

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Porovnání indukčního a přímého odporového ohřevu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan BENDA**
Osobní číslo: **E10B0006P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Porovnání indukčního a přímého odporového ohřevu**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte teorii indukčního a přímého odporového ohřevu
2. Proveďte analytický a numerický výpočet pro vybranou vsázku
3. Porovnejte získané výsledky
4. Stanovte závěry pro praxi



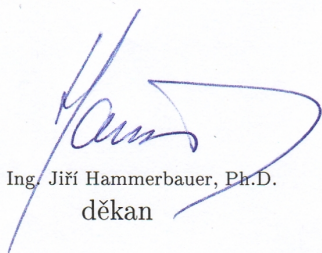
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. určí vedoucí práce

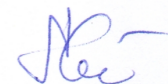
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Jiřinec**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry



V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá porovnáním indukčního a přímého odporového ohřevu. Na začátku práce je uvedena teorie ohřevů. V další části jsou vypsány rovnice popisující elektromagnetické pole. V následujících kapitolách je proveden numerický výpočet pro indukční ohřev, analytický výpočet pro přímý odporový ohřev a porovnání napájecích proudů.

Klíčová slova

Indukční ohřev, přímý odporový ohřev, numerický výpočet, analytický výpočet, doba ohřevu, Jouleovy ztráty.

Abstract

The presented bachelor's thesis is focused on comparison of induction and direct resistance heating. First part provides theoretical overview of basic principles and use of those heating methods. In the next part, most important formulas for electromagnetic field are shown. Last part of the thesis describes numeric calculation for induction heating and analytic calculation for direct resistance heating.

Key words

Induction heating, direct resistance heating, numerical calculation, analytical calculation, heating time, Joule losses.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 5.6.2014

Jan Benda

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavu Jiřincovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	1
ÚVOD	3
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	4
1. INDUKČNÍ OHŘEV	6
1.1 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU:	6
1.2 INDUKTOR	6
1.3 ÚČINNOST INDUKČNÍHO OHŘEVU, HLOUBKA VNIKU	7
1.4 VÝHODY INDUKČNÍHO OHŘEVU V PRAXI	8
1.5 HLAVNÍ APLIKAČNÍ OBLASTI INDUKČNÍHO OHŘEVU	8
1.6 INDUKČNÍ PECE.....	9
1.6.1 Indukční kelímková pec.....	9
1.6.2 Indukční kanálková pec	9
2. PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV	10
2.1 PRINCIP.....	10
2.2 POUŽITÍ PŘÍMÉHO ELEKTRICKÉHO OHŘEVU	11
3. NEPŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV	11
3.1 PRINCIP NEPŘÍMÉHO ODPOROVÉHO OHŘEVU.....	11
3.2 ROZDĚLENÍ NEPŘÍMÉHO ODPOROVÉHO OHŘEVU	11
3.3 SOUČÁSTI ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ S NEPŘÍMÝM OHŘEVEM.....	12
4. ZÁKLADNÍ ROVNICE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	14
4.1 MATERIÁLOVÉ VZTAHY:.....	14
4.2 MAXWELLOVY ROVNICE:	14
4.3 VEKTOROVÝ POTENCIÁL	16
4.4 PODMÍNKY NA ROZHRANÍ PRO ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	16
4.5 ROVNICE PRO TEPLOTNÍ POLE	18
5. VÝPOČET INDUKČNÍHO OHŘEVU	20
6. VÝPOČET OHŘEVU VSÁZKY PŘÍMÝM ODPOROVÝM OHŘEVEM	24
7. ZÁVĚR	27

SEZNAM OBRÁZKŮ	28
SEZNAM TABULEK.....	28
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	29

Úvod

Dnešní civilizace je zvyklá žít v luxusu. Tento luxus jí z velké části zajišťuje elektrická energie. Spotřeba elektrické energie každoročně stoupá a celý svět si tento fakt uvědomuje. Stejně jako si uvědomuje slévárenský průmysl kolik energie je potřeba na ohřátí jakéhokoliv materiálu byť jen o jeden stupeň. Právě tyto informace ve mně vzbudily zájem a díky nim jsem si vybral právě téma porovnání indukčního a přímého odporového ohřevu.

Velká část energie na celém světě je využita v elektrotepelné technice a na vytápění. Právě to přidává na důležitosti výzkumu v oblasti elektrotepelné techniky. Vytvořením nových metod a technologií a vylepšováním již známých je možné zefektivnit využití elektrické energie. Principů přeměny elektrické energie na teplo existuje více, je proto důležité zvolit využití správného principu pro dané použití. S tím souvisí i znalost jejich výhod a nevýhod.

Tato práce se zabývá výpočtem indukčního a přímého odporového ohřevu pro válcovou vsázku. Výpočty jsou provedeny pro vsázku z konstrukční uhlíkové oceli a induktor z mědi. Hlavním cílem této práce je porovnat velikosti proudů, které je potřeba dodávat pro vytvoření stejných Jouleových ztrát, v přímém odporovém a indukčním ohřevu. Pro indukční ohřev byla zvolena numerická metoda výpočtu pomocí multi-fyzikálního softwaru Ansys. Pro přímý odporový ohřev je použita analytická metoda pomocí základních vzorců. V závěru práce jsou shrnuty výhody a nevýhody obou ohřevů.

Seznam symbolů a zkratk

Veličina	Značka	Jednotka
teplo	Q	[J]
odpor	R	[Ω]
proud	I	[A]
čas	t	[s]
výkon	P	[W]
Eulerovo číslo	e	[-]
rezistivita	ρ	[$\Omega \cdot m$]
délka vodiče	l	[m]
průřez vodiče	S	[m ²]
hloubka vniku	δ	[m]
vodivost (konduktivita) materiálu	γ	[S]
permeabilita	μ	[H.m ⁻¹]
permeabilita vakua	μ_0	[H.m ⁻¹]
permeabilita prostředí	μ_r	[-]
úhlová rychlost	ω	[rad.s ⁻¹]
frekvence	f	[Hz]
účinnost	η	[%]
průměr induktoru	D`	[m]
průměr válcového předmětu	d	[m]
rezistivita materiálu induktoru	ρ_1	[$\Omega \cdot m$]
rezistivita ohřívaného materiálu	ρ_2	[$\Omega \cdot m$]
permitivita	ϵ	[F.m ⁻¹]
minimální frekvence	f_{min}	[Hz]
odpor při 20 °C	R ₍₂₀₎	[Ω]
součinitel přestupu tepla	α	[W.m ⁻² K ⁻¹]
termodynamická teplota	T	[K]
rozdíl termodynamických teplot	ΔT	[K]
počáteční termodyn. teplota	T _P	[K]
koncová termodyn. teplota	T _M	[K]
teplota vzduchu	T _{gass}	[K]

teplota okolních ploch	T_{ext}	[K]
permitivita vakua	ϵ_0	[F.m ⁻¹]
permitivita prostředí	ϵ_r	[-]
intenzita elektrostatického pole	\vec{E}	[V/m]
magnetická indukce	\vec{B}	[T]
intenzita elektromagnetického pole	\vec{H}	[A/m]
tok elektrického pole	$\vec{\psi}$	[V.m]
proudová hustota	\vec{J}	[A/m ²]
magnetický indukční tok	Φ	[Wb]
elektrický náboj	Q	[C]
objemová hustota volného náboje	ρ_0	[C.m ⁻³]
magnetický potenciál vektorový	\vec{A}	[Wb/m]
tepelná kapacita	c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Jouleovo teplo	w_j	[W.m ⁻³]
tepelná vodivost	λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
tepelný tok	q	[W.m ⁻²]
poloměr vsázky	r	[m]
objem	V	[m ³]
hustota materiálu	ρ_m	[kg.m ⁻³]
teplotní rozdíl	$\Delta\theta$	[°C]
ztrátový výkon přechodem tepla	P_z	[W]
střední rezistivita	$\rho_{\text{stř}}$	[Ω.m]
střední odpor	$R_{\text{stř}}$	[Ω]

1. Indukční ohřev

1.1 Princip indukčního ohřevu:

Zařízení pro indukční ohřev se skládají z induktoru a vsázky. V těchto zařízeních lze tavit pouze materiály elektricky vodivé¹. Induktor je napájen vysokými střídavými proudy, které vytvářejí magnetické pole. Vložení vsázky do tohoto pole se uvnitř vsázky podle indukčního zákona vytvářejí indukované proudy. Tyto proudy vsázku přímo ohřívají Joulovým teplem:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1)$$

Teplo se do vsázky nedodává přímo tepelným spádem, ale přes střídavé magnetické pole, díky kterému vzniká teplo přímo ve vsázce. Při správně nastaveném indukčním ohřevu je vsázka nejteplejší prvek celého zařízení, vše ostatní zůstává studené. [2] [3]

Vířivé proudy

Vířivé proudy se indukují v tělesech z elektricky vodivého materiálu při pohybu v elektromagnetickém poli stacionárním nebo se pokud nachází či pohybují v elektromagnetickém poli nestacionárním. Tyto proudy se snaží zabránit změně, která je vyvolala. [1][2]

1.2 Induktor

Induktor vyroben z vodivého materiálu, nejčastěji z měděného vodiče. Tvar induktoru závisí na tvaru vsázky, kterou chceme ohřívát. Požadujeme, aby bylo uspořádání induktoru co nejtěsnější se vsázkou. Vodiče cívky se používají válcové nebo ploché. Induktor bývá napájen proudem o velikosti jednotek až tisíců ampér a o frekvencích od několika kHz až do řádů MHz. Induktor se při takto velkých prouděch zahřívá, proto se v některých případech vyrábí dutý a vnitřně chlazený protékající vodou. [3] [4]

¹ Některé materiály se stávají vodivými až při určité teplotě. I tyto materiály je možné tavit indukčním ohřevem. Nejprve je však potřeba je ohřát na danou teplotu pomocí startovacího materiálu- vodivého kruhu nebo kovového prášku.

1.3 Účinnost indukčního ohřevu, hloubka vniku

Elektromagnetické pole se ve vodivých materiálech tlumí, hloubka vniku je vzdálenost od povrchu směrem ke středu objektu, ve které se amplituda veličin pole utlumí e-krát. Veličinami pole rozumíme $\vec{E}, \vec{D}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{J}$. Následující rovnice byly převzaty z literatury [7].

Hloubka vniku elektromagnetického pole do vodivého materiálu je definována vztahem

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu\omega}}, \quad (2)$$

kde

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ permeabilita materiálu,

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ úhlová frekvence.

Účinnost válcových těles lze dosti dobře odhadnout podle přibližného vztahu:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \cdot (1 + 6,25 \cdot \frac{\delta^2}{d^2}) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \cdot \rho_2}}} \quad (3)$$

Je důležité, aby člen $(1 + 6,25 \delta^2/d^2)$ byl co nejmenší; v podstatě lze zde dosáhnout hodnoty 1,1. Z toho vyplývá požadavek na velikost poměru δ/d :

$$\frac{\delta}{d} \leq \frac{1}{\sqrt{62,5}} \approx \frac{1}{8} \quad (4)$$

Je tedy potřeba volit frekvenci tak, aby hloubka vniku nebyla větší než jedna osmina průměru d_1 . V souladu s rovnicí (2) bude tedy minimální frekvence:

$$f_{\min} = 16 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho}{\mu \cdot d^2} \quad (5)$$

Tab. 1.3.1 Účinnost indukčního ohřevu válcového tělesa v závislosti na hodnotě poměru d/δ (převzato z [7])

d/δ	8	6	4	2	1	0,6	0,4
účinnost (%)	95	85	65	30	10	4	1

1.4 Výhody indukčního ohřevu v praxi

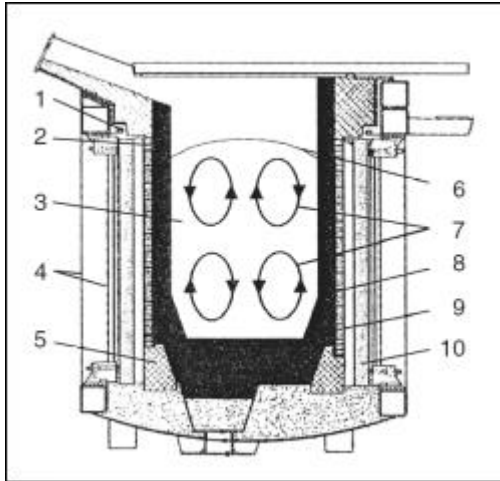
- Elektrické indukční pece umožňují dodávat tavby o menší hmotnosti (1-6 tun) v intervalu 40-120 minut
- Pomocí několika indukčních pecí lze zásobovat formovnu téměř plynule tekutým kovem
- Indukční míchání taveniny zajišťuje tepelnou i chemickou homogenitu taveniny. Dosažení přesného chemického složení a přesné odpichové teploty
- V oceli vyrobené v elektrické indukční peci se nachází obvykle nižší obsah vodíku a dusíku, zejména u kyselých indukčních pecí
- Během tavby nedochází k nauhličení kovu
- Rychlé uvedení tavicího agregátu do provozu během několika minut. Pece jsou vhodné pro slévárny pracující jen v jedné směně denně
- Nižší spotřeby elektrické energie
- Nízký propal železa i legujících prvků (legování na spodní hranici předepsaného materiálovým listem- úspora feroslitin)
- Nižší náklady na ekologizaci provozu
- Nižší hlučnost
- Menší vznik exhalací a menší vznik pevných odpadů související s provozem pece [8]

1.5 Hlavní aplikační oblasti indukčního ohřevu

- Tavení ocelových a barevných kovů teplotami až k 1500 °C
- Ohřev pro kování na 1250 °C
- Žihání naměkko a normalizace teplotami 750 až 950 °C po tváření za studena
- Povrchové kalení obrobků z oceli a litiny při teplotách 850 až 930 °C (popouštění 200 – 300 °C) a měkké a tvrdé pájení za teplot až 1100 °C, jakož i zvláštní oblasti, jako např. ohřev k lepení, spékání [5]

1.6 Indukční pece

1.6.1 Indukční kelímková pec



Obr. 1.7.1.1 Indukční kelímková pec (převzato z [4])

Legenda k obr. 1.7.1.1

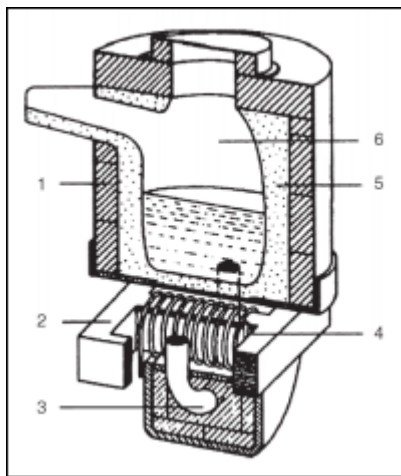
- 1 – kroužek spojený nakrátko
- 2 – vodou chlazený prstenec
- 3 – tavenina, 4 – ocelová kostra
- 5 – betonový prstenec
- 6 – kopulovitá hladina taveniny
- 7 – pohyb taveniny
- 8 – kelímek
- 9 – induktor
- 10 – svazek plechů

Indukční tavicí pece jsou výhodné hlavně pro homogenitu taveného materiálu, kterou zajišťuje víření vznikající vlivem elektrodynamických sil. Tlak magnetických sil způsobuje podtlak u stěny kelímku a v ose taveniny přetlak. Vlivem hydrostatických sil se tavený materiál pohybuje ke stěně a vzdouvá se do středu kelímku. Pece se napájí ze zdroje střídavého proudu frekvencemi od 50 do 4 kHz. Do cívky vtéká proud několik tisíc ampérů a proto je potřeba ji chladit vodou, která přitéká z izolačních hadic. Indukční kelímkové pece se používají především pro tavení ocelí. [4]

1.6.2 Indukční kanálková pec

Má lepší účinnost než indukční kelímková pec, musí se však udržovat na pracovní teplotě i pokud není používána. Její velkou nevýhodou je i nutnost předtavení materiálu do tekutého stavu aby bylo možné jej nalít do kanálkové pece. Kanálkové pece se používají pro zušlechťování šedé litiny (slitina železa s uhlíkem o obsahu vyšším než 2,14%) a tavení barevných kovů.

Kanálkové pece se používají pro zušlechťování šedé litiny (slitina železa s uhlíkem o obsahu vyšším než 2,14%) a tavení barevných kovů.



Legenda k obr. 1.7.2.1

- 1 – izolace
- 2 – jádro transformátoru
- 3 – kanálek
- 4 – primární cívka
- 5 – ohnivzdorná vyzdívka
- 6 – tavicí prostor

Obr. 1.7.2.1 Indukční kanálková pec
(převzato z [4])

Velké pece jsou využívány na zpracování hliníku, kdy účinnost dosahuje až 85% a pro-pal je pod 1%. Tavením hliníku a některých dalších kovů se však kanálek zanáší a proto se vyrábí spíše s přímkovou horizontální částí a přímkovými vertikálními částmi, které se jednodušeji čistí. [4][7]

2. Přímý odporový ohřev

2.1 Princip

Princip přímého odporového ohřevu spočívá v průchodu velkých proudů skrz pevnou vsázku nebo vodivou kapalinou. Teplo vzniká ve vodiči narážením elektronů do krystalické mřížky materiálu, tento jev popisuje Joulův zákon. Vzniklé teplo lze vypočítat podle vztahu:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t. \quad (6)$$

Odpor vodiče se stanoví ze vztahu:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (7)$$

Rezistivita materiálu závisí na teplotě, tudíž i odpor materiálu závisí na teplotě a to vztahem

$$R = R_{(20)} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T). \quad (8)$$

Většina vsázek má nelineární závislost fyzikálních vlastností na teplotě, což velmi ztěžuje projektování těchto zařízení. Nejdůležitější z těchto fyzikálních vlastností jsou rezistivita, měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti. [4] [10]

„Elektrická energie je dodávána do vsázky pomocí stykových kontaktů (elektrod), přičemž jejich počet a způsob rozmístění záleží na intenzitě proudu protékajícího vsázkou. Elektrody mohou být buď nepohyblivé, kluzné, válečkové, kapalinové. Elektrody nepohyblivé, kluzné, válečkové se vyrábějí z mědi, grafitu a legované oceli. Při velkých intenzitách proudu se chladí vodou a dotlačují se pneumaticky velkou silou vsázky. U kapalinového kontaktu stykačů se jako médium kontaktu používá tekuté olovo, cín nebo rozpuštěné soli“. [9]

2.2 Použití přímého elektrického ohřevu

- ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů,
- pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku,
- termická elektrolýza (elektrodové solné lázně, elektrodový ohřev vody),
- v procesech zpracování plastů a tepelného obrábění oceli a neželezných kovů,
- na grafitizaci uhlíkových materiálů,
- na nahřívání (sušení) betonu. [4]

3. Nepřímý odporový ohřev

3.1 Princip nepřímého odporového ohřevu

U nepřímého odporového ohřevu nevzniká teplo přímo ve vsázce ale v topných člancích, ze kterých se pak dostává do vsázky sáláním, prouděním a vedením. Jaký typ přenosu tepla se uplatní, záleží na použitém zařízení.

3.2 Rozdělení nepřímého odporového ohřevu

- Podle teploty
 - nízkoteplotní pece do 6000 °C
 - středněteplotní pece 600 – 1100 °C

- vysokoteplotní pece nad 11000 °C
- Podle atmosféry
 - normální atmosféra (vzduch)
 - umělá (ochranná) atmosféra
 - vakuum
- Podle použití
 - tepelné zpracování kovů
 - tavení kovů
 - tavení skla
 - a další...
- Podle pohybu vsázky
 - stabilní vsázka
 - Komorové
 - Vozové
 - Šachtové (hlubinné)
 - Poklopové (zvonkové)
 - Elevátorové
 - Kelímkové pece tavící a tavící vany
- Průběžné pece
 - Pásové
 - Válečkové
 - Narážecí
 - Střásací
 - Krokové
 - Protahovací
 - Bubnové
 - Karuselové (rotační)

[4][11]

3.3 Součásti elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem

- Topné články,
- Žáruvzdorná vyzdívka,
- Skříň pece
- Tepelná izolace
- Podávací mechanismy a jejich pohony [4]

Topné články

Topné články jsou nejdůležitější součástí pecí s nepřímým ohřevem. Základní kritéria při výběru materiálu jsou pracovní teplota a pecní atmosféra. [11]

Požadavky na materiál pro topné články:

- Žáruvzdornost při pracovní teplotě – Při velkých změnách teploty může při špatné žáruvzdornosti topný článek na povrchu popraskat.
- Mechanická pevnost při pracovní teplotě – Topný článek se nesmí deformovat při pracovní teplotě.
- Odolnost vůči chemickým účinkům prostředí pece – Je důležité, aby topný článek nereagoval při pracovní teplotě s atmosférou uvnitř pece, čímž by se snížila jeho životnost.
- Vyhovující elektrické vlastnosti – Je požadována vysoká rezistivita, stálost elektrického odporu a malý teplotní součinitel odporu. [11]

4. Základní rovnice elektromagnetického pole

Pro vytvoření této kapitoly byly informace čerpány z literatury [2],[4],[12],[13].

4.1 Materiálové vztahy:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (12)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (13)$$

4.2 Maxwellovy rovnice:

Maxwellovy rovnice jsou shrnutí Coulombova zákona, Gaussovy věty elektrostatiky, Ampérova zákona celkového proudu, Biot-Savartova zákona, zákona zachování náboje a Ohmova zákona. Shrnutí do vzájemných obecných souvislostí v soustavu rovnic provedl James Clark Maxwell. [2]

I. Maxwellova rovnice

- Ampérův zákon celkového proudu, zákon magnetoelektrické indukce

Integrální tvar

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \sum I + \frac{d\vec{\psi}}{dt} \quad (14)$$

Diferenciální tvar

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_0 + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (15)$$

Církulace vektoru \vec{H} po orientované křivce C je rovna celkovému vodivému proudu I a posuvnému proudu $d\vec{\psi}/dt$, který prochází v kladném směru plochy S, ohraničené křivkou C. Vzájemná orientace křivky a plochy lze nejjednodušeji stanovit pravidlem pravé ruky: Je-li palec ve směru kladné normály plochy S, ukazují prsty směr orientace křivky C.

II. Maxwellova rovnice

- Faradayův indukční zákon, zákon elektromagnetické indukce

Integrální tvar

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (16)$$

Diferenciální tvar

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

Cirkulace vektoru \vec{E} po orientované křivce C je rovna záporně vzaté časové změně magnetického toku, který prochází plochou S, ohraničenou křivkou C. Vzájemná orientace křivky a plochy je určena stejným pravidlem pravé ruky, jako v předchozí rovnici a nezávisí na směru vektorů \vec{E} nebo \vec{B} . [2]

III. Maxwellova rovnice

Integrální tvar

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q \quad (18)$$

Diferenciální tvar - Gaussův zákon elektrostatiky

$$\text{div}\vec{D} = \rho_0 \quad (19)$$

IV. Maxwellova rovnice

Integrální tvar

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (20)$$

Diferenciální tvar - Zákon spojitosti indukčního toku:

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (21)$$

4.3 Vektorový potenciál

Většina softwaru využívá vektorový potenciál a jeho úpravy pro analýzu elektromagnetického pole.

Vektorový potenciál je definován rovnicí

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}. \quad (22)$$

Odvození vektorového potenciálu $\text{rot}\vec{A}$ vychází z rovnic (15) a (17). Z rovnic (17) a (22) lze vyjádřit intenzitu elektrického pole

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} = \vec{E}_v + \vec{E}_i, \quad (23)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_v - \gamma \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_v + \vec{J}_i. \quad (24)$$

Celková proudová hustota je rozdělena na proudovou hustotu $\vec{J}_i = \gamma\vec{E}_i$ danou elektrickou intenzitou a vodivostí prostředí a proudovou hustotu $\vec{J}_v = \gamma\vec{E}_v$ vnuceného proudu. Budeme-li uvažovat pouze kvazistacionární pole, můžeme v rovnici (15) zanedbat Maxwellův posuvný proud.

$$J_{ef} \gg \epsilon\omega E \rightarrow \gamma \gg \epsilon\omega \quad (25)$$

Při splnění podmínky kvazistacionarity (25) je možné z rovnic (22),(23),(24) za předpokladu lineárního prostředí $\mu = \text{konst}$ psát výslednou parciální diferenciální rovnici pro vektorový potenciál

$$\Delta\vec{A} = \mu\gamma \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \mu\vec{J}_v \quad (26)$$

4.4 Podmínky na rozhraní pro elektromagnetické pole

Pro získání jednoznačného výsledku pro rovnici (26) je potřeba formulovat pro danou oblast okrajové podmínky, počáteční podmínky a podmínky na rozhraní.

Obecná formulace podmínek na rozhraní Γ_R pro vektorový potenciál:

Spojitosť vektorového potenciálu

$$\vec{A}_1(\Gamma_R) = \vec{A}_2(\Gamma_R). \quad (27)$$

Rovnice pro normálové derivace

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial \vec{A}_1}{\partial \vec{n}} - \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \vec{A}_2}{\partial \vec{n}} = \vec{K}_n. \quad (28)$$

Okrajové podmínky pro vektorový potenciál na hranici vyšetřované oblasti Γ_Ω jsou

- **Dirichletovy** - udává přímo požadovanou velikost počítané veličiny v každém bodě hranice Γ . Rozložení vektorového potenciálu

$$\vec{A}(\Gamma_\Omega, t) = \vec{A}_\Gamma(\Gamma_\Omega, t), \quad (29)$$

kde \vec{A} je hledaná hodnota vektorového potenciálu a \vec{A}_Γ je požadovaná hodnota vektorového potenciálu pro body hranice Γ_Ω .

- **Neumannovy** – je známa derivace vektorového potenciálu podle normály

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial \vec{n}}(\Gamma_\Omega, t) = f_{01}(\Gamma_\Omega, t), \quad (30)$$

kde f_{01} je požadovaná hodnota derivace \vec{A} dle vnější normály.

Neumannova podmínka určuje velikost tečné složky vektoru \vec{B} . Položíme-li Neumannovu podmínku rovnou nule, bude mít vektor $\vec{B}(\Gamma, t)$ směr normály k hranici. Toho lze opět s výhodou využít při zadávání symetrie, např. víme-li, že siločáry budou hranicí procházet v kolmém směru.

Oblast Ω , kde hledáme rozložení elektromagnetického pole, zpravidla volíme tak, aby bylo možno na základě fyzikální interpretace tyto okrajové podmínky snadno formulovat.

Vlastnosti vektorového potenciálu a vektoru \vec{B} říkají, že magnetické indukční čáry jsou totožné s ekvipotenciálami vektoru \vec{A} . Podmínka Dirichletova bude tedy pro vektorový potenciál platit, když bude hranice totožná se siločárou. Neumannova podmínka bude splněna, pokud je hranice rovinou symetrie nebo dokonalé permeabilního materiálu, kde tečná složka \vec{B} je rovna nule. V případě kombinace obou podmínek jde o smíšenou okrajovou úlohu.

4.5 Rovnice pro teplotní pole

Fourier-Kirchhoffova rovnice

Za předpokladu pevného skupenství látek, konstantního tlaku, konstantní měrné tepelné kapacity a nulové rychlosti ohřívání součástí platí

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\operatorname{div}(-\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + w_j. \quad (31)$$

Stejně jako v případě řešení elektromagnetického pole je potřeba formulovat okrajové a počáteční podmínky a podmínky na rozhraní pro teplotní pole.

Podmínky na rozhraní

Podmínky na rozhraní dvou materiálů s různými materiálovými parametry vyjadřují, že teploty na obou stranách rozhraní jsou stejné a že rozdíl toků energie k rozhraní a od rozhraní je roven plošné hustotě energie vznikající na rozhraní za jednotku času.

$$T_1 = T_2 \quad (32)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \vec{n}} - \lambda_2 \frac{\partial T_1}{\partial \vec{n}} = q \quad (33)$$

kde \vec{n} představuje normálový vektor se směrem do druhého prostředí a \vec{q} představuje plošnou hustotu energie, která vznikne na rozhraní za jednotku času.

V případě, že na rozhraní nevzniká žádná tepelná energie ($\vec{q} = 0$), pak platí pro rozhraní rovnice

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \vec{n}} = \lambda_2 \frac{\partial T_1}{\partial \vec{n}}. \quad (34)$$

Okrajové podmínky

Dirichletova – Známe teplotu na hranici Γ_Ω

$$T(\Gamma_\Omega, t) = T_{\Gamma_\Omega}(\Gamma_\Omega, t) \quad (35)$$

Neumannova – Známe tok tepelné energie přes hranici Γ . Využití na osách symetrie s nulovým tokem tepelné energie přes hranici.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}(\Gamma_\Omega, t) = f_{02}(\Gamma_\Omega, t) \quad (36)$$

kde f_{02} je požadovaná hodnota tepelného toku

Newtonova – používá se především při uvažování konvekce mezi pevnou látkou a kapalinou nebo plynem. Jedním z nejdůležitějších parametrů je součinitel přestupu tepla prouděním α . Jeho správné určení je velice problematické a určuje se na základě tzv. kritérií podobnosti. Je ovlivňován celou řadou parametrů, např. teplotou, tlakem, viskozitou, atd.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_{gass} - T) \quad (37)$$

Okrajová podmínka IV. Druhu – respektuje přestup tepla sáláním, které vychází ze Stefan-Bolzmanova zákona.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon c(T_{ext}^4 - T^4) \quad (38)$$

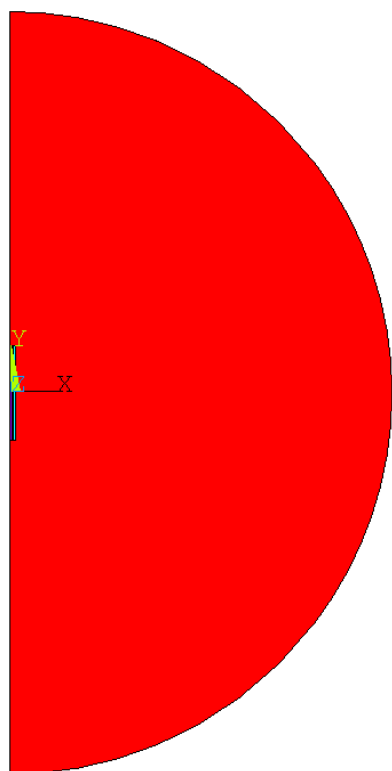
Při indukčním ohřevu dochází k ohřevu na velmi vysoké teploty. Je tedy potřeba uvažovat smíšenou okrajovou podmínku pro přestup tepla konvekcí a radiací.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \alpha(T_{gass} - T) + \varepsilon \cdot c \cdot (T_{ext}^4 - T^4) \quad (39)$$

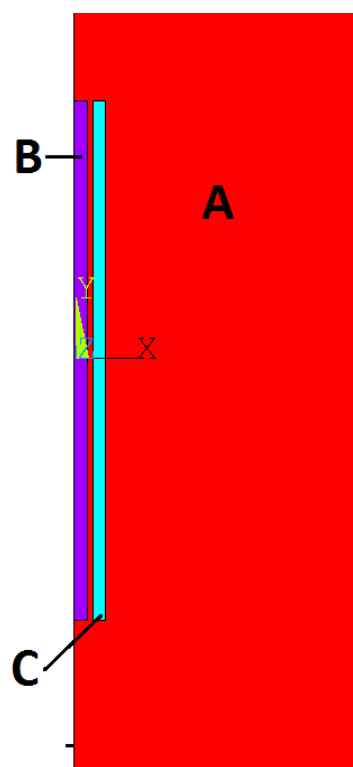
5. Výpočet indukčního ohřevu

Nejprve je potřeba podotknout, že při zadávání materiálových parametrů je nutné, uvědomit si jejich teplotní závislost a použít správný postup pro výpočet. V tomto případě byl zvolen postup použití středních parametrů pro daný teplotní rozsah. Tento postup byl použit z důvodu nedostatečných informací o teplotních závislostech pro použité materiály.

Pro výpočet indukčního ohřevu byl zvolen numerický výpočet pomocí multi-fyzikálního softwaru Ansys. Model pro výpočet se skládá z induktoru, vsázky a okolního prostředí. Vzhledem k uvažovanému tvaru induktoru a vsázky je úloha řešena jako rotačně symetrická, s osou symetrie uprostřed vsázky. Tento model je zobrazen na obr. 5.1 a 5.2. Válcová vsázka byla zvolena jeden metr dlouhá s průměrem pět centimetrů. Induktor má stejnou délku jako vsázka a šířku dva a půl centimetru. Okolí bylo uvažováno do vzdálenosti čtyř metrů.



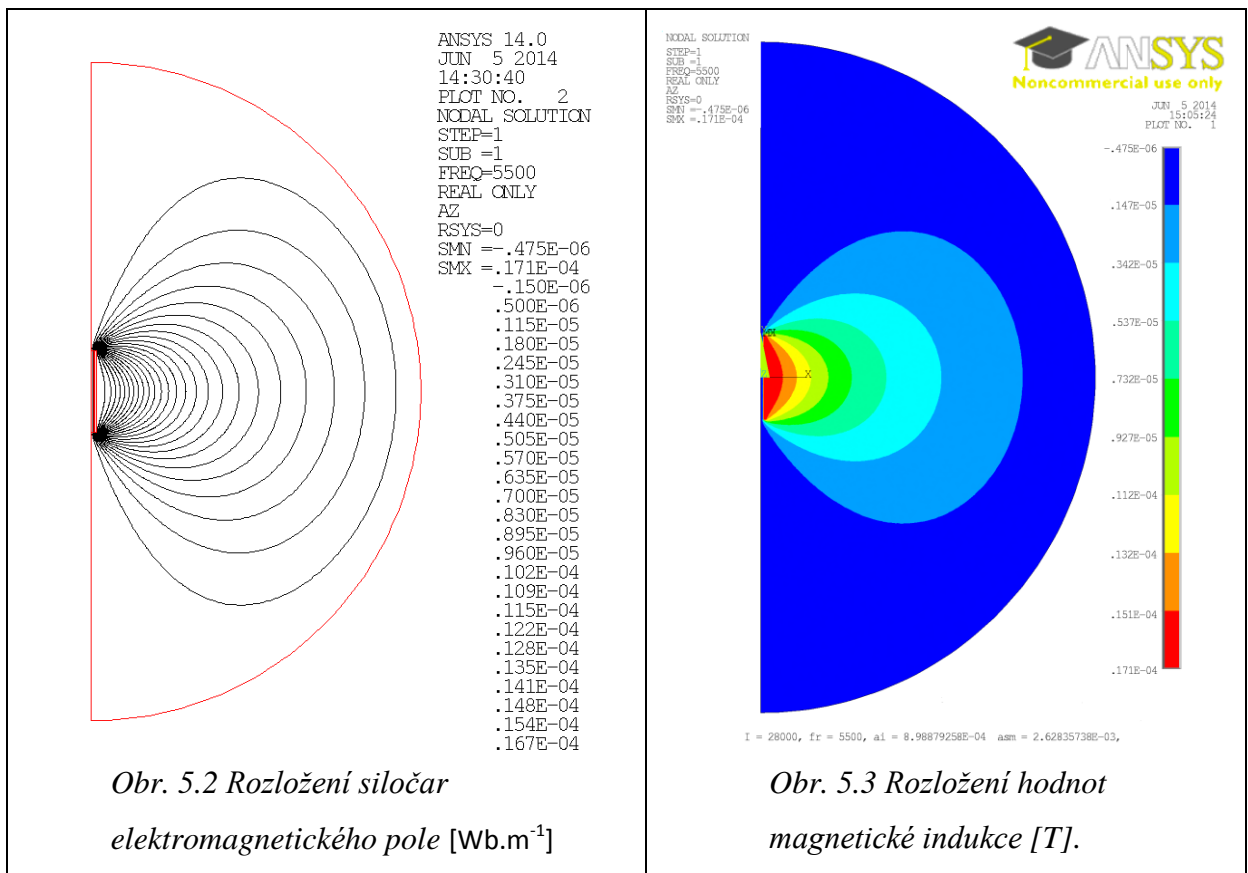
Obr. 5.1 Model pro výpočet indukčního ohřevu



Obr. 5.2 zvětšený výřez zaměřený na vsázku a induktor

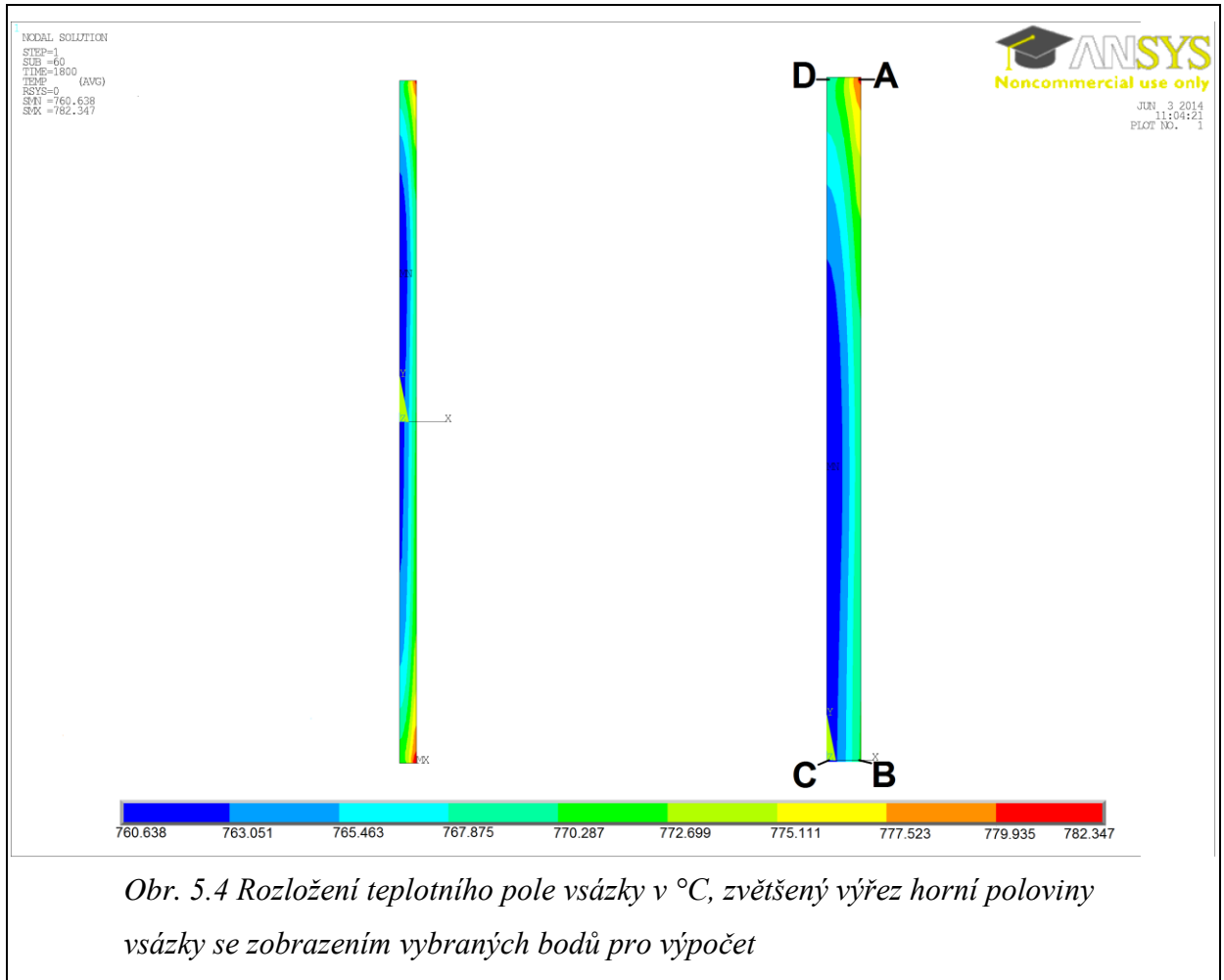
- A- Okolí
- B- Vsázka
- C- Induktor

Rozměry vsázky byly zvoleny tak, aby vyhovovaly i pro přímý odporový ohřev. Model je rozdělen pomocí nelineárního síťování. Nelineární síťování bylo zvoleno, aby bylo co nejlépe vyšetřeno rozložení magnetického pole ve vsázce, induktoru a blízkém okolí. V oblasti vsázky byla zvolena nelineární síť tak, aby co nejlépe respektovala pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky. Proud procházející induktorem byl zvolen 800 A. Celkový počet závitů byl uvažován 35. Na obr. 5.2 je zobrazen graf pro vektorový potenciál. Na obr. 5.3 je zobrazena intenzita magnetického pole.

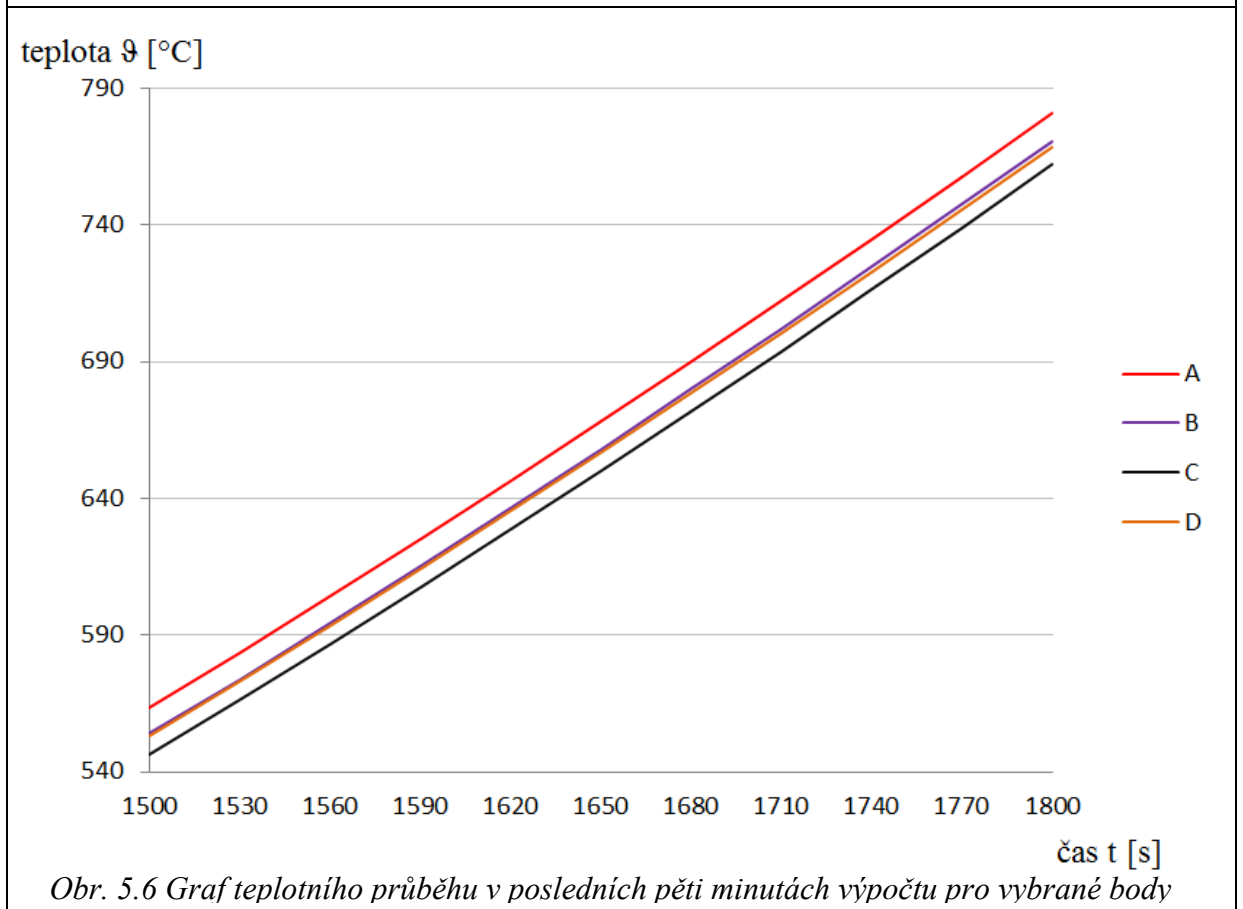
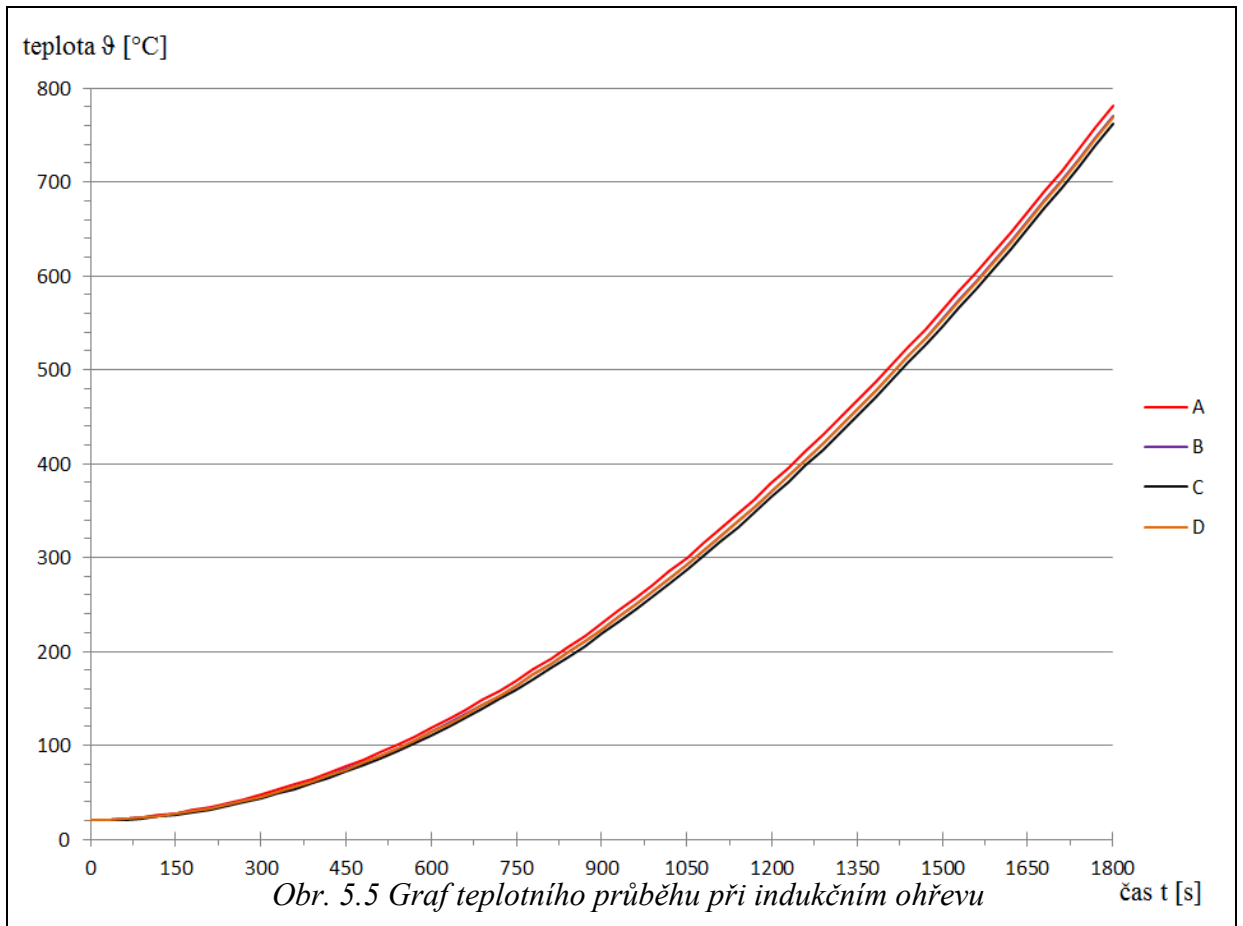


Pro výpočet teplotního pole byla použita tranzientní teplotní analýza, pracující na základě metody konečných prvků. Počáteční teplota vsázky je stejná jako uvažovaná teplota okolí, tedy 20 °C. Vzhledem k obtížnosti získání hodnoty součinitele přestupu tepla α , byla zvolena konstantní hodnota 20 Wm⁻²K⁻¹ pro oba výpočty. Bylo dosaženo Jouleových ztrát o velikosti 10397,2164 W.

Při výpočtu teplotního pole byla uvažována celková doba ohřevu 30 minut s časovým krokem 30 sekund. Rozložení teplotního pole ve vsázce je na obr 5.4 .



Při indukčním ohřevu se vsázka nezahřívá rovnoměrně. Na obrázku 5.4 je vidět, že nejteplejším bodem vsázky je bod A. V ose vsázky v bodě D a uprostřed pláště v bodě B jsou teploty téměř totožné, liší se pouze o 2 °C. Nejstudenější místo vsázky je v jejím těžišti, tedy v bodě C. Zde byla vypočtena hodnota o 22°C nižší než v nejteplejším bodě. Celý průběh ohřevu vsázky v jednotlivých bodech je popsán v obr. 5.1. Dobře viditelné rozdíly teplot jsou patrné z obr. 5.2, který popisuje ohřev v čase od 1500 do 1800 sekund.



6. Výpočet ohřevu vsázky přímým odporovým ohřevem

Při přímém odporovém ohřevu je uvažována vsázka napájená zdrojem střídavého proudu. Pro výpočet byla zvolena metoda analytického výpočtu, kdy uživatel zadá rozměry vsázky, frekvenci, velikost proudu a materiálové vlastnosti. Pro možnost porovnání výsledků s indukčním ohřevem byly vždy zvoleny stejné rozměry a střední materiálové parametry. Při výpočtech je uvažován stejný součinitel tepelné vodivosti a stejná teplota prostředí. Při výpočtech bylo čerpáno z literatury [4].

Jako první je potřeba vypočítat geometrické parametry vsázky. Důležité pro budoucí výpočty jsou obsah průřezu, obsah pláště, objem a hmotnost vsázky.

Obsah průřezu lze zjistit ze vzorce:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (40)$$

Obsah válce se určí pomocí:

$$S = \pi \cdot d \cdot l \quad (41)$$

Objem lze určit z:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot l \quad (42)$$

A hmotnost vsázky lze vypočítat pomocí:

$$m = \rho_m \cdot V \quad (43)$$

Z hodnoty získané z (43) lze zjistit jaké teplo je třeba dodat vsázce, aby se její teplota zvýšila na požadovanou hodnotu.

$$Q_a = m \cdot c \cdot \Delta \mathcal{G} \quad (44)$$

Při uvažovaném přímém odporovém ohřevu vznikají tepelné ztráty, ztrátový výkon lze zjistit pomocí vzorce:

$$P_z = \alpha \cdot (\mathcal{G}_p - \mathcal{G}_o) \cdot S \quad (45)$$

Ze zadaných a výše vypočítaných hodnot lze určit střední rezistivitu materiálu a z ní dále střední hodnotu odporu vsázky.

$$\rho_{stř} = \rho_{20} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{\mathcal{G}}{2} - \mathcal{G}_0\right)\right) \quad (46)$$

$$R_{stř} = \rho_{stř} \cdot \frac{l}{S} \quad (47)$$

Nyní je znám střední odpor vsázky a proud dodávaný zdrojem. Budeme-li uvažovat proudový zdroj ideální, je možné určit celkový výkon dodávaný zdrojem do obvodu (48) a tedy i výkon využitý pouze k navýšení teploty vsázky (49).

$$P_C = R \cdot I^2 \quad (48)$$

$$P_a = P_C - P_Z \quad (49)$$

Z určeného tepla z (44) a výkonu z (49) lze zjistit celkovou dobu ohřevu, jinak řečeno dobu potřebnou pro dosažení požadované teploty.

$$t = \frac{Q_a}{P_a} \quad (50)$$

Nakonec lze určit ztrátové teplo z hodnot vypočtených v (45) a (50).

$$Q_Z = P_Z \cdot t \quad (51)$$

Při výpočtech pro tuto práci se vychází z hodnot dosažené teploty a ztrátového výkonu z výpočtu pro indukční ohřev. Byl vypočten ztrátový výkon $P_Z = 10060,2954$ a dosažená teplota $\vartheta = 842$ °C za dobu $t = 1800$ s. Pomocí těchto hodnot se zjistí, jak velký proud by bylo potřeba dodávat při přímém odporovém ohřevu, aby bylo dosaženo stejných Jouleových ztrát jako při ohřevu indukčním.

Nejprve jsou vypočteny hodnoty obsahu podstavy a pláště válcové vsázky pomocí vztahů (40) a (41).

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,025^2 = \underline{1,9635 \cdot 10^{-3} m^2}$$

Za použití vzorce (46) je vypočtena střední hodnota rezistivity, pomocí které se následně vypočte hodnota středního odporu vsázky za použití vztahu (47).

$$\rho_{stř} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\frac{\vartheta}{2} - \vartheta_0)) = 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot (1 + 0,0066 \cdot (\frac{782,347}{2} - 20))$$

$$\rho_{stř} = \underline{5,1729 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m}$$

$$R_{stř} = \rho_{stř} \cdot \frac{l}{S} = 5,1729 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{1,9635 \cdot 10^{-3}} = \underline{2,6345 \cdot 10^{-7} \Omega}$$

Nakonec hledaný proud lze zjistit za použití vztahu:

$$I = \sqrt{\frac{P_z}{R_s}} = \sqrt{\frac{10397,2164}{2,6345 \cdot 10^{-4}}} = \underline{\underline{6282,1231 \text{ A}}} \quad (52)$$

K dosažení stejných Jouleových ztrát jako při indukčním ohřevu je potřeba proud o velikosti 6282,1231 A. Porovnáním s proudem 800 A, který byl dodáván při indukčním ohřevu, je zjištěno, že pro náš případ je proud pro přímý odporový ohřev téměř osm krát větší.

7. Závěr

Indukční ohřev je dnes jeden z nejpoužívanějších způsobů ohřevu. Je tomu tak díky jeho vlastnostem. U tohoto ohřevu je možné dosáhnout vysokých měrných příkonů, tedy i velmi rychlého ohřevu a pomocí volby frekvence proudu induktoru ovlivnit jak rozložení tepla, tak i intenzitu víření vsázky, které zajišťuje vysoce ceněnou homogenitu ohřivaného materiálu. Tento ohřev je jednodušší na automatizaci a lze s ním dosáhnout přesné teploty i libovolného objemu taveniny. Indukční zařízení mají ale vyšší pořizovací náklady a větší spotřebu místa. Indukční pece se nevyplatí používat v případech kdy je potřeba čištění. U jiných typů ohřevu je možné v průběhu zpracování odstranit oxidační produkty, dusík i vodík. Indukčního ohřevu tuto možnost postrádá.

Odporový ohřev nabízí možnost ohřevu v řádech tisíců stupňů celsia. Největší nevýhodou odporového ohřevu je doba ohřevu. Zahřátí na pracovní teplotu a následné ohřátí materiálu na požadovanou teplotu je mnohem pomalejší než u indukčního ohřevu. Zařízení pro přímý odporový ohřev mají však nižší pořizovací náklady než zařízení pro indukční ohřev a proto jsou stále oblíbené u menších společnostech.

Z výpočtů z šesté kapitoly vyplývá, že princip přímého odporového ohřevu potřebuje pro dosažení stejného výkonu několikanásobně větší proud než princip indukčního ohřevu. Odporový ohřev je tedy energeticky náročnější, je potřeba zdroj, který je schopný dodávat tyto vysoké proudy. Přívodní vedení se průchodem vysokých proudů více zahřívá, vzrůstá odpor a tedy i výkonové ztráty.

Seznam obrázků

Obr. 1.7.1.1 Indukční kelímková pec

Obr. 1.7.2.1 Indukční kanálková pec

Obr. 5.1 Model pro výpočet indukčního ohřevu.

Obr. 5.2 zvětšený výřez zaměřený na vsázku a induktor

Obr. 5.2 Rozložení elektromagnetického pole

Obr. 5.3 Rozložení elektromagnetického pole

Obr. 5.4 Rozložení teplotního pole vsázky, zvětšený výřez horní poloviny vsázky se zobrazením vybraných bodů pro výpočet

Obr. 5.5 Graf teplotního průběhu při indukčním ohřevu

Obr. 5.6 Graf teplotního průběhu v posledních pěti minutách výpočtu pro vybrané body

Seznam tabulek

Tab. 1.3.1 Účinnost indukčního ohřevu válcového tělesa v závislosti na hodnotě poměru d/δ

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPEČNÝ, Jan. Fyzika pro bakaláře: Elektromagnetická indukce. Studijní opory s převážujícími distančními prvky pro předměty teoretického základu studia. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/3_08_Magneticka_indukce.pdf
- [2] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975, s. 185-303.
- [3] RAJMONT S.R.O. Indukční ohřev. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/>
- [4] RADA, Josef, a kol.. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985.
- [5] INDUCTOTHERM GROUP COMPANY. Co je indukční ohřev?. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: http://www.inductoheat.eu/fileadmin/pdf/Was_ist_Induktion/was_ist_Induktion-CZECH.pdf
- [6] OLYMPUS NDT. Eddy Current Array (ECA) Theory, Practice and Application. [online]. 2013, 11.6.2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8016>
- [7] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev. *Elektro* [online]. roč. 2002, č. 10 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110255.pdf>
- [8] ZÁDĚRA, Antonín. Metalurgie oceli [online prezentace]. VUT FSI, Ústav strojírenské technologie, [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/CME/prednaska%202.ppt>

- [9] Solbraze-Resistance-Soldering-Heating-and-Brazing-Technical-Information: Resistance heating. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.solbraze.com/wp-content/uploads/Solbraze-Resistance-Soldering-Heating-and-Brazing-Technical-Information.pdf>
- [10] HRADÍLEK, Z. a kol.: Elektrotepelná technika. Simulace – počítačové programy. Skripta VŠB-TU, Ostrava 2001, ISBN 80-7078-874-7
- [11] NOVAK P., KOLESAR J. Elektrotepelná technika. ALFA Bratislava 1990, ISBN 80-05-00426-5
- [12] ROT, David, Teorie elektromagnetického pole, prezentace Microsoft PowerPoint. [cit. 2014-04-27].
- [13] MAYER D., ULRYCH B. : Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí . Praha: SNTL, 1988.