

ROTATION INDUCTION HEATING WITH EXTERNAL ROTOR

Lubomír Musálek ¹, Zdeněk Novák ²

ČVUT v Praze, Fakulta strojní

[1lubomir.musalek@fs.cvut.cz](mailto:lubomir.musalek@fs.cvut.cz), [2zdenek.novak@fs.cvut.cz](mailto:zdenek.novak@fs.cvut.cz)

Abstrakt:

Článek se zabývá jinými možnostmi modelování ohřevu nemagnetických válcových ingotů. Zařízení pracuje s nehybným ingotem, kolem kterého rotují permanentní magnety. Vlastní model je řešen v SW Agros2D, který je založen na metodě konečných prvků s vyšším řádem přesnosti.

Klíčová slova:

Indukční ohřev, permanentní magnet, sdružené úlohy, numerická analýza

Abstract:

The article deals with other possibilities of modeling heating of non-magnetic cylindrical ingots. The device works with a stationary ingot, around which permanent magnets rotate. The model is solved in SW Agros2D, which is based on a finite element method with a higher order of precision.

Keywords:

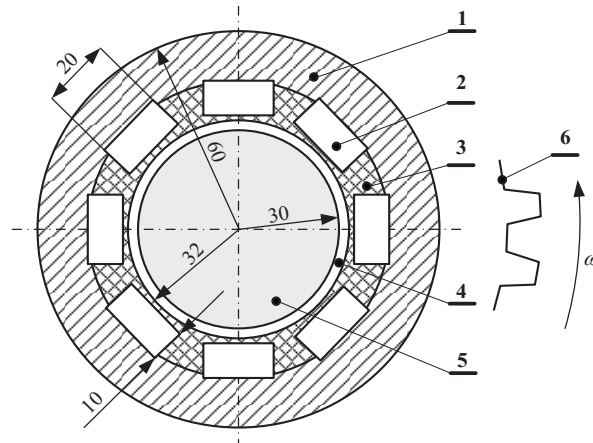
Induction heating, permanent magnet, coupled problems, numerical analysis

1. Úvod

Indukční ohřev válcových ingotů je běžný technologický postup v mnoha průmyslových aplikacích. Vzhledem k tomu, že metoda ohřevu klasickým indukčním ohřevem má poměrně malou účinnost, bylo nutno hledat nové možnosti. Před několika lety, byl navržen nový způsob ohřevu, kde se ingot otáčel ve statickém magnetickém poli vytvářeném supravodivými cívkami na stejnosměrný proud [1]. Ale tato technologie je nákladná a vyžaduje kompletní kryogenní infrastrukturu. Pro ingoty nižších průměrů jsme zahájili testování možnosti jejich vytápění rotací ve statickém magnetickém poli vytvářeném vhodně umístěných permanentních magnetů [2]. Ale i když je tento způsob účinnější a relativně levný pro realizaci, nemůžeme zabránit tepelným ztrátám v důsledku nadměrného chlazení rychle rotujícího ingotu od okolního vzduchu.

2. Nově navrhované uspořádání

Po projednání výše uvedených aspektů jsme se rozhodli otestovat inverzní možnost ohřevu - statický ingot se zahřívá v magnetickém poli vytvářeném permanentními magnety namontovaný na prsten z magneticky měkkého materiálu. Schematický pohled na nové uspořádání je znázorněno na obr. 1. rotační část se skládá z magnetického obvodu (1) reprezentované dutou trubkou oceli, na které jsou připevněny permanentní magnety (2). Magnety jsou umístěny v dobré tepelné izolaci (3) skleněné vlny, kterou jsou nalepeny na vnitřní stěnu trubky, aby se zabránilo přehřátí permanentních magnetů v důsledku konvekce a radiace z povrchu vyhřívajícího ingotu. Hnací moment je přenášen z asynchronního motoru externím ozubeným kolem (6) jak je vidět na obr. 1. Ingot (5) je umístěn uvnitř rotační části a nehybe se. Vzduchová mezera (4) je co nejtenčí, aby se dosáhlo maximální možnou účinnosti procesu.



Obr. 1 Uspořádání indukčního ohřevu s vnějším rotorem (všechny rozměry v mm)

Cílem práce bylo modelovat proces indukčního ohřevu ve výše uvedených parametrech. Výpočty jsou prováděny pomocí SW Agros2D [3], který pracuje na principu metody konečných prvků.

3. Matematický model

Matematický model procesu je dán dvěma nelineárními parciálními diferenciálními rovnicemi, které popisují rotující magnetické pole a nestacionární teplotní pole v systému. Rozdělení magnetického pole je popsáno z hlediska magnetického vektorového potenciálu rovnicí:

$$\text{curl}\left(\frac{1}{\mu}\text{curl}\mathbf{A} - \mathbf{H}_c\right) - \gamma\mathbf{v} \times \text{curl}\mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (1)$$

kde μ je permeabilita, γ je elektrická vodivost, \mathbf{v} je rychlost pohybu bodu, kde řešíme pole, \mathbf{H}_c je koercitivní síla vyvolána permanentními magnety. Permeabilita μ a elektrická vodivost γ jsou nelineárními funkcemi závislé na teplotě. Okrajová podmínka na obvodu modelu je typu Dirichlet ($\mathbf{A} = \mathbf{0}$).

Teplotní pole je popsáno následující rovnicí:

$$\text{div}(\lambda \text{grad} T) = \rho c_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} T\right) - p_j \quad (2)$$

kde λ je tepelná vodivost, ρ je hustota, a c_p je měrná tepelná kapacita při stálém tlaku. p_j jsou průměrné jouleovy ztráty vzniklé vířivými proudy (nezapočítáváme hysterezní ztráty). Ztráty jsou dány následující rovnicí:

$$p_j = \frac{|\mathbf{J}_{\text{eddy}}|^2}{\gamma}, \quad \text{where } \mathbf{J}_{\text{eddy}} = \gamma\mathbf{v} \times \text{curl}\mathbf{A} \quad (3)$$

4. Popis numerické metody

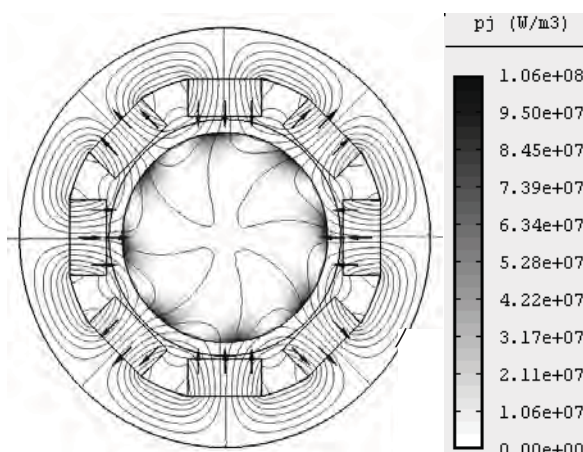
Výše uvedený model je řešen plně adaptivní metodou konečných prvků vyššího řádu přesnosti pomocí kódu Agros2D [3]. Tento SW je vytvořen v C++ kódu a je obecně určen pro numerické řešení soustav obecně druhého řádu parciálních diferenciálních rovnic, a proto se používá hlavně pro modelování složitých fyzikálních problémů. Kód je volně šiřitelný a ve 2D verzi a vykazuje řadu unikátních funkcí, jako je plně automatická hp-adaptivita, práce s uzly visí na jakékoli úrovni, multimesh technologii a možnosti kombinování trojúhelníkových, čtyřúhelníkových a zakřivených prvků pole.

5. Příklad výpočtu

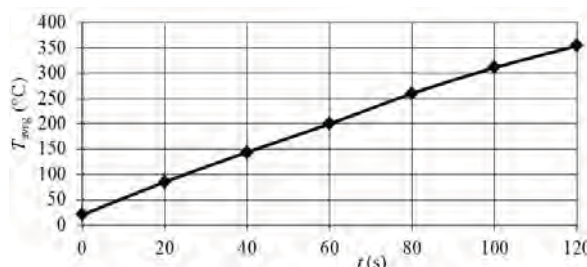
Rychlost rotace $n=1500$ rpm. Magnetický obvod je z ocele typu 12 040. Neodymové magnety jsou typu VMM10 jejichž magnetická remanence je $B_r=1.28$ T a relativní permeabilita je $\mu_r=1.11$. Počáteční teplota je $T_0=20$ °C.

Obrázek 2 ukazuje rozložení magnetického pole v systému. Šipky ukazují směr magnetizace jednotlivých permanentních magnetů a v šedé škále je ukázána velikost jouleových ztrát v ingotu (maxima je dosaženo v oblasti pod permanentními magnety).

Obrázek 3 ukazuje časový vývoj průměrné teploty v ingotu. Tato závislost je téměř lineární, protože proces je téměř adiabatický. To je způsobeno tím, že jsme použili malé tloušťky vzduchové mezery, dobrou tepelnou izolaci a dostatečně dlouhý ingot



Obr. 2 Rozložení magnetického pole a výsledných jouleových ztrát



Obr. 3 Průběh průměrné teploty uvnitř ingotu za 120s ohřevu

Literatura

- [1] N. Magnusson, R. Bersas, M. Runde: Induction heating of aluminium billets using hts dc coils, Institute of Physics Conference Series (2004) 1104–1109.
- [2] F. Mach, P. Karban, I. Doležel: Induction heating of cylindrical nonmagnetic ingots by rotation in static magnetic field generated by permanent magnets. Journal Comp. Appl. Math., 2012, in print.
- [3] <http://agros2d.org>.



Selected article from
Tento dokument byl publikován ve sborníku

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky,
automatického řízení a informatiky 2018**
**New Methods and Practices in the Instrumentation,
Automatic Control and Informatics 2018**
28. 5. – 30. 5. 2018, Příbram - Podlesí

ISBN 978-80-01-06477-1

Web page of the original document:
<http://control.fs.cvut.cz/nmp>
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2018.pdf>

Obsah čísla/individual articles:
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2018/>