

Rozložení rychlosti v tavenině při indukčním tavení v kelímkové peci

Jan Hrbek^{1*}, Lukáš Rykl², Jan Hadrava¹

¹Jaderný palivový cyklus, Centrum výzkumu Řež, Hlavní 130, Husinec-Řež

²Exova s.r.o., Podnikatelská 1183/41, Plzeň 3

*jan.hrbek@cvrez.cz

Velocity Distribution in the Melt during Induction Melting in the Crucible Furnace

Abstract – The paper deals with a mathematical model of induction crucible furnace. The melted material considered in calculations is the Sn63Pb37 alloy. The magnetic field coupled with flow field is analyzed. The magnetic problem is solved using ANSYS Mechanical and obtained distribution of Lorentz force is inserted into ANSYS CFX to solve the hydrodynamic task.

Keywords – Flow Field; Induction Crucible Furnace; Induction Melting.

I. ÚVOD

Prezentovaný výpočet vznikl na základě nutnosti znalosti rozložení rychlosti v tavenině slitiny Sn63Pb37 během experimentu, který byl proveden v laboratoři elektrického tepla KEE FEL ZČU. Během experimentu nebylo možné měřit rychlosti pomocí UDV, ani jiné techniky, proto byl navržen výpočet vycházející ze znalosti geometrických rozměrů, velikosti elektrického proudu induktorem a materiálových vlastností taveniny, který řeší sdruženou úlohu elektromagnetického pole a proudění.

Cílem experimentu bylo studium taveniny při dosažení ustáleného teplotního pole po roztavení vsázky. Proto i výpočet uvažuje stav, v němž se nacházela tavenina po roztavení a dosažení ustáleného stavu teplotního pole.

II. MATEMATICKÉ MODELY

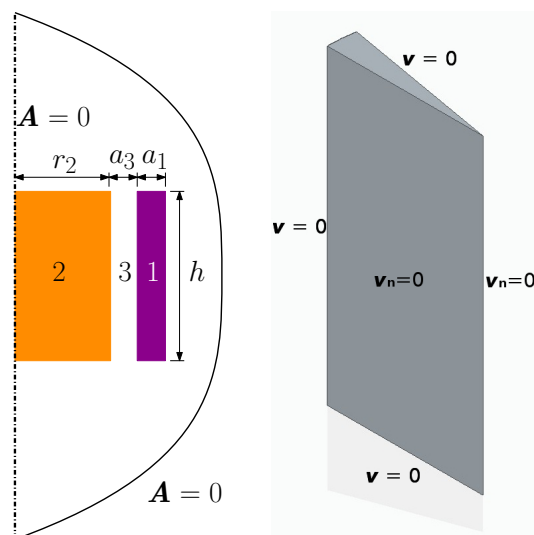
Výpočty byly provedeny pomocí softwarového balíku ANSYS, konkrétně ANSYS Mechanical pro řešení elektromagnetického pole a ANSYS CFX pro výpočet proudění. Vliv teplotního pole na proudění je ve výpočtu zanedbán a předpokládá se rovnoměrné rozložení teploty v tavenině. Teplota taveniny použitá pro výpočet je $T = 280^\circ\text{C}$.

Geometrické uspořádání řešeného problému z pohledu magnetického pole je vyobrazeno na Obr. I (vlevo). Problém byl řešen jako 2D osově-symetrická kvazistacionární úloha a bylo přistoupeno ke zjednodušení, kdy byl nahrazen skutečný induktor se závitou vodivou plochou. Rovněž byl zanedbán skin-efekt v induktoru.

Kvazistacionární magnetické pole lze popsat Helmholtzovou rovnicí pro magnetický vektorový potenciál \underline{A} ve formě

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \text{rot} \underline{A} \right) + j\gamma\omega \underline{A} = \underline{J}_{\text{ext}} \quad (1)$$

Okrajovou podmínkou pro magnetické pole je $\underline{A} = 0$ na vnější hranici řešené oblasti a na ose antisymetrie.



Obrázek I. Geometrické uspořádání úlohy pro řešení rozložení magnetického pole včetně okrajových podmínek na ose antisymetrie a vnější hranici regionu. Oblast 1 - induktor, oblast 2 - tavenina, oblast 3 - okolí neovlivňující magnetické pole (vlevo). Geometrické uspořádání modelu proudění včetně okrajových podmínek (vpravo).

TABULKA I. POUŽITÉ GEOMETRICKÉ A MATERIÁLOVÉ PARAMETRY PRO VÝPOČET ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO POLE A RYCHLOSTI PROUDĚNÍ PŘI TEPLOTĚ 280 °C [1].

h	30 mm
r_2	15 mm
a_3	4 mm
a_1	1 mm
γ_2	$68965 \text{ S} \cdot \text{m}^{-2}$
ρ_2	$8400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
η_2	$1,33 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
I_1	140 A
f	200 kHz

Existuje několik metod řešení proudění použitelných pro případ nestlačitelné tekutiny, v tomto případě tekutého kovu. Pro tranzientní úlohu je možné použít DNS (Direct Numerical Simulation) nebo LES (Large Eddy Simulation), pro řešení ustáleného stavu turbulentního proudění je možné využít RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes). Pro účel získání orientačních údajů o rozložení rychlostí v tavenině a její přibližné velikosti není nutné řešit tranzientní úlohu, proto byla zvolena varianta RANS, která klade nižší nároky na výpočetní výkon.

Pro výpočet ustáleného turbulentního proudění lze použít modely $k - \varepsilon$, $k - \omega$ nebo SST (Shear Stress Transport)[2]. $k - \omega$ model je vhodnější pro oblast nacházející se blízko stěny a uvnitř mezní vrstvy, $k - \varepsilon$ je výhodnější pro řešení proudění ve větší vzdálenosti od stěny. Zvolena byla formulace SST, která kombinuje modely $k - \varepsilon$ a $k - \omega$.

Geometrické uspořádání pro výpočet proudění je vidět na Obr. I (vpravo). Úloha byla řešena jako ustálená symetrická třídímní, přičemž řešenou oblastí je pouze tavenina, která je uvažována jako nestlačitelná.

Obecně popisuje ustálené proudění Navier-Stokesova rovnice ve tvaru

$$(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \eta \nabla^2 \mathbf{v} = -\nabla f + \mathbf{g}. \quad (2)$$

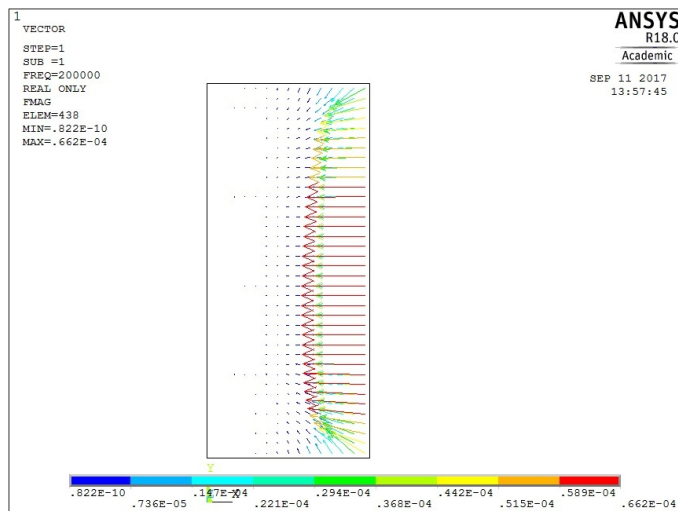
Okrajové podmínky pro výpočet proudění byly zvoleny ve tvaru $\mathbf{v} = 0$ na stěně i dně kelímku a na hladině taveniny. Tato okrajová podmínka na hladině taveniny byla použita s ohledem na to, že část taveniny na hladině byla během experimentu v pevném stavu. Na ose antisymetrie a na plochách symetrie byla zvolena okrajová podmínka $\mathbf{v}_n = 0$. Efekt vzduší hladiny taveniny nebyl zohledněn, jelikož byl zanedbatelný i v průběhu experimentu.

Po provedení výpočtu byl zkontrolován parametr Y_+ , jehož velikost se nacházela v intervalu s nízkou chybou pro celou řešenou oblast.

III. VÝSLEDKY

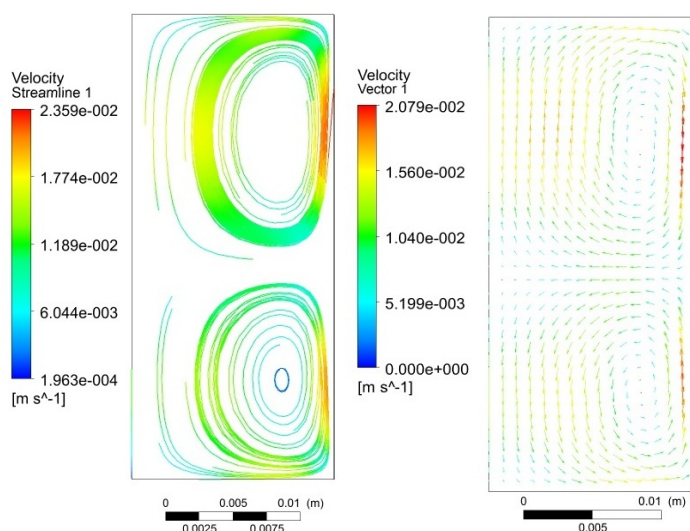
Z Obr. II je patrné, že rozložení Lorenzovy síly v tavenině odpovídá teoretickým předpokladům pro případ, kdy má induktor shodnou výšku s taveninou a není oproti ní posunut[3].

Rovněž z Obr. III a IV je zřejmé, že rozložení rychlosti je ve shodě s teoretickými předpoklady. Došlo ke vzniku dvou opačně orientovaných toroidálních vírů. Důležitým výsledkem výpočtů je rozsah dosahované rychlosti taveniny, která nabývá hodnot vyšších než $0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

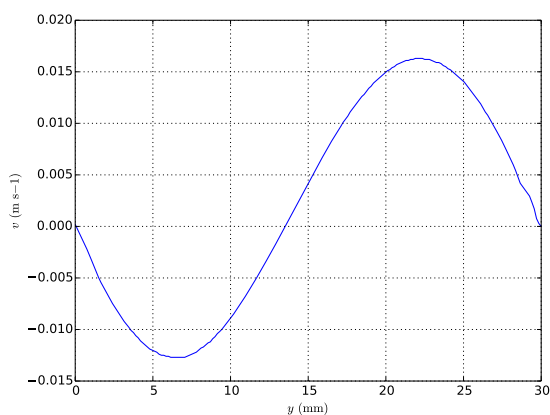


Obrázek II. Rozložení vektorů Lorenzovy síly F v tavenině.

V další fázi bude proveden výpočet proudění s okrajovou podmínkou na hladině kombinující situaci, při níž je materiál v pevném stavu v oblasti kolem osy taveniny $\mathbf{v} = 0$ a tzv. free-surface blíže ke stěnám kelímku. Tím by měly být získány výsledky více se blížící realitě.



Obrázek III. Rozložení rychlosti v v tavenině.



Obrázek IV. Závislost velikosti rychlosti v na výšce y v ose taveniny.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008. Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293, která je finančně podporována Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LM2015093 Infrastruktura SUSEN.

LITERATURA

- [1] Online Materials Information Resource - MatWeb [online]. [cit. 2.9.2017] Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=3a5c8bc670914d588b26ab0b994d88cb&ckck=1>
- [2] NACKE B. et al. Power Supplies. Mathematical Simulation and Optimization, Intensive Course Basic II, St. Petersburg 2013, ISBN 978-5-7629-1402-4.
- [3] NACKE B. et al. MHD Technologies in Metallurgy, Intensive Course Specific IV, St. Petersburg 2013, ISBN 978-5-7629-1410-9