

Recenzované výzkumné články

Fyzikální modelování technologických parametrů rotační rafinace hliníkové taveniny

Physical Modelling of Technological Parameters of Aluminium Melt Rotary Refining

Ing. Josef Walek; prof. Ing. Karel Michalek, CSc.; doc. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.

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

Předkládaný článek se zabývá využitím fyzikálního modelování pro studium procesu odplyňování hliníkových tavenin v rafinační pánvi dmýcháním inertního plynu přes otáčející se rotor. Pro účely fyzikálního modelování byl použit model z plexiskla v měřítku 1:1 k provozní pánvi. Součástí fyzikálního modelu byla dutá hřídel, sloužící pro přívod plynů, vybavená rotorem a dvěma vlnolamy. Proces odplyňování taveniny hliníku dmýcháním inertního plynu byl při fyzikálním modelování simulován poklesem rozpuštěného kyslíku v modelové kapalině (vodě). Tento příspěvek je zaměřen na vyhodnocení laboratorních experimentů získaných pomocí metody fyzikálního modelování. Pozornost je zaměřena na posouzení relevantních parametrů procesu odplynění – otáčky rotoru, objemový průtok inertního plynu, vzdálenost rotoru ode dna rafinační pánve a varianta rotoru. Předběžné výsledky fyzikálního modelování ukazují, že optimálních výsledků rafinačního procesu bylo dosaženo při použití rotoru F2A 190.

Klíčová slova: fyzikální modelování; rafinační pánev; dmýchání inertního plynu; odplynění taveniny; rotor

The presented paper deals with the use of physical modelling to study the degassing process of aluminium melts in the refining ladle by blowing inert gas through a rotating impeller. The efficiency of this rotary refining depends on the creation of fine bubbles with a high interphase surface, wide-spread distribution, the residence time of its effect in the melt, and mostly on the wide-spread dispersion of bubbles into the whole volume of the refining ladle. This is most affected by the rotary impeller speeds and the amount of blown inert gas. An equally important parameter is also the geometry of the impeller and its influence on the distribution and dispersion of inert gas bubbles, the formation of vortices and the overall homogenisation of the melt. Optimisation of the degassing process is difficult under operating conditions. Therefore, in laboratory conditions so-called modelling is used, where the original prototype is replaced by a model. In the case of physical modelling, a method is used, in which the real system is replaced by a tangible physical model, which is as close as possible to the behaviour of the real system. The basis of physical modelling consists in the targeted utilisation of the similarities of the processes that take place within the actual device and its model. For physical modelling, a plexiglass model on a scale of 1:1 is used for the operating ladle. Part of the physical model is a hollow shaft used for gas supply equipped with an impeller and also two baffles. The degassing process of aluminium melt by blowing inert gas is simulated at physical modelling by a decrease of dissolved oxygen in the model liquid (water). This paper is aimed at the evaluation of laboratory experiments obtained by the method of physical modelling. Attention is focused on the assessment of relevant parameters for the degassing process – rotary impeller speeds, a volume flow rate of inert gas, the distance of the impeller from the bottom of the refining ladle and impeller variant. The preliminary results of physical modelling show that optimal results of the refining process are achieved by using the F2A 190 impeller. And the results from numerical modelling are also used to verify the results from physical modelling.

Key words: physical modelling; refining ladle; inert gas blowing; degassing of the melt; impeller

Vzhledem k rostoucím požadavkům na kvalitu hliníkových odlitků je stále více kladen důraz na procesy rafinace taveniny odstraněním plynů (vodíku) [1-3], kovových nečistot (sodíku, vápníku, lithia atd.) a nekovových nečistot (oxidů, nitridů, boridů, karbidů atd.) v průběhu zpracování. Nejběžnější provozní technologií pro snižo-

vání obsahu nečistot v roztaveném hliníku představuje metoda dmýchání inertního plynu, tzv. rafinačního plynu, do pánve přes otáčející se rotor [4-6].

Technologie odplynění prostřednictvím inertního plynu je založena na Sievertsově zákoně. Podle Sievertsova zákona

je možné snížit obsah plynu v tavenině snížením jeho parciálního tlaku v bublině inertního plynu. Hlavními optimalizačními parametry jsou otáčky rotoru a množství dmýchaného inertního plynu [7-8]. Účinnost této rafinace založené na míchání lázně závisí na tvorbě jemných bublin s vysokým mezifázovým povrchem, jejich rovnoměrné distribuci, relativně dlouhé době působení v tavenině a většinou na rovnoměrné disperzi bublin v celém objemu rafinační pánve. To je nejvíce ovlivněno právě otáčkami rotoru a množstvím dmýchaného inertního plynu. Neméně důležitým parametrem je také geometrie samotného rotoru a její vliv na distribuci a disperzi bublin inertního plynu, tvorbu vírů a celkovou homogenizaci taveniny [9-11].

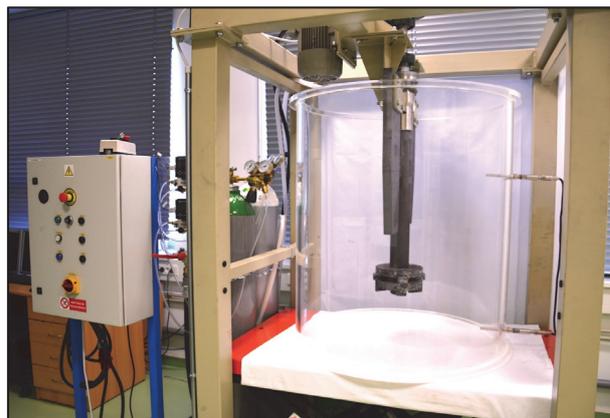
V provozních podmínkách je optimalizace procesu odplynění složitá. Proto se v laboratorních podmínkách využívá tzv. modelování, kde dochází k nahrazení původního díla modelem. Technologie modelování se dělí na dvě základní metody: numerické a fyzikální modelování. Při numerickém modelování je proces nahrazen matematickým modelem tvořeným soustavou parciálních diferenciálních rovnic. V případě fyzikálního modelování se jedná o metodu, při níž se nahrazuje reálný systém hmotným fyzikálním modelem, jenž se svým chováním co nejvíce blíží chování reálného systému. Hlavní podstata fyzikálního modelování spočívá v cíleném využití podobnosti dějů, které probíhají na skutečném zařízení a jeho modelu. Při této metodě má jak dílo, tak model stejnou fyzikální podstatu. Proudění tekutiny v technologickém procesu je tedy modelováno opět prouděním tekutiny v modelu, ale v určitém měřítku délek, rychlostí objemových průtoků, viskozit atd. Podmínkou přenosu výsledků z modelu na dílo je podobnost procesů probíhajících v modelu a díle. Jednou z výhod fyzikálního modelování je možnost vizualizace procesů, které přispívají k pochopení procesů probíhajících v reálných systémech. Z výsledků dosažených na modelu lze predikovat chování reálného systému při různých změnách procesu [12-13].

Cílem tohoto článku je seznámit s hodnocením metodických laboratorních experimentů zaměřených na návrh a testování vyvinutých metod odplynění při fyzikálním modelování.

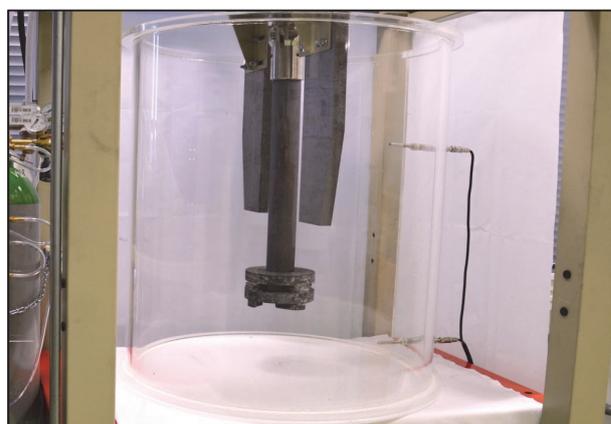
1. Experimentální podmínky fyzikálního modelování

Experimenty zkoumající odplynění taveniny kovu inertním plynem v rafinační pánvi byly prováděny v laboratoři fyzikálního a numerického modelování Katedry metalurgie a slévárenství. Tato laboratoř se nachází v prostorách Podnikatelského inkubátoru v komplexu kampusu VŠB-TU Ostrava. Fyzikální model byl vyroben z průhledného organického skla (plexiskla) v geometrickém měřítku 1:1 k provoznímu zařízení pro rafinaci roztaveného hliníku s kelímkem o vnitřním průměru 800 mm. Součástí tohoto fyzikálního modelu byly také dva polohovatelné grafitové vlnolamy, jejichž cílem bylo potlačit nadměrné zvlnění hladiny a tvorbu vírů. Sestava fyzikálního modelu je zobrazena na obr. 1 a obr. 2. Na obr. 3 jsou znázorněna

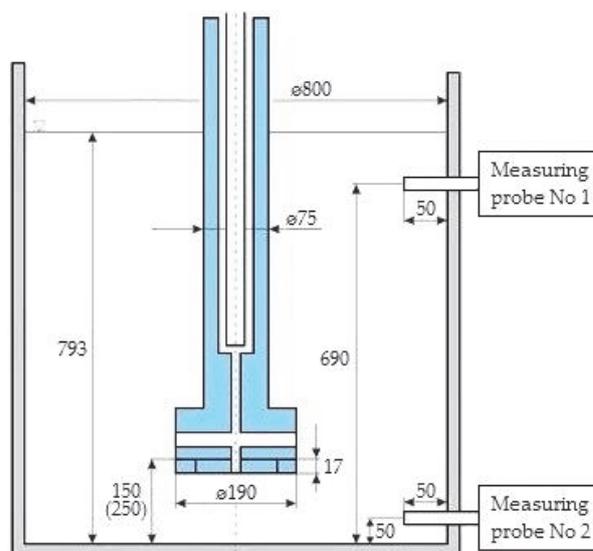
základní rozměrová data modelu včetně umístění měřicích sond.



Obr. 1 Pohled na sestavu fyzikálního modelu s příslušenstvím
Fig. 1 View of the physical model assembly with accessories



Obr. 2 Fyzikální model rafinační pánve s rotorem a dvěma vlnolamy
Fig. 2 Physical model of a refining ladle with an impeller and two baffles



Obr. 3 Základní rozměrová data fyzikálního modelu s rotorem F2A 190
Fig. 3 Basic dimensional data of physical model with the impeller F2A 190

Pro modelování byly použity čtyři varianty rotorů, označených dále jako F2A 190, F2A-Z 190, J8 190 a J8-ZD 190 (obr. 4). Tyto rotory dodala firma JAP INDUSTRIES, s.r.o.



(a) (b) (c) (d)

Obr. 4 Rotory použité pro modelování, pohled shora a zespodu: (a) F2A 190; (b) F2A-Z 190; (c) J8 190; (d) J8-ZD 190

Fig. 4 The impellers used for modelling, top and bottom view: (a) F2A 190; (b) F2A-Z 190; (c) J8 190; (d) J8-ZD 190

Rotor F2A 190 má boční a spodní vyústění dmýchaného plynu, rotor F2A-Z 190 pouze boční vyústění, a to mezi bočními výstupky. Rotor J8 190 má spodní jednootvorové vyústění plynu a rotor J8-ZD 190 v konfiguraci 8 menších výstupných otvorů v boční stěně centrální válcové části.

Fyzikální model byl umístěn na hydraulicky ovládané zvedací plošině, pomocí jejího zdvihu byla nastavena vzdálenost rotoru ode dna rafinační pánve. Regulace otáček rotoru byla řízena pomocí asynchronního motoru napájeného střídavým proudem s proměnlivou frekvencí z inventuru. Součástí modelu byly také tlakové láhve s kyslíkem a argonem. K měření a regulaci průtoku plynů byly použity jehlové regulační ventily, trojcestný ventil a hmotnostní průtokoměry.

Pokles obsahu plynu (vodíku) v tavenině hliníku v průběhu rafinace inertním plynem byl na fyzikálním modelu simulován poklesem obsahu rozpuštěného kyslíku v modelové kapalině (vodě). Hlavní výhoda použití tohoto média spočívá v nízkých nákladech, dobré dostupnosti a v jejich fyzikálních vlastnostech. Dynamickou a kinematickou viskozitu hliníku a vody lze považovat za velmi blízkou. Porovnání základních parametrů hliníku a vody je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1 Porovnání základních fyzikálních parametrů roztaveného hliníku a vody [1, 12]

Tab. 1 Comparison of basic physical parameters of the molten aluminium and water [1, 12]

Parametr	Značka	Jednotka	Hliník	Voda
Teplota	T	0 °C	750	20
Hustota	ρ	kg·m ⁻³	2345	998,5
Dynamická viskozita	η	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	0,00120	0,00101
Kinematická viskozita	ν	m ² ·s ⁻¹	0,51·10 ⁻⁶	1,012·10 ⁻⁶
Povrchové napětí	σ	N·m ⁻¹	0,680	0,072

Laboratorní experimenty byly na základě identity Froudeho kritéria prováděny v souladu s teorií podobnosti

mezi modelem a dílem. Nutné je dodržení zejména geometrické podobnosti díla s modelem a dynamické podobnosti proudění tekutiny v díle a modelu. Před každým experimentem byla voda nasycena plynným kyslíkem na hodnotu 23 ppm (23 mg O₂·l⁻¹) přes otáčející se rotor. Následně byl zahájen samotný experiment při daných otáčkách rotoru a objemovém průtoku argonu. K nepřetržitému měření obsahu kyslíku v modelové lázni (vodě) bylo využito dvou optických fluorescenčních sond. Tyto sondy jsou schopny zaznamenávat obsah rozpuštěného kyslíku do 26 ppm.

Hlavním cílem fyzikálního modelování bylo získat poznatky o vlivu relevantních parametrů rafinace pro odstranění rozpuštěného kyslíku během rafinace (tab. 2). Při experimentech byly cíleně měněny tyto parametry:

- počet otáček rotoru,
- objemový průtok inertního plynu,
- geometrie, tzn. provedení rotoru,
- vzdálenost rotoru ode dna rafinační pánve.

Tab. 2 Přehled experimentálních podmínek fyzikálního modelování procesu rafinace v pánvi

Tab. 2 Overview of experimental conditions for physical modelling of refining process in the ladle

Varianta rotoru	Vzdálenost rotoru	Objemový průtok argonu	Otáčky rotoru
	[mm]	[l·min ⁻¹]	[min ⁻¹]
F2A 190	150, 250	10, 15	350, 500, 650
F2A-Z 190	150	10, 15	350, 500, 650
J8 190	150, 250	10, 15	350, 500, 650
J8-ZD 190	150	10, 15	350, 500, 650

2. Výsledky experimentu

Vyhodnocení experimentů bylo provedeno ve třech fázích. V první fázi byly výsledky porovnány pomocí kombinovaných grafů, ve druhé fázi byly výsledky porovnány na základě doby dosažení bezrozměrové koncentrace v lázni (v tomto případě 0,5 a 0,1) a v poslední, vizualizační fázi byly pořízeny fotografie, kde byla studována velikost bublin a distribuce těchto bublin do objemu rafinační pánve.

2.1 Porovnání výsledků experimentů pomocí kombinovaných grafů

Kombinované grafy představují časovou závislost změny koncentrace kyslíku v průběhu rafinace inertním plynem. Jak již bylo uvedeno, k měření koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě byly použity dvě optické fluorescenční sondy (A1 – horní sonda, A2 – spodní sonda). Při analýze výsledků bylo zjištěno, že průběh změny koncentrace kyslíku snímaných těmito sondami je prakticky identický.

Toto chování se projevilo u všech experimentů. Hlavní příčinou je vysoká míra turbulence, jež způsobuje téměř homogenní koncentrační pole v celém objemu modelu rafinační pánve. Proto byly při dalším hodnocení využívány hodnoty ze spodní sondy A2.

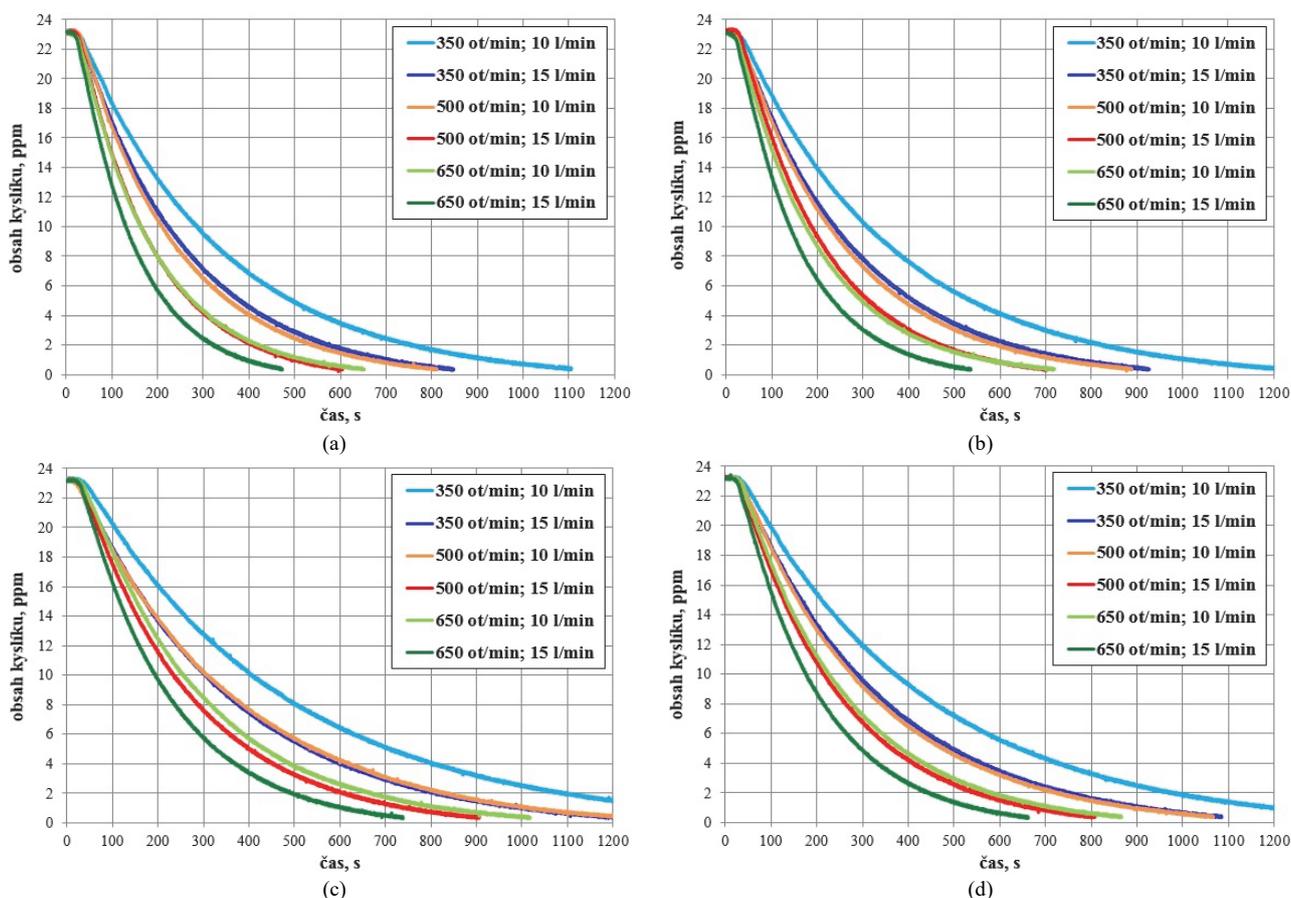
2.1.1 Vliv otáček rotoru a průtoku inertního plynu pro jednotlivé rotory

Vliv otáček rotoru a průtoku inertního plynu byl sledován pro hodnoty 350, 500 a 650 min⁻¹ při konstantním průtoku inertního plynu 10 a 15 l·min⁻¹ a vzdálenosti rotoru ode dna rafinační pánve 150 mm. Na obr. 5 jsou uvedeny grafy s výsledky pro jednotlivé rotory F2A 190, F2A-Z 190, J8 190 a J8-ZD 190. Z grafů je patrný významný vliv zvýšených otáček rotoru na proces snižování obsahu kyslíku. Spolurozhodujícím faktorem je i zvýšený průtok inertního plynu.

Lze také vysledovat jednoduchou souvislost mezi zvyšováním otáček rotoru a průtoku inertního plynu. Přibližně

stejně pozitivního efektu, jako má zvýšení otáček o 150 min⁻¹, lze dosáhnout také zvýšením průtoku inertního plynu z 10 na 15 l·min⁻¹ bez změny otáček. Z toho vyplývá, že nejvyšší účinnosti bylo dosaženo při otáčkách rotoru 650 min⁻¹ a průtoku inertního plynu 15 l·min⁻¹.

Z porovnání jednotlivých grafů rovněž vyplývá, že rotor F2A-Z 190 dosahoval mírně horších výsledků než rotor F2A 190. U rotorů typu J8 z porovnání grafů vyplývá, že rotor J8-ZD 190 dosahoval výrazně lepších výsledků v porovnání s rotorem J8 190.



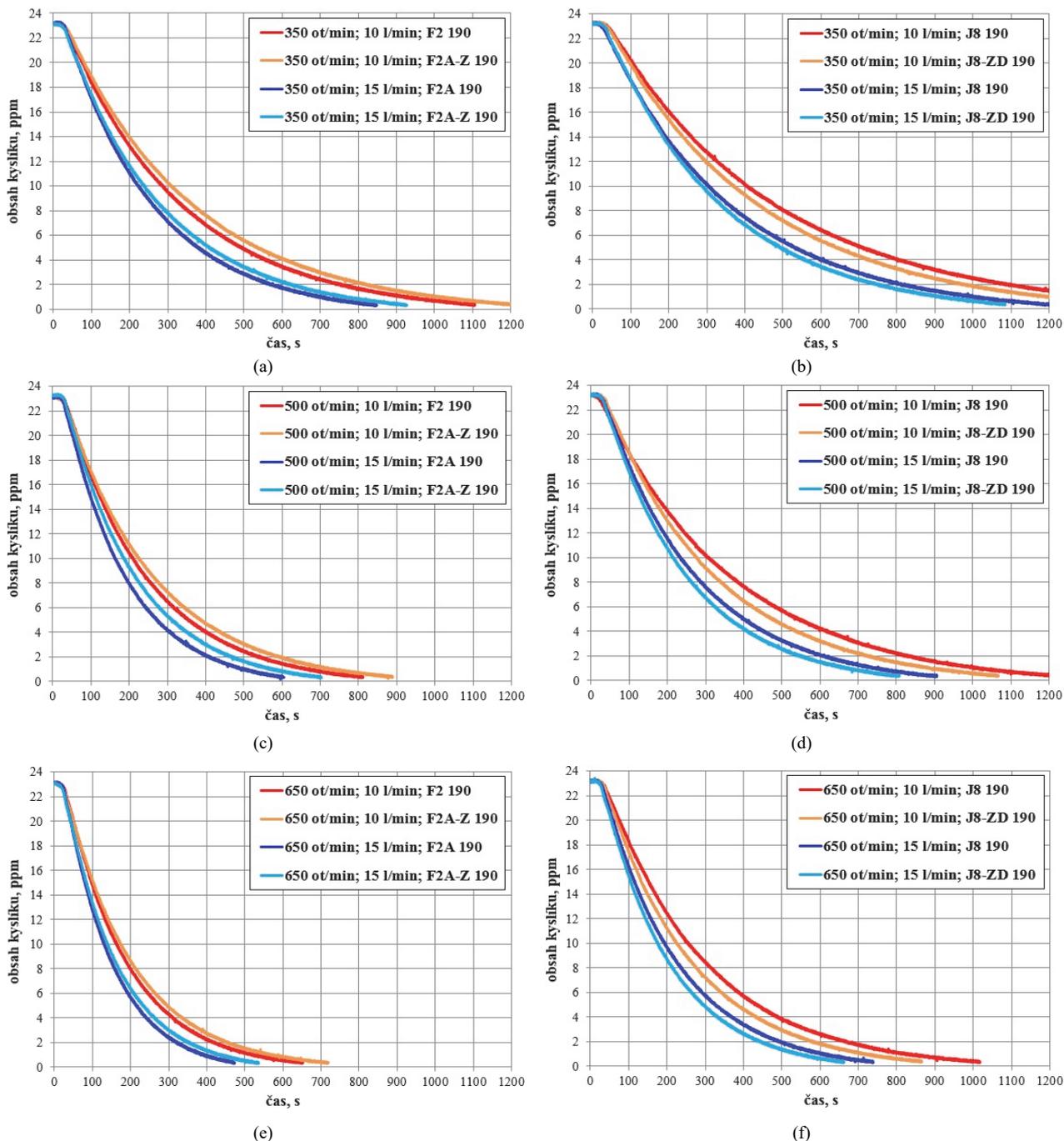
Obr. 5 Vliv změny otáček rotoru a objemového průtoku inertního plynu na koncentraci kyslíku pro jednotlivé rotory: (a) F2A 190; (b) F2A-Z 190; (c) J8 190; (d) J8-ZD 190

Fig. 5 Influence of the change of rotary impeller speeds and volume flow rate of inert gas on the concentration of oxygen for the individual impellers: (a) F2A 190; (b) F2A-Z 190; (c) J8 190; (d) J8-ZD 190

2.1.2 Porovnání vlivu geometrie jednotlivých rotorů

Tato další část se zabývá porovnáním rotoru F2A 190 s F2A-Z 190 a rotoru J8 190 s J8-ZD 190 při otáčkách 350, 500 a 650 min⁻¹, konstantním průtoku inertního plynu 10 a 15 l·min⁻¹ a při vzdálenosti rotoru ode dna pánve 150 mm (obr. 6). Z porovnání grafů vyplývá, že rotor F2A-Z 190 dosahoval mírně horších výsledků než rotor F2A 190 za všech experimentálních podmínek. Je to dáno zejména geometrií rotorů. Účinek při tomto provedení rotoru byl nižší. Může to souviset s horší distribucí bublin inertního

plynu do lázně a následným snížením účinku procesu rafinace pod vlastním rotorem, kde byl v případě rotoru F2A-Z 190 výskyt bublin menší. Z výsledků uvedených v grafech také vyplývá, že rotor J8-ZD 190 dosahoval lepších výsledků ve srovnání s rotorem J8 190. Geometrie rotoru J8-ZD 190 vedla k rovnoměrnější distribuci bublin dmýchaného inertního plynu, které byly spodními žebry rotoru navíc rozptýleny na velmi jemné bublinky, což se pozitivně projevilo i v lepším rafinačním účinku tohoto rotoru.



Obr. 6 Porovnání vlivu geometrie jednotlivých rotorů na koncentraci kyslíku (a,c,e) F2A 190 a F2A-Z 190; (b,d,f) J8 190 a J8-ZD 190

Fig. 6 Comparison of influence of individual impellers geometry on concentration of oxygen (a,c,e) F2A 190 and F2A-Z 190; (b,d,f) J8 190 and J8-ZD 190

2.1.3 Vliv vzdálenosti rotoru ode dna rafinační pánve

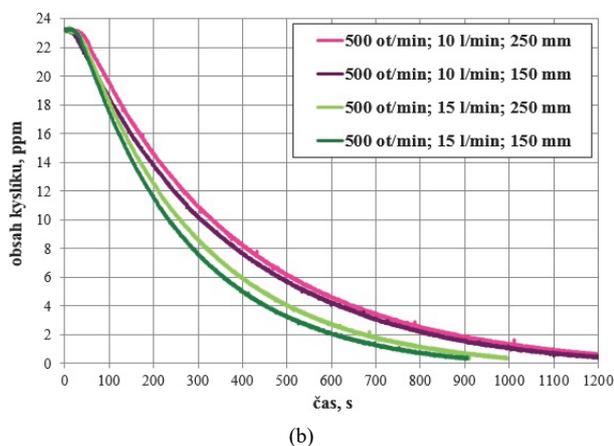
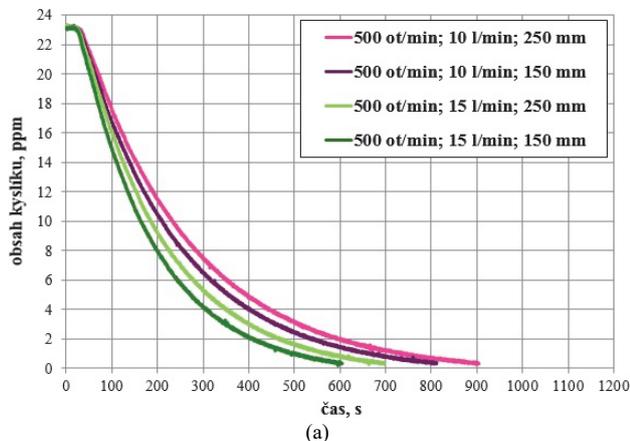
Vzdálenost rotoru ode dna pánve je velmi důležitá pro podpoření rovnoměrné distribuce inertního plynu v objemu rafinované lázně. Při větší vzdálenosti ode dna může být efekt rafinace méně výrazný, při malé vzdálenosti ode dna zase může hrozit nebezpečí zvýšené eroze vyzdívky nadměrnou turbulencí a rotací lázně v blízkosti dna pánve.

Na obr. 7 jsou zobrazeny kombinované grafy, které dokumentují uvedený vliv vzdálenosti mezi rotorem a dnem modelu o velikosti 150 a 250 mm, při otáčkách rotoru 500

min^{-1} a průtoku inertního plynu 10 a $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ pro rotory F2A 190 a J8 190. Níže uvedené grafy jednoznačně ukazují, že zvětšení vzdálenosti rotoru ode dna pánve z 150 na 250 mm se projevilo v mírném snížení účinnosti rafinace, resp. v nárůstu rafinačních časů. Obdobný průběh byl potvrzen i při otáčkách rotoru 350 a 650 min^{-1} .

Možné vysvětlení může být následující. Při nízkých otáčkách rotoru se tvoří velké bubliny, které vznikají v nejtěsnější blízkosti rotoru a následně vyplouvají k hladině. Posunutím bodu vzniku těchto bublin o dalších

100 mm směrem nahoru se sníží objem taveniny, která je schopna reagovat s bublinami inertního plynu, což vede ke snížení účinnosti rafinace. Při zvýšených otáčkách rotoru, které vedou ke zvýšené turbulenci taveniny a tvorbě vírů, se tento rozdíl v účinnosti zmenšuje.



Obr. 7 Vliv vzdálenosti rotoru nade dnem pánve na koncentraci kyslíku pro rotory: (a) F2A 190; (b) J8 190

Fig. 7 Influence of the distance of the impeller above the bottom of the ladle on the concentration of oxygen for the impellers: (a) F2A 190; (b) J8 190

2.2 Porovnání výsledků na základě doby dosažení bezrozměrové koncentrace

Pro snadnější interpretaci a grafické porovnání dosažených výsledků daných experimentů byly porovnány časy $\tau_{0,5}$ a $\tau_{0,1}$, tzn. časy, za které se koncentrace kyslíku v lázni snížila na 50, resp. 10 % počáteční hodnoty, tzn. za kterou je dosaženo tzv. bezrozměrové koncentrace $C_x = 0,5$ a $C_x = 0,1$. Bezrozměrová koncentrace C_x se vypočítá dle vztahu

$$C_x = C\tau / C_{poč} \quad (1)$$

kde $C\tau$ je koncentrace kyslíku v lázni (ppm) a

$C_{poč}$ je koncentrace na počátku experimentu (standardizováno na 23 ppm).

Jinými slovy se dá říct, že doba dosažení bezrozměrové koncentrace 0,5 a 0,1 (tedy $\tau_{0,5}$ a $\tau_{0,1}$) je doba, za kterou původní koncentrace 23 ppm klesne na 50 % počáteční

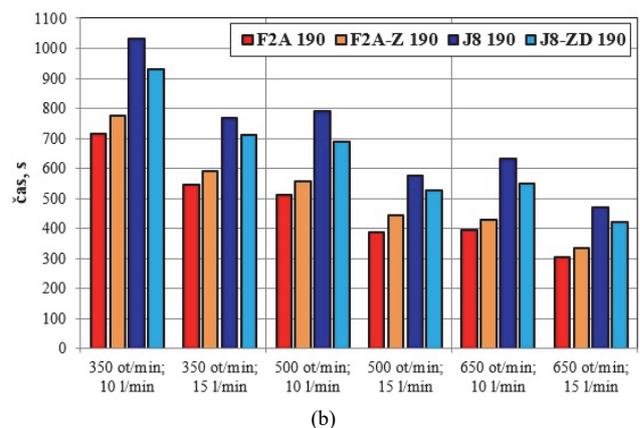
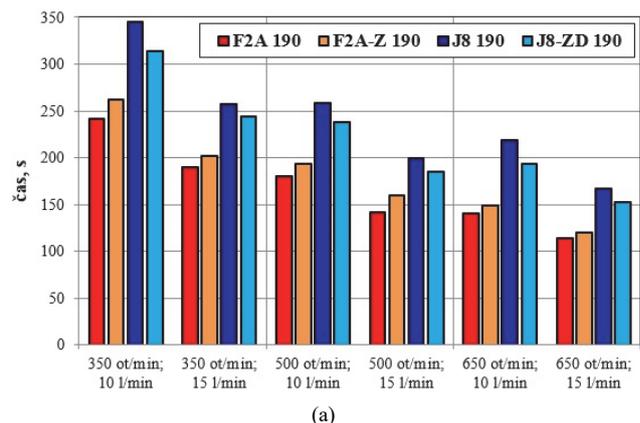
koncentrace, tj. na 11,5 ppm a analogicky na 10 %, tedy na 2,3 ppm. Uvedené parametry mohou tedy charakterizovat rychlost poklesu rozpuštěného kyslíku v lázni.

Výše uvedené porovnání bylo provedeno souhrnně pro hlavní sledované parametry:

- počet otáček rotoru, objemový průtok inertního plynu a geometrie rotoru,
- vzdálenost rotoru ode dna pánve.

2.2.1 Vliv otáček rotoru, objemového průtoku inertního plynu a geometrie rotoru

Z obr. 8 je patrný výrazný vliv otáček rotoru a objemového průtoku inertního plynu na obě hodnoty $\tau_{0,5}$ a $\tau_{0,1}$. Se vzrůstem otáček rotoru (350, 500, 650 min^{-1}) a průtoku inertního plynu (10, 15 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$) dochází ke snižování jak $\tau_{0,5}$, tak i $\tau_{0,1}$. Je zde viditelný trend, při kterém přibližně stejného pozitivního efektu jako má zvýšení otáček rotoru o 150 min^{-1} za stálého průtoku inertního plynu lze dosáhnout i zvýšením průtoku inertního plynu z 10 na 15 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ bez změny otáček rotoru.



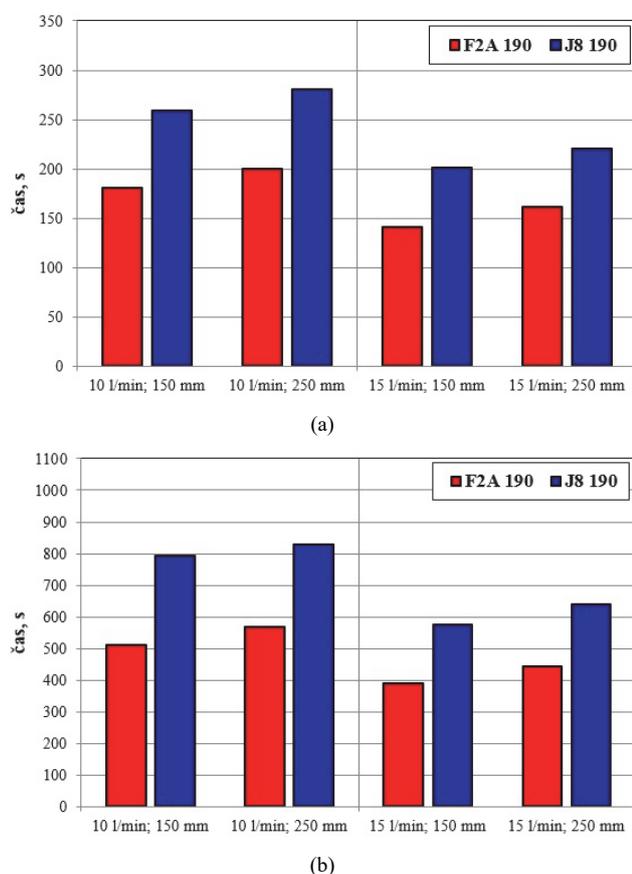
Obr. 8 Porovnání vlivu počtu otáček rotoru, objemového průtoku inertního plynu a geometrie rotoru na čas rafinace při konstantní vzdálenosti rotoru ode dna pánve 150 mm na hodnoty: (a) $\tau_{0,5}$; (b) $\tau_{0,1}$

Fig. 8 Comparison of the influence of rotary impeller speeds, the volume flow rate of inert gas and impeller geometry on refining time at a constant distance of the impeller from the bottom of 150 mm on the values: (a) $\tau_{0,5}$; (b) $\tau_{0,1}$

Z obou grafů na obr. 8 je patrné, že nejlepšími výsledky, tj. nejkratší doby rafinace neboli nejnižší koncentrace plynu v lázni, dosahoval rotor F2A 190. Jeho modifikace F2A-Z 190 vykazovala mírně horší výsledky. Výsledky použití rotoru J8 190 naznačují, že jeho rafinační účinnost je z porovnávaných rotorů nejhorší. Modifikace rotoru J8-ZD 190 přinesla v porovnání s J8 190 mírně pozitivní efekt, nicméně i tento modifikovaný typ nedosahoval výsledků rotoru F2A 190.

2.2.2 Vliv vzdálenosti rotoru ode dna pánve

Zvětšení vzdálenosti rotoru ode dna pánve ze 150 na 250 mm se projevilo v mírném nárůstu hodnot $\tau_{0,5}$, a $\tau_{0,1}$ za všech experimentálních podmínek a u všech použitých rotorů (obr. 9). Tyto nárůsty nejsou ale tak významné, aby výrazně prodloužily celkový čas rafinace.



Obr. 9 Porovnání vlivu vzdálenosti rotoru ode dna pánve na čas rafinace při objemovém průtoku inertního plynu 10 a 15 l·min⁻¹ na hodnoty: (a) $\tau_{0,5}$; (b) $\tau_{0,1}$.

Fig. 9 Comparison of the influence of the distance of the impeller from the bottom of the ladle on refining time at the volume flow rate of inert gas 10 and 15 l·min⁻¹ on the values: (a) $\tau_{0,5}$; (b) $\tau_{0,1}$

Křivky na obr. 5 – 7 odpovídají obecné exponenciální závislosti

$$c = c_0 \cdot e^{kt}, \quad (2)$$

kde c a t jsou proměnné, c_0 a k jsou konstanty a exponent t nabývá hodnot v rozmezí -0,003 až -0,009. Ze sloupcových grafů lze rovněž vysledovat, že čas $\tau_{0,1}$ je u většiny variant třikrát vyšší než čas $\tau_{0,5}$.

2.3 Vizualizační sledování experimentu

V průběhu provádění jednotlivých experimentů byly pořízeny snímky chování lázně uvnitř modelu, ze kterých bylo možno blíže zhodnotit proudění tekutiny, množství a rozptýl bublin inertního plynu. Pro vizualizaci byly použity rotory F2A 190, F2A-Z 190, J8 190 a J8-ZD 190 při otáčkách rotoru 350, 500 a 650 min⁻¹ a objemovém průtoku inertního plynu 10 a 15 l·min⁻¹.

Příklad proudění lázně při použití výše uvedených rotorů, při otáčkách rotoru 500 min⁻¹, objemovém průtoku inertního plynu 10 l·min⁻¹ a vzdálenosti rotoru ode dna pánve 150 mm jsou na obr. 10 a 11.

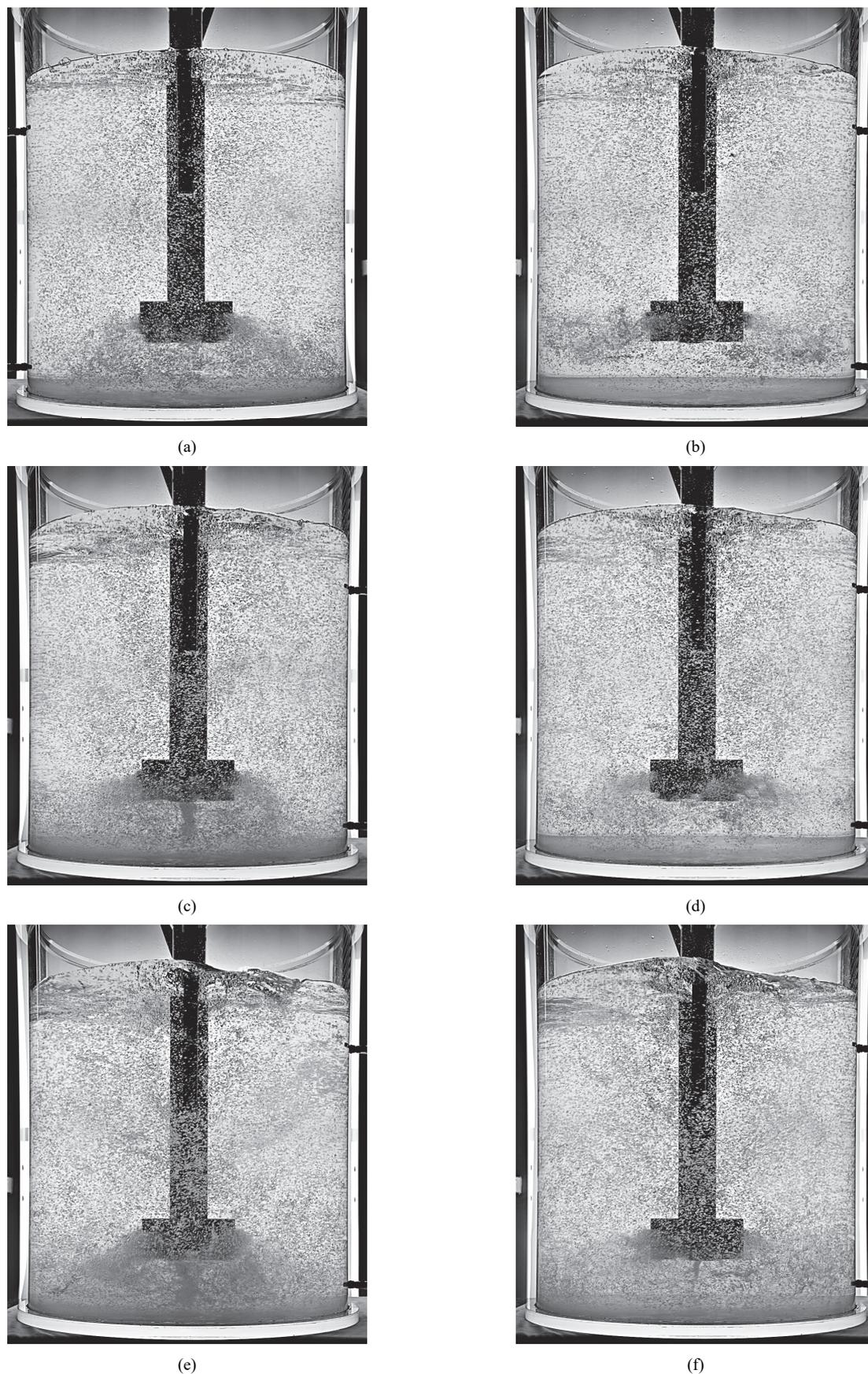
Na těchto snímcích je zřetelný vliv zvyšujících se otáček rotoru v rozmezí 350 až 650 min⁻¹, kdy dochází k intenzivnějšímu rozdělování bublin do celého objemu rafinační pánve, ale také i vyšší míře rozvlnění hladiny lázně v rafinační pánvi.

U rotoru F2A 190 lze pozorovat intenzivní víření a zvýšenou koncentraci bublin nejen po stranách rotoru, ale i pod ním, a to zvláště při vyšších otáčkách rotoru. Pod rotorem je rovněž patrná tvorba intenzivního víru a v pravidelných cyklech i velké rotující kavity vyplněné interním plynem. Tyto kavity se asi v třísekundových intervalech porušují a rozdělují se na velké množství malých bublin.

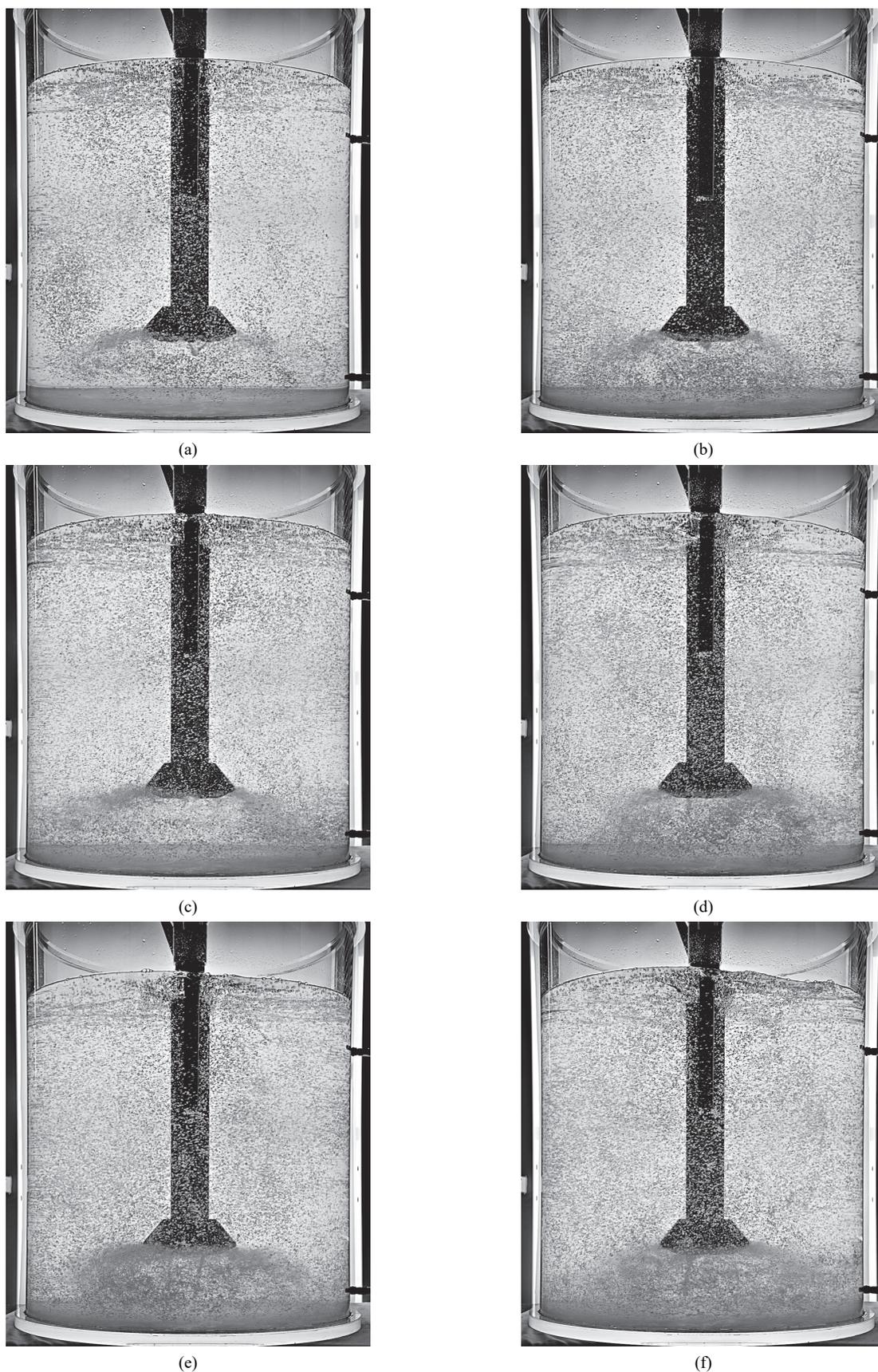
Z fotografií na je zřejmé, že rotace kapaliny existuje i pod rotorem F2A-Z 190. Tvorba kavity je však méně intenzivní a koncentrace bublin pod rotorem je nižší v porovnání s rotorem F2A 190. Zřejmě i s tímto jevem souvisí mírně horší účinnost rotoru F2A-Z 190 v porovnání s rotorem F2A 190.

U rotoru J8 190 můžeme pozorovat rovněž tvorbu kavit naplněných inertním plynem, a to již při nízkých otáčkách rotoru 350 min⁻¹. Pokud velikost rotující kavity překročí kritickou velikost, tak se kavity poruší za vzniku velkého množství drobných bublin.

Návrh rotoru J8-ZD 190 vycházel z požadavku omezit vznik těchto kavit pod rotorem. Proudění lázně během rafinace skutečně potvrdilo menší výskyt kavit, které se tvořily až při vyšších otáčkách rotoru 650 min⁻¹ a navíc ještě v menších objemech. Lepší distribuce bublin argonu v prostoru rafinační pánve také vedla k lepší účinnosti tohoto rotoru v porovnání s rotorem J8 190.



Obr. 10 Vizualizační snímky proudění plynu v lázni při objemovém průtoku inertního plynu 10 l·min⁻¹: (a) F2A 190 – 350 min⁻¹; (c) F2A 190 – 500 min⁻¹; (e) F2A 190 – 650 min⁻¹; (b) F2A-Z 190 – 350 min⁻¹; (d) F2A-Z 190 – 500 min⁻¹; (f) F2A-Z 190 – 650 min⁻¹
Fig. 10 Visualisation images of the flow of gas in the bath at the volume flow rate of inert gas 10 l·min⁻¹: (a) F2A 190 – 350 rpm; (c) F2A 190 – 500 rpm; (e) F2A 190 – 650 rpm; (b) F2A-Z 190 – 350 rpm; (d) F2A-Z 190 – 500 rpm; (f) F2A-Z 190 – 650 rpm



Obr. 11 Vizualizační snímky proudění plynu v lázni při objemovém průtoku inertního plynu $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$: (a) J8 190 – 350 min^{-1} ; (c) J8 190 – 500 min^{-1} ; (e) J8 190 – 650 min^{-1} ; (b) J8-ZD 190 – 350 min^{-1} ; (d) J8-ZD 190 – 500 min^{-1} ; (f) J8-ZD 190 – 650 min^{-1}
Fig. 11 Visualisation images of the flow of gas in the bath at the volumetric flow rate of inert gas $10 \text{ NI}\cdot\text{min}^{-1}$: (a) J8 190 – 350 rpm ; (c) J8 190 – 500 rpm ; (e) J8 190 – 650 rpm ; (b) J8-ZD 190 – 350 rpm ; (d) J8-ZD 190 – 500 rpm ; (f) J8-ZD 190 – 650 rpm

3. Vyhodnocení výsledků experimentu

Vyhodnocení experimentů probíhalo ve třech fázích. V první fázi byly provedeny experimenty zaměřené na vliv jednotlivých parametrů na chování kyslíku během rafinace, které byly následně použity při tvorbě kombinovaných grafů. V druhé fázi byly výsledky porovnány na základě doby dosažení bezrozměrové koncentrace 0,5 a 0,1 v lázni. V poslední, vizualizační fázi byly pořízeny fotografie, kde byla zkoumána velikost bublin a jejich rozptýl v objemu rafinační pánve.

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

- Zvýšený počet otáček rotoru velmi významně ovlivňuje účinnost procesu odplynění lázně. Spoluozhodujícím faktorem je však i zvýšený průtok inertního plynu.
- Přibližně stejného pozitivního efektu, jako má zvýšení otáček rotoru o 150 min^{-1} , lze dosáhnout také zvýšením průtoku inertního plynu z 10 na $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ bez změny otáček rotoru.
- Porovnání rotorů F2A 190 a F2A-Z 190 vedlo k závěru, že rotor F2A-Z 190 dosahoval mírně horších výsledků než rotor F2A 190 při všech experimentálních podmínkách. Je to dáno zejména geometrií rotoru.
- Rotor J8-ZD 190 dosahoval lepších výsledků ve srovnání s rotorem J8 190. Geometrie rotoru J8-ZD 190 vedla k rovnoměrnější distribuci bublin dmýchaného inertního plynu, které byly spodními žebry rotoru navíc rozptýleny na velmi jemné bublinky.
- Výsledky také jednoznačně ukazují na to, že zvětšení vzdálenosti rotoru ode dna pánve ze 150 na 250 mm se projevilo v mírném snížení účinnosti rafinace, resp. v nárůstu rafinačních časů.
- Porovnání hodnot $\tau_{0,5}$ a $\tau_{0,1}$, tzn. časů, za které se koncentrace kyslíku v lázni snížila na 50, resp. 10 % počáteční hodnoty, vedlo k závěru, že nejlepších výsledků dosahoval rotor F2A 190. Naproti tomu rafinační účinnost rotoru J8 190 byla z porovnávaných rotorů nejhorsí.
- V rámci experimentu byla provedena fotodokumentace, která byla zaměřená na objasnění vlivu počtu otáček rotoru v rozmezí 350 až 650 min^{-1} a objemového průtoku inertního plynu $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Prokázal se zřetelný vliv zvyšujících se otáček rotoru na zkrácení doby rafinace a také na intenzivnější rozdělování bublin do celého objemu rafinační pánve.

Závěr

Odplyňování (snížování obsahu vodíku) v taveninách na bázi hliníku bylo při fyzikálním modelování simulováno procesem snižování obsahu rozpuštěného kyslíku ve vodě o teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Pomocí dvou fluorescenčních sond byla měřena jeho koncentrace ve vodní lázni.

Experimenty byly prováděny v laboratorních podmínkách, jejichž cílem bylo zjistit a vyhodnotit vliv jednotlivých parametrů na účinnost procesu rafinace taveniny. U jednotlivých parametrů byla porovnávána schopnost ovlivnit účinnost procesu. Mezi tyto parametry patří otáčky rotoru, objemový průtok inertního plynu, vzdálenost rotoru ode dna pánve a geometrie rotoru.

Poděkování

Tento výzkum vznikl za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR v rámci programu TRIO v rámci řešení projektu č. FV10080 „Výzkum a vývoj pokročilých rafinačních technologií hliníkových tavenin pro zvýšení kvality produktu“.

Článek byl vytvořen také díky projektu č. CZ.02.1.01/0.0/17_049/0008399 z finančních fondů EU a ČR poskytovaných „Operačním programem Výzkum, vývoj a vzdělávání, Výzvy 02_17_049 Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI, řídicí orgán: Česká republika – Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy“. A za podpory Studentské grantové soutěže č. SP2021/39 a SP2021/41.

Literatura

- [1] MICHALEK, K., TKADLEČKOVÁ, M., SOCHA, L., GRYC, K., SATERNUS, M., PIEPRZYCA, J., MERDER, T. Physical Modelling of Degassing Process by Blowing of Inert Gas. *Arch. Metall. Mater.*, 63 (2018) 987–992.
- [2] HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, M., CAMACHO-MARTÍNEZ, J., GONZÁLEZ-RIVERA, C., RAMÍREZ-ARGÁEZ, M. A. Impeller Design Assisted by Physical Modelling and Pilot Plant Trials. *J. Mater. Process. Technol.*, 236 (2016) 1–8.
- [3] SATERNUS, M. Rafinacja aluminium i jego stopów przez przedmuchiwanie argonem. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, Poland, 2011, 167 p. ISBN 978-83-7335-892-8.
- [4] MOSTAFAEI, M., GHOBADI, M., EISAABADI, G. B., ULUDAG, M., TIRYAKIOGLU, M. Evaluation of the Effects of Rotary Degassing Process Variables on the Quality of A357 Aluminum Alloy Castings. *Met. Mater. Trans. A*, 47 (2016) 3469–3475.
- [5] MERDER, T., SATERNUS, M., WARZECHA, P. Possibilities of 3D Model Application in the Process of Aluminium Refining in the Unit with Rotary Impeller. *Arch. Met. Mater.*, 59 (2014) 789–794.
- [6] SATERNUS, M., MERDER, T., PIEPRZYCA, J. The Influence of Impeller Geometry on the Gas Bubbles Dispersion in Uro-200 Reactor-RTD Curves/Wpływ rodzaju wirnika na dyspersje pecherzyków gazowych w reaktorze URO-200-krzywe mieszanin. *Arch. Met. Mater.*, 60 (2015) 2887–2894.
- [7] YAMAMOTO, T., SUZUKI, A., KOMAROV, S. V., ISHIWATA, Y. Investigation of Impeller Design and Flow Structures in Mechanical Stirring of Molten Aluminum. *J. Mater. Process. Technol.*, 261 (2018) 164–172.
- [8] GAO, G., WNG, M., SHI, D., KANG, Y. Simulation of Bubble Behavior in a Water Physical Model of an Aluminum Degassing Ladle Unit Employing Compound Technique of Rotary Blowing and Ultrasonic. *Met. Mater. Trans. A*, 50 (2019) 1997–2005.
- [9] YU, S., ZOU, Z., SHAO, L., LOUHENKILPI, S. A. Theoretical Scaling Equation for Designing Physical Modelling of Gas-Liquid Flow in Metallurgical Ladles. *Steel Res. Int.*, 88 (2016) No. 1600156.
- [10] ABREU-LÓPEZ, D., DUTTA, A., CAMACHO-MARTÍNEZ, J. L., TRÁPAGA-MARTÍNEZ, G., RAMÍREZ-ARGÁEZ, M. A. Mass Transfer Study of a Batch Aluminum Degassing Ladle with Multiple Designs of Rotating Impellers. *Journal of Materials, Metals & Materials Society*, 70 (2018) 2958–2967.
- [11] MANCILLA, E., CRUZ-MÉNDEZ, W., GARDUÑO, I. E., GONZÁLEZ-RIVERA, C., RAMÍREZ-ARGÁEZ, M. A.,

ASCANIO, G. Comparison of the Hydrodynamic Performance of Rotor-injector Devices in a Water Physical Model of an Aluminum Degassing Ladle. *Chem. Eng. Res. Des.*, 118 (2017) 158–169.

[12] MICHÁLEK, K. *Využití fyzikálního a numerického modelování pro optimalizaci metalurgických procesů*. Ostrava: VŠB-Technická

univerzita Ostrava, Česká republika, 2001, 125 s. ISBN 80-7078-861-5.

[13] SATERNUS, M., MERDER, T. Physical Modelling of Aluminum Refining Process Conducted in Batch Reactor with Rotary Impeller. *Metals*, 8 (2018) 726.

Společnost TOSYALI objednala EOP QUANTUM a dvouproude kontilití

Metals Magazine, February 2021, p.19, metalmagazine@primetals.com, meta.ls/magazine

Turecká ocelárna Tosalı Demir Celik Sanayi objednala u Primetals Technologies EOP Quantum, zdvojené vakuovací zařízení s možností dmýchání kyslíku a dvouproude bramové kontilití. Zařízení je určeno pro projekt výroby plochých ocelí, budovaný na zelené louce v tureckém Iskenderunu.

Elektrická oblouková pec Quantum je projektována tak, aby mohla pracovat s širokým rozsahem sázeného materiálu rozdílné kvality a chemického složení – prakticky cokoliv od šrotu až k HBI a tekutému surovému železu. Její energetická spotřeba je ve srovnání s jinými EOP podstatně nižší, primárně díky inovativnímu systému předehřevu šrotu.

Vakuovací zařízení nabízí další možnosti zpracování vyráběných ocelí. Díky možnosti dmýchání kyslíku bude Tosalı moci vyrábět všechny značky ocelí od těch s velmi nízkým obsahem uhlíku až po vysokouhlíkové, též peritektické, API, dvoufázové, a také HSLA značky. Nová ocelárna zahájí provoz do konce roku 2022.

Společnost PRIMETALS TECHNOLOGIES získala závěrečné potvrzení o provedené modernizaci teplé širokopásové válcovny 1700 mm v Mariupolu

Metals Magazine, February 2021, p.13, metalmagazine@primetals.com, meta.ls/magazine

Hutní závod Iljič v Mariupolu vydal závěrečné potvrzení o provedené modernizaci teplé širokopásové válcovny 1700 mm společnosti PRIMETALS TECHNOLOGIES. Modernizace zvýšila konkurenceschopnost válcovny rozšířením výrobního mixu, zvýšením kvality, produktivity a snížením výrobních nákladů. Kapacita se zvýšila z 1,36 na 2,5 mil. tun/rok. Primetals Technologies zodpovídala za inženýring a dodávku klíčových komponent teplé pásové válcovny, včetně instalace nového vratného přípravného pořadí s mohutnou vertikální stolicí, nový coilbox a upgrade hotovního pořadí.

Ve Švédsku postaví zelenou hut'

ocelocel (Newsletter Ocelářské unie), únor 2021, s.5

Na severu Švédska vznikne unikátní integrovaná hut' H2 Green Steel s kapacitou 5 mil. tun, jejíž součástí bude největší elektrolyzátor na světě (800 MW). Elektřina bude pocházet výhradně z obnovitelných zdrojů. Největším akcionářem projektu je investiční společnost Vargas, spoluzakladatel výrobce baterií Northvolt. Dalšími akcionáři jsou Scania, Bilstein, SMS či zakladatel Spotify Daniel Ek. Výroba oceli by mohla začít již v roce 2024 s tím, že projektované emise CO₂ na tunu oceli jsou dvacetkrát nižší než emise z klasické výroby v integrovaných hutích (0,1 v s. 2s. přibližně 2 tuny CO₂ na tunu oceli). Celkové náklady projektu se odhadují na 2,5 mld. eur (cca 65,5 mld. korun), z čehož akcionáři vloží asi 750 mil. eur.