

Závislost rychlosti proudění taveniny v ose indukční kelímkové peci na elektrických parametrech induktoru

Jan Hrbek^{1*}, Bence Mészáros²

¹Katedra elektroenergetiky a ekologie, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni

²Jaderný palivový cyklus, Centrum výzkumu Řež, Hlavní 130, Husinec-Řež

*hrbek@kee.zcu.cz

Influence of the Electrical Parameters of the Inductor on Axial Melt Velocity in the Induction Crucible Furnace

Abstract – The paper describes a mathematical model of induction crucible furnace. The main purpose of the article is to study influence of inductor frequency and electric current on axial melt velocity. The material used for calculation is Wood's metal. The considered problem contains electromagnetic field coupled with hydrodynamics. The electromagnetic problem is solved using ANSYS Mechanical APDL and obtained distribution of Lorentz force is inserted into ANSYS Fluent to solve the hydrodynamic task.

Keywords – Flow Field; Induction Crucible Furnace; Induction Melting; Axial Velocity; Wood's Metal

I. ÚVOD

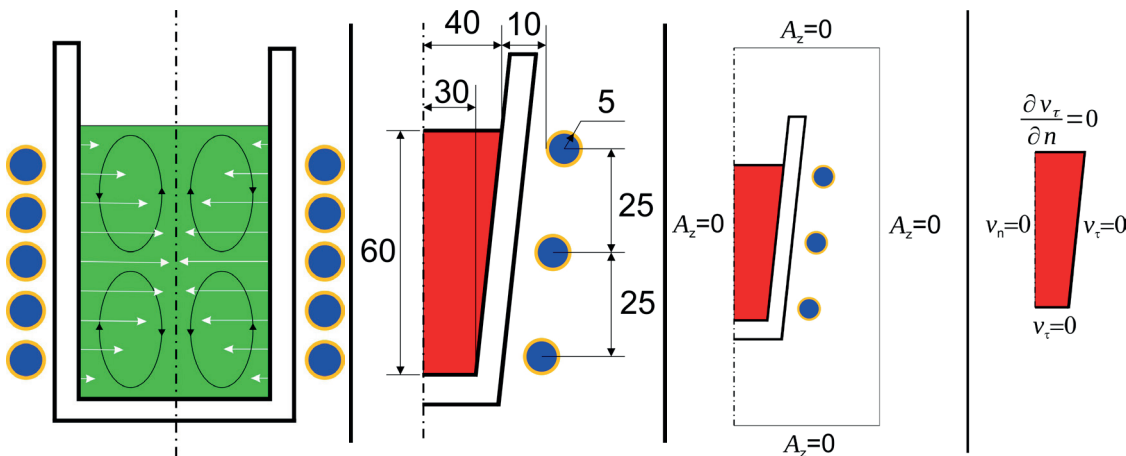
Prezentované výpočty byly provedeny na základě prováděného experimentu, při němž byl taven Woodův kov (50 %Pb + 25 %Bi + 12,5 %Sn + 12,5 %Cd), který byl zvolen pro svou nízkou teplotu tání 70 °C[1]. Při experimentu byly sledovány tepelné veličiny, nicméně nebylo možné měřit rychlost proudění taveniny, která bude mít vliv na homogenizaci materiálu. Proto byl vytvořen matematický model řešící slabě sdruženou úlohu zahrnující elektromagnetické pole a hydrodynamiku. Model je připraven pro zahrnutí teplotního pole do výpočtu a tedy i zohlednění proudění způsobeného rozdílem teploty taveniny v různých místech, ale vzhledem k tomu, že se jedná o nízkoteplotní taveninu, při jejímž tavení bude i rozdíl teplot malý, dá se předpokládat, že hlavní vliv na proudění taveniny bude mít Lorentzova síla a vliv rozdílu teplot na rychlost proudění lze, bez výrazné ztráty na přesnosti, zanedbat.

V průběhu experimentu byly zkoumány parametry v ustáleném stavu teplotního pole, proto i výpočet byl proveden pro taveninu při ustálené rovnoměrně rozložené teplotě 100 °C. Pro získání informace o chování materiálu během tavení byl výpočet proveden s různými hodnotami frekvence a proudu induktorem. Tato data jsou v závěru článku porovnávána a je diskutován vliv těchto dvou elektrických parametrů na rychlost v ose taveniny.

II. MATEMATICKÉ MODELY

Výpočet sestává z matematického modelu elektromagnetického pole vytvořeného v ANSYS APDL, jehož výstupem je rozložení Lorentzovy síly a Joulových ztrát v tavenině. Získaná data slouží jako zdroje pro výpočet proudění a teplotního pole v matematickém modelu vytvořeném v software FLUENT. Jak již bylo zmíněno výše, vliv rozdílu teploty v různých místech taveniny na proudění byl zanedbán. Rovněž nebyl zohledněn efekt vzduší hladiny taveniny. Předpokládané rozložení Lorentzovy síly a tvar proudění taveniny v kelímku lze vidět na Obr. I.

Geometrické uspořádání řešené úlohy je vyobrazeno na Obr. I včetně informace o rozměrech. Materiálové parametry použité při výpočtu jsou uvedené v Tab. I.



Obrázek I. Předpokládané rozložení Lorentzovy síly (bílé šipky) a tvar dvou toroidálních vírů (černé šipky) v tavenině během indukčního tavení Woodova kovu (vlevo)[2], geometrické uspořádání řešeného problému, uvedené rozměry jsou v mm (vlevo uprostřed), okrajové podmínky pro řešení elektromagnetického pole (vpravo uprostřed) a proudění (vpravo)

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

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

kde μ_0 je permeabilita vakua, \underline{A} magnetický vektorový potenciál, ω úhlová frekvence a $\underline{J}_{\text{ext}}$ reprezentuje proudovou hustotu externích proudů dodaných ze zdroje.

Proudění tekutiny obecně popisuje Navier-Stokesova rovnice ve formě

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \eta \nabla^2 \mathbf{v} = -\nabla p + \mathbf{f}, \quad (2)$$

kde ρ je hustota, \mathbf{v} rychlost, η dynamická viskozita, p tlak a \mathbf{f} vnější objemová síla.

Okrajové podmínky pro výpočet elektromagnetického pole i proudění jsou vyobrazeny na Obr. I.

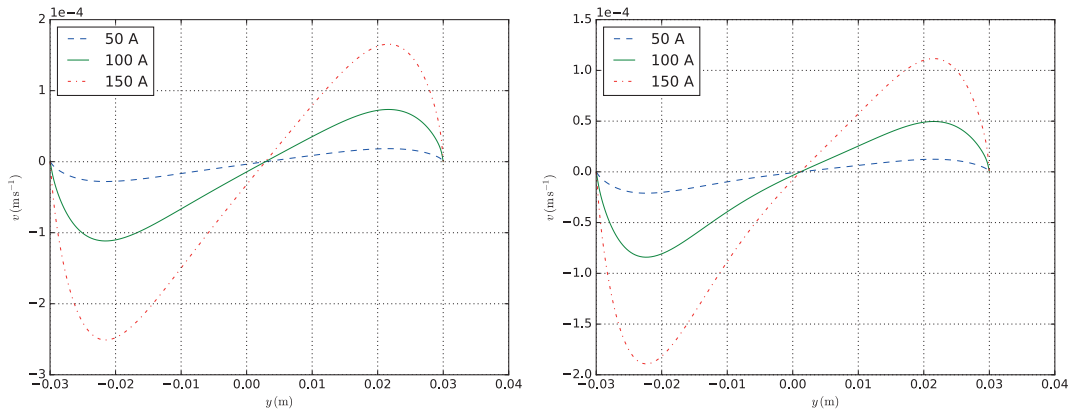
Pro výpočet proudění taveniny byl zvolen k- ϵ model. Jedná se o model sestávající ze dvou transportních rovnic, který popisuje střední hodnoty veličin turbulentního proudění[3].

TABULKA I. POUŽITÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY PRO VÝPOČET ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO POLE A RYCHLOSTI PROUDĚNÍ

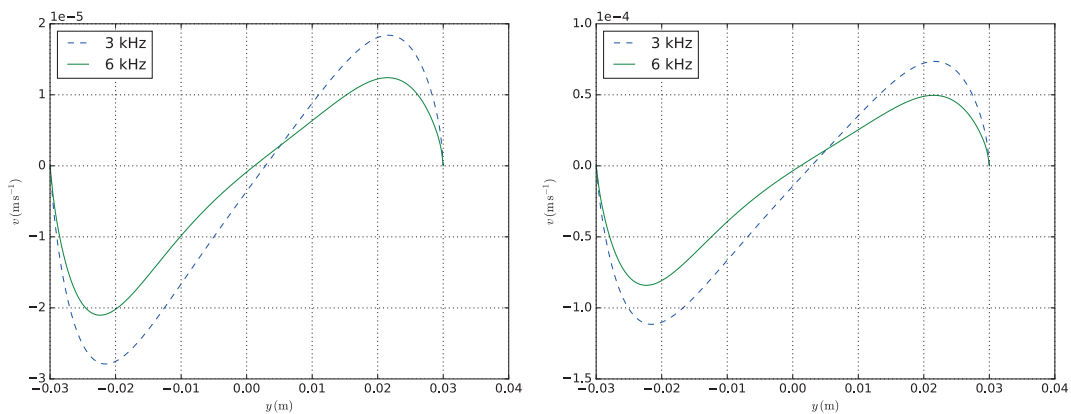
| | | |
|------------|--|---|
| γ_1 | $50 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-2}$ | elektrická vodivost materiálu induktoru (měď) |
| γ_2 | $0,9 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-2}$ | elektrická vodivost Woodova kovu při 100 °C [1] |
| η_2 | $2 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ | dynamická viskozita Woodova kovu při 100 °C [1] |
| ρ_2 | $1050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | hustota Woodova kovu při 100 °C [1] |

III. VÝSLEDKY

Rozložení rychlosti taveniny v ose kelímku při různých elektrických parametrech induktoru je vyobrazeno na Obr. II, III a IV. Z obrázků je patrné, že volná hladina taveniny a zešíkmená stěna kelímku má vliv na průběh rychlosti taveniny v její ose. Hodnoty by byly symetrické kolem $y = 0$, pokud by byla hladina taveniny překryta víkem a zároveň stěny kelímku by byly kolmé ke dnu kelímku.

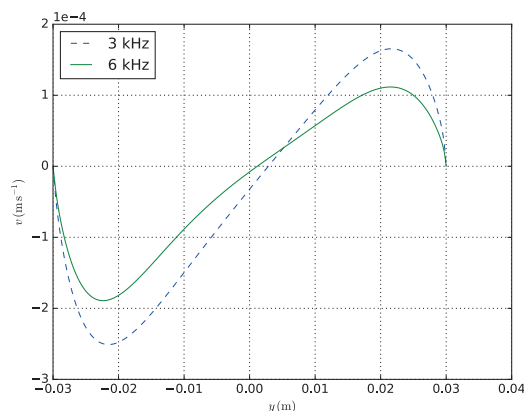


Obrázek II. Rozložení rychlosti taveniny v ose kelímku při frekvenci 3 kHz (vlevo) a 6 kHz (vpravo)



Obrázek III. Rozložení rychlosti taveniny v ose kelímku při proudu induktorem 50 A (vlevo) a 100 A (vpravo)

Dále je možné pozorovat, že ve všech případech je spodní vír větší a maximální velikost rychlosti je v něm vyšší než v případě horního víru. Rovněž je zřejmé, že s rostoucím proudem tekoucím induktorem roste velikost rychlosti proudění taveniny v ose.



Obrázek IV. Rozložení rychlosti taveniny v ose kelímku při proudu induktorem 150 A

Dále je vhodné zmínit, že rychlost taveniny v ose kelímku při frekvenci 3 kHz je vyšší než v případě frekvence 6 kHz.

Možným pokračováním tohoto výzkumu je použití materiálu s vyšší teplotou tání a tedy výraznějším vlivem rozdílu teploty taveniny na proudění. Tento vliv by musel být zahrnut do výpočtů. Dalším krokem by bylo zahrnutí vlivu vzduší taveniny.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005. 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] HUGHES W.F., YOUNG F.J. *The Electromagnetodynamics of Fluids*, John Wiley & Sons, Inc. New York 1966
- [2] NACKE B. et al. *MHD Technologies in Metallurgy, Intensive Course Specific IV*, St. Petersburg 2013, ISBN 978-5-7629-1410-9
- [3] NACKE B. et al. *Power supplies. Mathematical simulation and optimization, Intensive Course Basic II*, St. Petersburg 2013, ISBN 978-5-7629-1402-4