

Geometrická modifikácia dopadového miesta v medzipanve ako významný parameter „flow control“ ocele

The geometrical modification of impact point in tundish as significant parameter of steel flow control

doc. Ing. Branislav Bul'ko, PhD.¹; Ivan Priesol²; doc. Ing. Peter Demeter, PhD.¹; Ing. Peter Gašparovič, Ph.D.³

¹ Technická univerzita v Košiciach, Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie, Slovenská republika

² IPC REFRACTORIES s.r.o., Magnezitárska 11, 040 13 Košice, Slovenská republika

³ Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, 042 00 Košice, Slovenská republika

V súvislosti so zvyšujúcimi sa požiadavkami na čistotu ocele, je potrebné vyvíjať originálne riešenia. Medzipanva, ako posledný žiaruvzdorne vymurovaný reaktor, poskytuje dostatok priestoru na odstraňovanie inklúzií optimalizáciou prúdenia ocele. Základným komponentom medzipanvy je dopadová doska, ktorá svojím tvarom vytvára vhodné prúdenie ocele, čím sa stáva súčasťou medzipanvovej metalurgie. Optimálne prúdenie ocele v medzipanve musí zabráňovať vytváraniu oblastí mŕtvych zón alebo javu „červeného oka“ v okolí ochrannej trubice. Prúdenie v medzipanve má za úlohu vytvorenie podmienok na vyplavovanie vtrúsenín do trosky a intenzifikovanie reakcií na rozhraní ocel'-troska. Optimálne prúdenie ocele nemá spôsobovať nadmernú eróziu pracovnej výmurovky medzipanvy. V tomto príspevku je porovnanie štandardnej dopadovej dosky so sférickou dopadovou doskou „Spheric“ pomocou nástrojov výpočtovej dynamiky tekutín (CFD) a fyzikálneho modelovania. Hodnotiacimi kritériami sú retenčný čas a prúdenie v medzipanve pri troch rôznych rýchlostiach odlievania

Kľúčová slova: Dopadové dosky; plynulé odlievanie; medzipanva; retenčný čas; CFD simulácie

In connection with the increasing requirements for cleanliness in cast steel, it is necessary to develop original solutions. The tundish, as the last refractory-lined reactor, gives enough space to remove inclusions by optimizing the flow of steel. The basic component of the tundish is the impact pad, the shape of which creates a suitable flow of steel, thus making it part of the tundish metallurgy. The optimal steel flow in the tundish must avoid creating dead zone areas, or the slag “eye” phenomenon in the slag layer around the ladle shroud, and is intended to create conditions for the release of inclusions by promoting reactions at the steel-slag phase interface. The flow also has to prevent excessive erosion of the tundish refractory lining. This paper compares the standard impact pad with the “Spheric” spherical impact pad using computational fluid dynamics (CFD) tools and physical modelling. The evaluation criteria are residence time and flow in the tundish at three different casting speeds.

Key words: spheric impact pad; continuous casting; tundish; residence time; computational fluid dynamics (CFD)

1. Úvod

Súčasný trendy ukazujú, že viac než 96% produkovanej ocele sa spracováva kontinuálnym odlievaním [1].

Vzhľadom na tento fakt, dochádza k prirodzene zvyšujúcemu sa tlaku na výrobcov žiaruvzdorných materiálov používaných v procese plynulého odlievania ocele. Kľúčovou časťou ZPO je medzipanva, v ktorej je možné do výraznej miery ovplyvniť čistotu odlievanej ocele. V súvislosti neustále zvyšujúcemu sa podielu vysokočistých ocelí v portfóliu produkovaných akostí je nevyhnutný rozvoj v oblasti medzipanvovej metalurgie. Základom správne pracujúcej medzipanvy sú najmä vhodne zvolené krycie a rafinačné prášky a s nimi spojený troskový režim medzipanvy. Základnou podmienkou pre správne fungovanie troskového systému je vhodné prúdenie ocele v medzipanve tak, aby boli

inklúzie z ocele vyplavované do trosky a aby dochádzalo ku chemickým reakciám na fázovom rozhraní ocel'-troska [2]. Z tohto pohľadu je primárna a aj najdôležitejšia geometrická úprava dopadového miesta ocele v medzipanve. V praxi je to riešené použitím dopadovej dosky, ktorá má za úlohu najmä zníženie erózie dna medzipanvy pritekajúcou oceľou [3-5]. Turbulentné prúdenie v mieste dopadu je spôsobené vysokou kinetickou energiou pritekajúcej ocele. Nízka hybnosť difúzivity vstupujúcej ocele spôsobuje relatívne pomalý prenos kvapaliny zo vstupujúceho prúdu s veľkou kinetickou energiou do okolitej kvapaliny. V prípade vhodne tvarovanej dopadovej dosky sa vo vtokovej časti medzipanvy vytvorí tzv. piestové prúdenie. Jedným z hlavných ukazovateľov kvality nastavenia prúdenia v medzipanve je retenčný čas, ktorý je definovaný ako doba zotrvania častice ocele v medzipanve [6]. Čím je retenčný čas dlhší, tým viac času majú inklúzie v oceli na vyplávanie do trosky.

V posledných rokoch prešli dopadové dosky značným vývojom, najmä z hľadiska svojho dizajnu, pričom sa zmenili z jednoduchých dosiek, cez dosky zvlnené až po najmodernejšie sofistikované tvary, ktoré využívajú najnovšie poznatky aj z oblasti matematického a fyzikálneho modelovania.

Ako je spomenuté vyššie, dopadová doska je jednou z kľúčových častí vnútorného vybavenia medzipanvy, ktorá ovplyvňuje prúdenie ocele [7-9]. Väčšinou sa používa s vhodne zvolenými hrádzkami, prepážkami a baffle, ktorými je možné výrazne predĺžiť retenčný čas medzipanvy [doplniť]. Aby bolo možné presne porovnať vlastnosti sférickej dopadovej dosky so štandardnou dopadovou doskou, tento článok obsahuje výsledky porovnania týchto dopadových dosiek bez použitia ďalších modifikátorov prúdenia.

Cieľom tohto výskumu je poukázať na nové, inovatívne riešenie dopadovej dosky využívajúcej konvexný tvar štvorcového výrezu guľového vrchlíka. V prípade symetrickej dvojprúdovej medzipanvy boat-type sa v prípade takejto dopadovej dosky predpokladá výhodnejší charakter prúdenia ocele.

2. Experimental materials and methods

2.1 Sférická dopadová doska

Na základe mechanizmu obtekania telesa kvapalinou bol stanovený tvar testovanej sférickej dopadovej dosky. Vzhľadom na silu pôsobiacu na dopadajúci prúd ocele bolo zistené, že rozhodujúci vplyv na veľkosť odporovej sily má bezrozmerná konštanta C , ktorá bola experimentálne odvodená (1)

$$F = \frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v \quad (1)$$

Kde: C - koeficient odporu, ktorý závisí na tvare telesa, [-]

ρ - merná hmotnosť tekutiny, [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

S - veľkosť plochy priečného rezu telesa, [m^2]

v - veľkosť relatívnej rýchlosti v smere kolmom na uvažovanú plochu. [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Hodnoty konštanty C sú pre štvorcovú dosku 1.17, pričom hodnoty pre vypuklú pologuľu sú dané konštantou 0,4 [10].

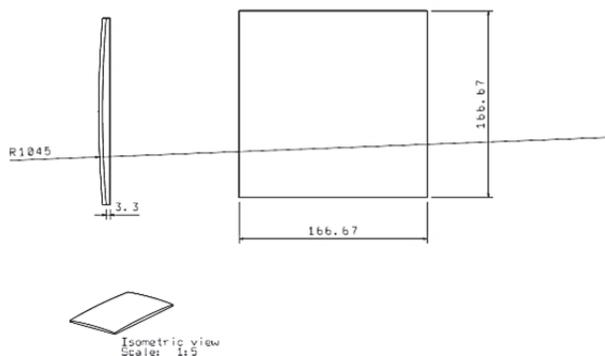
Z uvedeného vyplýva opodstatnenie sférickeho tvaru dopadovej dosky. Výhodou je, že aj pri nízkych objemových prietokoch, nedochádza ku skratovému prúdeniu.

Sférická dopadová doska je porovnávaná so štandardnou dopadovou doskou, ktorej hlavnou úlohou je obmedzenie turbulentného prúdenia v medzipanve.

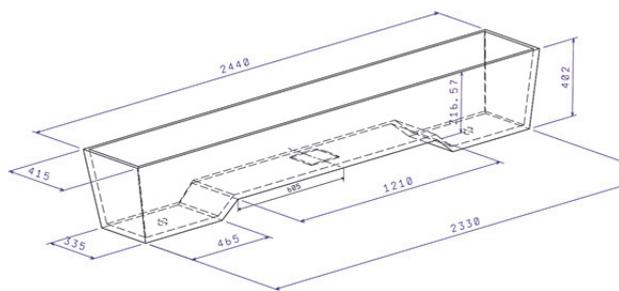
Pre fyzikálne simulácie bol použitý vodný model ZPO v mierke 1:3, konkrétne popísaný vrátane použitých metód v [7, 11].

Rozmery dopadovej dosky boli dodržané vzhľadom na mierku medzipanvy 1:3, pričom výška dopadovej dosky (obr. 1) bola 9.96 mm, vzhľadom na jej umiestnenie na

dne reálnej medzipanvy (obr. 2). Prúdenie ocele v medzipanve vybavenej sférickou dopadovou doskou je optimalizované nielen vzhľadom k retenčným časom, ale aj z pohľadu charakteru prúdenia tak, aby toto prúdenie napomáhalo vyplavovaniu inklúzií do trosky a aby boli najlepšie podmienky pre inetrakcie na fázovom rozhraní troska-kov. Tento spôsob modifikácie prúdenia je uvedený v [12, 13].



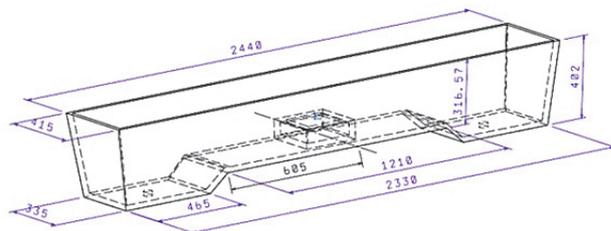
Obr. 1 Dopadová doska „Spheric“
Fig. 1 Impact pad „Spheric“



Obr. 2 Umiestnenie dopadovej dosky „Spheric“ v medzipanve
Fig. 2 Location of impact pad „Spheric“ in tundish

2.2 Štandardná dopadová doska

Rozmery, ako aj umiestnenie štandardnej dopadovej dosky v medzipanve je na obr. 3.



Obr. 3 Umiestnenie štandardnej dopadovej dosky v medzipanve
Fig. 3 Location of standard impact pad in tundish

Merania boli robené v ustálenom režime (Steady State), čiže hladina ocele v medzipanve je konštantná a množstvo ocele pritekajúcej do medzipanvy je rovné množstvu ocele opúšťajúcej medzipanvu výtokovými uzlami.

Metóda C-kriviek umožňuje zdefinovať charakteristiky prúdenia ocele v medzipanve za konštantných

(ustálených) podmienok liatia [14, 16]. Po dosiahnutí požadovanej hladiny v kryštalizátore a ustálení rýchlosti liatia sa vstrekuje odmerané množstvo vodného roztoku KCl do ochrannej trubice. Na vstupe do medzipanvy a jej výtokových uzloch sú umiestnené vodivostné sondy, ktoré zaznamenávajú zmenu vodivosti vody vplyvom pridanej soli, čím sa získa C-krivka [17]. Z tejto krivky vieme určiť minimálny retenčný čas τ_{min} , čo je minimálna doba, za ktorú sa impuz značkovacej látky injektovanej do ochrannej trubice ($\tau_0 = 0s$) objaví na výtoku z medzipanvy. Minimálny retenčný čas má rozhodujúci vplyv na dobu ktorú majú inklúzie na vyplávanie z ocele do trosky [18]. Maximálny retenčný čas τ_{max} je doba medzi τ_0 a maximálnou nameranou koncentráciou značkovacej látky na výstupe z medzipanvy. Hodnota maximálneho retenčného času hovorí o dobe potrebnej na dosiahnutie maximálnej koncentrácie sledovaného prvku na výstupe z medzipanvy [19, 20].

Merania boli urobené pre testované konfigurácie pri prietokoch zodpovedajúcich rýchlostiam liatia $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $1.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na reálnom zariadení ZPO. Dĺžka ochrannej trubice na modeli zodpovedá reálnej dĺžke 1700 mm.

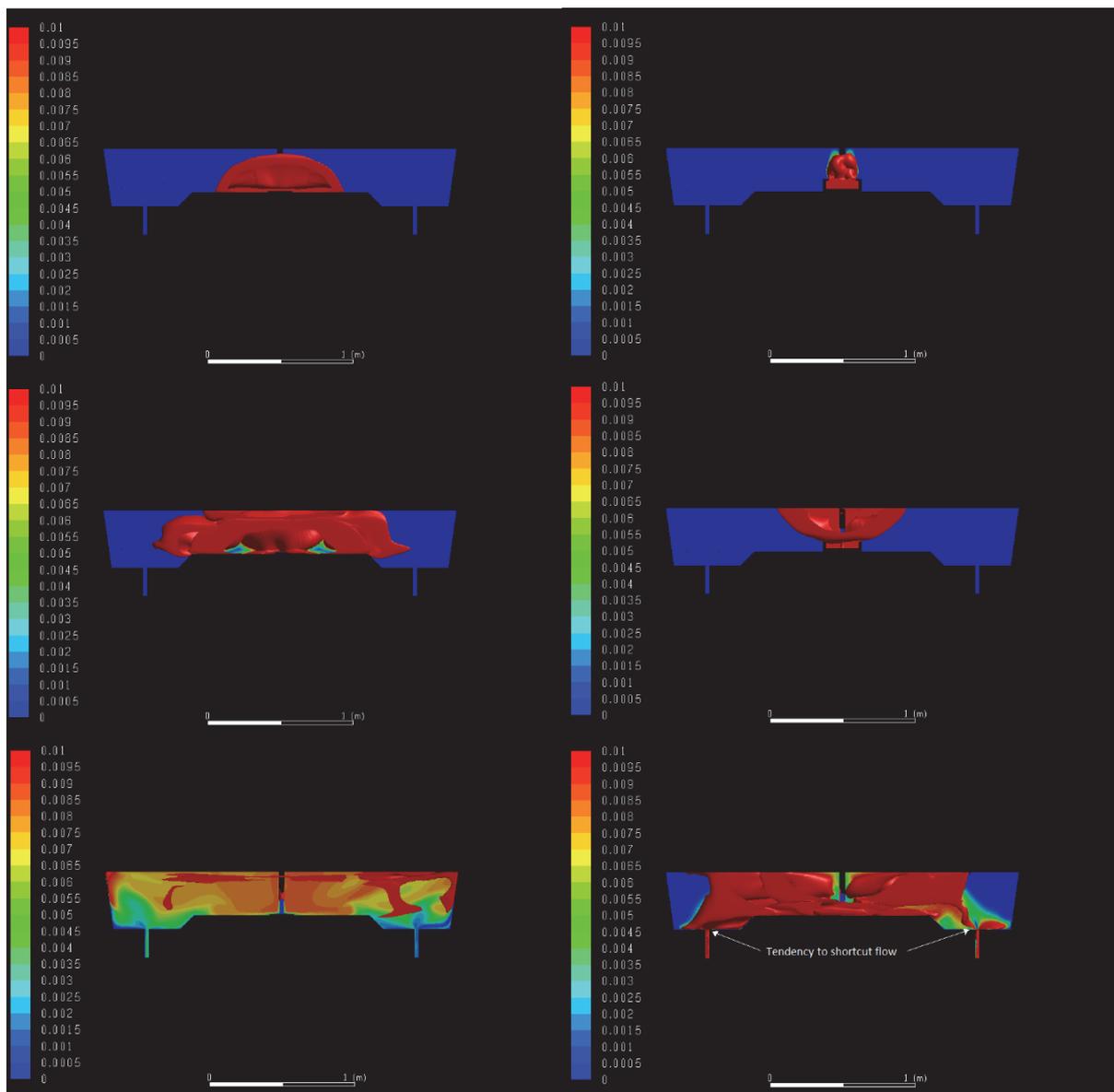
Každá modelovaná konfigurácia bola pritom pre presnejšie štatistické vyhodnotenie a porovnanie výsledkov simulovaná trikrát, pričom z týchto meraní boli následne vypočítané pre každú konfiguráciu priemerné hodnoty, uvádzané vo výsledkoch a grafoch. Detailnejšie špecifikácie jednotlivých simulovaných konfigurácií a konkrétne výsledky sú prezentované v nasledujúcom texte.

3. Výsledky a diskusia

Počiatočná myšlienka dopadovej dosky „Spheric“ bola overená pomocou simulačných nástrojov CFD [21, 22] (obr. 4 a 5).

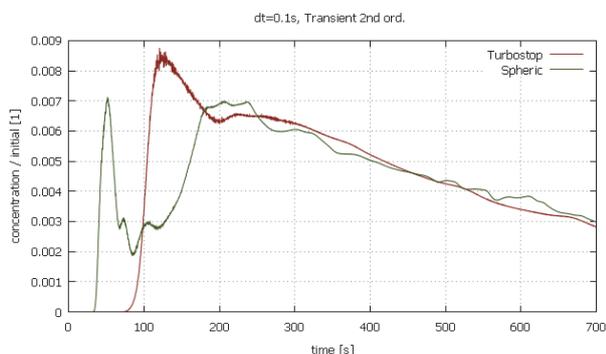
Numerická simulácia prúdenia bola realizovaná v softvéri ANSYS Fluent v19.2, od firmy ANSYS, Canonsburg, PA, USA. ANSYS Fluent počíta diskrétné hodnoty časovo závislých Navier-Stokesových rovníc pričom sa jedná o rovnice zachovania hybnosti v smeroch x , y a z a rovnicu zachovania hmotnosti. Časovo závislé detaily turbulentných vírov sú odstránené z Navier-Stokesových rovníc s Reynoldsovým spriemerovaním a vplyv turbulentného pohybu na transport hybnosti v spriemerovanom toku sa predpokladá pomocou Boussinesqovej hypotézy, ktorá definuje turbulentnú viskozitu. Turbulentná viskozita zvyšuje základnú, molekulárnu viskozitu kvapaliny. Výpočet turbulentnej viskozity vyžaduje ďalšie rovnice, ktoré sú založené na

modeli k-omega SST (Shear Stress Transport, Menterov variant modelu k-omega). Zmena koncentrácie roztoku vo vode je modelovaná pomocou transportných rovníc druhov. Riešiteľ Ansys Fluent je založený na tlaku, takže rýchlosť sa získa z rovnice hybnosti a tlak sa získa z rovnice tlaku, ktorá je odvodená z rovnice continuity a rovnice hybnosti. Rovnice sú diskretizované pomocou metódy kontrolného objemu (CVM). Objem domény je rozdelený na diskrétny kontrolné objemy pomocou výpočtovej siete a rovnice sú integrované na tieto objemy a linearizované, aby sa vytvorili algebraické rovnice pre neznáme hodnoty rýchlosti, tlaku a frakcie druhov. Výsledný systém rovníc má riedku maticu koeficientov a rieši sa iteratívne pomocou Gauss-Seidelovej metódy. Aktualizácia neznámych hodnôt sa vykonáva pomocou združeného algoritmu v prípade rýchlosti a tlaku a následne v prípade druhej frakcie. Hodnoty sú uložené v stredoch buniek. Hodnoty na čelných plochách buniek, potrebné v konvekčných podmienkach rovníc, sú interpolované z hodnôt stredy bunky pomocou diskretizačných schém proti smeru vetra. Priestorová diskretizácia gradientu sa dosiahne použitím metódy najmenších štvorcov buniek. Tlak, hybnosť, turbulentná kinetická energia a špecifický rozptyl využívajú diskretizáciu druhého rádu. Druhá frakcia tiež používa diskretizáciu druhého rádu, rovnako ako časová diskretizácia. Voda je modelovaná ako nestlačiteľná kvapalina s konštantnou hustotou $998.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a konštantnou viskozitou $1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Okrajovou podmienkou na vstupe je rovnomerná rýchlosť $0.623 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Oba výstupy majú vopred definovanú rýchlosť prúdenia rovnajúcu sa polovici hodnoty vstupnej rýchlosti. Intenzita turbulencie na vstupe je 0.1 %. Steny sú definované s podmienkou nulového sklzu, to znamená, že rýchlosť tekutiny, ktorá sa bezprostredne pripojí k stene, je rovná nule. Časový krok je 0.1 s a tok je inicializovaný prietokovým poľom vyvíjajúcim sa prirodzene po 200 sekundách od roztoku v ustálenom stave. Každý časový krok bol vypočítaný v 10 iteráciách. Sieť bola vytvorená v softvéri ICEM CFD. Sieť je štruktúrovaná tak, že je zložená iba z hexaedrónových diskretných objemov usporiadaných do blokov s pravidelnou ortogonálnou štruktúrou. Ortogonálna geometria blokov sa premieta na povrch stien a vnútorná geometria objemov blokov je interpolovaná z hraníc. Sieť prilieha k stenám v oblasti hraničnej vrstvy má medzi výškami po sebe nasledujúcich vrstiev objemov kolmú geometrickú vzdialenosť s násobkom 1.15 a prvá vrstva objemu má v oblasti nárazového prúdenia výšku 0.035 mm, a výška 0.45 mm inde. Najhoršia hodnota y^+ je 1.6 v oblasti nárazového toku a 0.02-1.0 inde. Sieť obsahovala 2.5 milióna buniek a 2.5 milióna uzlov. Výpočet prebiehal vo vysokovýkonnom výpočtovom centre Technickej univerzity v Košiciach [23-25].



Obr. 4 Porovnanie simulácie prúdenia pre dopadovú dosku „Spheric“ a pre štandardnú dopadovú dosku pri rýchlosti odlievania $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – CFD simulácia

Fig. 4 Comparison of simulation of steel flow for tundish equipped with „Spheric“ and standard impact pad for casting speed $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – CFD simulation



Obr. 5 Porovnanie C-kriviek pre dopadovú dosku „Spheric“ a pre štandardnú dopadovú dosku pri rýchlosti odlievania $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – CFD simulácia

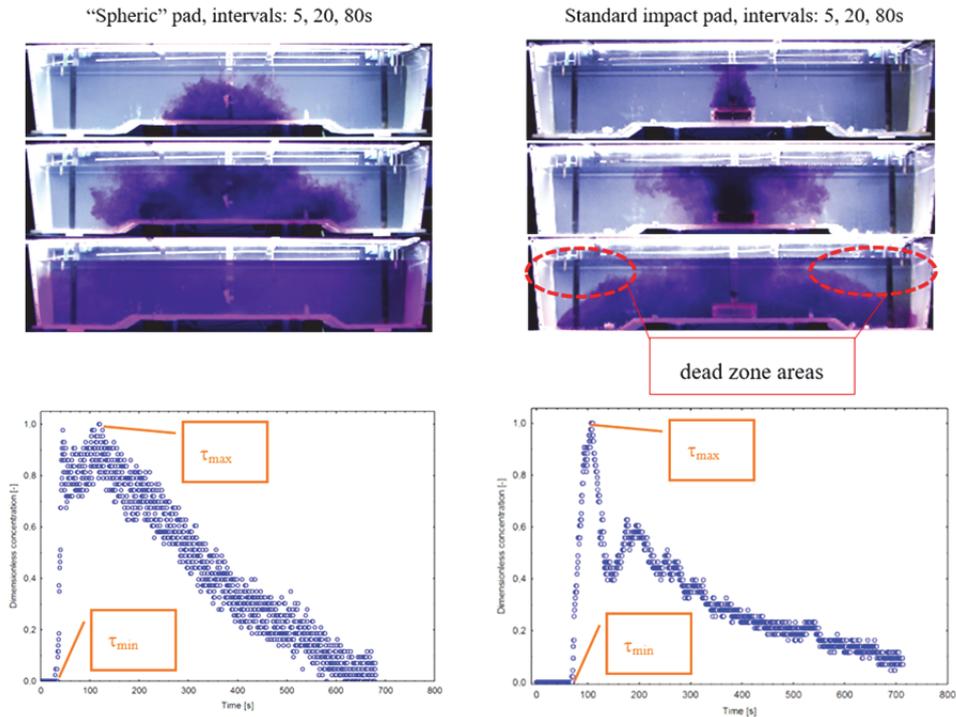
Fig. 5 Comparison of C - curves for tundish equipped with „Spheric“ and standard impact pad for casting speed $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – CFD simulation

Na základe výsledkov CFD simulácií sa očakáva, že použitie dopadovej dosky „Spheric“ skráti retenčný čas v porovnaní so štandardnou dopadovou doskou, ale na druhej strane sa tiež očakáva zníženie vírenia ocele okolo ochrannej trubice a zníženie javu tvorby „červeného oka“ v jej okolí. Predpokladá sa, že pri použití dopadovej dosky „Spheric“ bude prevládať oblasť premiešavania a objem mŕtvych zón sa bude intenzívne zmenšovať. Tiež sa zistilo, že štandardná dopadová doska má tendenciu vytvárať skratové prúdenie pri nižších rýchlostiach odlievania.

Navrhovaná dopadová doska bola testovaná s použitím modelu skutočnej symetrickej dvojprúdovej medzipanvy v mierke 1:3 pri troch rýchlostiach odlievania. Ako porovnávací kritériá bola zvolená C-krivka, retenčný čas a vizuálne vyhodnotenie prietoku v medzipanve.

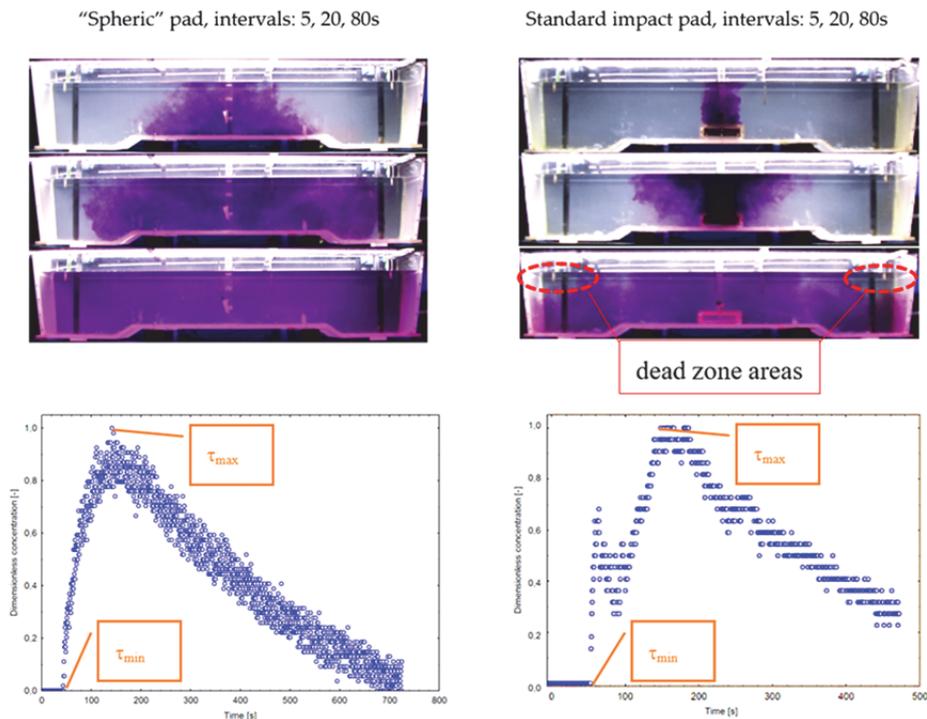
Stopovacia látka je vodný soľný roztok KCl, ktorého koncentrácia sa monitoruje pomocou systému merania vodivosti, pričom sa prúdenie vizuálne vyhodnocuje pomocou KMnO_4 . Obr. 6-8 znázorňujú výsledky simulácií porovnávajúcich štandardnú a sférickú dopadovú dosku. Pre vizuálne porovnanie prúdenia,

obr. 6-8 znázorňujú prúdenie v časových intervaloch 5, 20 a 80 s po vstreknutí stopovacej látky. Pod týmito obrázkami sú zodpovedajúce C-krivky so zvýraznenými minimálnymi a maximálnymi retenčnými časmi pre každú konfiguráciu a rýchlosť odlievania.



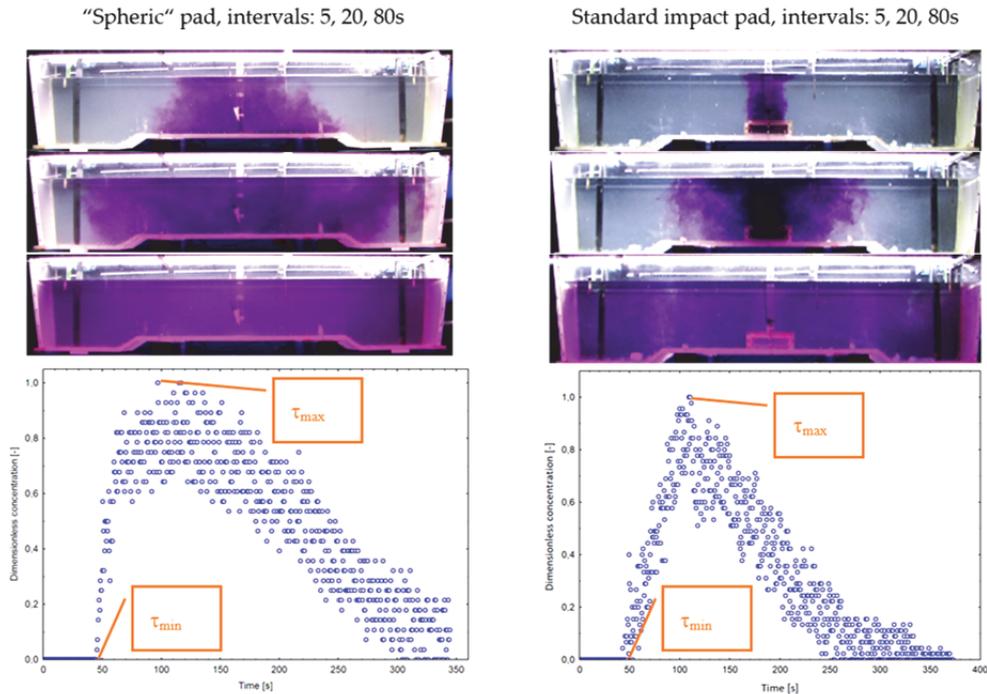
Obr. 6 Vizuálne a grafické porovnanie prúdenia pre pre dopadovú dosku „Spheric“ a pre štandardnú dopadovú dosku pri rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – fyzikálna simulácia

Fig. 6 Visual and graphical comparison of simulation of steel flow for tundish equipped with „Spheric“ and standard impact pad for casting speed $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – physical simulation



Obr. 7 Vizuálne a grafické porovnanie prúdenia pre dopadovú dosku „Spheric“ a pre štandardnú dopadovú dosku pri rýchlosti odlievania $1,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – fyzikálna simulácia

Fig. 7 Visual and graphical comparison of simulation of steel flow for tundish equipped with „Spheric“ and standard impact pad for casting speed $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – physical simulation



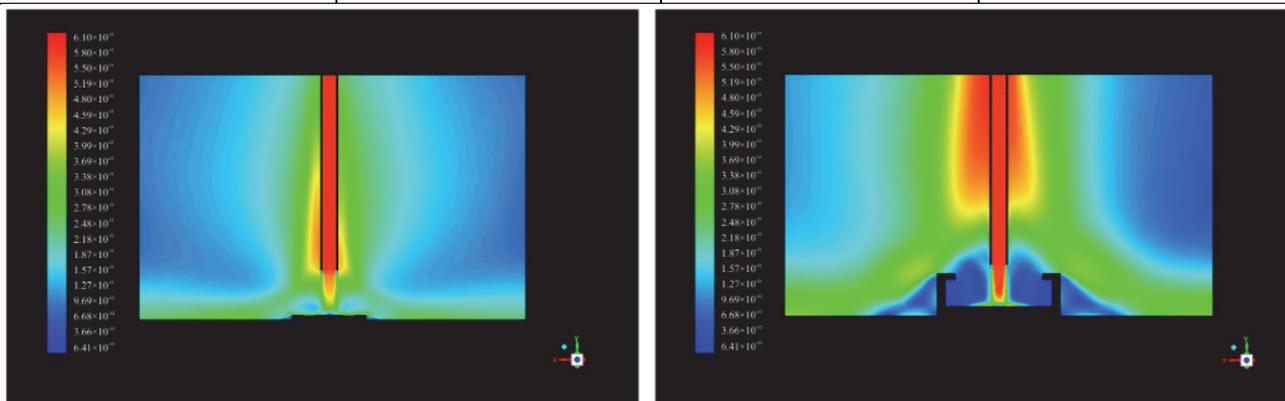
Obr. 8 Vizuálne a grafické porovnanie prúdenia pre dopadovú dosku „Spheric“ a pre štandardnú dopadovú dosku pri rýchlosti odlievania $1,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – fyzikálna simulácia
Fig. 8 Visual and graphical comparison of simulation of steel flow for tundish equipped with „Spheric“ and standard impact pad for casting speed $1.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ – physical simulation

V tab.1 je porovnanie minimálnych a maximálnych retenčných časov pre každú konfiguráciu. Čísla v zátvorkách označujú percentuálny rozdiel retenčných časov voči štandardnej konfigurácii.

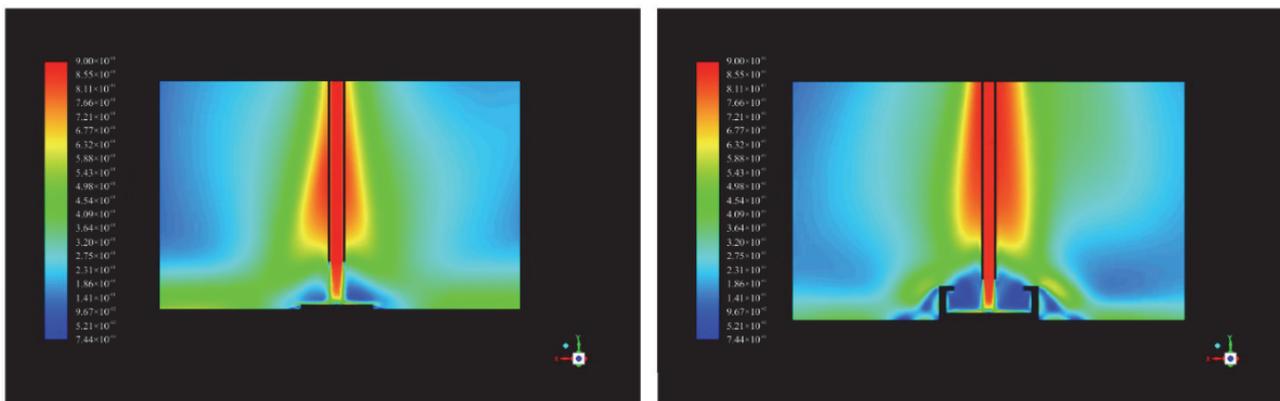
Na obr. 9 a 10 je vizualizácia dynamiky prúdenia pre porovnávané dopadové dosky (CFD simulácia).

Tab. 1 Porovnanie retenčných časov pre testované dopadové dosky
Tab. 1 Comparison of residence time for tested impact pads

Konfigurácia	Rýchlosť odlievania	Minimálny retenčný čas	Maximálny retenčný čas
	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	[s]	
Štandardná dopadová doska	0.8	57	98
	1.2	55	137
	1.6	39.5	119
Sférická dopadová doska	0.8	40.5 (71%)	119
	1.2	42 (76%)	127
	1.6	42 (106%)	104



Obr. 9 Porovnanie rýchlostných polí pri rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Fig. 9 Comparison of velocity fields (casting speed $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

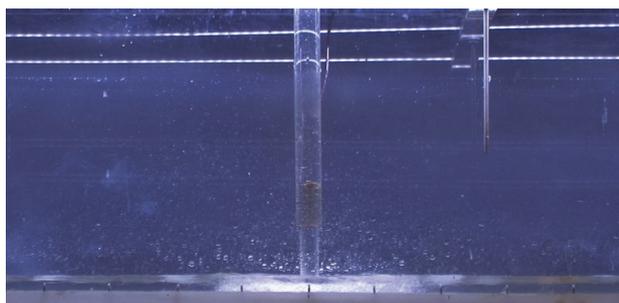


Obr. 10 Porovnanie rýchlostných polí pri rýchlosti odlievania 1,2 m·min⁻¹
Fig. 10 Comparison of velocity fields (casting speed 1.2 m·min⁻¹)

Rýchlejšia vertikálna cirkulácia ocele až po vrstvu trosky môže spôsobiť tvorbu „červeného oka“, čiže odkrytie povrchu ocele, následnú reoxidáciu vzduchom a vyššie tepelné straty [26, 27].

Pri použití dopadovej dosky „Spheric“ je vertikálna rýchlosť prúdenia okolo ochrannej trubice výrazne nižšia ako pri použití štandardnej dopadovej dosky. Použitie dopadovej dosky „Spheric“ môže eliminovať tvorbu takzvaného „červeného oka“ v dôsledku nižšej vertikálnej rýchlosti prúdenia ocele v tejto oblasti, na rozdiel od štandardnej dopadovej dosky.

Ďalšou veľmi dôležitou funkciou dopadových dosiek je zabránenie rozstretu roztavenej ocele pri plnení prázdnej medzipanvy, a to najmä z bezpečnostných dôvodov. Ukážka prvých sekúnd plnenia prázdnej medzipanvy je znázornená na obr. 11 a je zřejmé, že sférická dopadová doska bezpečne bráni rozstretu ocele.



Obr.11 Prvé sekundy naplňania prázdnej medzipanvy, sférická dopadová doska

Fig. 11 First seconds of filling an empty tundish, using the “Spheric” impact pad

4. Záver

Dizajn sférickej dopadovej dosky s konvexným povrchom bol inšpirovaný rozdielmi medzi prúdením okolo plochej dosky a prúdením okolo gule. Na počiatočné testovanie a potvrdenie tohto tvaru dopadovej boli použité CFD simulácie. V porovnaní so štandardnou dopadovou doskou pri zodpovedajúcej rýchlosti odlievania

0,8 m·min⁻¹ sa zistilo, že sférická dopadová doska skracuje retenčný čas, ale na druhej strane prúdenie vytvorené touto doskou bude mať za následok elimináciu oblastí mŕtvych zón a elimináciu tvorby „červeného oka“ v okolí ochrannej trubice. Navrhovaná dopadová doska nemá tendenciu vytvárať skratové prúdenie. Dopadová doska „Spheric“ bola preto podrobená ďalšiemu, rozsiahlejšiemu testovaniu s použitím fyzikálneho modelu medzipanvy v mierke 1:3 pri prietokoch simulujúcich rôzne rýchlosti odlievania.

V porovnaní so štandardnou dopadovou doskou, na základe meraní C-křiviek pomocou vodného modelu, dopadová doska „Spheric“ skracuje minimálne retenčné časy pri rýchlosti odlievania 0.8 a 1.2 m·min⁻¹ na úrovni 71 % a 76 % časov dosahovaných pri použití štandardnej dopadovej dosky za rovnakých podmienok. Na druhej strane dopadová doska „Spheric“ vykazovala o 6 % dlhší retenčný čas ako štandardná doska pri rýchlosti odlievania 1,6 m·min⁻¹. Treba brať do úvahy, že ide len o porovnanie dopadových dosiek. V oboch prípadoch je možné vybaviť medzipanvu ďalšími modifikátormi prúdenia, ako sú hrádzky, prepážky a baffle, aby sa predĺžila doba zotrvania ocele v medzipanve.

Z vizuálneho porovnania prietoku v medzipanve je evidentné, že dopadová doska „Spheric“ vytvára výhodnejšie prúdenie ako štandardná doska. Nemá tendenciu ku skracovému prúdeniu pri nižších rýchlostiach odlievania. Taktiež eliminuje oblasti mŕtvych zón. Je možné predpokladať, že použitie tejto dopadovej dosky v praxi bude mať pozitívny vplyv na čistotu ocele vďaka dynamickejšiemu prúdeniu ocele na rozhraní ocel-troska. Okrem toho, tvorba „červeného oka“ bude výrazne potlačená, pretože sférická dopadová doska nemá výrazné piestové prúdenie.

Na základe výsledkov realizovaných simulácií možno predpokladať, že dopadová doska „Spheric“ má veľký potenciál na optimalizáciu prúdenia ocele v medzipanve môže sa stať novou súčasťou modernej medzipanvy s významným vplyvom na výslednú kvalitu a čistotu odlievanej ocele.

Pod'akovanie

Tento výskum bol financovaný a realizovaný v rámci projektu APVV-21-0396: Vývoj sférických dopadových miest v panvách a medzipanvách určených pre odlievanie vysokokvalitných oceľí.

Literatúra

- [1] Worldsteel Association. Steel Statistical Yearbook 2016. Available online: <https://www.worldsteel.org/publications/bookshop/product-details/~Steel-Statistical-Yearbook-2016~PRODUCT~SSY2016~.html> (accessed on 9 November 2018).
- [2] MICHALEK, K., GRYC, K., SOCHA, L., TKADLEČKOVÁ, M., SATERNUS, M., PIEPRZYCA, J., MERDER, T. and PINDOR, L. Physical modelling of tundish slag entrainment under various technological conditions. *Arch. Metall. Mater.* (2017), 62, 1467–1471, doi:10.1515/amm-2017-0227.
- [3] WARZECHA, M. Numerical Modelling of Non-Metallic Inclusion Separation in a Continuous Casting Tundish. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/221913237> (accessed on 9 November 2018).
- [4] BRAUN, A., WARZECHA, M. and PFEIFER, H. Numerical and physical modeling of steel flow in a two-strand tundish for different casting conditions. *Metall. Mater. Trans. B* (2010), 41, 549–559.
- [5] CHATTOPADHYAY, K., ISAC, M. and GUTHRIE, R.I.L. Physical and mathematical modelling of steelmaking tundish operations: A review of the last decade (1999-2009). *ISIJ Int.* (2010), 50, 331–348.
- [6] KOWITWARANGKUL, P. and HARNSIHACACHA, A. Tracer injection simulations and RTD analysis for the flow in a 3-strand steelmaking tundish. *Key Eng. Mater.* (2016), 728, 72–77.
- [7] BUEKO, B. and KIJAC, J. Optimization of tundish equipment. *Acta Metall. Slovaca*, (2010), 16, 76–83.
- [8] BUEKO, B., MOLNÁR, M. and DEMETER, P. Physical modeling of different configurations of a tundish for casting grades of steel that must satisfy stringent requirements on quality. *Metallurgist*, (2014), 57, 976–980.
- [9] CHATTERJEE, D. Designing of a novel shroud for improving the quality of steel in tundish. *Adv. Mater. Res.* (2012), 585, 359–363.
- [10] HOERNER, S. F. *Fluid Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance*, Hoerner Fluid Dynamics: Bakersfield, CA, USA, 1965.
- [11] Laboratory of Simulation of Flow Processes. Available online: https://ohaz.umet.fmmr.tuke.sk/lsp/index_en.html (accessed on 17 September 2018).
- [12] PRIESOL, I. *A Method of Molten Metal Casting Utilizing an Impact Pad in the Tundish*. International Patent Application No. PCT/IB2016/056207, 10 October 2016.
- [13] PRIESOL, I. Spôsob Liatia Roztaveného Kovu s Využitím Dopadovej Dosky v Medzipanve. International Patent Classification: B22D 11/10 B22D 41/00, Application No. 109-2016, 11 October 2016, B22D 11/00 B22D 41/00, Application No. 89-2016, 10 October 2016.
- [14] MICHALEK, K., GRYC, K., SOCHA, L., TKADLEČKOVÁ, M., SATERNUS, M., PIEPRZYCA, J., MERDER, T. and PINDOR, L. Study of tundish slag entrainment using physical modeling. *Arch. Metall. Mater.* (2016), 61, 257–260, doi:10.1515/amm-2016-0048.
- [15] *Acta Metallurgica Slovaca*. Available online: http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/2010/number2/mag01/mag01.pdf (accessed on 17 September 2018).
- [16] GRYC, K., MICHALEK, K., HUDZIECZEK, Z. and TKADLEČKOVÁ, M. Physical modelling of flow patterns in a 5-strand asymmetrical tundish with baffles. In *Proceedings of the Metal 2010-19th International Conference on Metallurgy and Materials*, Czech Republic, 18-20 May 2010.
- [17] SAHAI, Y. and EMI, T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. *ISIJ Int.* (1996), 36, 667–672, doi:10.2355/isijinternational.36.667.
- [18] VÄYRYNEN, P., WANG, S., LOUHENKILPI, S. and HOLAPPA, L. Modeling and removal of inclusions in continuous casting. In *Proceedings of the Materials Science and Technology 2009 International Symposium on Inclusions and Clean Steel 2009*, Pittsburgh, PA, USA, 25-29 October 2009.
- [19] MICHALEK, K. *Využití Fyzikálního a Numerického Modelování pro Optimalizaci Metalurgických Procesů*, Vysoká škola Báňská - Technická Univerzita: Ostrava, Czech Republic, 2001, ISBN 80-7078-861-5.
- [20] FALKUS, J. and LAMUT, J. Model testing of the bath flow through the Tundish of the continuous casting machine. *Arch. Metall. Mater.* (2005), 50, 709–718.
- [21] Ansys Fluent 12.0 User's Guide, 2009. Available online: <http://users.ugent.be/~mvbelleg/flug-12-0.pdf> (accessed on 22 August 2018).
- [22] NASTAC, L., ZHANG, L., THOMAS, B. G., ZHU, M., LUDWIG A., SABAU, A.S., PERICLEOUS, K. and COMBEAU, H. *CFD Modeling and Simulation in Materials Processing 2016*, Springer International Publishing: New York, NY, USA, 2016.
- [23] GARDIN, P., BRUNET, M., DOMGIN, J. F. and PERICLEOUS, K. An experimental and numerical CFD study of turbulence in a tundish container. *Appl. Math. Model.* (2002), 26, 323–336, doi:10.1016/S0307-904X(01)00064-6.
- [24] MAZUMDAR, D. and GUTHRIE, R.I.L. The physical and mathematical modelling of continuous casting Tundish systems. *ISIJ Int.* (1999), 39, 524–547, doi:10.2355/isijinternational.39.524.
- [25] LIU, S., YANG, X., DU, L., LI, L. and LIU, C. Hydrodynamic and mathematical simulations of flow field and temperature profile in an asymmetrical t-type single-strand continuous casting Tundish. *ISIJ Int.* (2008), 48, 1712–1721, doi:10.2355/isijinternational.48.1712.
- [26] CHATTERJEE, S. and CHATTOPADHYAY K. Formation of slag 'eye' in an inert gas shrouded Tundish. *ISIJ Int.* (2015), 55, 1416–1424, doi:10.2355/isijinternational.55.1416.
- [27] ZHANG, L. and THOMAS, B. G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness. *ISIJ Int.* (2003), 43, 271–291, doi:10.2355/isijinternational.43.271.