

² TRINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Česká republika

Předkládaný článek se zabývá využitím fyzikálního modelování pro studium charakteru proudění oceli při různých stavech vnitřního uspořádání asymetrické pětiproudé mezipánve pro plynule odlévané předlitky. Pro účely fyzikálního modelování byl použit model z plexiskla v měřítku 1:4 k provozní mezipánvi. Součástí tohoto fyzikálního modelu byly také dvě lící pánve, stínící trubice, zátkové tyče, ponorné výlevky a krystalizátory. Tento příspěvek je zaměřen na vyhodnocení laboratorních experimentů získaných pomocí metody fyzikálního modelování. Pozornost je zaměřena na posouzení relevantních parametrů majících vliv na charakter proudění oceli v mezipánvi – tvar dopadového místa, vnitřní výška dopadového místa a vzdálenost ústí stínící trubice ode dna dopadového místa. Předběžné výsledky fyzikálního modelování ukazují, že optimálních výsledků charakteru proudění oceli v mezipánvi bylo dosaženo při použití konfigurace M3-30-131.

Klíčová slova: fyzikální modelování; mezipánve; dopadové místo; proudění oceli; retenční čas

The presented paper deals with the use of physical modelling to study the character of steel flow in the asymmetric five-strand tundish.

The flow parameters should be chosen so that duration of stay of each element of the melt in the tundish is as long as possible. The time, during which each part of the steel remains in the tundish, is determined as the residence time. The residence time layout is referred to as the RTD (Residence Time Distribution) characteristic. The steel flow in the tundish is associated with the scattering of residence times, especially in multi-strand tundishes. The aim is therefore to achieve a character of the flow that is characterized by the smallest possible scattering of residence times related to the individual casting strands; at the same time that their values must be as high as possible. Optimization of the character of the steel flow in the tundish is difficult under operating conditions. Therefore, in laboratory conditions so-called modelling is used, where the original prototype is replaced by a model. In the case of physical modelling, a method is used, in which the real system is replaced by a tangible physical model, which is as close as possible to the behavior of the real system. The basis of physical modelling consists in the targeted utilization of the similarities of the processes that take place within the actual device and its model. For physical modelling, a plexiglass model on a scale of 1:4 is used for the operating tundish. The physical model consists of two ladles, ladle shroud, stopper rods, SEN and moulds. The character of the steel flow in the tundish is simulated at physical modelling by the model liquid (water). This paper is aimed at the evaluation of laboratory experiments obtained by the method of physical modelling. Attention is focused on the assessment of relevant parameters for the character of the steel flow in the tundish – shape of the impact pad, inner height of the impact pad and height of ladle shroud from the bottom of the impact pad. The preliminary results of physical modelling show that optimal results of the character of the steel flow are achieved by using the configuration of M3-30-131. And the results from numerical modelling are also used to verify the results from physical modelling.

Key words: physical modelling; tundish; impact pad; steel flow; residence time

Současné trendy poukazují na neustále se zvyšující požadavky na kvalitu vyráběné oceli. Plynulé odlévání oceli je technologický postup, při kterém je tekutá ocel průběžně zpracovávána na předlitek, který může mít různé tvary dle požadavků pro následné tváření. Plynulé odlévání oceli z velké části nahrazuje starší metodu výroby oceli ingotovou cestou a v současnosti se touto metodou odlévá celosvětově až 95 % oceli. V České republice je technologií plynulého odlévání vyrobeno až 92 % ocelových předlitků [1–3].

Jedním z nejdůležitějších technologických uzlů zařízení plynulého odlévání oceli je mezipánev, která je zařazena mezi lící pánvi a krystalizátorem, protože ovlivňuje stabilitu procesu liti a kvalitu předlitku. Úloha mezipánve spočívá hlavně v rovnoměrném rozdělení oceli do jednotlivých lících proudů a slouží jako zásobník oceli při sekvenčním odlévání. Poskytuje totiž dostatečný prostor k výměně lící pánve, aniž by musel být předčasně přerušen proud oceli do krystalizátoru [4–7].

Mezipánev lze využít jako průtočný reaktor s mícháním lázně a z metalurgického hlediska představuje jednu z posledních možností, kde lze podstatně ovlivnit výslednou čistotu oceli. Z hlediska zlepšování čistoty oceli je nezbytné co nejvíce zvýšit dobu setrvání oceli v mezipánvi, která se určuje tzv. retenčním časem, a současně minimalizovat rozptyly retenčních časů na jednotlivých výlevkách. Zvýšení retenčního času a současná úprava charakteru proudění by měla přispívat k vyplouvání nekových vměstků do strusky [8–11].

Pro odlévání požadované kvality je nezbytné optimalizovat proudění oceli v mezipánvi. V provozních podmínkách je sledování charakteru proudění oceli v mezipánvi velice obtížné a z ekonomických důvodů nevhodné. Proto se v laboratorních podmínkách využívá tzv. modelování, kde dochází k nahrazení původního díla modelem. Technologie modelování se dělí na dvě základní metody: numerické a fyzikální modelování. Při numerickém modelování je proces nahrazen matematickým modelem tvořeným soustavou parciálních diferenciálních rovnic. V případě fyzikálního modelování se jedná o metodu, při níž se nahrazuje reálný systém hmotným fyzikálním modelem, jenž se svým chováním co nejvíce blíží chování reálného provozního systému. Hlavní podstata fyzikálního modelování spočívá v cíleném využití podobnosti dějů, které probíhají na skutečném zařízení a jeho modelu. Při této metodě má jak dílo, tak model stejnou fyzikální podstatu. Proudění tekutiny v technologickém procesu je tedy modelováno opět prouděním tekutiny v modelu, ale v určitém měřítku délek, rychlostí objemových průtoků, viskozit atd. Podmínkou přenosu výsledků z modelu na dílo je podobnost procesů probíhajících v modelu a díle. Jednou z výhod fyzikálního modelování je možnost vizualizace procesů, které přispívají k pochopení procesů probíhajících v reálných provozních systémech. Z výsledků dosažených na modelu lze predikovat chování reálného provozního systému při různých změnách procesu [2, 12].

Cílem tohoto článku je seznámit s hodnocením metodických laboratorních experimentů zaměřených na zkoumání vlivu jednotlivých parametrů na charakter proudění oceli v mezipánvi při fyzikálním modelování.

1. Experimentální podmínky fyzikálního modelování

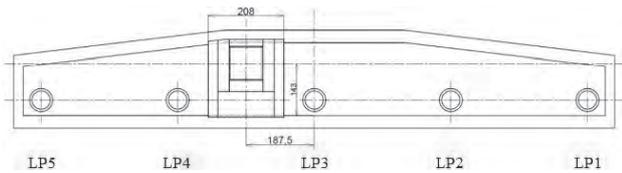
Experimenty zkoumající charakter proudění oceli v mezipánvi byly prováděny v laboratoři fyzikálního a numerického modelování Katedry metalurgie a slévárenství. Tato laboratoř se nachází v prostorách Podnikatelského inkubátoru v komplexu kampusu VŠB-TU Ostrava. Fyzikální model byl vyroben z průhledného organického skla (plexiskla) v geometrickém měřítku 1:4 k provozní mezipánvi na odlévání bloků. Součástí tohoto fyzikálního modelu byly také dvě lící pánve, které zajišťovaly přítok vody o teplotě 20 °C do mezipánve přes stínící trubici. Každý lící proud byl vybaven zátkovou tyčí pro případnou regulaci průtoku z mezipánve do krystalizátorů. Lící proudy byly vybaveny náporovými ponornými výlevkami, kde byla rovněž simulována hladina oceli v krystalizátorech.

Sestava fyzikálního modelu je zobrazena na obr. 1. Na obr. 2 a 3 je půdorys vnitřního uspořádání modelu mezipánve s polohou dopadového místa.



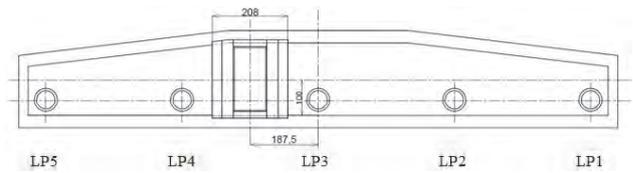
Obr. 1 Sestava fyzikálního modelu pětiproudé mezipánve s příslušenstvím

Fig. 1 The physical model assembly of five-strand tundish with accessories



Obr. 2 Pohled na vnitřní uspořádání modelu mezipánve s polohou dopadového místa M1

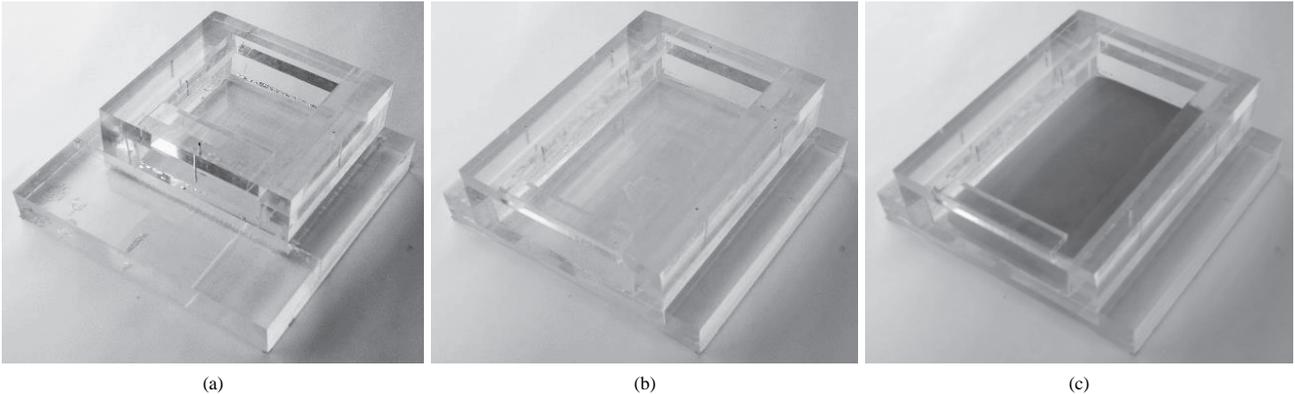
Fig. 2 View of the internal arrangement of the tundish model with the position of the impact pad M1



Obr. 3 Pohled na vnitřní uspořádání modelu mezipánve s polohou dopadového místa M2 a M3

Fig. 3 View of the internal arrangement of the tundish model with the position of the impact pad M2 and M3

Pro modelování byly použity tři varianty dopadových míst, označených jako M1, M2 a M3 (obr. 4).

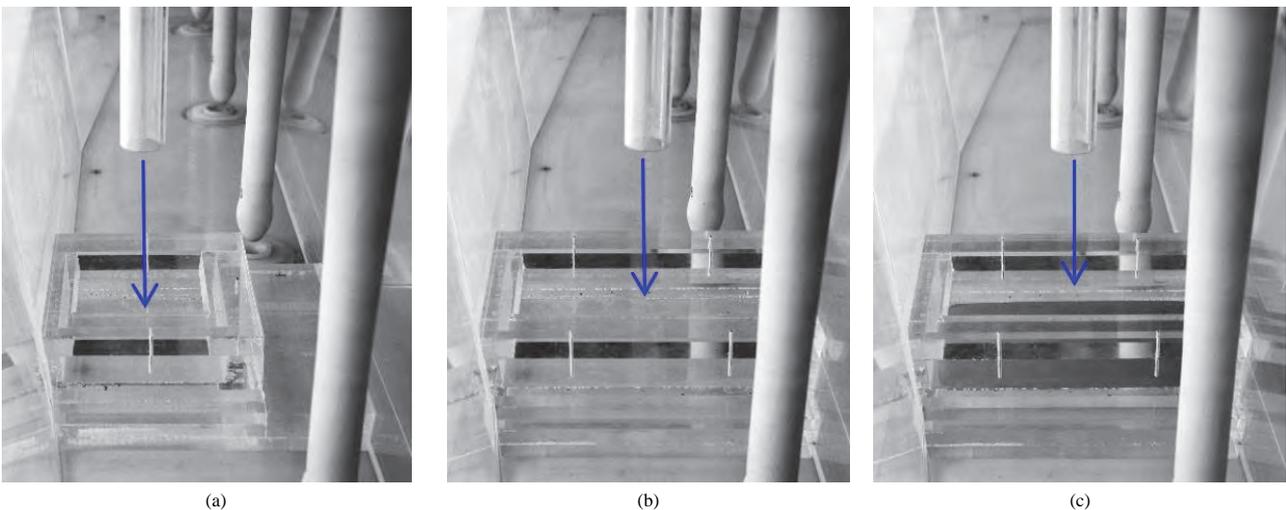


Obr. 4 Varianty dopadových míst použitých pro modelování: (a) M1; (b) M2; (c) M3

Fig. 4 The variants of the impact pad used for modelling: (a) M1; (b) M2; (c) M3

Dopadové místo M1 je základní čtvercová varianta, umístěná u zadní stěny mezipánve. Dopadové místo M2 je obdélníková varianta, rozšířená přes celou šířku mezipánve a dopadové místo M3 je varianta M2 s vypouklým dnem.

Jednotlivá dopadová místa byla umístěna mezi třetím a čtvrtým licím proudem. Stínící trubice byla vždy umístěna nad geometrickým středem daného dopadového místa (obr. 5).



Obr. 5 Poloha stínící trubice vůči dopadovému místu: (a) M1; (b) M2; (c) M3

Fig. 5 Position of the ladle shroud towards in respect to the impact pad: (a) M1; (b) M2; (c) M3

Fyzikální model byl vybaven měřicí ústřednou k měření vodivosti a teploty na modelu a regulačním systémem modelu mezipánve, dále objemovými průtokoměry, vodivostními a teplotními sondami, které byly umístěny v stínící trubici a každé ponorné výlevce.

Charakter proudění oceli v mezipánvi byl na fyzikálním modelu simulován modelovou kapalinou (vodou). Hlavní výhodou použití tohoto média spočívá v nízkých nákladech, dobré dostupnosti a v jejich fyzikálních vlastnostech. Kinematickou viskozitu tekuté oceli a vody lze považovat za velmi blízkou. Základní parametry díla a modelu jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Základní parametry díla a modelu

Tab. 1 Basic parameters of the prototype and the model

Značka	Vysvětlení	Rozměr	Hodnota	
			Provozní mezipánve	Model 1:4
V	objem lázně v mezipánvi	[m ³]	4,64	37,12 · 10 ⁻³
m	hmotnost lázně v mezipánvi	[kg]	32480	37,04
T_k	průměrná teplota lázně	[K]	1520 + 273	20 + 273
r_k	průměrná hustota lázně	[kg · m ⁻³]	7000	998
n_k	kinematická viskozita lázně	[m ² · s ⁻¹]	0,913 · 10 ⁻⁶	1,02 · 10 ⁻⁶
$D_{E,k}$	difúzní koeficient složky E v lázni	[m ² · s ⁻¹]	7,2 · 10 ⁻⁹	1,4 · 10 ⁻⁸
α_k	součinitel teplotní vodivosti lázně	[m ² · s ⁻¹]	1,86 · 10 ⁻⁶	0,14 · 10 ⁻⁶
s_k	mezifázové napětí lázeň-plyn	[kg · s ⁻²]	1,69	0,09
g	tíhové zrychlení	[m · s ⁻²]	9,81	9,81
p_v	tlak nad hladinou lázně	[kg · m ⁻¹ · s ⁻²]	98,06 · 10 ³	98,06 · 10 ³
E	složka lázně	[-]	C	KCl
L_1	vnitřní délka mezipánve v úrovni dna	[m]	6,387	1,597
L_2	vzdálenost mezi ponornými výlevkami	[m]	1,5	0,375
D_1	vnitřní průměr stínící trubice	[m]	0,085	0,021
H_1	výška lázně odpovídající hmotnosti m	[m]	0,925	0,231
H_2	vzdálenost ústí ST ode dna ULP	[m]	0,525	0,131
			0,585	0,146
H_3	ponor ST pod hladinou lázně	[m]	0,300	0,075
			0,235	0,059
$Q_{m,k}$	hmotnostní průtok lázně do mezipánve	[kg · s ⁻¹]	46,32	0,207
			[kg · min ⁻¹]	2779
$Q_{v,k}$	objemový průtok lázně do mezipánve	[m ³ · s ⁻¹]	0,00662	0,000207
			[l · min ⁻¹]	397
$Q_{v,kr}$	objemový průtok na každé z výlevek	[l · min ⁻¹]	79,4	2,48

Laboratorní experimenty byly na základě identity Froudeho kritéria prováděny v souladu s teorií podobnosti mezi modelem a dílem. Nutné je dodržení zejména geometrické podobnosti díla s modelem a dynamické podobnosti proudění tekutiny v díle a modelu. Před každým experimentem bylo provedeno nastavení příslušné konfigurace mezipánve, tzn. vložení příslušného dopadového místa do mezipánve, nastavení výšky a polohy stínící trubice vůči dopadovému místu. Následně byl zahájen samotný experiment a do stínící trubice injektován impuls 50 ml vodného roztoku KCl. Reakce na impuls byla sledována na výlevkách, na kterých byla monitorována změna vodivosti a rovněž i teploty.

Pro zajištění reprodukovatelnosti výsledků byl každý pokus opakován třikrát. Pokud byl mezi výsledky zaznamenán nesoulad, byl proveden ještě další, čtvrtý pokus. Pro další hodnocení byl pak proveden aritmetický průměr ze všech shodných měření.

Hlavním cílem fyzikálního modelování bylo získat poznatky o vlivu relevantních parametrů na charakter proudění oceli v mezipánvi (tab. 2). Při experimentech byly cíleně měněny tyto parametry:

- tvar dopadového místa,
- vnitřní výška dopadového místa,

- vzdálenost ústí stínící trubice ode dna dopadového místa.

Tab. 2 Přehled provedených experimentů fyzikálního modelování

Tab. 2 Overview of the performed experiments of physical modelling

Typ dopadového místa		M1		M2		M3	
Vnitřní výška DM	[mm]	30	40	30	40	30	40
Výška ústí ST ode dna DM		131	131	131	131	131	131
		146	146	146	146	146	146

2. Výsledky experimentu

Vyhodnocení experimentů bylo provedeno ve dvou fázích. V první fázi byly výsledky porovnány na základě analýzy dat tvořících RTD křivky a v druhé, vizualizační fázi byly pořízeny fotografie, kde byl studován charakter proudění v mezipánvi pomocí injektáže barviva.

V rámci diskuse výsledků jsou všechny konfigurace uváděny zkráceně. Například konfigurace s použitím dopadového místa M1 s vnitřní výškou dopadového místa 30 mm a nastavenou výškou stínící trubice 131 mm nad dnem dopadového místa bude zkráceně uvedena jako M1-30-131.

2.1 Porovnání výsledků experimentu na základě analýzy RTD křivek

Parametry proudění by měly být zvoleny tak, aby doba každého elementu taveniny v mezipánvi byla co nejdéší. Tato doba, po kterou setrvává určitá část oceli v mezipánvi, se označuje jako retenční čas. Rozložení retenčních časů je označováno jako RTD (Residence Time Distribution) charakteristika [2].

Nejběžnější metodou pro stanovení retenčních časů je tzv. vodivostní metoda, která využívá rozdílu vodivosti kapaliny. Jako indikační médium se používají slabé vodné roztoky KCl nebo NaCl, jež se vyznačují iontovou vodivostí. Vodivost je měřena vodivostní sondou na vstupu i výstupech z mezipánve. Nejčastěji se využívá metoda dle Diracova impulsu, která spočívá v injektáži stopovací látky a její odezvě na výlevkách. Výsledkem je v tomto případě tzv. C křivka [2].

Další možnou metodou je tzv. Heavisideův jednotkový skok, který spočívá v trvalé změně vstupní koncentrace a měření po dobu získání vstupní koncentrace na všech výlevkách. Výsledkem odezvy na Heavisideův jednotkový skok je tzv. F křivka [2].

Teoretický průměrný retenční čas oceli v mezipánvi se vypočítá dle vztahu [2]:

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

kde: $\bar{\tau}$ - teoretický průměrný retenční čas, [s];
 V - objem oceli v mezipánvi, [m³];
 Q_v - objemový průtok oceli, [m³·s⁻¹].

Rov. (1) předpokládá ustálený stav, kdy objemový průtok oceli vstupující do mezipánve je stejný jako objemový průtok oceli z mezipánve vystupující.

Proudění oceli v mezipánvi je spojeno s rozptylem retenčních časů, a to zvláště u víceprůdných mezipánví. Snahou je proto dosáhnout takového charakteru proudění, který se vyznačuje co nejmenšími rozptyly retenčních časů vztahovaných k jednotlivým licím proudům a současně aby jejich hodnoty byly co nejvyšší [2].

Pro hodnocení proudění lázně v mezipánvi se používají skutečné retenční časy určené podle rov. (2):

$$\bar{\tau}_{skut} = \frac{\int c \cdot \tau \cdot d\tau}{\int c \cdot d\tau}. \quad (2)$$

Stanovuje se minimální retenční čas, který je definován jako minimální doba, za kterou se značkovací látka injektovaná do stínící trubice objeví na výlevce, a maximální retenční čas, což je doba dosažení maximální výchylky sledované veličiny na výstupu z mezipánve. Z naměřených hodnot se rovněž vyhodnocuje tzv. střední retenční čas, který charakterizuje časové rozložení měřené veličiny, např. koncentrace či vodivosti.

Získané retenční časy se mohou použít pro výpočet parametrů, které dále upřesňují charakter proudění v mezipánvi. Využívá se rozdělení celkového objemu mezipánve na tři části, které jsou prezentovány jako promíchávaný

objem, objem s píستovým tokem oceli a mrtvý objem a které mají rozdílný charakter proudění.

Promíchávaný objem mezipánve úzce souvisí s její vtokovou částí, ve které kinetická energie licího proudu z pánve zajišťuje intenzivní promíchávání oceli v této oblasti. S ohledem na složitost stanovení podílu velikosti promíchávaného objemu se nejčastěji používá dopočet do celkového objemu. Zde platí [2]:

$$\frac{V_m}{V} + \frac{V_p}{V} + \frac{V_d}{V} = 1. \quad (3)$$

Na tento promíchávaný objem navazuje oblast proudění oceli s píستovým tokem. V tomto objemu je průtok lázně rovnoměrný, kdy žádný element taveniny nepředbíhá jiný element. V této oblasti má proudění oceli již laminární charakter, a jsou zde proto vytvořeny příznivější podmínky pro vyplouvání vměstků. Podíl objemu s píستovým tokem lze vypočítat podle vztahu [2]:

$$\frac{V_p}{V} = \frac{\tau_{min}}{\bar{\tau}}. \quad (4)$$

V mezipánvi existují také oblasti, v nichž ocel proudí velmi pomalu. Tyto oblasti představují tzv. mrtvý objem mezipánve. Jedná se o oblasti, kde tavenina stráví delší čas, než je dvojnásobek průměrného retenčního času. Existence mrtvých objemů může výrazně snížit aktivní objem mezipánve, a tím zkrátit retenční časy. V těchto oblastech navíc existuje nebezpečí pro lokální tuhnutí oceli. Z toho důvodu je žádoucí minimalizovat velikost mrtvého objemu v mezipánvi. Pro výpočet podílu mrtvého objemu se uvádí vztah [2]:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{\bar{\tau}_{skut}}{\bar{\tau}}. \quad (5)$$

Krajním teoretickým případem je úplné promíchávání celého objemu mezipánve, kdy je maximální koncentrace stopovací látky na výstupu pozorována v čase jejího vstřiku na vstupu. Toto chování je typické pro tzv. zkratové proudění, kdy se čerstvě přiváděná ocel prakticky okamžitě dostane k výstupu z mezipánve, což je velmi nepříznivé zejména s ohledem na čistotu oceli.

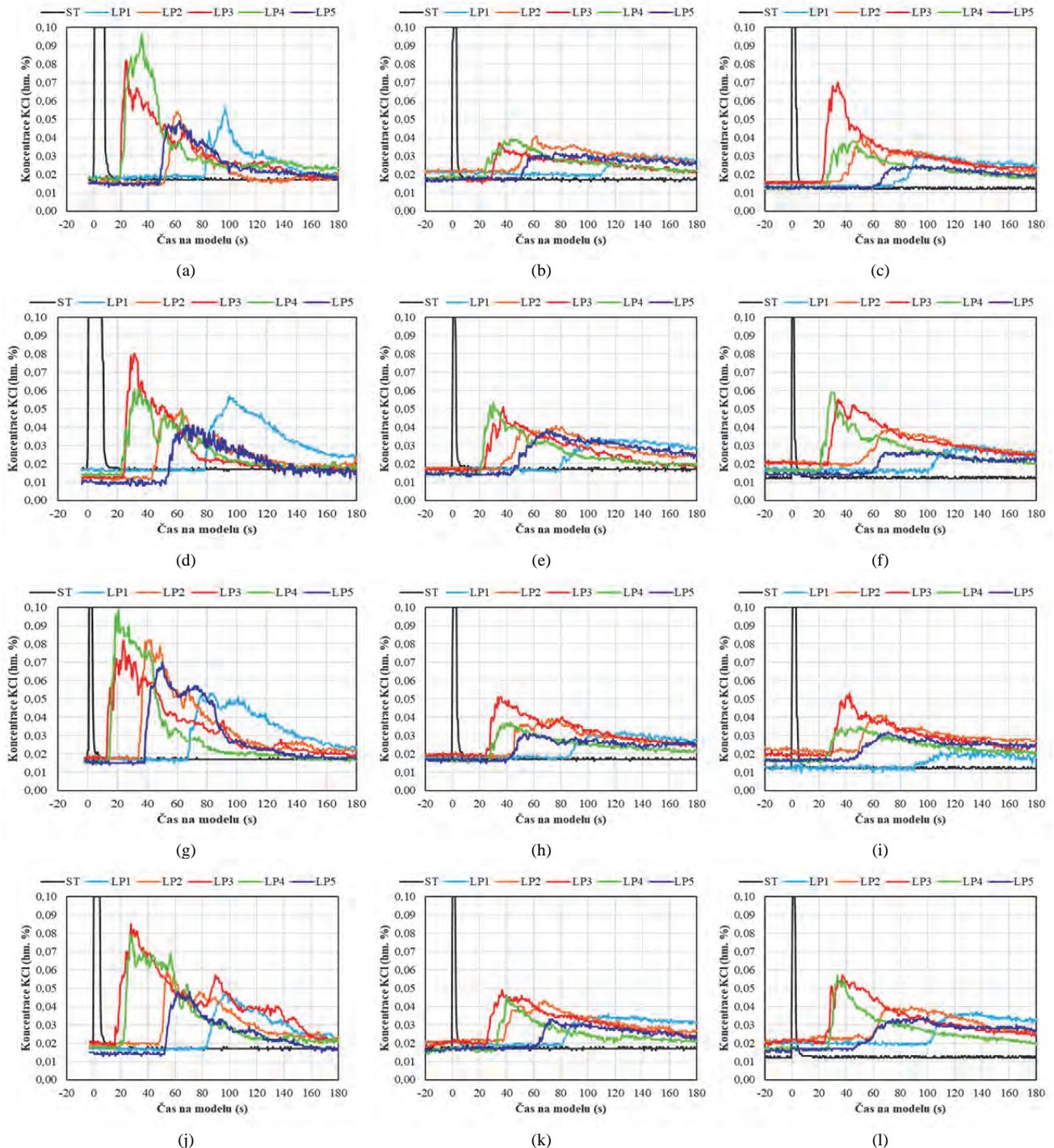
Z hlediska zajištění různých funkcí mezipánve lze požadavky na velikost jednotlivých oblastí shrnout takto:

- podle potřeb zachovat určitý podíl promíchávaného objemu oceli v mezipánvi,
- zajistit dostatečný podíl objemu oceli proudící píستovým tokem tak, aby v této oblasti ocel vytékající libovolnou výlevkou pobyla dostatečný čas,
- minimalizovat mrtvé objemy.

2.1.1 Stanovení minimálních a maximálních retenčních časů

Protože vtok do mezipánve je orientován mezi licími proudy LP3 a LP4, je pro eliminaci zkratového proudění zapotřebí dosáhnout nejvyšších možných minimálních a maximálních retenčních časů u těchto výlevek.

Na obr. 6 jsou ukázky RTD křivek pro jednotlivé konfigurace.



Obr. 6 RTD křivky pro jednotlivé konfigurace: (a) M1-30-131; (b) M2-30-131; (c) M3-30-131; (d) M1-40-131; (e) M2-40-131; (f) M3-40-131; (g) M1-30-146; (h) M2-30-146; (i) M3-30-146; (j) M1-40-146; (k) M2-40-146; (l) M3-40-146
Fig. 6 The RTD curves for the individual configurations: (a) M1-30-131; (b) M2-30-131; (c) M3-30-131; (d) M1-40-131; (e) M2-40-131; (f) M3-40-131; (g) M1-30-146; (h) M2-30-146; (i) M3-30-146; (j) M1-40-146; (k) M2-40-146; (l) M3-40-146

Z RTD křivek byly odečteny minimální a maximální retenční časy. Rovněž byl stanoven průměrný minimální a maximální retenční čas a variabilita retenčních časů (tab. 3 a 4). Grafické porovnání minimálních a maximálních retenčních časů je uvedeno na obr. 7 a 8.

V případě dopadového místa M1 byly detekovány poměrně nízké hodnoty minimálních retenčních časů, a to zejména u licích proudů LP3 a LP4, kde se nejhůře proje-

vila konfigurace M1-30-146 s $\tau_{\min} = 13$ a 16 s. Výrazně lépe se projevila konfigurace M1-40-131, kde byl u LP3 a LP4 dosažen $\tau_{\min} = 22,2$ a 21 s, za současně nízké míry variability všech licích proudů $v = 53,6\%$. Obdobný výsledek se projevil i v případě τ_{\max} .

V případě použití dopadového místa M1 je patrný vliv vnitřní výšky dopadového místa, kde se jednoznačně povedlo zvýšit retenční časy na LP3 a LP4 s použitím

vyššího dopadového místa 40 mm oproti 30 mm. Patrný je i vliv výšky umístění stínící trubice, který se pozitivně projevil při nižší výšce ST 131 mm nad dnem dopadového místa.

V případě použití dopadového místa M2 došlo oproti M1 ke značnému zlepšení retenčních časů, kde se hodnoty τ_{\min} u LP3 a LP4 zvýšily na 21,2 až 26,3 s. Nejlépe se projevila konfigurace M2-40-146, kde byly dosaženy téměř nejvyšší τ_{\min} na LP3 a LP4 (24,8 a 25,2 s) a doprovázeny téměř nejnižší mírou variability všech licích proudů $v = 60,0 \%$.

Z retenčních časů se patrně projevil vliv výšky dopadového místa, kde byly nejlepší výsledky dosaženy s použitím vyšší varianty 40 mm. Vliv výšky umístění stínící trubice není jednoznačný.

Oproti dopadovému místu M2 se v případě M3 povedlo minimální a maximální retenční časy na licích proudech LP3 a LP4 mírně zvýšit. Až na výjimku u konfigurace M3-40-131 byly dosaženy poměrně dlouhé minimální

retenční časy LP3 a LP4, a to $\tau_{\min} = 24,7$ až 28 s. Rovněž v případě dopadového místa M3 se povedlo oproti M2 téměř u všech konfigurací snížit míru variability všech licích proudů.

Nejlépe se projevila konfigurace M3-30-131, kde byl dosažen téměř shodný minimální retenční čas na LP3 a LP4 $\tau_{\min} = 25,2$ a 24,8 s. Tato konfigurace byla současně doprovázena nízkou mírou variability $v = 58,1 \%$. Výraznější rozdíly se projevily v případě maximálních retenčních časů, kde byl dosažen τ_{\max} na LP3 a LP4 43,8 a 38,2 s, které byly nejdelší ze všech ostatních konfigurací. Rovněž u maximálních retenčních časů byla dosažena téměř nejnižší míra variability ze všech konfigurací $v = 43,9 \%$.

Z hlediska retenčních časů se projevil vliv výšky dopadového místa, kde při nižší výšce dopadového místa 30 mm byly dosaženy delší τ_{\min} i τ_{\max} doprovázené nižší mírou variability. Vliv výšky stínící trubice se neprojevil jednoznačně.

Tab. 3 Minimální retenční časy pro všechny hodnocené konfigurace

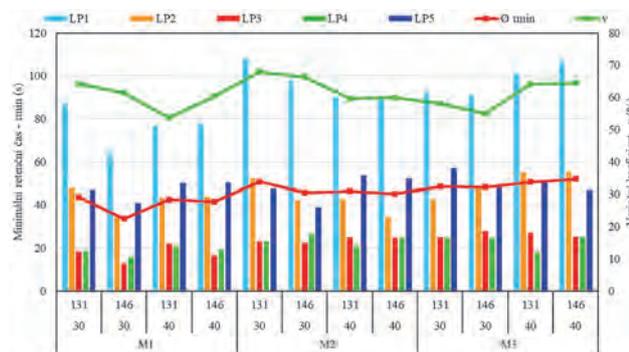
Tab. 3 Minimal residence times for all evaluated configurations

Typ DM	Výška DM	Výška ST	τ_{\min}						
	[mm]		LP1 [s]	LP2 [s]	LP3 [s]	LP4 [s]	LP5 [s]	\emptyset [s]	v [%]
M1	30	131	87,0	47,7	18,5	18,8	47,0	43,8	64,1
	30	146	64,0	34,5	13,0	16,0	41,0	33,7	61,4
	40	131	76,5	43,3	22,2	21,0	50,2	42,6	53,6
	40	146	77,8	43,8	16,5	19,3	50,5	41,6	60,4
M2	30	131	107,7	52,2	23,3	23,2	47,7	50,8	67,9
	30	146	97,8	42,5	22,7	26,3	39,2	45,7	66,3
	40	131	90,0	42,7	25,0	21,2	53,5	46,5	59,5
	40	146	89,5	34,5	24,8	25,2	52,2	45,2	60,0
M3	30	131	92,8	42,6	25,2	24,8	57,2	48,5	58,1
	30	146	91,2	48,2	28,0	24,7	49,0	48,2	55,0
	40	131	101,5	55,0	27,2	18,2	51,0	50,6	64,2
	40	146	107,0	55,1	25,3	25,3	47,0	52,0	64,4

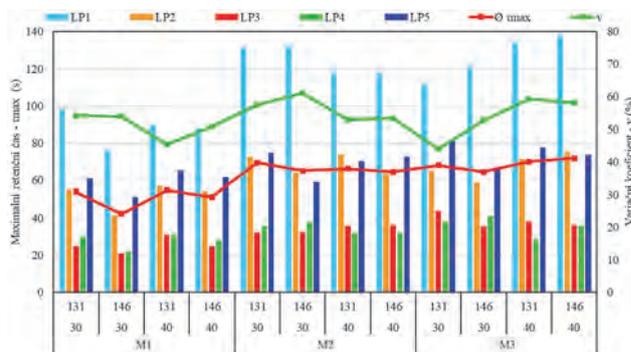
Tab. 4 Maximální retenční časy pro všechny hodnocené konfigurace

Tab. 4 Maximal residence times for all evaluated configurations

Typ DM	Výška DM	Výška ST	τ_{\max}						
	[mm]		LP1 [s]	LP2 [s]	LP3 [s]	LP4 [s]	LP5 [s]	\emptyset [s]	v [%]
M1	30	131	98,2	55,3	24,8	30,2	61,2	53,9	54,2
	30	146	75,8	41,5	20,8	22,0	51,3	42,3	53,9
	40	131	89,8	57,0	31,0	31,0	65,3	54,8	45,4
	40	146	88,0	54,3	24,8	27,8	61,5	51,3	50,7
M2	30	131	131,2	72,7	32,3	35,8	74,8	69,4	57,5
	30	146	132,0	64,0	32,5	37,7	59,3	65,1	61,1
	40	131	118,5	73,8	35,8	32,0	70,3	66,1	53,0
	40	146	117,7	63,3	36,3	32,3	72,7	64,5	53,3
M3	30	131	111,7	65,2	43,8	38,2	81,3	68,0	43,9
	30	146	121,2	58,9	35,7	41,0	65,8	64,5	52,7
	40	131	134,2	71,3	38,0	29,0	77,7	70,0	59,2
	40	146	138,2	75,0	36,3	35,8	73,5	71,8	58,2



Obr. 7 Minimální retenční časy pro všechny hodnocené konfigurace
Fig. 7 Minimal residence times for all evaluated configurations



Obr. 8 Maximální retenční časy pro všechny hodnocené konfigurace
Fig. 8 Maximal residence times for all evaluated configurations

2.1.2 Stanovení jednotlivých charakteristických objemů v mezipánvi

Následně byl hodnocen charakter proudění na základě výpočtů zastoupení jednotlivých charakteristických objemů v mezipánvi. Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 9.

Hodnocení charakteristických objemů v mezipánvi při použití dopadového místa M1 ukázalo, že nejlépe se projevila konfigurace M1-30-131, kde bylo dosaženo nejnižšího zastoupení mrtvého objemu $V_d/V_{celk} = 32,83\%$ a současně nejvyšší poměr mezi pístovým a mrtvým objemem $V_p/V_d = 0,74$.

Z porovnání hodnot charakteristických objemů a retenčních časů vyplynulo, že pro dopadové místo M1 lze nejlepších výsledků dosáhnout s nižší polohou ST 131 mm. Vliv výšky dopadového místa v tomto případě není jednoznačný.

Při porovnání zastoupení objemů se nejlépe projevila konfigurace M2-30-131, kde byl dosažen nejnižší mrtvý objem $V_d/V_{celk} = 14,36\%$ a současně nejvyšší poměr mezi pístovým a promíchávaným objemem $V_p/V_d = 1,97$.

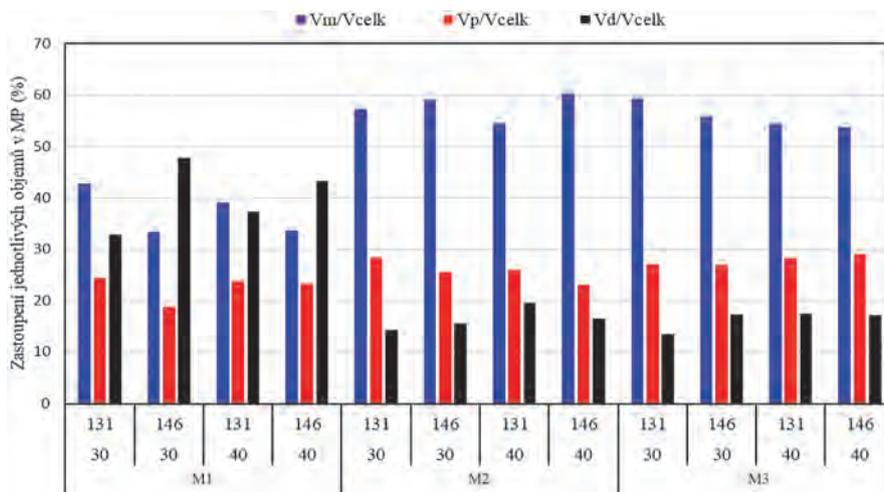
Ze zastoupení charakteristických objemů je patrný vliv výšky dopadového místa, kde se u konfigurací s nižší výškou dopadového místa 30 mm povedlo snížit mrtvý objem a zvýšit poměr mezi pístovým a mrtvým objemem, oproti konfiguracím s výškou dopadového místa 40 mm. Vliv výšky stínící trubice v tomto případě není jednoznačný.

Použití dopadového místa M2 tedy přineslo výrazné zlepšení v porovnání s konfiguracemi s dopadovým místem M1, a to zejména v prodloužení minimálních retenčních časů, což mělo i pozitivní vliv na zvýšení hodnoty pístového proudění a snížení mrtvého objemu.

Tab. 5 Zastoupení průměrných charakteristických objemů v mezipánvi

Tab. 5 Representation of average characteristic volumes in the tundish

Typ DM	Výška DM	Výška ST	V_p/V_{celk}	V_d/V_{celk}	V_m/V_{celk}	V_p/V_d
	[mm]					
M1	30	131	24,41	32,83	42,75	0,74
	30	146	18,78	47,92	33,30	0,39
	40	131	23,75	37,27	38,98	0,64
	40	146	23,18	43,26	33,56	0,54
M2	30	131	28,30	14,36	57,34	1,97
	30	146	25,46	15,53	59,01	1,64
	40	131	25,88	19,54	54,58	1,32
	40	146	23,13	16,50	60,38	1,40
M3	30	131	27,04	13,55	59,41	1,99
	30	146	26,86	17,27	55,87	1,56
	40	131	28,18	17,47	54,36	1,61
	40	146	28,95	17,25	53,80	1,68



Obr. 9 Zastoupení průměrných charakteristických objemů v mezipánvi
Fig. 9 Representation of average characteristic volumes in the tundish

Z grafů na obr. 7–9 vyplývá, že nejlepší výsledek byl dosažen u konfigurace M3-30-131, a to s nejnižším podílem mrtvého objemu ze všech konfigurací $V_d/V_{celk} = 13,55\%$. Rovněž byl dosažen nejvyšší poměr mezi pístovým a mrtvým objemem ze všech konfigurací $V_p/V_d = 1,99$.

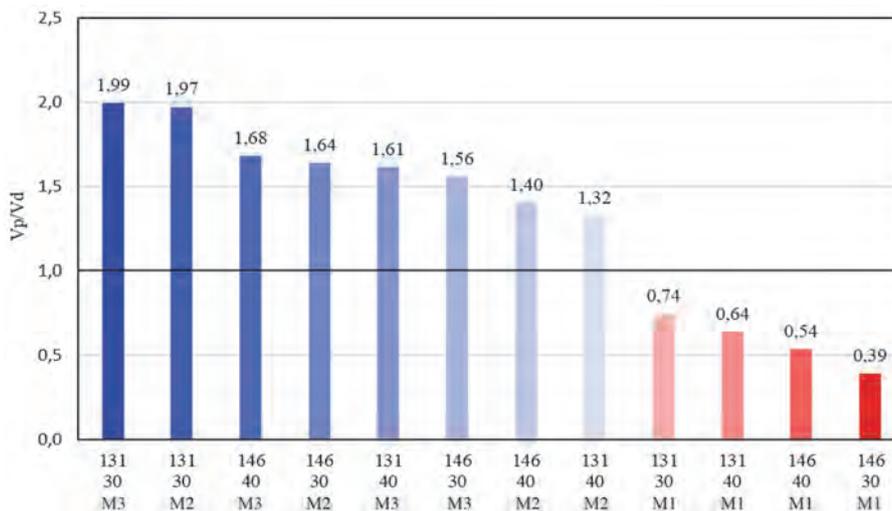
V případě dopadového místa M3 a zastoupení charakteristických objemů se jednoznačně neprojevil vliv výšky stínící trubice ani vliv výšky dopadového místa.

2.1.3 Srovnání výsledků experimentu

Z hlediska zastoupení jednotlivých charakteristických objemů v mezipánvi se poměr mezi pístovým a mrtvým

objemem prokázal jako vypovídající ukazatel charakteru proudění. Poměr V_p/V_d pro všechny hodnocené konfigurace je zobrazen na obr. 10.

Nejlépe se projevila konfigurace M3-30-131 s poměrem $V_p/V_d = 1,99$, mírně horší výsledky byly dosaženy u M2-30-131 $V_p/V_d = 1,97$. Nejhůře se projevilo dopadové místo M1, kde všechny konfigurace dosahovaly hodnot V_p/V_d výrazně pod 1, což znamená, že hodnota mrtvého objemu je vyšší než hodnota pístového objemu. S použitím každého dopadového místa se projevila nejlépe právě varianta s výškou dopadového místa 30 mm a s výškou ústí ST 131 mm nad dnem dopadového místa.



Obr. 10 Poměr mezi pístovým a mrtvým objemem pro všechny jednotlivé konfigurace
Fig. 10 Ratio of plug volume to dead volume for all the individual configurations

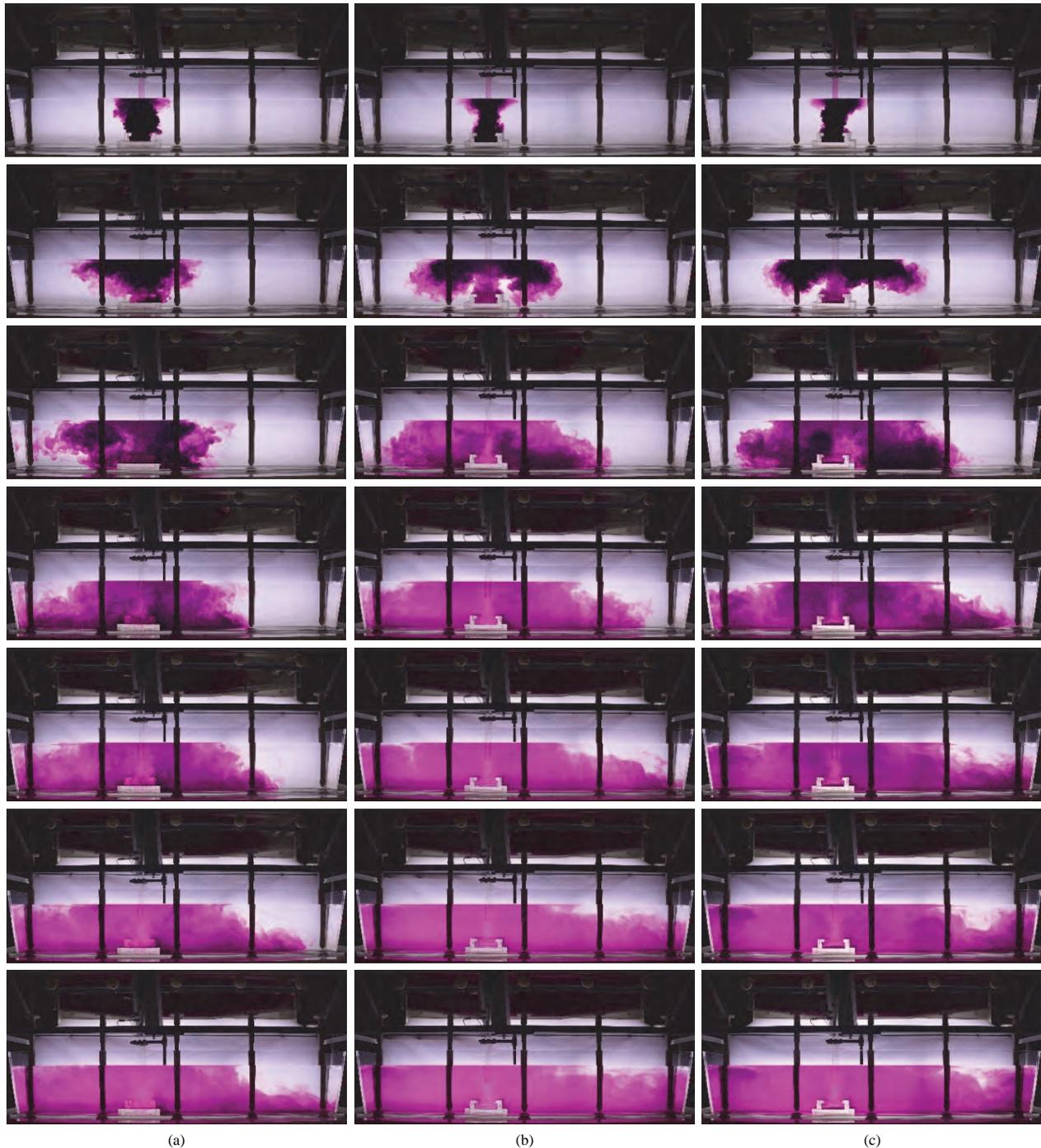
2.2 Vizualizace proudění v mezipánvi

V rámci vizualizačních procesů byl zkoumán vliv tvaru dopadového místa, kde prováděné vizualizace probíhaly za podmínek vzdálenosti ústí stínící trubice 131 mm nad dnem dopadového místa a s vnitřní výškou dopadového místa 30 mm. Vizualizace byly prováděny injektáží

vodného roztoku na bázi $KMnO_4$ do stínící trubice, kdy tento roztok způsobuje fialové zbarvení lázně. Průběh šíření barevného roztoku je znázorněn na obr. 11, kde uváděné časové údaje vypovídají o době po dokončení injektáže. U dopadového místa M1 (obr. 11 a) jsou zjevné největší mrtvé oblasti, které v levé části mezipánve (u LP 5) zanikají po 120 s a v pravé části

(LP 1) je nebylo možné eliminovat téměř vůbec ani po 150 s. Výsledky z vizualizace M2 (obr. 11 b) a M3 (obr. 11 c) jsou obdobné. První rozdíl je zřejmý na snímku po 10 s, kde je zjevná detekce na LP3 a LP4 u varianty s M2. Varianta M3 se projevila vyšším

retenčním časem na nejbližších licích proudech. U dopadového místa M3 se zjevně tvořily nejmenší mrtvé oblasti, které byly v okolí LP1 nejvíce eliminovány. Proudění s variantou dopadového místa M3 (obr. 11 c) je na základě vizualizací optimální.



Obr. 11 Vizualizace proudění v čase pro jednotlivá dopadová místa: (a) M1; (b) M2; (c) M3
Fig. 11 Visualization of the flow in time for individual impact pads: (a) M1; (b) M2; (c) M3

3. Vyhodnocení výsledků experimentu

Vyhodnocení experimentů probíhalo ve dvou fázích. V první fázi byly provedeny experimenty zaměřené na vliv jednotlivých parametrů na charakter proudění oceli

v mezipánvi. V druhé, vizualizační fázi byly pořízeny fotografie, kde byl studován charakter proudění v mezipánvi pomocí injektáže barviva.

Na základě získaných výsledků z experimentálních měření lze formulovat tyto poznatky:

- Konfigurace s dopadovým místem čtvercového typu M1 se projevila nejhůře. Pozitivně lze hodnotit nízkou míru variability, která byla ovšem doprovázena velice krátkými retenčními časy na LP3 a LP4 a velkými mrtvými objemy (až 42,75 %). S použitím dopadového místa M1 se nejlépe projevila konfigurace M1-40-141, kde byl dosažen nejvyšší τ_{\min} na LP3 a LP4, doprovázený nejnížší variabilitou a nejnížším mrtvým objemem.
- Použitím dopadového místa M2 se povedlo podstatně prodloužit retenční časy a snížit zastoupení mrtvého objemu oproti dopadovému místu M1. Z hlediska retenčních časů se nejlépe projevila konfigurace M2-40-146, při posuzování zastoupení charakteristických objemů se lépe projevila varianta M2-30-131, kde byl dosažen nižší výskyt mrtvého objemu.
- Výsledky s použitím dopadového místa M3 byly obdobné jako M2. I přesto však došlo k mírnému prodloužení retenčních časů na LP3 a LP4, ke snížení celkové míry variability a současně ke snížení zastoupení mrtvých objemů. Nejlépe se projevila konfigurace M3-30-131, kde byly získány téměř nejvyšší a rovnoměrné τ_{\min} , které byly doprovázené nízkou mírou variability a nejnížším výskytem mrtvého objemu ze všech konfigurací.
- Vliv výšky stínicí trubice nebyl na základě hodnocení retenčních časů jednoznačný. Zjevný vliv byl však prokázán na základě zastoupení charakteristických objemů v mezipánvi, kde se nižší poloha stínicí trubice (131 mm nad dnem dopadového místa) projevila nižšími mrtvými objemy a současně vyššími poměry mezi pístovým a mrtvým objemem.
- Vliv vnitřní výšky dopadových míst nebyl zcela jednoznačný. Avšak z hlediska poměru mezi pístovým a mrtvým objemem byly v rámci každého typu dopadového místa dosaženy nejlepší výsledky s nižší výškou dopadového místa 30 mm.
- Na základě vizualizací proudění v mezipánvi se nejhůře projevila konfigurace s dopadovým místem M1, což se projevilo nejvyšším zastoupením mrtvého objemu a nerovnoměrným prouděním. U konfigurací s dopadovými místy M2 a M3 se vizualizace projevily téměř totožně. Mírné zlepšení lze ovšem zjistit u použití dopadového místa M3.

Závěr

Charakter proudění oceli v mezipánvi byl při fyzikálním modelování simulován v modelu mezipánve prouděním vody o teplotě 20 °C. Výsledky byly hodnoceny na základě retenčních časů, které byly zjištěny z RTD (Residence Time Distribution) křivek.

Experimenty byly prováděny v laboratorních podmínkách, jejichž cílem bylo zjistit a vyhodnotit vliv jednotlivých

parametrů na charakter proudění oceli v mezipánvi. U jednotlivých parametrů byla porovnávána schopnost ovlivnit účinnost procesu. Mezi tyto parametry patří tvar dopadového místa, vnitřní výška dopadového místa a vzdálenost ústí stínicí trubice ode dna dopadového místa.

Poděkování

Tento výzkum vznikl a článek byl vytvořen díky projektu č. CZ.02.1.01/0.0/17_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“. A za podpory projektu č. SP2021/39 „Výzkum a vývoj v oblasti metalurgických a slévárenských technologií a aplikací“.

Literatura

- [1] 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*, (2020) 10, 849. DOI: 10.3390/met10070849.
- [2] MICHALEK, K. *Využití fyzikálního a numerického modelování pro optimalizaci metalurgických procesů*, 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2011, 125 s. ISBN 80-7078-861-5.
- [3] MAZUMDAR, D., EVANS, J. W. *Modeling of Steelmaking Processes*. CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2009, pp. 463–978.
- [4] SAHAI, Y. Tundish Technology for Casting Clean Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions B – Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 47 (2016) 4, 2095-2106. DOI: 10.1007/s11663-016-0648-3.
- [5] BULKO, B., PRIESOL, I., DEMETER, P., GAŠPAROVIČ, P., BARICOVÁ, D., HRUBOVČÁKOVÁ, M.: Geometric Modification of the Tundish Impact Point. *Metals*, 8 (2018) 11. DOI: 10.3390/met8110944.
- [6] BULKO, B., MOLNÁR, M., DEMETER, P. Physical Modeling of Different Configurations of a Tundish for Casting Grades of Steel that Must Satisfy Stringent Requirements on Quality. *Metallurgist*, 57 (2014) 11-12, 976-980. DOI: 10.1007/s11015-014-9832-3.
- [7] HE, F., ZHANG, LY., XU, QY. Optimization of Flow Control Devices for a T-type Fivestrand Billet Caster Tundish: Water Modeling and Numerical Simulation. *China Foundry*, 13 (2016) 3, 166-175. DOI: 10.1007/s41230-016-5132-9.
- [8] CHANG, S., ZHONG, L., ZOU, ZS. Simulation of Flow and Heat Fields in a Seven-strand Tundish with Gas Curtain for Molten Steel Continuous-Casting. *ISIJ International*, 55 (2015) 4, 837-844. DOI: 10.2355/isijinternational.55.837.
- [9] CWUDZIŃSKI, A.: Mathematical Simulation and Water Modelling of Liquid Steel Interaction with an Argon Bubble Curtain in a One-strand Continuous Casting Tundish. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118 (2018) 5, 545-554. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n5a11.
- [10] BARTOSIEWICZ, M., CWUDZIŃSKI, A. Intensification of Liquid Steel Active Flow Volume in One-strand Tundish using a Modified Ladle Shroud. *Metallurgical and materials engineering*, 26 (2020) 1, 1-14. DOI: 10.30544/458.
- [11] ZHANG, JS., YANG, SF., LI, JS., TANG, HY., JIANG, ZY. Effect of a Dissipative Ladle Shroud on Mixing in Tundish: Mathematical and Experimental Modelling. *High-Temperature Materials and Processes*, 37 (2018) 1, 25-32. DOI: 10.1515/htmp-2016-0093.
- [12] WALEK, J., MICHALEK, K., TKADLEČKOVÁ, M., SATERNUS, M. Modelling of Technological Parameters of Aluminium Melt Refining in the Ladle by Blowing of Inert Gas through the Rotating Impeller. *Metals*, (2021) 11, 284. DOI: 10.3390/met11020284.