

# Recenzované vědecké články

## Numerické modelování rafinace taveniny hliníku v pánvi

## Numerical Modeling of Refinement of Aluminium Melt in Ladle

Ing. Jana Sviželová; doc. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.; prof. Ing. Karel Michalek, CSc.

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, Katedra metalurgie a slévárenství, 17. listopadu 2172/12, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

*Práce je zaměřena na hodnocení dílčích výsledků numerických simulací procesu rafinace hliníkové taveniny inertním plynem dmýchaným pomocí ponorného zařízení využívaného v provozních podmínkách. Současná fáze výzkumu se zabývá analýzou rafinace objemu modelové rafinační pánve, jejíž předlohou byl vodní fyzikální model zkoumaného zařízení. Pomocí Species modelu byly vypočteny koncentrační křivky. Koncentrační křivky popisují šíření koncentrace stopovací látky v objemu taveniny v pánvi a napomáhají stanovit podmínky rafinace. K verifikaci výsledků numerického modelu posloužily výsledky získané na fyzikálním modelu. V rámci této práce byla pozornost zaměřena na zhodnocení vlivu počtu otáček rotoru a vzdálenosti rotoru od dna pánve na charakter proudění taveniny v pánvi a účinnost rafinace hliníkové taveniny.*

**Klíčová slova:** hliník; numerické modelování; CFD analýza; rafinace hliníku; koncentrační křivky

*The use of aluminium alloys in many industrial sectors is still increasing. Due to its excellent properties, aluminium is widely used in many industrial fields. The increase in the use of aluminium is also accompanied by increasing demands for chemical and metallographic cleanliness of this metal. The presence of unwanted phases in the molten metal can cause changes in final castings properties, such as porosity, corrosion susceptibility, electrical and thermal conductivity, etc. These phases are represented especially by harmful gases and non-metallic inclusions. Although significant progress has been made in the field of metallurgy in recent decades, great attention is still being paid to the optimization of metallurgical processes. Refining technology of aluminium melts is not the exception. Reducing refining time and process intensification often result in significant financial savings. The paper is focused on the evaluation of the results of numerical simulations of the process of refining of aluminium melt by an inert gas. In operating conditions, aluminium refinement is conducted by a submersible device consisting of a hollow shaft, rotor and breakwaters. Numerical simulations are based on the water physical model of the refining device. The current phase of research deals with the analysis of tracer concentration in the ladle. Using the Species model, concentration curves describing the propagation of tracer concentration in the water were calculated. Concentration curves helped to determine total time of tracer concentration stabilization in the water. In this paper, the attention was focused on the evaluation of the effect of rotational speed and the rotor immersion on the rate of tracer concentration stabilization in the water. Results of numerical simulations proved a positive influence of increasing rotational speed and increasing immersion of the rotor.*

**Key words:** aluminium; numerical simulations; CFD analyses; aluminium refinement; concentration curves

Cílem rafinace hliníkové taveniny je odstranění nečistot, které jsou reprezentovány zejména škodlivými plyny (H) a nekovovými vměstkami [1-4]. V současné době se pro rafinaci hliníkové taveniny používá několik typů technologií, například vakuová rafinace nebo rafinace inertním plynem v pánvových či průběžných reaktorech [2, 5, 6]. Předkládaný příspěvek se věnuje procesu rafinace hliníkové taveniny v pánvi pomocí dmýchání inertního plynu ponorným rotačním zařízením (obr. 1). Ponorné zařízení sestává z hřídele a dutého rotoru, kterými je inertní plyn vháněn do taveniny. Proudění na povrchu taveniny, plocha a tvar fázového rozhraní

kov-atmosféra jsou ovlivňovány jedním nebo dvěma vlnolamy. Účelem vlnolamů je minimalizovat vlnění na povrchu taveniny během dmýchání inertního plynu a otáčení rotoru, a tím omezit riziko absorpce vodíku z okolí.

Technologie odplynění hliníku inertním plynem (argonem nebo dusíkem, zde s označením jako *H*) je založena na Sievertsově zákoně vyjádřeného v rov. (1), podle kterého je možné snížit obsah plynu v tavenině snížením jeho parciálního tlaku v bublině inertního plynu, jak ukazuje rov. (2) [7]:

$$1/2 \{H_2\}_{(g)} \Leftrightarrow |H|, \quad (1)$$

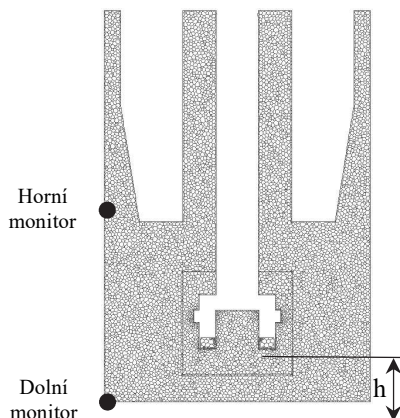
Proud inertního plynu je distribuován v tavenině ve formě bublinek v důsledku otáčení rotoru. Velikost a charakter rozptýlení bublinek inertního plynu výrazně ovlivňuje účinnost rafinace taveniny. S klesající velikostí bublinek

se zvětšuje jejich měrný povrch, tedy povrch, přes který může vodík difundovat z taveniny do inertního plynu. Menší bubliny také vykazují delší retenční čas v tavenině, což poskytuje vodíku více času na difuzi do bubliny inertního plynu.



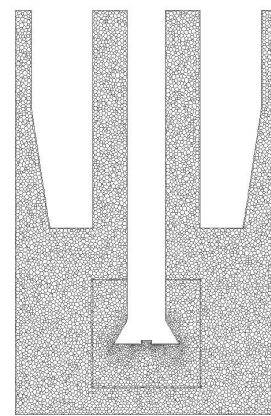
Obr. 1 Fyzikální model zařízení pro rafinaci hliníku [11]

Fig. 1 Physical model of refining device



Obr. 2 Geometrie a výpočetní síť varianty 1 s rotorem F2A, s vyznačením monitorovacích bodů

Fig. 2 Geometry and computational mesh of Variant 1 with F2A rotor and marking of monitoring points position



Obr. 3 Geometrie a výpočetní síť varianty 2 s rotorem J8

Fig. 3 Geometry and computational mesh of Variant 2 with J8 rotor

$$|\%H| = \frac{K_H}{f_H} (p_{H_2})_r, \quad (2)$$

kde je  $K_H$  rovnovážná konstanta reakce (-),  $f_H$  je aktivní koeficient vodíku (-) a  $(p_{H_2})_r$  je relativní parciální tlak vodíku (-).

## 1. Procedura numerického modelování

Pro stanovení intenzity odstraňování vodíku z hliníkové taveniny při změně některých procesních parametrů byly provedeny numerické simulace. Numerické modelování rafinace hliníku je komplexní proces, jehož řešení zahrnuje použití několika modelů s různou fyzikální podstatou. Simulace rotačního odplynění spočívají ve výpočtu turbulentního proudění za současné rotace domény a vývinu plynu, tedy interakce fází tavenina-atmosféra a tavenina-plyn. Pro účely předkládaného výzkumu byl zvolen CFD software ANSYS Fluent. Tento program pracuje s metodami konečných prvků a konečných objemů a disponuje modely vhodnými pro numerický popis zkoumané technologie (tab. 1). Více o metodice a postupu numerických simulací je možné se dočíst v publikacích autorů příspěvku [6, 7].

Srovnání numerické simulace s výsledky z fyzikálního modelování poskytuje jedinečnou příležitost k ověření numerického modelu. Primárním cílem numerické analýzy bylo tedy popsat děje probíhající při fyzikálním modelování procesu rafinace hliníkové taveniny. Předmětem simulací byl vodní fyzikální model rafinační pánve [11] (obr. 1). U fyzikálního modelu je podle teorie

podobnosti tavenina nahrazena vodou a škodlivý vodík kyslíkem. Kyslík je odstraňován inertním plynem a změna jeho koncentrace je monitorována dvěma optickými sondami. Proto byla také v případě numerických simulací jako modelové médium definována voda, která nahradila hliníkovou taveninu a kyslík jako náhrada vodíku.

Tab. 1 Zvolené numerické modely  
Tab. 1 Selected numerical models

Model	Oblast použití
Turbulent SST k- $\omega$ Model	Turbulentní proudění
Volume of Fluid Model	Vícefázové proudění
Species Model	Šíření koncentrace rafinačního plynu
Discrete Phase Model	Velikost a distribuce bublin v tavenině

Protože nelze (nebo jen s velkými obtížemi) numericky vypočítat najednou všechny děje, které probíhají při fyzikálním modelování procesu rafinace hliníkové taveniny, bylo nutné v rámci numerického modelování při vymezení modelu nalézt vhodnou definici. Definice musela respektovat jak dostupné procesy probíhající při rafinaci taveniny, tak možnosti použitého softwaru. K popisu změny koncentrace kyslíku ve vodním fyzikálním modelu byl použit tzv. Species model. Rychlost změny koncentrace kyslíku (resp. vodíku v případě reálného procesu rafinace) během dmýchání inertního plynu byla s využitím Species modelu popsána rychlostí šíření koncentrace monitorovací látky v objemu vody v pánvi. Stopovací látka byla monitorována v bodech, jejichž poloha odpovídala poloze optických sond na fyzikálním modelu (obr. 2). Na základě výsledků

Species modelu byla studována rychlost změny koncentrace stopovací látky v modelové kapalině.

### 1.1 Geometrie modelované oblasti a výpočetní síť

Geometrie vyšetřovaného agregátu pro dva typy rotorů (F2A, J8) a výpočetní síť jsou zobrazeny na obr. 2 a 3. Geometrii numerického modelu tvoří vnitřní objem pánve, ze které byl vyříznut rotor a vlnolamy. Vzdálenost  $h$  spodní hrany rotoru od dna reaktoru představuje ponor rotoru, který je proměnlivý v závislosti na modelovaných variantách.

Na připravené geometrii byla vytvořena polyedrická výpočetní síť (obr. 2 a 3). Tato síť se zvolila s ohledem na cirkulační proudění, které má v různých místech pánve různou orientaci. V těchto případech se od polyedrické sítě očekává dosažení vyšší přesnosti než u jiných typů sítí, zvláště díky většímu počtu sousedních elementů. Dochází tak k výměně hmoty přes více ploch, čímž se snižuje účinek numerické difuze způsobený prouděním, které nesměřuje kolmo na jejich stěnu [12].

### 1.2 Nastavení okrajových podmínek

Cílem numerických simulací technologie rafinace hliníkové taveniny bylo ověřit vliv některých provozních parametrů na daný proces. Mezi tyto parametry se řadí mimo jiné geometrie rotoru, počet otáček a ponor rotoru. Pro popis vlivu rychlosti otáčení na proudění a turbulentní jevy v reaktoru byly definovány dvě různé rychlosti otáčení používané v provozních podmínkách. Na základě provozních požadavků se také testoval vliv hloubky ponoru rotoru  $h$ , a sice 100 mm a 150 mm. Pro přesnější ověření vlivu ponoru na rafinační proces byly dále nadefinovány ponory 50 a 200 mm ode dna pánve. Nastavení a označení modelovaných variant uvádí tab. 2.

Tab. 2 Definice a značení modelovaných variant  
Tab. 2 Definition and designation of modelled variants

VARIANTA	1		2	
Typ rotoru	F2A		J8	
	Frekvence otáček ( $\text{min}^{-1}$ )			
Hloubka ponoru $h$ (mm)	350	500	350	500
50	1A3	1A5	2A3	2A5
100	1B3	1B5	2B3	2B5
150	1C3	1C5	2C3	2C5
200	1D3	1D5	2D3	2D5

## 2. Diskuse výsledků

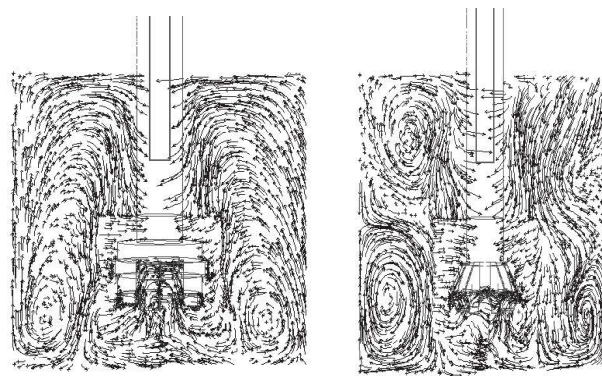
Změna koncentrace vodíku byla monitorována pomocí koncentračních křivek stopovací látky (která ve fyzikálních experimentech nahrazovala vodík) v objemu modelové kapaliny. Koncentrační křivky získané numerickým modelem odpovídají charakteru RTD křivek, naměřených při fyzikálním modelování rafinace taveniny v rámci

výzkumu [13]. Při tomto fyzikálním modelování byla použita k monitorování koncentrační změny injektáž NaCl. Současně byly použity frekvence otáček rotoru 300 až  $500 \text{ min}^{-1}$  a průtok argonu  $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tento způsob modelování sice nedefinuje skutečný čas dosažení požadovaného minimálního obsahu vodíku v tavenině, ale pracuje s předpokladem, že nejrychleji dosažená a ustálená koncentrační změna značí nejrychleji homogenizovaný objem taveniny v pánvi a určuje danou variantu jako nejefektivnější i v provozních podmínkách během rafinace taveniny [13]. Proto byly u koncentračních křivek numerického modelování sledovány nejrychleji dosažené časy pro ustálení koncentrace stopovací látky v modelové kapalině.

### 2.1 Charakter proudění v pánvi a plocha volné hladiny

Charakter proudění v pánvi, vypočtený turbulentním SST  $k-\omega$  modelem a vizualizovaný pomocí proudnic pro dvě základní varianty 1B5 a 2B5, je pro představu zobrazen na obr. 4. Proudění u ostatních hodnocených variant dle tab. 2, které se lišily vzdáleností rotoru ode dna pánve, vykazovalo podobné chování.

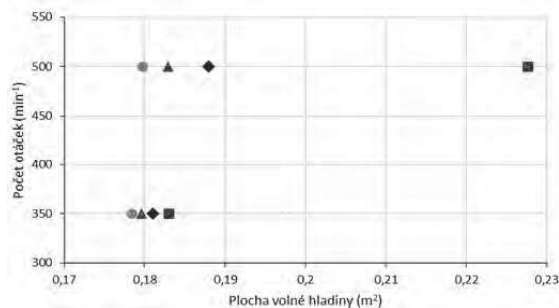
Je zřejmé, že rotor indukuje proudění směřující pod určitým úhlem ke dnu pánve, kde tvoří cirkulační smyčku. Odtud se proud po stěnách šíří do horní oblasti pánve. Tento hlavní proud dělí objem reaktoru na dvě oblasti – pod rotorem a nad rotorem. U varianty 2B5 se navíc v závislosti na natočení rotoru vyskytuje cirkulační smyčka i v oblasti u hladiny.



Obr. 4 Ukázka charakteru proudění v pánvi a) 1B5, b) 2B5  
Fig. 4 Illustration of flow character in a ladle a) 1B5, b) 2B5

Z hlediska reálného procesu je pohyb hladiny kovu nežádoucí, neboť dochází ke zvětšení povrchu rozhraní mezi taveninou a okolní atmosférou, kterým může do kovu difundovat vodík z různých zdrojů (pecní atmosféra, krycí soli apod. [14]). Při nevhodném nastavení parametrů procesu hrozí také riziko rozstříku kovu, či pohlcování okolní atmosféry do objemu kovu a tvorba bublin. Klidná hladina v pánvi během otáčení rotoru dosahovala plochy kolem  $0,18 \text{ m}^2$ . S rostoucími otáčkami a vzdáleností rotoru od dna pánve se však povrch volné hladiny zvětšoval. Způsobilo to zintenzivnění vlnění na hladině vlivem pohybu rotoru a obtékáním vlnolamů.

Vliv rychlosti otáčení rotoru na velikost plochy hladiny u všech modifikací varianty 1 s rotorem F2A ukazuje obr. 5. Výrazně větší povrch hladiny byl zjištěn u varianty 1D5, u které docházelo k velmi intenzivnímu vlnění doprovázenému pohlcováním bublin okolní atmosféry do objemu modelované kapaliny. Při reálném procesu rafinace by pravděpodobně docházelo také k rozstříku kovu. U varianty 2 s rotorem J8 nebylo zjištěno intenzivnější vlnění hladiny při změně parametrů procesu, které by vedlo ke zvětšení její plochy. Velikost plochy hladiny při použití rotoru J8 přibližně odpovídala velikosti plochy klidné hladiny v pánvi ( $0,18 \pm 0,005 \text{ m}^2$ ).



Obr. 5 Plocha volné hladiny varianty 1 (rotor F2A) při různých okrajových podmínkách

Fig. 5 Free surface area of Variant 1 (F2A rotor) in dependence on boundary conditions

Tab. 3 Časy ustálení koncentrace stopovací látky – vliv frekvence otáček  
Tab. 3 Time of tracer concentration stabilization – influence of rotational speed

Varianta	Čas ustálení koncentrace stopovací látky v monitorech (s)		Celkový čas ustálení koncentrace stopovací látky (s)	Varianta	Čas ustálení koncentrace stopovací látky v monitorech (s)		Celkový čas ustálení koncentrace stopovací látky (s)
	Dolní	Horní			Dolní	Horní	
1B3	11,75	13,25	13,25	2B3	12,50	14,80	14,80
1B5	9,10	9,98	9,98	2B5	8,93	10,13	10,13
1C3	10,75	12,50	12,50	2C3	11,30	11,70	11,70
1C5	7,73	8,70	8,70	2C5	9,35	8,78	9,35

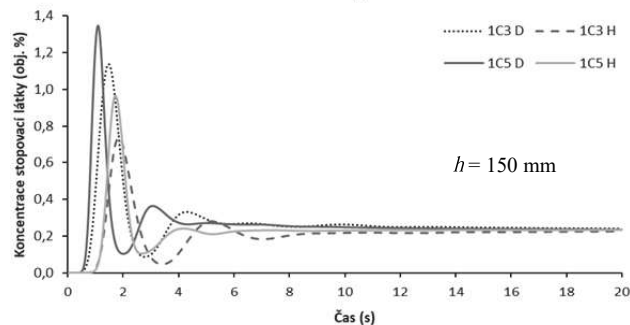
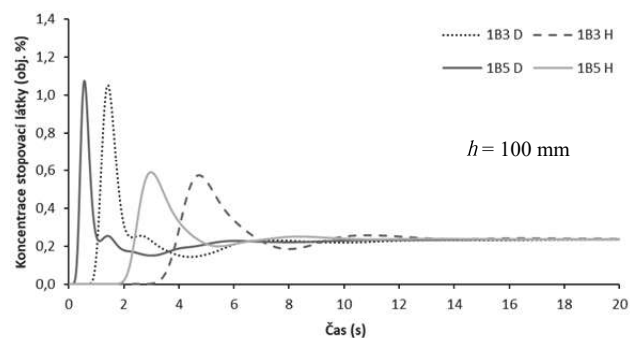
Tab. 4 Časy ustálení koncentrace stopovací látky – vliv ponoru  
Tab. 4 Time of tracer concentration stabilization – influence of rotor immersion

Varianta	Čas ustálení koncentrace stopovací látky v monitorech (s)		Celkový čas ustálení koncentrace stopovací látky (s)	Varianta	Čas ustálení koncentrace stopovací látky v monitorech (s)		Celkový čas ustálení koncentrace stopovací látky (s)
	Dolní	Horní			Dolní	Horní	
1A5	13,20	16,05	16,05	2A5	8,60	10,98	10,98
1B5	9,10	9,98	9,98	2B5	8,93	10,13	10,13
1C5	7,73	8,70	8,70	2C5	9,35	8,78	9,35
1D5	8,20	8,45	8,45	2D5	5,85	8,03	8,03

## 2.2 Vliv počtu otáček na účinnost rafinace taveniny v pánvi

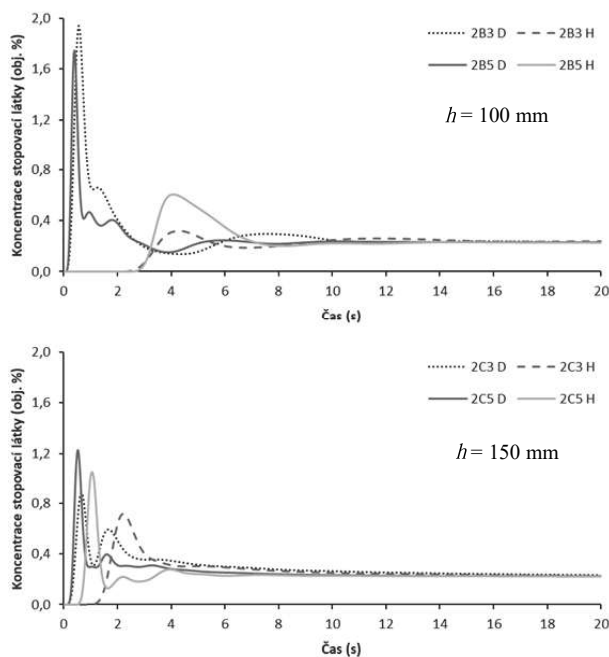
Obr. 6 a 7 znázorňují vliv počtu otáček rotoru na rychlost šíření koncentrace monitorovací látky v objemu kapaliny v pánvi u varianty 1 a 2. V případě obou variant 1 a 2 docházelo k dřívější detekci stopovací látky v dolním monitorovacím bodu, což je plně v souladu s charakterem proudění zjištěným v rámci analýzy proudění (obr. 4) – hlavní proud směřuje od rotoru směrem ke dnu pánve, poté se šíří po stěně pánve směrem k hladině.

Při frekvenci otáček  $500 \text{ min}^{-1}$  byla stopovací látka na dolním monitorovacím bodu zachycena téměř bezprostředně po započetí simulace. Při frekvenci otáček  $350 \text{ min}^{-1}$  byla zřejmě prodleva od startu do zachycení koncentrace na dolním monitoru, která se pohybovala v rozmezí 0,5 až 1,4 s. Podobné trendy byly pozorovány také u šíření koncentrace v horním monitorovacím bodu. U variant s frekvencí otáček  $350 \text{ min}^{-1}$  se koncentrace stopovací látky rozšířila do horní části pánve průměrně po 2 až 4 s. Při vyšších otáčkách není tato prodleva natolik významná.



Obr. 6 Koncentrační křivky varianty 1 (rotor F2A) – vliv frekvence otáček

Fig. 6 Concentration curves of Variant 1 (F2A rotor) – influence of rotational speed



Obr. 7 Koncentrační křivky varianty 2 (rotor J8) – vliv otáček  
Fig. 7 Concentration curves of Variant 2 (J8 rotor) – influence of RPM

Z uvedeného je zřejmé, že při vyšších otáčkách rotoru dochází k rychlejší změně koncentrace monitorovací látky v objemu kapaliny v pánvi, a lze tedy předpokládat i lepší podmínky a účinnost rafinačního procesu. Rychlost změn koncentrace pro všechny modelované verze je souhrnně uvedena v tab. 3.

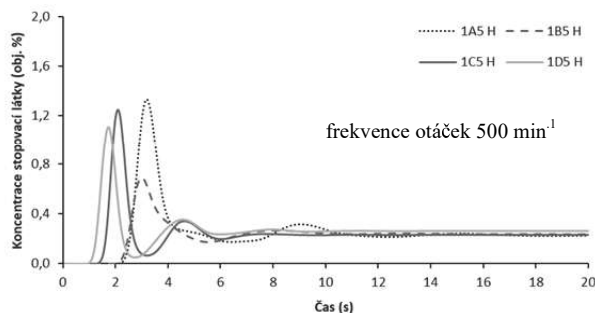
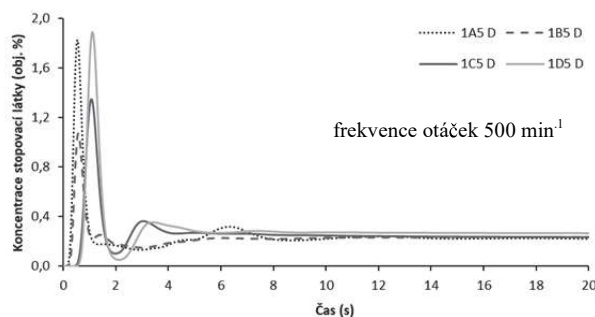
### 2.3 Vliv pozice rotoru na účinnost rafinace

Vliv ponoru rotoru na rychlost šíření koncentrace monitorovací látky v pánvi je demonstrován na variantách 1 a 2 při frekvenci otáček  $500 \text{ min}^{-1}$ , za kterých dochází k výraznějším fluktuacím koncentrací v monitorovacích bodech a představují tak názornější příklad.

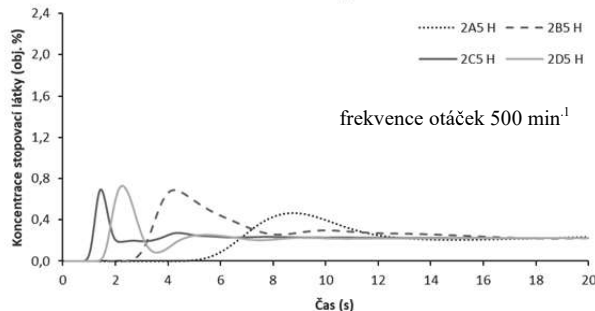
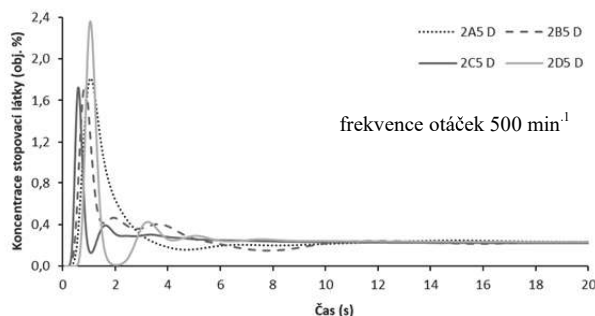
Obr. 8 zobrazuje šíření koncentrace stopovací látky v pánvi u varianty 1 s rotorem F2A. V dolním monitorovacím bodě dochází k dřívější detekci stopovací látky v případě variant 1A5 s ponorem rotoru 50 mm a 1B5 s ponorem rotoru 100 mm, jejichž rotory jsou dolnímu monitorovacímu bodu více přiblíženy. Naopak v horním monitorovacím bodu byly dříve detekovány koncentrace stopovací látky u varianty 1D5 s ponorem 200 mm a 1C5 s ponorem 150 mm. Časy homogenizace stopovací látky v pánvi jsou uvedeny v tab. 3. Z těchto dat je patrné, že u varianty 1 s rotorem F2A k dřívějšímu ustálení koncentrace dochází v případě všech ponorů v dolní části reaktoru. S rostoucí vzdáleností rotoru od dna pánve se zkracoval celkový čas ustálení koncentrace v pánvi. Tato skutečnost může naznačovat méně intenzivní proudění v oblasti nad rotorem, jehož důsledkem byl problematictější transport stopovací látky k hornímu monitoru. S rostoucí vzdáleností rotoru ode dna se tato oblast zmen-

šovala a docházelo k urychlení šíření koncentrace objemu pánve.

Průběhy koncentrací stopovací látky varianty 2 s rotorem J8 jsou zobrazeny na obr. 9. Je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností rotoru J8 od dna pánve dochází k urychlení šíření stopovací látky k dolnímu i hornímu monitorovacímu bodu, s výjimkou varianty 2D s ponorem 200 mm. U varianty 2 s rotorem J8 tedy zvyšování ponoru urychluje čas ustálení koncentrace stopovací látky v kapalině podobně jako v případě rotoru F2A.



Obr. 8 Koncentrační křivky varianty 1 – vliv ponoru rotoru  
Fig. 8 Concentration curves of Variant 1 – influence of rotor immersion



Obr. 9 Koncentrační křivky varianty 2 – vliv ponoru rotoru  
Fig. 9 Concentration curves of Variant 2 – influence of rotor immersion

### 3. Závěr

Príspevek prezentuje výsledky numerického modelování rafinace taveniny hliníku v pánvi za současného použití inertního plynu. Závěry plynoucí ze současného stavu výzkumu lze shrnout do následujících bodů:

- Předlohou pro numerické simulace uvedené technologie byl fyzikální model poloprovodní pánve pro rafinaci kovů. Tato skutečnost řešitelům umožnila ověření funkce numerického modelu.
- Pro výpočet proudění byl zvolen SST  $k-\omega$  model. Chování volné hladiny bylo popsáno pomocí multifázového VOF modelu. Výpočet koncentračních křivek se provedl pomocí Species modelu.
- Charakter proudění v reaktoru vykazuje podobné chování v případě všech modelovaných variant nezávisle na počtu otáček a ponoru rotoru. U všech variant byl zaznamenán hlavní proud, který v objemu modelové kapaliny vytváří dvě cirkulující oblasti.
- Výsledky VOF modelu poukázaly na nadměrné vlnění hladiny a zatahování bublin okolní atmosféry do objemu kapaliny v reaktoru při použití rotoru F2A s ponorem 200 mm a frekvencí otáček  $500 \text{ min}^{-1}$ .
- S rostoucími frekvencí otáček dochází k rychlejšímu ustálení koncentrace stopovací látky v objemu modelované kapaliny v pánvi.
- Zvětšení vzdálenosti rotoru od dna pánve přináší pozitivní vliv na urychlení procesu změny koncentrace stopovací látky. Při zvyšování ponoru rotoru nad 150 mm je ovšem nutné brát ohled na chování volné hladiny. Jak bylo prokázáno, každé přiblížení rotoru k hladině znamená zvětšení její plochy, a tedy zvýšení nebezpečí dalšího prisávání nežádoucího vodíku do objemu taveniny.

V další fázi výzkumu bude snahou numericky popsat chování vhněněného plynu a popsat korelaci mezi dosaženými výsledky fyzikálního a numerického modelování. U výsledků fyzikálního modelu se zřejmě uplatňují další vlivy, které nebyly při numerických simulacích brány v potaz (např. difuze kyslíku z okolní atmosféry přes hladinu do objemu pánve, difuze kyslíku z vody do bublin argonu apod.)

#### Poděkování

Práce vznikla za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR v rámci programu TRIO a projektu FV10080 "Výzkum a vývoj pokročilých rafinačních technologií hliníkových tavenin pro zvýšení kvality výrobků". Finanční podpora byla také poskytnuta projektem Studentské grantové soutěže č. SP2019/148 a SP2019/43. Dík patří také Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy, které tuto práci podpořilo v rámci projektu Velké infrastruktury pro výzkum, experimentální vývoj a inovace „IT4Innovations National Supercomputing Center – LM2015070“.

#### Literatura

- [1] WARKE, V. S., TRYGGVASON, G., MAKHLOUF, M. M. Mathematical Modelling and Computer Simulation of Molten Metal Cleansing by the Rotating Impeller degasser, Part I. Fluid Flow. *J. Mat. Pro. Tech.*, 168 (2005) 1, 112–118. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.10.017.
- [2] MERDER, T., SATERNUS, M., WARZECHA, P. Possibilities of 3D Model Application in the Process of Aluminium Refining in the Unit with Rotary Impeller. *Arch. Metal. Mater.*, 59 (2014) 2, 789–794 DOI 10.2478/amm-2014-0134.
- [3] SIGWORTH, G. K. A Scientific Basis for Degassing Aluminum. *AFS transactions*, (1987) 73–78. ISBN 0-87433-106-4.
- [4] GOMÉZ, E. R., ZENIT, R., RIVERA, C. G., TRÁPAGA, G., RAMÍREZ-ARGÁEZ M. A. Mathematical Modelling of Fluid Flow in a Water Physical Model of an Aluminium Degassing Ladle Equipped with an Impeller-Injector. *Metal. Mater. Trans. B*, (2013) 44B, 423-435 DOI: 10.1007/s11663-012-9774-8.
- [5] SATERNUS, M., MERDER T. A Flow Rate of Gas Versus the Level of Gas Dispersion in Physical Model of Continuous Refining Reactor. *Metallurgija*, 54 (2015) 1, 27–30. ISSN 0543-5846.
- [6] POPESCU, G., GHEORGHE, I., DĂNILĂ, F., MOLDOVAN, P. Vacuum Degassing of Aluminium Alloys. *Materials Science Forum*, 217-222 (1996) 147-152.
- [7] ADOLF, Z. *Teorie procesů při výrobě železa a oceli*, část II - Teorie ocelářských pochodů. (Studijní opora) VŠB-TU Ostrava, 2013, 94 s.
- [8] HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, M., CAMACHO-MARTÍNEZ J. L., GONZÁLEZ-RIVERA C. et al. Impeller Design Assisted by Physical Modelling and Pilot Plant Trials. *J. Mater. Process. Technol.* 236 (2016) 1-8. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.031.
- [9] SVIŽELOVÁ, J., TKADLEČKOVÁ, M., MICHALEK, K., WALEK, J. Development of a Monitoring Method of Hydrogen Removal from Aluminium Melt Using Numerical Modelling. In: *METAL 2019: 28<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials: list of abstracts*. Ostrava: Tanger, 2019, 161 p. ISBN 978-80-87294-91-8.
- [10] SVIŽELOVÁ, J., TKADLEČKOVÁ M., MICHALEK K., WALEK J., SATERNUS M., PIEPRZYCA J., MERDER T. Numerical Modelling of Metal Melt Refining Process in Ladle With Rotating Impeller and Breakwaters. *Arch. Metal. Mater.*, 64 (2019) 2, 659–664. DOI: 10.24425/amm.2019.127595.
- [11] MICHALEK, K., SOCHA, L., GRYC, K., TKADLEČKOVÁ, M., SATERNUS, M., PIEPRZYCA, J., MERDER, T.: Physical Modelling of Degassing Process at Blowing of Inert Gas. *Arch. Metal. Mater.*, 63 (2018) 2, 978–992 DOI: 10.24425/122432
- [12] SOSNOWSKI, M., KRZYWANSKI, J., GNATOWSKA, R., SUWAŁA, W., DUDEK, M., LESZCZYŃSKI, J., ŁOPATA, S. Polyhedral Meshing as an Innovative approach to Computational Domain Discretization of a Cyclone in a Fluidized Bed CLC unit. *E3S Web of Conferences*, 2017, 14. DOI: 10.1051/e3sconf/20171401027. ISSN 2267-1242.
- [13] SATERNUS, M., MERDER, T. Physical Modelling of Aluminum Refining Process Conducted in Batch Reactor with Rotary Impeller. *Metals*, 9 (2018) 8. DOI: 10.3390/met8090726. ISSN 2075-4701.
- [14] MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.