

**Technická univerzita Košice, Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie, Ústav
metalurgie, Oddelenie hutníctva a zlievarenstva**

Fyzikálne modelovanie v Laboratóriu simulácie procesov prúdenia LSPP

Modifikácia sférickej dopadovej dosky Spheric

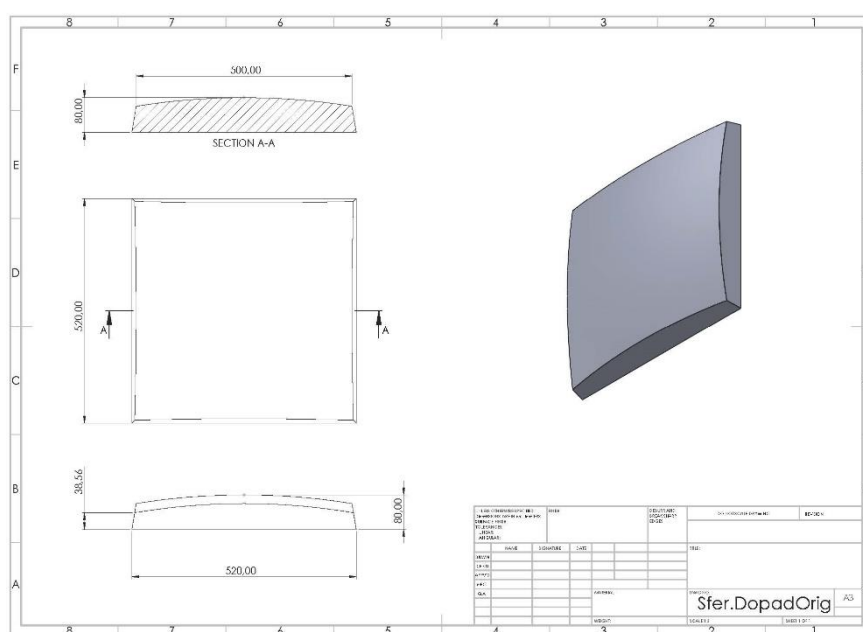
Košice, Marec 2024

Zodpovední riešitelia zadania: Doc. Ing. Branislav Bulko, PhD., Ing. Peter Demeter, PhD.

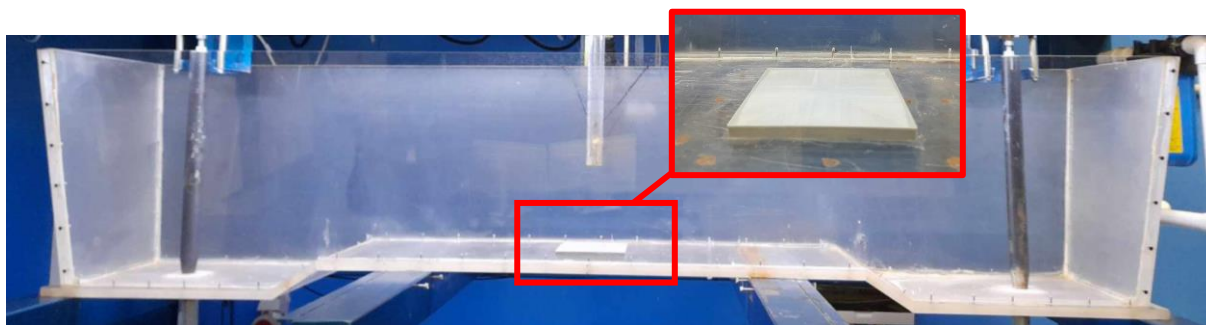
Úvod

Každá medzipanva je jedinečné zariadenie, preto neexistuje univerzálne vhodný tvar dopadovej dosky. Pri aplikácii Sferickej dopadovej dosky (Obr. 1) do dvojprúdovej medzipanvy na fyzikálnom modeli ZPO USS bez použitia ďalších modifikátorov dochádzalo k skratovému prúdeniu. Aby sme mohli sferickú dopadovú dosku použiť v takejto medzipanve je potrebné ju modifikovať. Pre optimalizáciu vnútornej geometrie s cieľom zlepšenia charakteru prúdenia a rafinácie ocele sa používajú moderné nástroje ako sú numerické simulácie.

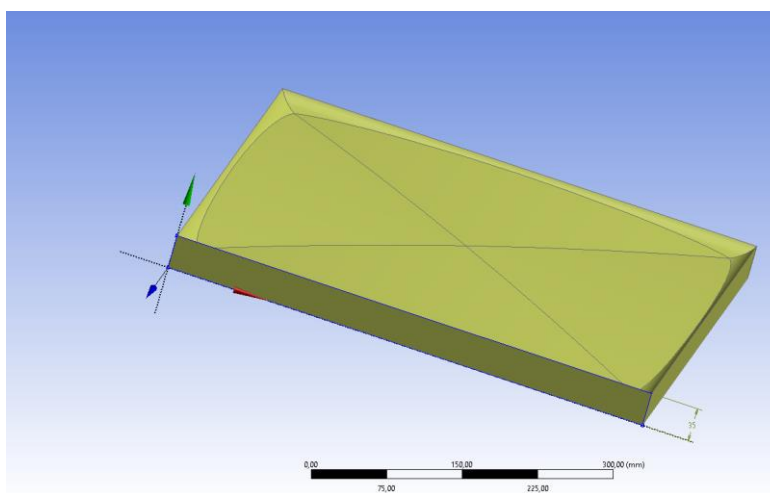
Pre prvotné testovacie simulácie boli využité numerické simulácie v programe Ansys Fluent pre návrh modifikovanej sferickej dopadovej dosky „K4“. Následne výsledný tvar navrhovanej sférickej dopadová dosky „K4“ bol verifikovaný na fyzikálnom modeli dvojprúdovej medzipanvy (Obr. 2). Modifikovaný tvar sférickej dopadovej dosky „K4“ je zobrazený na Obr. 3.



Obr. 1 Sférická dopadová doska



Obr.2 Umiestnenie dopadovej dosky Spheric-„K4“ v 2-prúdovej medziapanve



Obr. 31 Modifikovaná sférická dopadová doska - SPHERIC „K4“

Metodika merania na fyzikálnom modeli

Pri fyzikálnom modelovaní procesov prúdenia je tekutá oceľ nahradená vodou, čo umožňuje aj vizuálne skúmanie prúdenia vo všetkých uzloch ZPO.

Túto náhradu prúdiaceho média umožňuje podobnosť viskozitných parametrov vody a tekutej ocele Tab.1 .

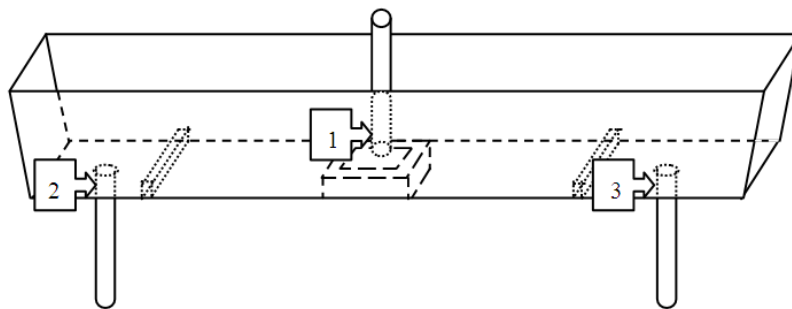
Tab. 1 Porovnanie fyzikálnych vlastností vody pri 20°C a ocele pri 1600°C

Vlastnosť	Voda pri 20°C	Oceľ pri 1600°C
Dynamická viskozita [kg.m ⁻³]	0,001	0,0064
Hustota [kg.m ⁻³]	1000	7014
Kinematická viskozita [m ² .s ⁻¹]	1.10 ⁻⁶	0,913.10 ⁻⁶
Povrchové napätie [N.m ⁻¹]	0,073	1,6

Merania sú štandardne vyhodnocované pomocou C-kriviek alebo F-kriviek.

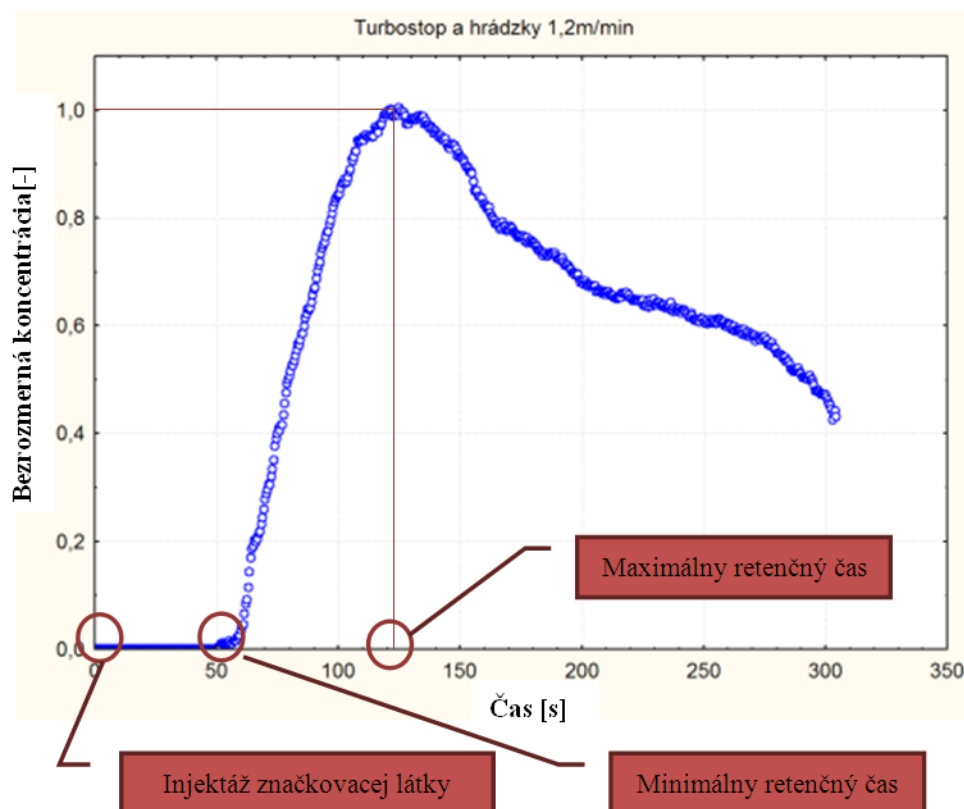
Metóda C-kriviek umožňuje zdefinovať charakteristiky prúdenia ocele v medzipanve za konštantných podmienok liatia.

Po dosiahnutí požadovanej hladiny v kryštalizátore a ustálení rýchlosti liatia sa vstrekuje odmerané množstvo vodného roztoku KCl do ochrannej trubice a zaznamená sa impulz zo sondy č.1, ktorý potom zodpovedá času τ_0 . 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, **Error! Reference source not found.** 4. Krivka sa tiež označuje ako RTD (Residence Time Distribution).



Obr. 4 Umiestnenie vodivostných sond na vodnom modeli

Z tejto krivky vieme určiť minimálny retenčný čas τ_{min} , čo je minimálna doba, za ktorú sa impulz značkovej látky injektovaný do ochrannej trubice ($\tau_0 = 0s$) objaví na výstupe z medzipanvy Obr. 5. Minimálny retenčný čas má rozhodujúci vplyv na dobu ktorú majú inklúzie na vyplávanie z ocele do trosky.



Obr. 5 Základné body na C-krivke

Maximálny retenčný čas $\tau_{\max}$ je doba medzi τ_0 a maximálnou nameranou koncentráciou značkovacej látky na výstupe z medzipanvy.

Koncentrácia stopovacej látky je udávaná v bezrozmerných číslach a je prepočítavaná podľa vzťahu (1):

$$\text{Bezrozmerná koncentrácia} = \frac{\text{nameraná koncentrácia}}{\text{maximálna nameraná koncentrácia}} [-] \quad (1)$$

Čas je v danom prípade udávaný čas nameraný na modeli, ktorý však po prepočte môže byť uvedený ako čas zodpovedajúci reálnemu ZPO, alebo môže byť udávaných v tonách odliatej ocele pri zodpovedajúcich rozmeroch kryštalizátora a rýchlosti odlievania.

Metóda F-kriviek. Získavanie hodnôt pre zostrojenie F-krivky sa realizuje podobným spôsobom ako pre C-krivku. Rozdiel je v tom, že v medzipanve na modeli sa spúšťa hladina vodného roztoku so „stopovacou látkou“ známej koncentrácie. Po znížení hladiny na požadovanú hodnotu sa následne medzipanva dopĺňa čistou vodou na maximálnu úroveň hladiny. Meranie F-kriviek je možné prevádzať aj bez zníženia hladiny v medzipanve, v závislosti napríklad na režime práce medzipanvy konkrétnej oceliarne. Dopĺňanie čistej vody spôsobuje pokles vodivosti na sondách umiestnených na výtokových uzloch medzipanvy. Z takto nameraných hodnôt sa zostrojí graf, ktorého výsledkom je tzv. F-krivka. U takto zostrojenej krivky sa dá

vypočítať, v ktorom čase za daných podmienok sa koncentrácia analyzovaného prvku znížila, alebo zvýšila na požadovanú hodnotu. Takisto sa dá vypočítať, aké množstvo ocele bolo odliate a kde sa nachádza tzv. prechodová oblasť.

Merania v ustálenom režime (C-krivky) boli urobené pri troch prietokoch zodpovedajúcich rýchlostiam liatia 0.8 m.min^{-1} , 1.2 m.min^{-1} (Tab. Tab. 2). Merania v neustálenom režime boli robené pri prietoku vody zodpovedajúcom rýchlosti odlievania 1 m.min^{-1} . Hodnoty prietokov vypočítané v Tab. 2 boli predelené dvoma (pre každý kryštalizátor) a zaokrúhlené na celé čísla. Medzipanva bola pri všetkých meraniach vystrojená testovanou dopadovou doskou a zvýšeným dnom.

Každá modelovaná konfigurácia bola pre presnejšie štatistické vyhodnotenie a porovnanie výsledkov simulovaná opakovane, pričom z týchto meraní boli následne vypočítané pre každú konfiguráciu priemerné hodnoty retenčných časov, uvádzané vo výsledkoch a grafoch.

Tab. 2 Prepočet prietokov vody na základe rozmerov kryštalizátora a rýchlosti odlievania

ŠÍRKA KRYŠTALIZÁTORA (m)	1,15	1,15	1,15
RÝCHLOSŤ LIATIA (m.min^{-1})	0,8	1,3	1
HUSTOTA TUHEJ OCELE (kg.m^{-3})	7800	7800	7800
MINÚTOVÁ PRODUKCIA DIELA Q_m (kg.min^{-1})	3157,44	4612,608	3946,8
MINÚTOVÁ PRODUKCIA DIELA Q_m (t.hod^{-1})	189,4464	276,7565	236,808
HUSTOTA TEKUTEJ OCELE (kg.m^{-3})	7014	7014	7014
OBJEMOVÝ PRIETOK Q_v ($\text{m}^3.\text{min}^{-1}$)	0,450163	0,657629	0,562703
AK MÁME MODEL 1:3, $MI=0,33$	0,06415	0,06415	0,06415
OBJEMOVÝ PRIETOK Z PANVY DO MP Q_v (l.min^{-1}) NA MODELI	28,87794	42,1869	36,09742
ZODPOVEDAJÚCI OBJEMOVÝ PRIETOK NA JEDNOM LIACOM PRÚDE (l.min^{-1}) NA MODELI	14	21	18

Výsledky meraní

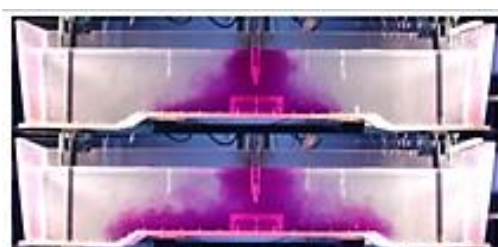
Výsledky pre jednotlivé merania C-krivky sú zobrazené v nasledujúcej Tab. 3.

Hodnotenie charakteru prúdenia bolo realizované pomocou vybratých obrázkov (Obr. 6, 7) pre rôzne rýchlosti liatia ($0,8$; $1,2 \text{ m.min}^{-1}$). Porovnania výsledkov z meraní modifikovanej sferickej dopadovej dosky – Spheric „K4“ boli realizované so štandardnou dopadovou doskou – Turbostopom. Samozrejme pre každú modelovanú konfiguráciu boli stanovené aj hodnoty minimálnych a maximálnych retenčných časov prúdenia ocele.

Tab. 3 Priemer retenčných časov pre jednotlivé dopadové dosky

Retenčný čas [s]	Turbostop		Spheric K4	
Rýchlosť liatia [m.min ⁻¹]	$\tau_{\min}$	$\tau_{\max}$	$\tau_{\min}$	$\tau_{\max}$
0.8	67	107	40,4	61,6
1.2	58	103	42,5	103,9

Medzipanva vystrojená štandardná
dopadová doska (Turbostopom)



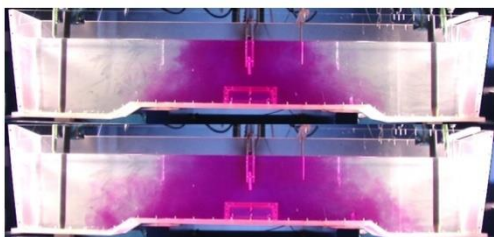
Medzipanva vystrojená spherickou
dopadovou doskov K4



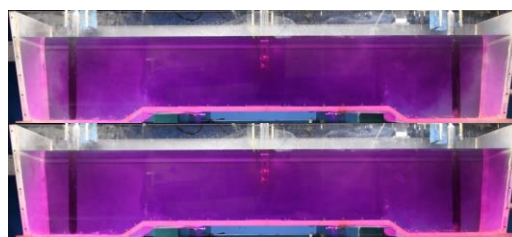
Čas. intervaly: 40,60 s rýchlosť 0,8 m.min⁻¹

Obr. 6 Prúdenie v sledovaných časoch od vstreknutia stopovacej látky pri rýchlosti 0,8 m.min⁻¹

Medzipanva vystrojená štandardná
dopadová doska (Turbostopom)



Medzipanva vystrojená spherickou
dopadovou doskov K4

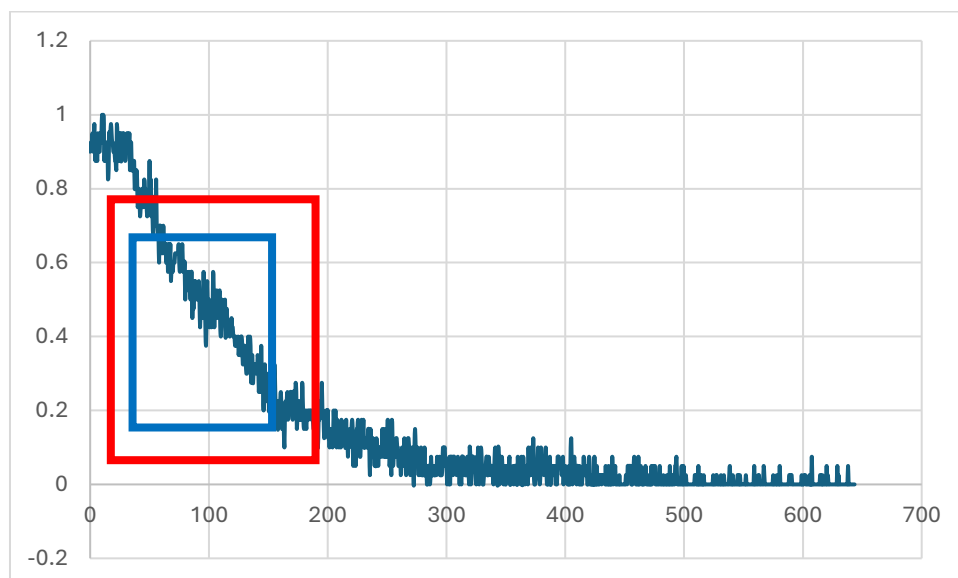


Čas. intervaly: 40,60 s rýchlosť 1,2 m.min⁻¹

Obr. 7 Prúdenie v sledovaných časoch od vstreknutia stopovacej látky pri rýchlosti 1,2 m.min⁻¹

Dôležitou etapou pri plynulom odlievaní ocele v sekvencii je napájanie tavieb za sebou, zvlášť pri odlievaní rôznych akostí. Tento technologický proces je charakteristický vznikom takzvaných prechodových oblastí. Prechodová oblasť pri odlievaní ocele označuje časový interval, počas ktorého dochádza k zmene chemického zloženia ocele pri výmene hlavných paniev a pri prechode medzi dvoma rôznymi druhmi ocele. Tento jav je dôležitý z pohľadu kvality výsledného produktu a efektivity výroby.

Pri fyzikálnom modelovaní nazývame toto meranie ako neustálený režim odlievania. Takéto meranie bolo realizované pri rýchlosti odlievania $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (Obr. 8).



Obr. 8 F-krivka pri rýchlosti liatia $1,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

V Tab. 4 je porovnanie časových intervalov pre dosiahnutie zmeny bezrozmernej koncentrácie v rozsahu 0.2 – 0.8 (čierna-tmavomodrá), resp. 0.1 – 0.9 (červená-svetlomodrá) pre jednotlivé dopadové dosky.

Tab. 4 Porovnania časových intervalov – F-krivky

Bezrozmerná koncentrácia (-)	0,8	0,2	Trvanie prechodu (s)	0,9	0,1	Trvanie prechodu (s)
Standard	80	260	180	75	310	235
SPH čas (s)	37,5	146	108,5	5,5	191,5	186

Záver

Z výsledkov realizovaných simulácií na fyzikálnom modeli vyplýva, že použitím dopadovej dosky Spheric „K4“ v dvojprúdovej medzipanve došlo zníženiu retenčných časov, ale na druhej strane dochádza k rovnomernejšiemu rozptýleniu pritekajúcej ocele od strednej časti do celkového objemu medzipanvy čo má pozitívny vplyv na vyplavovanie nekovových inklúzií. Pre komplexné porovnanie výsledkov sa hodnotili aj dĺžky prechodových oblastí, ktoré pri použití Spheric-„K4“ došlo k výraznému zníženiu oproti štandardnej dopadovej dosky.