

POROVNANIE CHARAKTERU PRÚDENIA OCELE V 6 PRÚDOVEJ MEDZIPANVE PRI POUŽITÍ DVOCH ROZDIELNYCH DOPADOVÝCH DOSIEK (IMPACT PAD).

Demeter P., Dzurnák R. Bulko B., Ivan Priesol ² Hubatka S., Fogaraš L.

¹ Technical University of Košice, Faculty of Metallurgy, Košice, Slovakia; peter.demeter@tuke.sk (P.D.); dana.baricova@tuke.sk (D.B.); martina.hrubovcakova@tuke.sk (M.H.)

² IPC REFRACTORIES s.r.o., Magnezitárska 11, 040 13 Košice, Slovakia; ipc@ipc.sk
Correspondence: peter.demeter@tuke.sk; Tel.: +421 55 602 3164

Keywords: tundish, mathematical modelling, non-isothermal flows, CFD

Abstrakt

Článok sa zaoberá skúmaním charakteru prúdenia pri použití troch rôznych tvarových dopadových dosiek v 6 prúdovej (6-strands) medzipanve. Prúdenie ocele v medzipanve má výrazný vplyv na tepelnú a chemickú homogenizáciu, na rafinačnú schopnosť od nekovových inklúzií a na eróziu výmurovky. Všetky tieto vplyvy majú veľký význam pri výrobe vysokokvalitných ocelí. Na pozorovanie prúdenia ocele v medzipanve boli využité nástroje CFD simulácií. Vyhodnotenie výsledkov simulácií sa realizovalo pozorovaním charakteru prúdenia stopovacou látkou a porovnaním priebehu RTD kriviek. Následne pomocou C-kriviek boli vypočítané oblasti vzájomného prepojenia toku s rôznym charakterom prúdenia. RTD krivky boli realizované pri izotermických podmienkach a pre výpočet teplotných polí ocele v medzipanve pri neizotermických podmienkach.

Výsledky ukazujú že pomocou tvarových dopadových dosiek „SPHERIC – PROTOTYP-A, SPHERIC – PROTOTYP-B“ je možné vylepšiť charakter prúdenia z pohľadu zrovnomenenia retečných časov medzi jednotlivými výtakovými otvormi a úpravy pomeru oblastí premiešavania.

Úvod

Medzipanva je súčasťou zariadenia plynulého odlievania ocele, ktoré primárne slúži ako zásobník kovu pri výmene liacich panví a je to posledné žiaruvzdorne vymurované zariadenie kde je možné zlepšiť ale aj zhoršiť kvalitu odlievanej ocele. Medzipanva v súčasnosti neslúži len na transport tekutej ocele k jednotlivým výtakovým uzlom, na zníženie pôsobenia ferostatického tlaku kovu na hladinu v kryštalizátore a na minimalizáciu roztreku liaceho prúdu, ale slúži ako zariadenie s možnosťou dezoxidácie, mikrolegovania a chemicko-teplotnej homogenizácie ocele a zvyšovania čistoty ocele rafinačnými medzifázovými reakciami na rozhraní kov-troska [1-4]. Medzipanva slúži tiež ako efektívny kontinuálny metalurgický reaktor s optimálnymi hodnotami retenčných časov pre dokonalú separáciu nekovových inklúzií a strhnutej koagulovanej trosky flotáciou a optimalizáciou navzájom prepojených oblastí toku s rôznym charakterom prúdenia. Sú sledované tieto hlavné oblasti: mŕtva oblasť, oblasť dokonalého premiešavania a oblasť piestového toku. [4-6]. Na optimalizáciu tvaru medzipanvy vplyva veľa faktorov ako napríklad počet výtakových uzlov ocele z medzipanvy a vzdialenosť medzi nimi, poloha liacej panvy, rýchlosť odlievania, prierez kontodliatku, doba potrebná k výmene panvy, štart odlievania, odstránenie trosky a oceľového zliatku, prúdenie kovu atď.

Základným cieľom prezentovaného výskumu bolo zlepšiť charakter prúdenia, rozloženia teplôt ocele v celkovom objeme medzipanvy aby nedochádzalo k erózií výmurovky v hornej časti vtokovej oblasti. Simulácie boli realizované pre rôzne tvarové dopadové dosky. Prúdenie v medzipanve je hodnotené

pomocou vektorov, kontúr, prúdnic, RTD kriviek, hodnôt minimálnych a maximálnych retenčných časov. Pomocou týchto hodnotiacich nástrojov sme schopní zhodnotiť teplotné rozloženie ocele, zvýšiť rafinačnú schopnosť medzipanvy od nekovových vtrúsenín a znížiť eróziu žiaruvzdornej výmurovky medzipanvy. Na začiatku sa vychádzalo z tvarovej dopadovej dosky s názvom „SPHERIC“ International patent Application [7], International Patent Classification [8], ktorej hlavnou myšlienkou bol predpoklad zníženia hydrodynamickej odporovej sily dopadajúceho prúdu roztavenej ocele na základe tvaru telesa a vplyvu koeficientu C zo vzťahu pre rozmerovú analýzu odporovej sily F.

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

where: C—coefficient of drag, ρ —specific mass of fluid, S—size of the reference area (planform area of the pad), and v—relative velocity of impinging stream.

Koeficient C (Tab.1) je bezrozmerný parameter, ktorý možno považovať za konštantný pre malé zmeny rýchlosti. Experimentálne hodnoty súčiniteľa odporu predmetov vo voľnom prúde sú 1,17 pre štvorcovú plochú dosku a 0,40 pre konvexnú hemisféru. [9,10, 11] Navrhovaná guľatá podložka má štvorcový pôdorys a horný povrch má tvar pologule s veľkým polomerom [11].

Tab. 1 Koeficient odporu od tvaru telesa alebo profilu [11]

Shapes and profiles of Solids	Coefficient of drag - C
Circular plate	1.11
Square plate	1.05 to 1.27
Hollow hemisphere	1.35 to 1.40
Convex hemisphere	0.30 to 0.40
Round cylinder	1.20
Elliptic cylinder a:b = 2:1	0.48
Elliptic cylinder a:b = 8:1	0.20

Každá medzipanva je jedinečné zariadenie, preto neexistuje univerzálne vhodný tvar dopadovej dosky. V prípade že tvar medzipanvy je daný, je možné charakter prúdenia (flow characteristic) ovplyvniť do značnej miery voľbou vhodného tvaru dopadovej dosky. Preto je potrebné aby dopadové dosky boli modifikované na základe konštrukcie, tvaru a vnútorného vystrojenia medzipanvy.

Primárnym cieľom úpravy dopadovej dosky „SPHERIC“ bolo aby prúdenie pritekajúcej ocele smerovalo do celkového objemu medzipanvy tak aby došlo k zrovnomeneniu retenčných časov na výtokových uzloch čo vedie k lepšej chemickej a tepelnej homogenizácii a zabráneniu erózie výmurovky v hornej časti vtokovej oblasti.

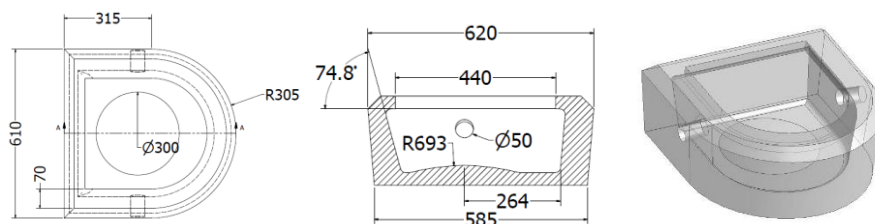
Pre modernú medzipanvovú metalurgiu je potrebné používať moderné nástroje ako sú matematické simulácie pre optimalizáciu vnútornej geometrie medzipanvy zlepšením charakteru prúdenia a rafinácie. prúdových a rafinačných charakteristík.

Základnou úlohou matematických simulácií je popísanie správania sa reálneho systému pomocou numerického modelu. Matematickým simulovaním je možné simulovať rôzne systémy bez zásahu na reálnych zariadeniach. Matematické simulácie umožňujú sledovať zmeny okrajových podmienok, presné stanovenie rôznych podmienok tak, aby zariadenie pracovalo efektívnejšie. Prednosťou matematických simulácií je ich použitie aj v tých prípadoch, ktoré nie je možné riešiť v reálnych systémoch [12-14].

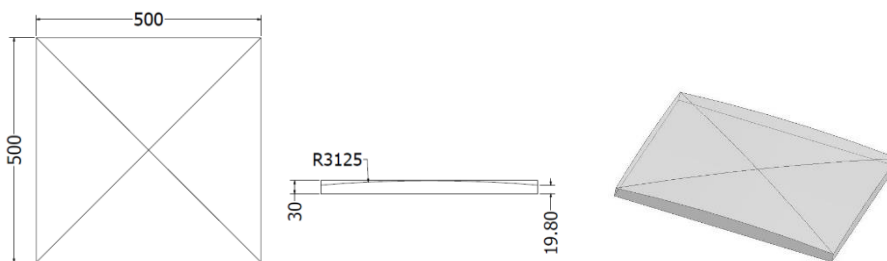
Na základe prvotných simulácií v programe ANSYS Discovery 2022, the software produced by ANSYS, Canonsburg, PA, USA, bol navrhnutý upravený „SPHERIC-PROTOTYP“ so zdvihnutými bočnými stenami tak aby spĺňal vyššie uvedené požiadavky pre daný typ medzipanvy.

Základná konfigurácia medzipanvy z ktorej sa vychádzalo je vystrojená s „KTHE/C“ tvarovou dopadovou doskou by Zakłady Magnezytowe "ROPCZYCE" S.A., Postępu 15c Street 02-676 Warsaw, Poland.

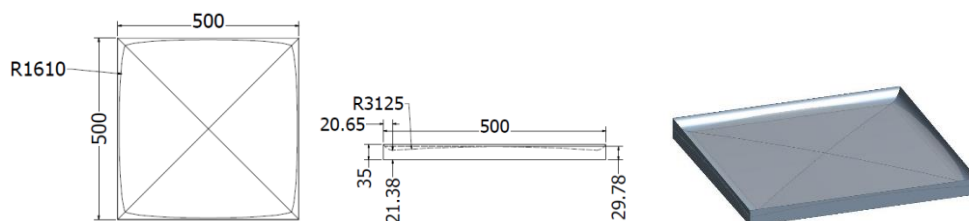
Základné rozmery skúšaných tvarových dopadových dosiek sú na obrázkoch Obr. 1 „KTHE/C“, obr. 2 „SPHERIC“, obr. 3 „SPHERIC-PROTOTYP-A“ a obr. 4 „SPHERIC-PROTOTYP-B“.



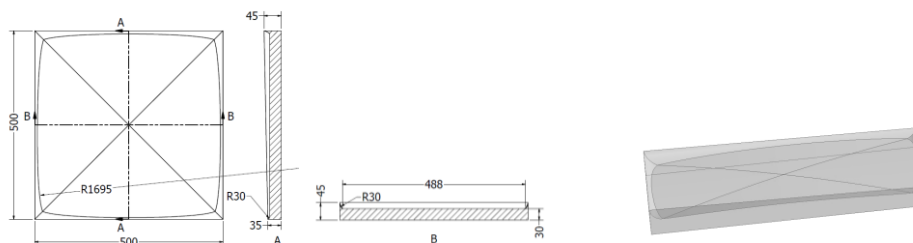
Obr. 1 „KTHER/C“



Obr. 2 „SPHERIC“



Obr. 3 „SPHERIC-PROTOTYP-A“



Obr. 4 „SPHERIC-PROTOTYP-B“

V tejto práci sa porovnávali tri tvarové dopadové dosky „KTHER/C“, „SPHERIC-PROTOTYP-A“ a „SPHERIC-PROTOTYP-B“ v 6 prúdovej medzipanve of a trough-type pomocou CFD simulácií.

NUMERICKÉ MODELOVANIE

Popis CFD modelu

Pre výskum bol použitý CFD program Ansys Fluent, the software produced by ANSYS, Canonsburg, PA, USA. Výpočet sa realizoval na 3D modely. Väčšina riešených problémov v praxi má turbulentné prúdenie, preto je potrebný turbulentný model. Pre výpočet bol použitý **Model k- ω SST** [15,16]

Tento model patrí medzi RANS modely. Najviac používaná metóda v praxi. Model k- ω SST (Tab. 2) spája robustnosť a presnosť v blízkosti steny s modelom k- ϵ , ktorý je vhodný ďalej od stien. Tento model je výhodnejší pri viacerých druhoch prúdenia. [17,18]

Turbulentná viskozita sa vypočíta podľa vzťahu (2)

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^* \alpha_1 \omega}, \frac{SF_2}{\alpha^* \alpha_1 \omega}\right]} \quad (2)$$

kde S - užívateľom zadané zdrojové členy
a - inverzné efektívne Prandtlove čísla
F – vnútorná objemová sila [N.m⁻³]

Tab. 2 Konštanty modelu SST K- ω [18]

α_{∞}^*	α_{∞}	α_0	β_{∞}^*	R_{β}	R_k	R_{ω}	ζ^*	M_{t0}	$\sigma_{k,1}$	$\sigma_{\omega,1}$	$\sigma_{k,2}$	$\sigma_{\omega,2}$	α_1	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$
1	0,52	1/9	0,09	8	6	2,95	1,5	0,25	1,176	2,0	1,0	1,168	0,31	0,075	0,0828

Model transportu častíc

Pre zhodnotenie a určenie času a doby, ktorú tekutina v medzipanve strávi, je kľúčovou veličinou retenčný čas. Aby bolo možné tento čas určiť, bol použitý model transportu častíc. Princíp spočíva v injekcii stopovacej látky s totožnými fyzikálnymi vlastnosťami ako má hlavné prúdacie médium. Po 10 sekundách stopovacia látka prestane do medzipanvy prúdiť. Na výstupoch tak dokážeme sledovať jej koncentráciu počas celej doby prúdenia.

Model predikuje množstvo látky v objeme pomocou riešenia konvektívno-difúznej rovnice (3). Táto rovnica má všeobecnú formu:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (3)$$

kde Y_i – lokálne množstvo každej častice

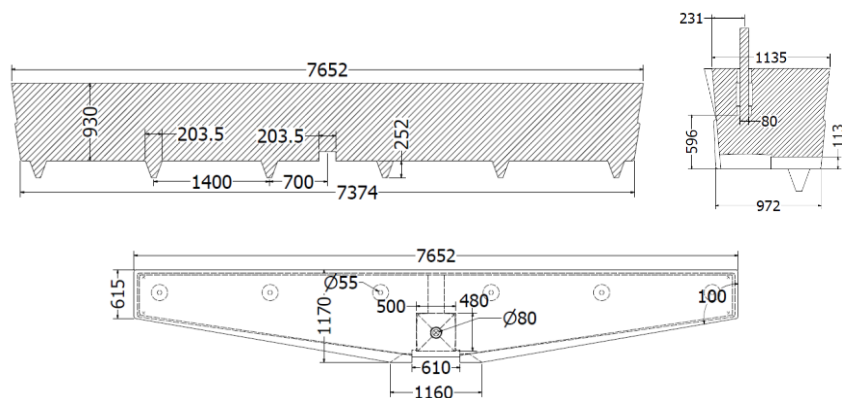
R_i - podiel vznikajúcich častíc i chemickými reakciami

S_i – miera vytvorenia pridaním z rozptýlenej fázy a akékoľvek definovaného zdroja [19,20]

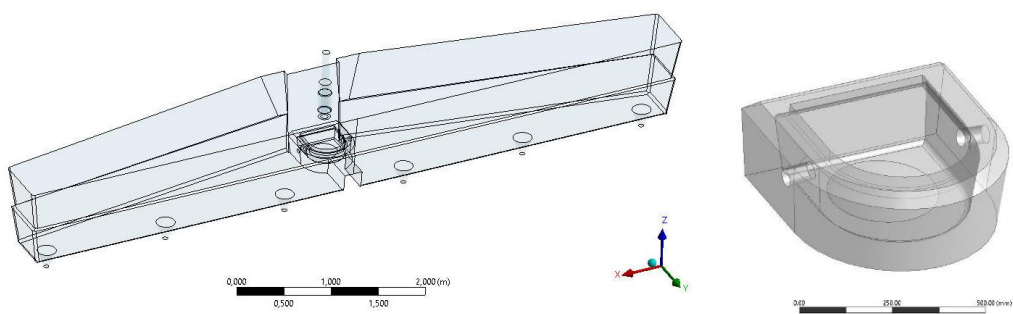
Geometria, výpočtová sieť a hraničné podmienky

Pri modelovaní prúdenia je potrebné vytvoriť model, ktorý reprezentuje vnútorný objem medzipanvy (5,6989 m³), tzn. modelovať priestor, cez ktorý bude tekutina v medzipanve prúdiť. Rozmery pre medzipanvu s tvarovou dopadovou doskou „KTHE/C“ sú znázornené na obr. 4. Boli sledované tri konfigurácie s označením K pre tvarovú dopadovú dosku „KTHE/C“ (Obr. 5), s označením SP-A pre tvarovú dopadovú dosku „SPHERIC-PROTOTYP-A“ (Obr. 6), s označením SP-B pre tvarovú dopadovú

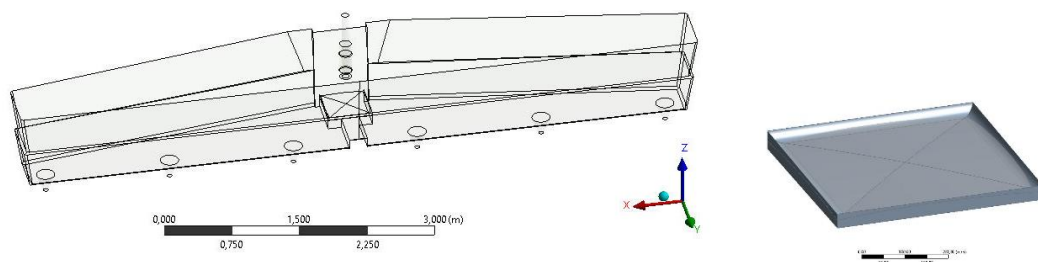
dosku „SPHERIC-PROTOTYP-B“. Geometrie boli nakreslené v programe DesignModeler súčasť balíka Ansys.



Obr. 4 Technický výkres sledovanej 6-prúdovej medzipanvy

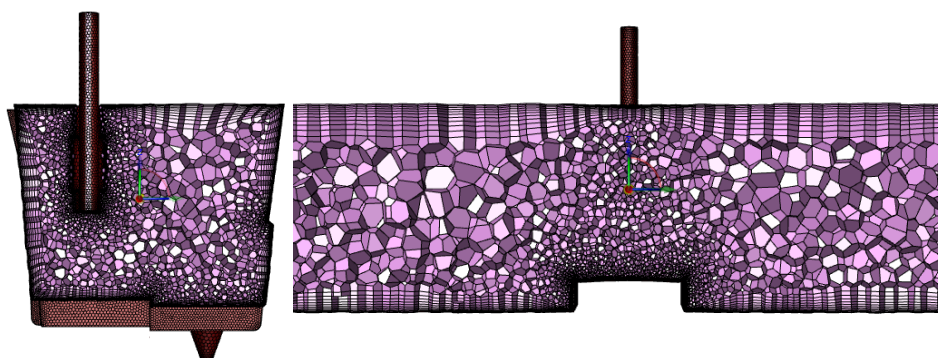


Obr. 5 Geometria 6-prúdovej medzipanvy s „KTHE/C“ – konfigurácia K



Obr. 6 Geometria 6-prúdovej medzipanvy s „SPHERIC-PROTOTYP-A“ - konfigurácia SP-A

Výpočtová sieť bola tvorená polyedrami (Obr. 7). Počet elementov pre výpočtovú sieť bol 1 404 422. Úlohou štruktúrovanej siete, ktorá je vytvorená v oblasti stien je výpočet rýchlostného profilu tekutiny v tzv. medznej vrstve. Sieť bola hodnotená aj na základe kvalitatívneho spektra pre kritérium Skewness a orthogonality. Dosiahnuté hodnoty boli pre kritérium skewness 0.32 a pre ortogonalitu 0,99. Počas tvorby siete bola aplikovaná aj medzná vrstva, ktorej použitie je nevyhnutné pri turbulentnom prúdení tekutín. Dôležitým krokom je aj špecifikácia oblasti vstupu, výstupu a stien modelu medzipanvy, kvôli možnosti následného zadávania počiatkových a okrajových podmienok.



Obr. 7 Ukážka výpočtovej siete 6-prúdovej medzipanvy s tvarovou dopadovou doskou KTHEC

Riešenie bolo realizované v stacionárnom režime (steady) a nestacionárnom (transient - Number of Time Steps: 1600s, Time step 0,1s max. Iterations 20). Do výpočtu bol zahrnutý aj vplyv gravitácie.

Hodnoty okrajových a počiatočných podmienok pre CFD simulácie sú uvedené v Tab. 3.

Table 3. Parameters and boundary conditions used in modeling.

Parameter	Value
	Model
Diameter of ladle shroud [mm]	80
Depth of molten steel [mm]	930
	Material
Inlet temperature [K]	1823
Density of molten steel [kg.m-3]	7020
Viscosity of molten steel [kg.m-1.s-1]	0.0067
Specific heat[J.kg-1.K-1]	750
Thermal conductivity [w.m-1.K-1]	41
Heat flux [kw.m-2]	15
	Inlet
Mass flow Rate [kg.s-1]	11.36
Turbulent Intensity [%]	3.48
Hydraulic Diameter [m]	0.08
	Outlet
Pressure outlet	0
Turbulent Intensity [%]	3.64
Hydraulic Diameter [m]	0.055
	Walls
Walls (flow)	No slip
Thermal Conditions [K]	1777
Wall (heat loss) [kW.m ⁻²]	2.5
Surface (heat loss) [kW.m ⁻²]	15
	Tracer
Injection time (s)	10

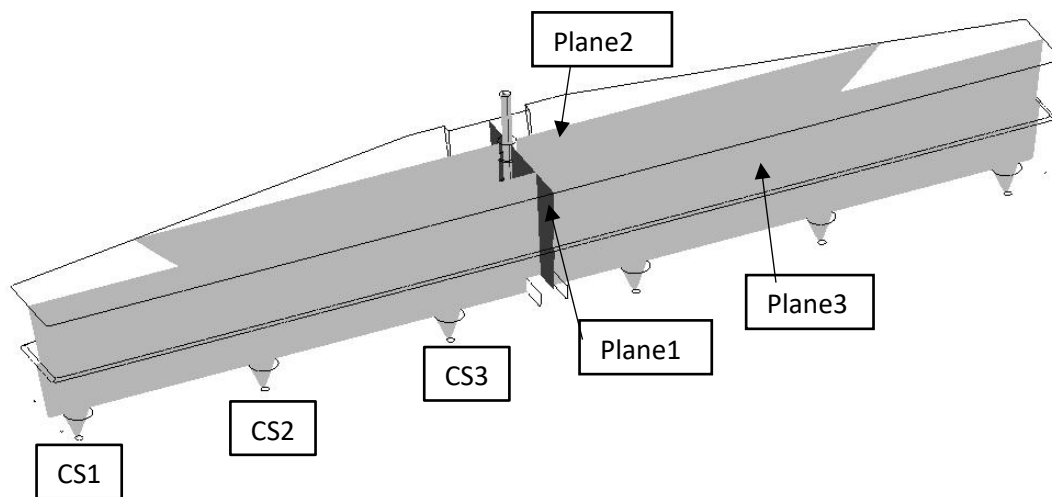
VYHODNOTENIE A DISKUSIA

Vyhodnotenie CFD simulácií sa realizovalo pozorovaním charakteru prúdenia pomocou kontúr, vektorov, prúdnic a rozloženia teploty roztavenej ocele na vybraných rovinách pre obidve konfigurácie. Ďalej sa porovnávali merania distribúcie ocele v čase pomocou RTD kriviek a hodnôt retenčných časov. Nakoniec boli hodnotené jednotlivé oblasti charakterizujúce reálne reaktory s navzájom prepojených oblastí prúdenia a to oblasť piestového toku, oblasť dokonalého premiešavania a mŕtvej oblasti. [21, 22]

Vyhodnotenie charakteru prúdenia

Vizuálne vyhodnotenie charakteru prúdenia pomocou vektorov, kontúr a prúdnic sa realizovali na troch rovinách a to pre rovinu YZ (cross-section) - Plane 1, pre rovinu XZ - Plane 2 a pre rovinu XZ - Plane 3 (coming through the outlets) (Obr. 8

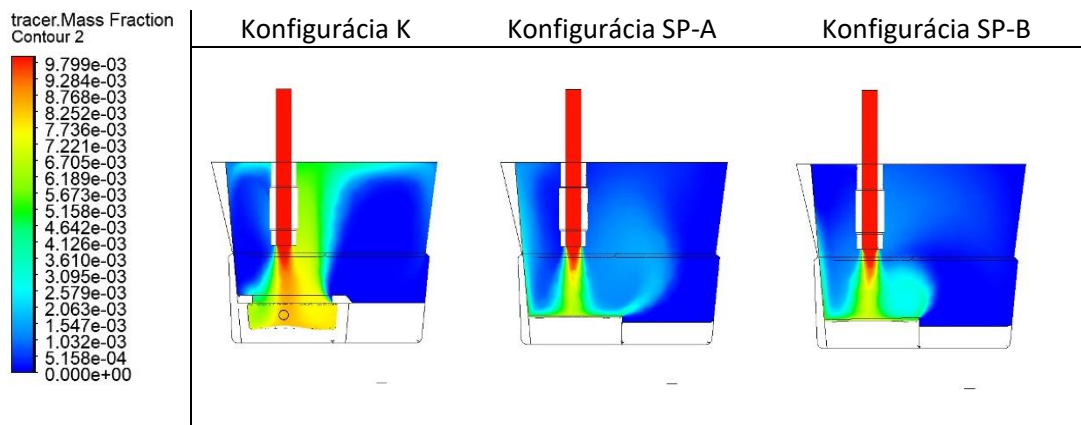
Obr.).



Obr. 8 Sledované roviny a označenie výtokových uzlov v simulovanom modeli

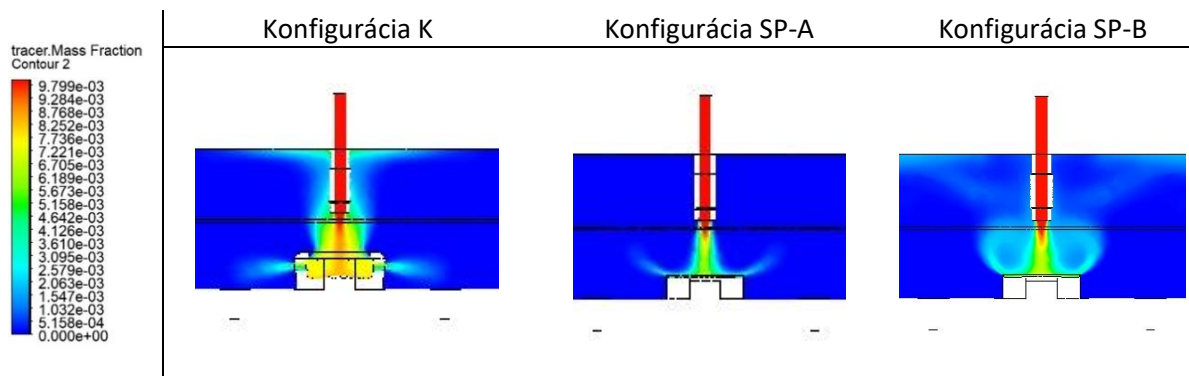
Pomocou vizuálneho sledovania kontúr na rovine ZY (Plane 1) je zobrazené prúdenie vstreknutej stopovacej látky v 20 sekunde (Obr. 9). Pri jednotlivých konfiguráciách môžeme sledovať rozdielnosť prúdenia na základe použitej tvarovej dopadovej dosky. Pri konfigurácií K mali kontúry charakter piestového prúdenia, this can cause the metal surface uncover.

Avšak (however) pri konfigurácií SP-A môžeme sledovať zmenu prúdenia k hornej prednej časti medzipanvy čo prispieva k lepšej distribúcii kovu do celkového objemu medzipanvy a tým aj k lepšiemu využitiu jej objemu. Pri konfigurácii SP-B bolo sledované čiastočné usmernenie toku do priestoru ale tiež k spätnému toku pritekajúcej ocele cez ochrannú trubicu (ladle shroud).



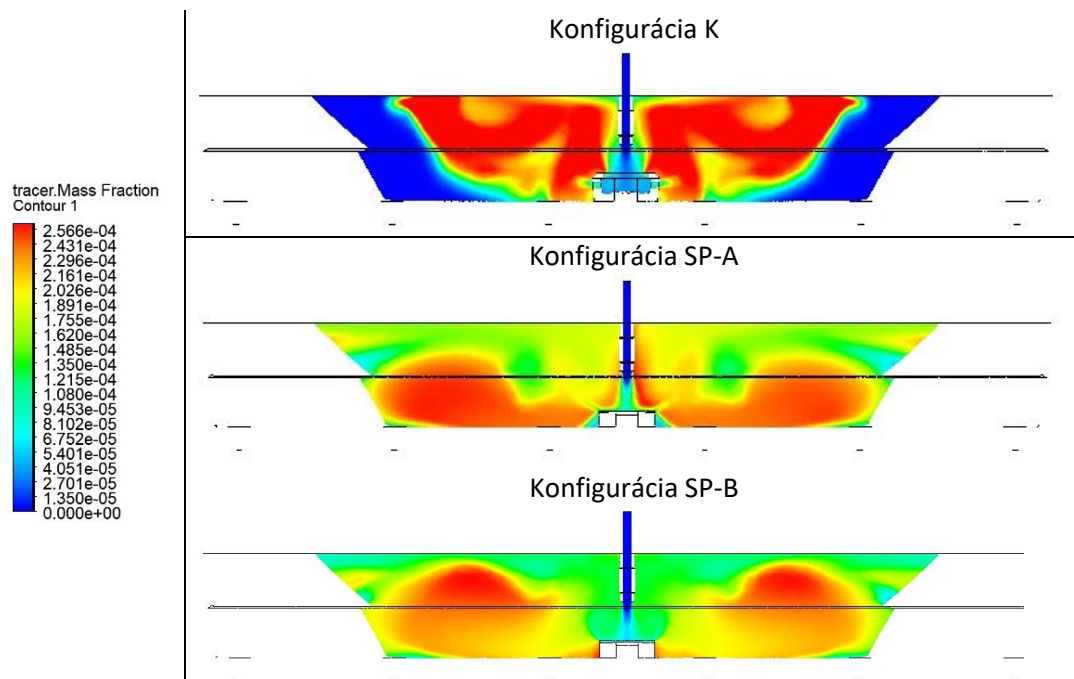
Obr. 9 Distribúcia stopovacej látky pri konfiguráciach K, SP na Plane1

Pri pozorovaní stopovacej látky cez rovinu XZ (Plane 2) bolo zistené, že je nutné zabezpečiť aby nedochádzalo ku skratovému prúdeniu a to hlavne pre výtokový otvor CS3 čo bolo dosiahnuté pri oboch skúšaných konfigurácii SP-A, SP-B (Obr. 10).



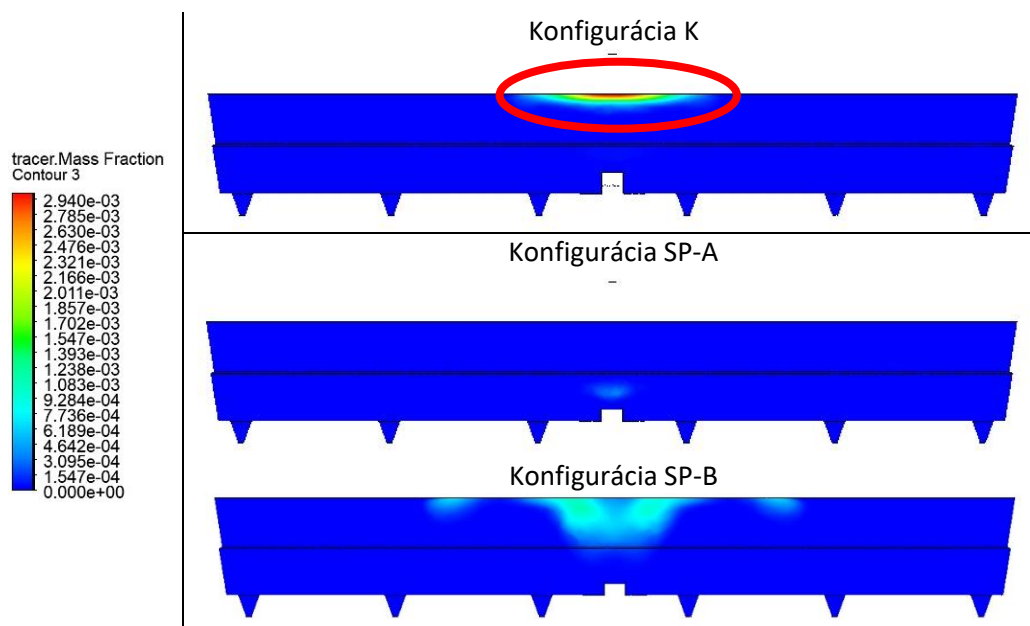
Obr. 10 Distribúcia stopovacej látky pri konfiguráciach K, SP-A, SP-B na Plane2

Pri zobrazení charakteru prúdenia stopovacej látky v 80 sekunde môžeme sledovať rozdielnosť pri konfiguráciách SP-A, SP-B a dochádza k rovnomernejšiemu rozptýleniu v celom objeme medzipanvy (Obr. 11).



Obr. 11 Distribúcia stopovacej látky na Plane2 v 80 sekunde

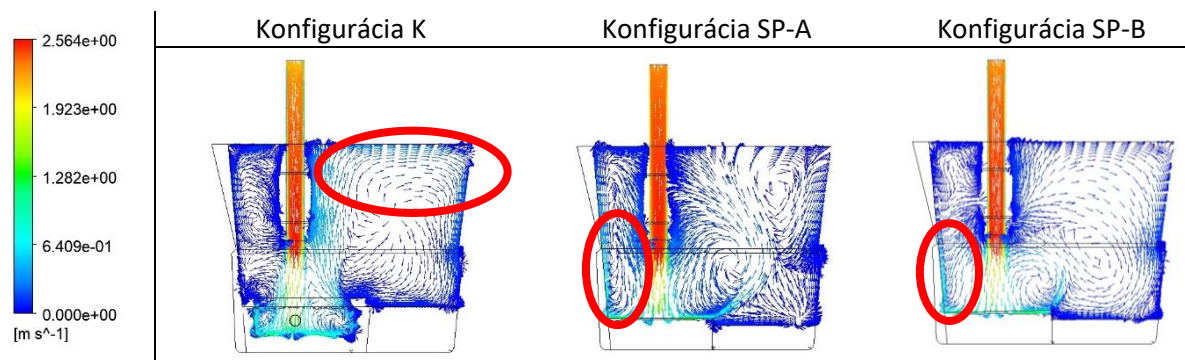
Pri sledovaní charakteru prúdenia na Plane 3 bolo sledované prúdenie stopovacej látky len v hornej časti vtokovej oblasti pri konfigurácii K. Tento jav by mohol spôsobovať obmývanie a eróziu výmurovky v oblasti troskovej čiary (Obr. 12).



Obr.12 Obmývanie hornej vtokovej časti medzipanvy v oblasti troskovej čiary

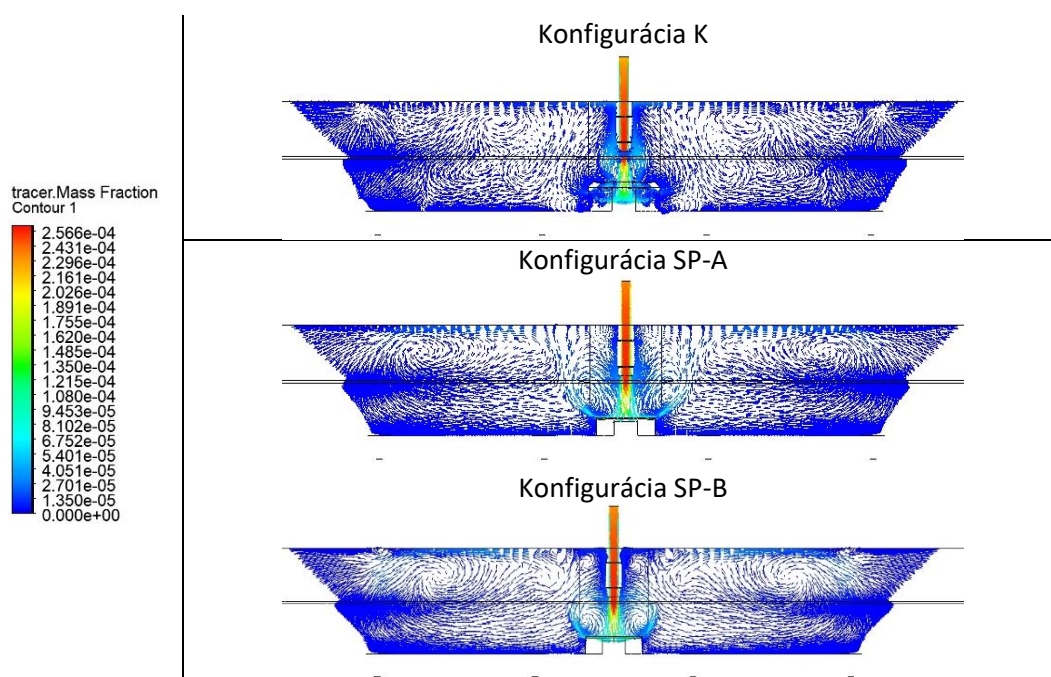
Hodnotením charakteru prúdenia pomocou vektorov vieme určiť smer a rýchlosť prúdenia ocele aj pri stenách medzipanvy, na základe čoho je možné predikovať intenzitu erózie pracovnej výmurovky medzipanvy.

Na základe sledovaných vektorov pri referenčnej konfigurácii K môžeme predpokladať, že najviac namáhaná časť pracovnej výmurovky medzipanvy je horná stredná časť medzipanvy v oblasti ochrannej trubice. Pri konfigurácii SP-A, SP-B je najviac namáhaná zadná časť medzipanvy a to v oblasti za ochrannou trubicou (ladle shroud) (Obr. 13). Namáhanie v tejto oblasti nie je problémovou časťou nakoľko je tam štandardne inštalovaná monolitická zosilnená doska.



Obr. 13 Smer prietoku tekutiny v medzipanvách na Plane 1

V reze Plane 2 môžeme sledovať vektory prúdenia pre sledované konfigurácie (Obr. 14), pri ktorých je možné vidieť rozdielnosť prúdenia v celom objeme medzipanve.

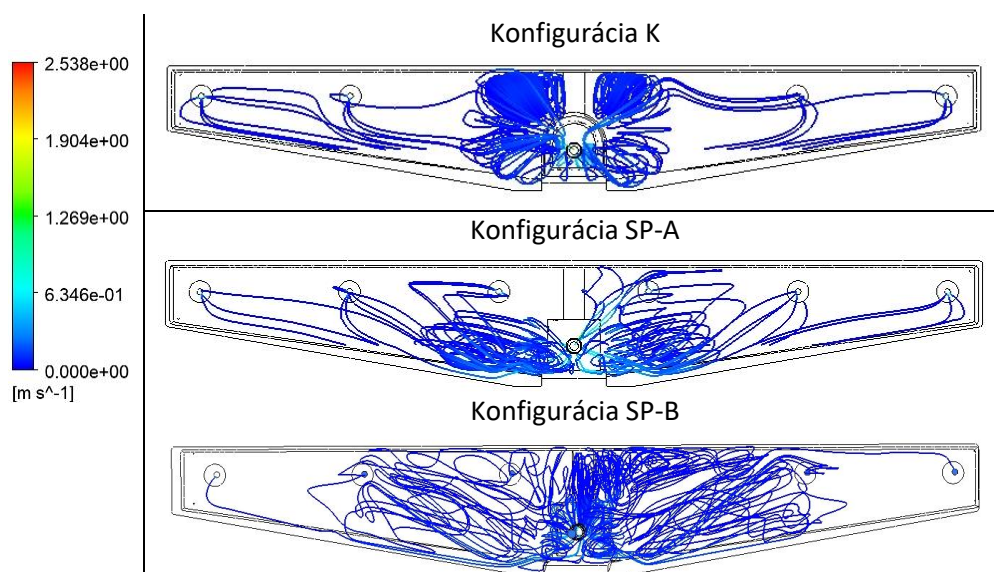


Obr. 14 Vektor prúdenia pre sledované konfigurácie K, SP-A, SP-B na Plane2

Prúdnice - Streamline

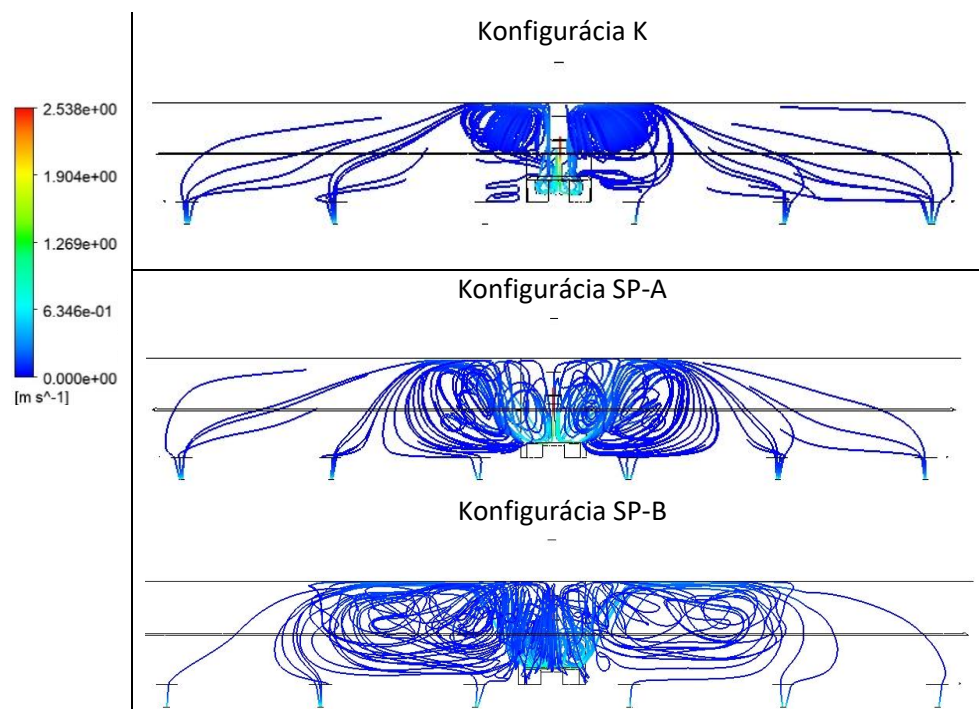
Na základe sledovania prúdnic pri pohľade na medzipanvu z hora je možné pozorovať akou cestou sa dostane sledovaná častica do výtokových otvorov (outlets). Oproti referenčnej konf. K, v ktorej prúdnice smerujú najskôr do stredných výtokových otvorov, pri konf. SP-A prúdnice smerujú najskôr k zadnej časti vtokovej oblasti a následne k výtokovým otvorom, čo má vplyv na predĺženie min.

retenčného času pre CS3 (Obr. 15).. Pre konf. SP-B dochádza k rovnomernému prúdeniu vo vtokovej časti na všetky strany.



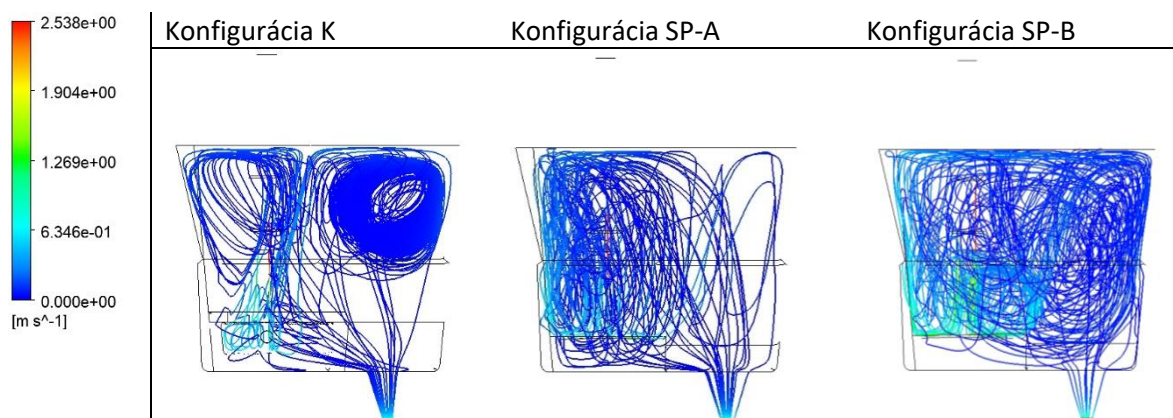
Obr. 15 Zobrazenie prúdnic pohľad zhora pre konfiguráciu K a SP

Pri pohľade spredu pri konfigurácii K prvé prúdenie je zhustené v prednej hornej vtokovej oblasti z celkového objemu medzipanvy a hlavne pri strednom výtokovom otvore CS3 čo spôsobuje eróziu a opotrebenie výmurovky v danej oblasti medzipanvy. Následne odtiaľ smerujú prúdnice k jednotlivým výtokovým otvorom. Pri konfigurácii SP-A sa podarilo v tejto časti rozptýliť prúdenie na širšiu zadnú oblasť medzipanvy s menšou intenzitou prúdenia a na základe toho dosiahnuť zvýšenie hodnoty min. retenčného času na CS3 (Obr. 16). Pre konfig. SP-B bol sledovaný podobný charakter prúdenia ako pri SP-A, ale ešte väčším rozšírením do objemu medzipanvy.



Obr. 16 Zobrazenie prúdnic pohľad spredu pre konfiguráciu K a SP

Pri pozorovaní prúdnic pohľad zboku (side view) so zameraním na strednú časť medzipanvy v oblasti dopadovej dosky bol prúd ocele najviac zhustený a stáčil sa pri stenách v hornej prednej časti pre konf. K. Toto nám potvrdzuje eróziu a opotrebenie výmurovky v tejto časti medzipanvy. Pri konf. SP-A bolo docielené aby prúdenie bolo smerované k zadnej časti po celej výške medzipanvy. Toto prúdenie zabezpečí zníženie rýchlosti prúdenia a tým aj nižšie opotrebenie výmurovky v tesnej blízkosti ponornej výlevky (Obr. 17). Rovnomerné rozdelenie prúdnic celým prierezom medzipanvy bolo sledované pre konf. SP-B.

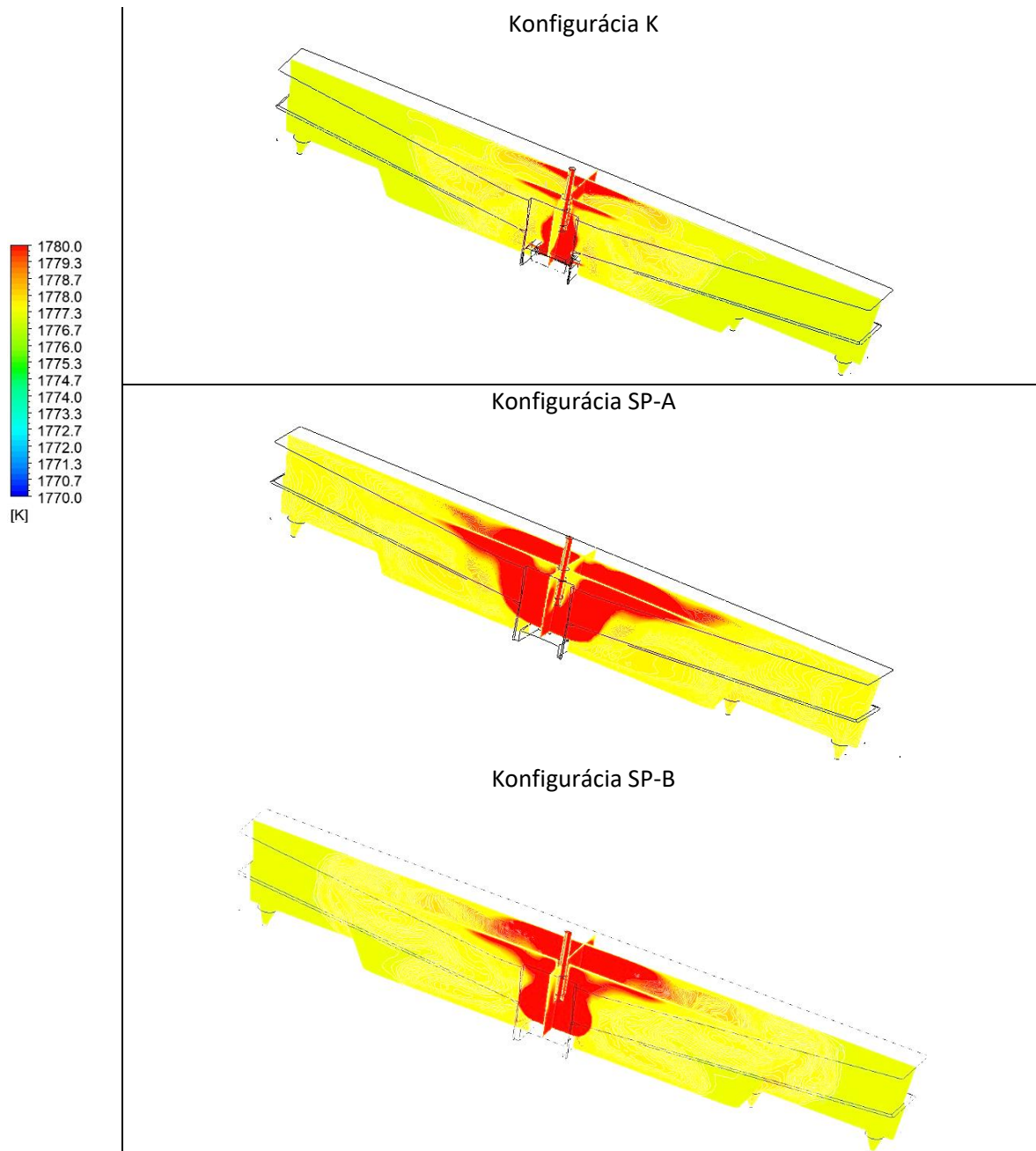


Obr. 17 Zobrazenie prúdnic pohľad zboku pre konfiguráciu K, SP-A, SP-B

Teplotné polia (Heat transfer)

Vstupné parametre pritekajúcu ocele pre výpočet teplotných polí sú uvedené v Tab. 3. Na obrázku 18 je zobrazené rozloženie teploty ocele v sledovaných rovinách pre analyzované konfigurácie. Pri porovnaní teplotného rozloženia pri konfigurácii SP-A s referenčnou konf. K má najvyššiu teplotu vo vtokovej oblasti medzipanvy, čo naznačuje lepšie premiešavanie vďaka tvarovej dopadovej dosky „SPHERIC-PROTOTYP - A“ a „SPHERIC-PROTOTYP - B“. Dochádza k lepšej distribúcii teplotného poľa ocele vo väčšej vzdialenosti od dopadovej dosky.

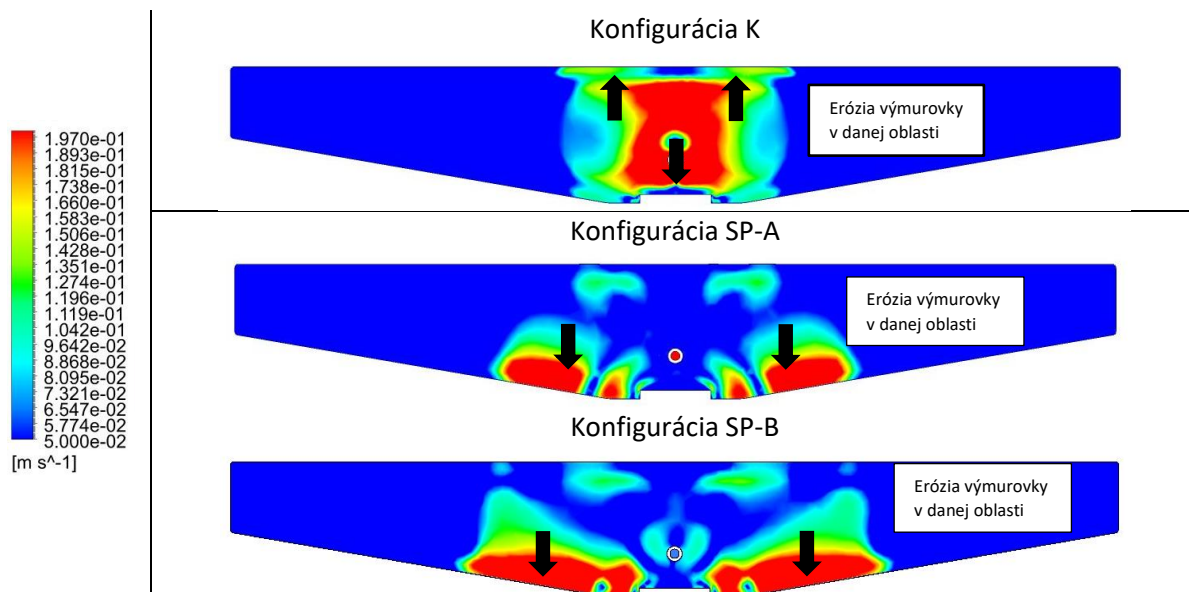
Naopak, pri referenčnej tvarovej dopadovej doske „KTHER/C“ je najvyššia teplota sledovaná v hornej zadnej a prednej vtokovej oblasti pritekajúcej ocele a najmä v oblasti ochrannej trubice ako smeruje piestové prúdenie. Tento trend naznačuje menšie premiešanie pritekajúcej ocele s celkovým objemom ocele v medzipanve.



Obr. 18 Rozloženie teploty ocele na rovinách v medzipanve pre konfigurácie K, SP-A a SP-B

Porovnanie kontúr na základe rýchlosti prúdenia

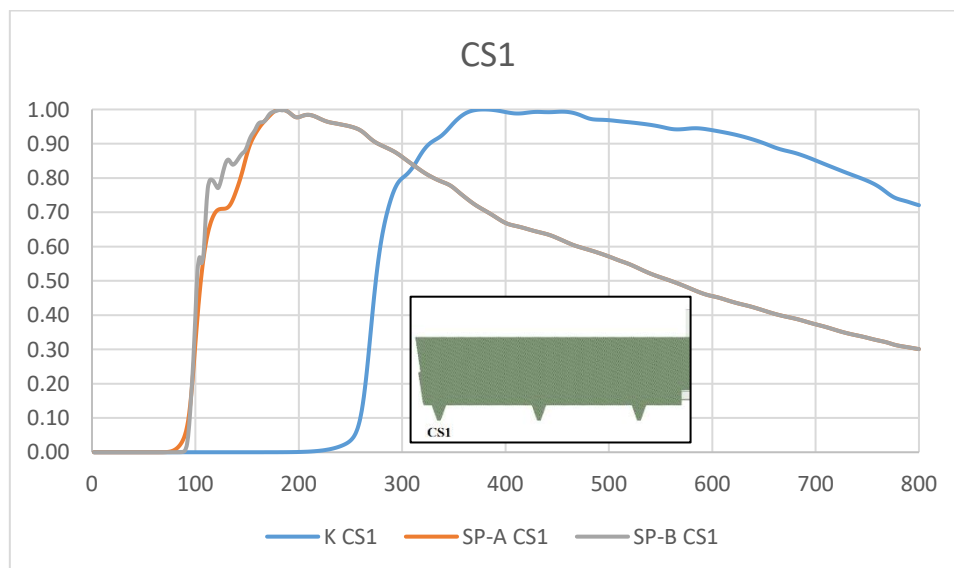
Pre pozorovanie kontúr v oblasti troskovej čiary bola vytvorená rovina, ktorá bola umiestnená 10 mm pod hladinou. Farebná škála rýchlosti (velocity) bola nastavená v rozsahu 0.05 – 0.2 m/s. Na základe pozorovaní môžeme konštatovať zmenu rýchlostného poľa. Pri konfiguráciách SP-A a SP-B v okolí ochrannej trubice bolo pozorovaná nižšia rýchlosť prúdenia čo môže mať pozitívny vplyv na menšie opotrebenie žiaruvzdornej výmurovky v strednej časti medzipanvy (obr. 19). Tento trend potvrdzujú aj výsledky z distribúcie stopovacej látky a vektorov, ktoré sú uvedené vyššie.



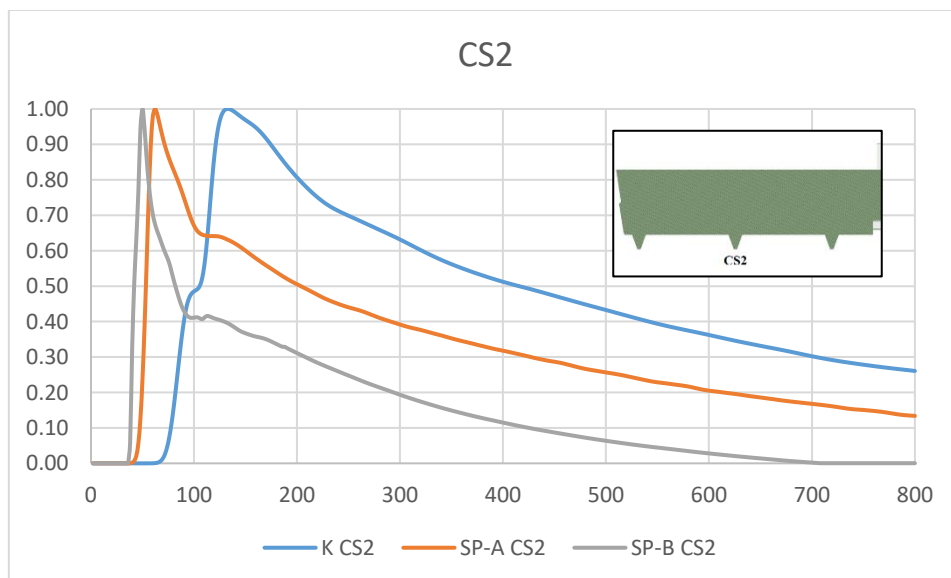
Obr. 19 Porovnanie rýchlostných kontúr stredovej časti medzipanvy v oblasti troskovej čiary.

RTD krivky

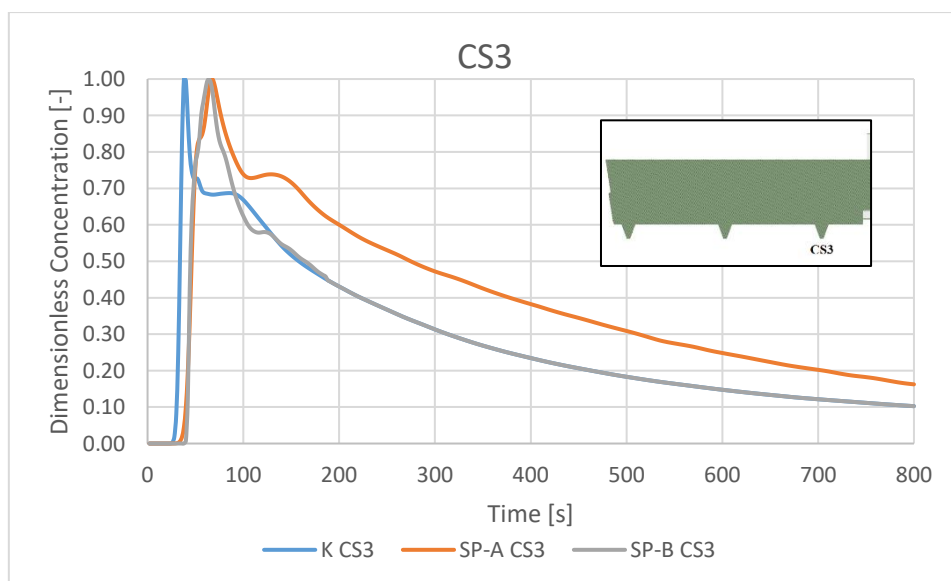
Pretože medzipanva je symetrická, porovnanie charakteru prúdenia pomocou RTD-kriviek a hodnôt min. a max. retenčného času boli hodnotené pre výtokové otvory CS1 (being far from the inlet) (obr. 20), CS2 (obr. 21) a CS3 (obr. 22).



Obr. 20 Výsledky RTD kriviek matematického modelovania pre výtokový otvor CS1 pre sledované konfigurácie K, SP



Obr. 21 Výsledky RTD kriviek matematického modelovania pre výtokový otvor CS2 pre sledované konfigurácie K, SP



Obr. 22 Výsledky RTD kriviek matematického modelovania pre výtokový otvor CS3 pre sledované konfigurácie K, SP

Hodnoty min. a max. retenčných časov zistené z c-kriviek na jednotlivých výtokových otvorov pre sledované konfigurácie s uvedením percentuálneho rozdielu voči referenčnej konfigurácii K sú uvedené v Tab. 4

Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..

Tab. 4 Výpočtové parametre RTD a objemový podiel prietoku pre konfigurácie K a SP

	Výsledky min. a max. retenčných časov						$\frac{V_d}{V}$	$\frac{V_p}{V}$	$\frac{V_m}{V}$
	Tmin [s]			Tmax [s]			[%]		
	CS1	CS2	CS3	CS1	CS2	CS3			
Konfigurácia K	168	56	28	387	103	37	19.9	25.8	54.3
Konfigurácia SP-A	80	41	33	180	60	65	31.7	15.2	53.1
Percentuálny rozdiel [%]	-52	-26.8	+17.8	-53.5	41.7	56.9	-	-	-
Konfigurácia SP-B	65.2	39.5	43.3	0	73.9	73.9	19.9	9.8	70.3
Percentuálny rozdiel [%]	-61.2	-29.5	54.6	-100.0	-28.3	99.7			

Na základe hodnôt minimálneho retenčného času pre výtokový uzol CS1 vyplýva, že percentuálny rozdiel Tmin v prípade konfigurácie K oproti konfigurácii SP-A došlo k zníženiu o 52 %. Pre CS2 došlo k zníženiu o 26.8 % a naopak pri CS3 došlo k navýšeniu o 17.8%. Tento trend má výrazný vplyv na samotnú rafinačnú schopnosť medzipanvy.

Pri porovnaní min. retenčných časov medzi jednotlivými výtokovými otvormi je možné sledovať tiež výrazné rozdiely hodnôt. Pri konfigurácii K tieto hodnoty činili rozdiel medzi výtokovými otvormi CS1 a CS2 až 67% a medzi CS2 a CS3 50 %. Pre konf. SP došlo k značnému zníženiu týchto rozdielných hodnôt mi. retenčných časov a to medzi CS1 a CS2 na 48.7% a medzi CS2 a CS3 na 19.5 %.

Na základe výsledkov realizovaných simulácií, boli pri konfigurácii SP dosiahnuté výrazne nižšie percentuálne rozdiely medzi jednotlivými výtokovými otvormi, čo môže mať efektívny vplyv na premiešanie celého objemu medzipanvy a zníženie nehomogenity kontidliatkov na jednotlivých výtokových uzloch z pohľadu zotrvania ocele v medzipanve.

Pri posudzovaní správnej rafinácie tekutej ocele je kľúčové určiť podiel oblastí prúdenia a to zónu premiešavania, mŕtvu zónu a zónu piestového prúdenia.

Pomocou vzťahov 4-8 boli vypočítané piestové prúdenie, zóna mŕtveho prietoku a oblasť premiešavania. Piestové prúdenie bolo vypočítané vzťahom (4)

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

kde V_p – objem s piestovým prúdením, [m³] – plug volume

τ_{min} – minimálny retenčný čas, [s]

$\bar{\tau}$ – Teoretický priemerný čas, [s] theoretical mean residence time

$$\bar{\tau} = \frac{V}{Q} \quad (5)$$

kde V – objem tekutiny v reaktore, [m³] V – volume of the tundish

Q – objemový prietok tekutiny [m³.s⁻¹] volumetric rate of the flow

Pre výpočet objemu s mŕtvym prúdením bol vypočítaný pomocou vzťahu (6)

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{\bar{\tau}_{skut}}{\bar{\tau}} \quad (6)$$

Kde V_d – objem s mŕtvym prúdením, [m³] – Dead zone

$\bar{\tau}_{skut}$ – skutočný priemerný čas tekutiny v reaktore [s] (7) – real mean residence time flow v equipment

$$\bar{\tau}_{skut} = \frac{\int c \cdot \tau \cdot d\tau}{\int c \cdot d\tau} \quad (7)$$

Pre výpočet objemu premiešavania bol použitý tento vzťah (8):

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (8)$$

Kde V_m – objem s mŕtvym prúdením, [m³] – Mixed volume

Z pohľadu vypočítaných mŕtvych objemov v medzipanve bolo zistené zvýšenie pri konf. SP oproti konf. K a pri objeme piestového prúdenia došlo k zníženiu. Oblasť premiešavania bola približne rovnaká.

Ďalej na základe porovnania sledovaných konfigurácií bol vypočítaný pomer premiešavania k mŕtvemu prietoku V_m/V_d , ktorý hovorí o kvalite tepelnej a chemickej homogenizácie v medzipanve a pomer piestového prúdenia k mŕtvemu prietoku V_p/V_d , ktorý hovorí, o podmienkach pre priaznivú flotáciu nekovových inklúzií [2] Tab. 5.

Table 5 Comparison of ratio of different tundish volumes

Konfigurácia	V_m/V_d	V_p/V_d
K	2.7	1.3
SP-A	1.7	0.5
SP-B	3.5	0.5

Pri konfigurácii SP-A na základe vypočítaných hodnôt navzájom prepojených oblastí toku prúdenia pomerov premiešavania k mŕtvemu prietoku môžeme predpokladať zníženie tepelnej a chemickej homogenity a podmienok pre priaznivú flotáciu nekovových inklúzií. Všetky pri konfigur. SP-B došlo k zvýšeniu tepelnej a chemickej homogenity.

Záver

Jedným zo spôsobov ako zlepšiť efektivitu odlievania ocele je pred zavedením nových modifikátorov prúdenia výhodné ich otestovať a vyladiť za pomoci matematických simulácií.

Tento článok popisuje využitie matematických simulácií zameraných na popis charakteru prúdenia tekutej ocele v 6 prúdovej medzipanve pri zmene tvarovej dopadovej dosky pri jednej rýchlosti odlievania. Boli skúmané tri tvarové dopadové dosky. Výsledky matematických simulácií boli využité na porovnanie týchto dopadových dosiek. Hodnotenie bolo realizované pomocou kontúr, vektorov rýchlosti a stopovacej látky, teplotného rozloženia ocele v celkovom objeme medzipanvy. Pomocou c- kriviek bol stanovený minimálny a maximálny retenčný čas

a vypočítané navzájom prepojených objemov prúdenia ako sú mŕtvy objem, objem premiešavania a piestový objem pre sledované konfigurácie. Závěry hodnotenia sú tieto:

Pri pozorovaní charakteru prúdenia pomocou kontúr a vektorov bolo dosiahnuté aby pritekajúca roztavená oceľ nespôsobovala eróziu v hornej časti vtokovej oblasti medzipanvy. Prúdenie bolo usmernené na zadnú časť medzipanvy mimo vtokovej oblasti.

Následne došlo aj k zmene charakteru prúdenia v celom objeme medzipanvy čoho výsledkom bolo zrovnomenenie retenčných časov získaných z RTD kriviek na jednotlivých výtokových uzloch.

Na druhej strane pri konfigurácii SP-A na základe hodnotenia rozloženia oblastí prúdenia ako kritérium pre hodnotenie tepelnej a chemickej homogenity a podmienok pre priaznivú flotáciu nekovových inklúzií lepšie vychádzali pre konfiguráciu K. Všetky pri konfigurácii SP-B boli hodnoty pre kritérium tepelnej a chemickej homogenity vyššie oproti referenčnej konfigurácii K.

Čo sa týka hodnotenia teplotného rovnomernejšieho rozloženia roztavenej ocele na základe vizuálneho pozorovania v celkovom objeme medzipanvy bol pre konfiguráciu s tvarovou dopadovou doskou „SPHERC-PROTOTYP-A“ a „SPHERC-PROTOTYP-B“ dosiahnuté rozšírené teplotné pole vo vtokovej oblasti.

Na základe výsledkov z CFD simulácií pre tvarové dopadové dosky „SPHERC-PROTOTYP-A“ a „SPHERC-PROTOTYP-B“ môžeme konštatovať, že takéto dosky majú schopnosť eliminovať oblasti erózie výmurovky a zrovnomeniť retenčné časy pre jednotlivé výtokové uzly. S vhodným vystrojením medzipanvy by bolo možné upraviť aj oblasti prúdenia.

This research work was performed under the grant project No. 1/0212/21 and was financially supported by VEGA MŠ SR a SAV a project APVV-21-0396 was financially supported by APVV.

References

1. Continuous Casting Machinery Equipment, [Online], [cit. 2009-06-22]. Dostupné na internete: <http://rerollingmillccm.com/index.php/product/index/g/e/id/4.html>
2. M. Warzecha, T. Merder, P. Warzecha, A.M. Hutny. Hydrodynamic Conditions Of Flow In The Tundish Depending On Selected Technological Parameters For Different Steel Groups, Arch. Metall. Mater. 64 (2019), 1, 65-70, DOI: 10.24425/amm.2019.126219
3. Roderick I. L. Guthrie, Mihaiela M. Isac. Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future. Metals 2022, 12(5), 862; <https://doi.org/10.3390/met12050862>
4. L. Sowa: Effect Of Steel Flow Control Devices On Flow And Temperature Field In The Tundish Of Continuous Casting Machine, Archives Of Metallurgy And Materials, Volume 60, 2015, Issue 2, DOI: 10.1515/amm-2015-0216.
5. J. Pieprzyca, T. Merder, J. Lipinski, D. Laskawiec: Physical model of CCM for research in isothermal and non-isothermal conditions, Hutnik-Wiadomości hutnicze, , 2010, Nr 10, s. 567-571, ISSN 1230-3534

6. Gryc K., Michalek K., Střasák P.:Optimalizace vnitřní konfigurace mezipánve pro dosažení teplotní homogenity plynule odlévané oceli, Metal 2007, 22.-24.5.2007, Hradec nad Moravicí
7. 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.
8. Priesol, I. Spôsob Liatia Roztaveného Kovu s Využitím Dopadovej Dosky v Medzipánve. 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.
9. Hoerner, S.F. Fluid Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance; Hoerner Fluid Dynamics: Bakersfield, CA, USA, 1965.
10. Mechanizmus obtekania telies, Available online: <http://physedu.science.upjs.sk/kvapaliny/obtekanie.htm>, (accessed on 17.09.2018)
11. Branislav Buľko, Ivan Priesol , Peter Demeter, Peter Gašparovič, Dana Baricová, Martina Hrubovčáková. The Geometric Modification Of Impact Point In Tundish, Metals 2018, 8(11), 944; <https://doi.org/10.3390/met8110944>.
- 12.Liu, J.; Zhou, P.; Zuo, X.; Wu, D.;Wu, D. Optimization of the Liquid Steel Flow Behavior in the Tundish throughWater Model Experiment, Numerical Simulation and Industrial Trial. Metals 2022, 12, 1480. <https://doi.org/10.3390/met12091480>
- 13.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. <http://doi.org/10.3390/met10070849>
- 14.Yang, B.; Lei, H.; Xu, Y.; Liu, K.; Han, P. Numerical Investigation of Flow Characteristics of Molten Steel in the Tundish with Channel Induction Heating. Metals 2021, 11, 1937. <http://doi.org/10.3390/met11121937>
- 15.Vlček, P. 2013. Modelování turbulentního proudění. České Vysoké Učení Technické v Praze. [Online]. [cit. 31-03-2020]. Dostupné na internete: <<http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>>.
16. Sheng, D.-Y. Design Optimization of a Single-Strand Tundish Based on CFD-Taguchi-Grey Relational Analysis Combined Method. Metals 2020, 10, 1539. <http://doi.org/10.3390/met10111539>
17. Michalek K., Gryc K., Tkadlečková M., Morávka J., Modelování a vizualizace metalurgických procesu, VŠB, Ostrava, 2013, 118 str.
18. Zhiyin, Y. 2015. Large-eddy simulation: Past, present and the future. In Chinese Journal of Aeronautics. Volume 28, Issue 1. 2015. s. 11-24. ISSN 1000-9361.
19. Species transport theory. [Online] Ansys Fluent. [cit. 2020-01-03] Dostupné na: internete: <[ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 7.1.1 Species Transport Equations \(enea.it\)](#)>
- 20.Andreas Spille-Kohoff, Enrico Preuß, Klaus Böttcher: Numerical solution of multi-component species transport in gases at any total number of components, International Journal of Heat and Mass

Transfer, Volume 55, Issues 19–20, September 2012, Pages 5373-5377,
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.040>

21. Physical and numerical modelling of a four-strand steelmaking tundish using flow analysis of different configurations - J.H. Cloete, G. Akdogan, S.M. Bradshaw, and D.K. Chibwe

22. Flow Mechanism of Molten Steel in a Single-Strand Slab Caster Tundish Based on the Residence Time Distribution Curve and Data - Guocheng WANG,^{1,2}* Maofan YUN,^{2,3} ISIJ International, Vol. 55 (2015), No. 5, pp. 984–992 Chongmin ZHANG¹) and Guodong]