

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Ohřevy magnetických a nemagnetických materiálů  
elektromagnetickou indukcí**



## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na základy indukčního ohřevu. Blíže uvádí výhody indukčního ohřevu s použitím v praxi. Zaměřuje se na vliv magnetických vlastností látek na indukční ohřev.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetické pole, elektromagnetická indukce, indukční ohřev, Curieova teplota, relativní permeabilita, Poyntingův vektor, indukční pec, studený kelímek, Maxwellovy rovnice

**Abstract**

The submitted work is focused on the theory of induction heating. It provides the advantages of induction heating using in practice. It focuses on the influence of magnetic properties of materials of induction heating.

**Key words**

Electromagnetic fields, electromagnetic induction, induction heating, Curie temperature, relative permeability, Poynting vector, induction furnace, cold crucible, Maxwell's equations

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala 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 4.6.2013

Iva Mlejová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavu Jiřincovi za cenné profesionální rady, připomínky, ochotu a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE</b> .....	<b>10</b>
1.1 MAXWELLOVY ROVNICE.....	10
1.1.1 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru.....	10
1.1.2 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru.....	10
1.2 ROVNICE ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ .....	11
1.2.1 Obecné elektromagnetické vlnění [1] .....	11
1.2.2 Harmonické elektromagnetické vlnění [1].....	12
<b>2 INDUKČNÍ OHŘEV</b> .....	<b>13</b>
2.1 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE .....	13
2.2 TEORIE VZNIKU TEPLA V OHŘÍVANÉ VSÁZCE .....	14
2.3 ROVINNÉ VLNĚNÍ [1,2] .....	14
2.4 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ [1,2] .....	17
2.4.1 Obecné rovnice válcového vlnění.....	17
2.4.2 Válcové elektromagnetické vlnění v prázdné dutině cívky .....	19
2.4.3 Válcové elektromagnetické vlnění v plně elektricky vodivé vsázce .....	20
2.5 POYNTINGŮV VEKTOR .....	23
<b>3 VÝHODY TAVENÍ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ</b> .....	<b>24</b>
3.1 TEPLO VZNIKLÉ VE VSÁZCE .....	24
3.2 INDUKČNÍ TAVÍCÍ ZAŘÍZENÍ .....	24
3.2.1 Indukční kelímková pec.....	24
3.2.2 Indukční kanálková pec.....	25
3.3 ELEKTRICKY NEVODIVÉ MATERIÁLY .....	26
3.3.1 Studený kelímek.....	26
3.3.2 Vitřifikace.....	28
<b>4 ELEKTICKÉ PARAMETRY</b> .....	<b>30</b>
4.1 HLOUBKA VNIKU NAINDUKOVANÝCH PROUDŮ DO ELEKTRICKY VODIVÉ VSÁZKY[1] .....	30
4.2 MĚRNÁ VODIVOST [1,15].....	30
4.3 FREKVENCE [2,16].....	30
4.4 PŘÍKON PRO OHŘEV V CELÉM PRŮŘEZU .....	31
4.5 ÚČINNOST INDUKČNÍHO OHŘEVU [16].....	32
<b>5 INDUKČNÍ OHŘEV MAGNETICKÉ A NEMAGNETICKÉ VSÁZKY</b> .....	<b>32</b>
5.1 MAGNETISMUS .....	32
5.2 CURIEOVA TEPLOTA .....	33
5.3 Vliv relativní permeability .....	33
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>35</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>36</b>

## Seznam symbolů a zkratek

značka	název	jednotka
$a$	hloubka vniku	[m]
$B$	magnetická indukce	[T]
$E$	intenzita elektrického pole	[V/m]
$f$	frekvence	[Hz]
$H$	intenzita magnetického pole	[A/m]
$I$	Proud	[A]
$J$	hustota proudu	[A/m <sup>2</sup> ]
$N$	Poyntingův vektor	[W/m <sup>2</sup> ]
$P$	výkon	[W]
$t$	čas	[s]
$v$	rychlost	[m/s]
$\gamma$	měrná elektrická vodivost	[S/m]
$\varepsilon$	permitivita $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$	[F/m]
$\varepsilon_r$	relativní permitivita	[-]
$\mu$	permeabilita $\mu = \mu_0 \mu_r$	[H/m]
$\mu_r$	relativní permeabilita	[-]
$\rho$	rezistivita	[ $\Omega$ m]
$\rho_v$	objemová hustota náboje	[C/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	magnetický tok	[Wb]
$\omega$	úhlová frekvence	[s <sup>-1</sup> ]
$\alpha_r$	teplotní součinitel elektrického odporu	[K <sup>-1</sup> ]

Permitivita vakua	$\varepsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m
Permeabilita vakua	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

Rozlišení charakteru veličin:

Skalární veličiny	<i>kurzíva</i>
Vektorové veličiny	<i>kurzíva tučně</i>
Fázory vektorových veličin	<b>tučně Arial</b>



## Úvod

Předkládaná práce se zabývá ohřevy elektromagnetickou indukcí. Indukční ohřev je v dnešní době velmi využíván, neboť nabízí možnost tavení v indukčních pecích velkého množství materiálu za vysokých teplot. Další výhodou je jeho snadná regulovatelnost. Indukčního ohřevu se využívá v mnoha oblastech průmyslu.

Práce obsahuje základní teorii elektromagnetického pole a popisující obecné vztahy. Následuje teorie indukčního ohřevu, kde se věnují vztahům a rovnicím, které popisují rovinné a válcové vlnění. Další část práce je zaměřena na výhody tavení indukčním ohřevem a kde je možno indukční ohřev využít. Dále se věnují elektrickým parametrům, které ovlivňují průběh ohřevu, a nakonec se zmiňují o vlivu magnetických vlastností na průběh jeho tavení.

# 1 Elektromagnetické pole

## 1.1 Maxwellovy rovnice

Teorie a rovnice elektromagnetického vlnění jsou odvozeny z Maxwellových rovnic (dále MR). Rovnice jsou využívány na popis pole v prostorové oblasti v integrálním tvaru. Ve tvaru diferenciálním k popisu pole v určitém bodě dané oblasti.

### 1.1.1 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (1.1)$$

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1.2)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (1.3)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.4)$$

### 1.1.2 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = \rho_v \quad (1.7)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (1.8)$$

## 1.2 Rovnice elektromagnetického vlnění

### 1.2.1 Obecné elektromagnetické vlnění [1]

Pro odvození rovnic šíření vlnění je použit diferenciální tvar MR.

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \gamma\mathbf{E} + \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.9)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.10)$$

$$\operatorname{div}\varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E} = \rho_v \quad (1.11)$$

$$\operatorname{div}\mu_0\mu_r\mathbf{H} = 0 \quad (1.12)$$

S využitím dalších vlastností a vztahů se dospěje k obecným rovnicím elektromagnetického vlnění.

$$\nabla^2\mathbf{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (1.13)$$

$$\nabla^2\mathbf{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1.14)$$

Elektromagnetické vlnění se dále liší podle toho, zda je prostředí elektricky vodivé či elektricky nevodivé.

Pro elektricky nevodivé prostředí je  $\gamma = 0$  a pak platí:

$$\nabla^2\mathbf{H} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.15)$$

$$\nabla^2\mathbf{E} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.16)$$

Pro elektricky vodivé prostředí je  $\gamma \neq 0$  a platí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.17)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.18)$$

### 1.2.2 Harmonické elektromagnetické vlnění [1]

V našem případě, protože jsou uvažovány harmonicky proměnné veličiny, použije se vyjádření ve tvaru fázorů. Dosazením do rovnice (1.13) ve tvaru  $\mathbf{E} = \mathbf{E} \cdot e^{j\omega t}$ , se získá rovnice:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E} - j\omega \mu \gamma \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} + (\omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \gamma) \mathbf{E} = 0 \quad (1.19)$$

Výraz  $(\omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \gamma)$  je součinitel  $k^2$ , kde  $k$  představuje konstantu šíření elektromagnetické vlnění šířící se v daném prostředí.

$$k^2 = -j\omega \mu (\gamma + j\omega \epsilon) = \alpha - j\beta \quad (1.20)$$

	$\gamma=0$	$\gamma \neq 0$
$\alpha$	$\frac{\omega}{v} = k$	$\frac{1}{a}$
$\beta$	0	$\frac{1}{a}$
$k^2$	$\left(\frac{\omega}{v}\right)^2$	$-2 \frac{j}{a^2}$

Tab. 1: Hodnoty součinitele  $k$

Výsledné rovnice pro  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{E}$  po úpravě jsou

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1.21)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.22)$$

Zde se také rozlišuje rovnice pro elektricky nevodivá a vodivá prostředí.

Elektricky nevodivá prostředí

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} \quad (1.23)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.24)$$

Elektricky vodivá prostředí

$$\nabla^2 \mathbf{H} = j\omega\gamma\mu\mathbf{H} \quad (1.25)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = j\omega\gamma\mu\mathbf{E} \quad (1.26)$$

## 2 Indukční ohřev

### 2.1 Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je jev, kdy se v elektrickém obvodu změnou magnetického toku indukují napětí a v uzavřeném obvodu začne procházet indukovaný proud. Tento jev může nastat v nestacionárním poli, které můžeme získat různými způsoby: vodičem, kterým protéká časově proměnný proud, nebo vodičem s proudem, ale pohybujícím se, či pohybujícím magnetem. Tedy například pohybujícím magnetem v blízkosti cívky pomocí voltmetru změříme elektromotorické napětí. [1]

Pro výpočet hodnoty indukovaného napětí je třeba znát vztah pro magnetický tok  $\phi$ ,  
$$\phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

kde  $B$  je magnetická indukce,  $S$  plocha, kterou tok prochází a úhel  $\alpha$ , který svírá vektor magnetické indukce s normálovým vektorem plochy.

Hodnota indukovaného napětí je  $U_i = -\frac{d\phi}{dt}$ .

## 2.2 Teorie vzniku tepla v ohřivané vsázce

Vsázka neboli ohřivaný předmět, který je vložen do proměnného pole induktoru, je působením elektromagnetického vlnění zahříván. Průchodem střídavého proudu se ve vsázce indukují vířivé proudy a tím se vsázka zahřívá. Pro názornost je přirovnáván indukční ohřev k transformátoru. Cívka je nyní braná jako primární vinutí a vsázka jako sekundární vinutí zapojené nakrátko. Toto je možné pouze u elektricky vodivých materiálů.

Při dopadu elektromagnetického vlnění na vodivou stěnu se část vlnění odrazí a část proniká do stěny. Vlnění se postupně ve stěně utlumí a jeho energie předaná atomům uvnitř vsázky se přemění na tepelnou energii. [1]

## 2.3 Rovinné vlnění [1,2]

Je uvažováno vlnění vyjádřené v pravouhlých souřadnicích

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

V rovinném vlnění je bráno řešení jen v jednom směru, tedy ve směru osy x, tím lze dva členy brát jako nulové a uvažovat tím rovinné vlnění. Dosazením do rovnic (1.23-26) se získá:

Pro elektricky nevodivé prostředí

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} = -\omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = -\omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.3)$$

Pro elektricky vodivé prostředí

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} = j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = j\omega\mu\mathbf{E} \quad (2.5)$$

Vyjádření  $\mathbf{H}$  v **nevodivém** prostředí je řešením rovnic (1.21-22).

Z tabulky pro součinitel  $k$  lze zjistit, že v nevodivém prostředí je roven  $k = a$ . Řešením rovnice je podle řešení lineární diferenciální rovnice 2. řádu s konstantními součiniteli, s tím, že počátek souřadnice je v odrážející rovině.

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}_1 e^{-j\alpha x} + \mathbf{A}_2 e^{j\alpha x} \quad (2.6)$$

kde výraz s  $\mathbf{A}_1$  vyjadřuje vlnu postupnou, výraz s  $\mathbf{A}_2$  vyjadřuje vlnu odraženou.

Nyní je potřeba ještě zjistit složku elektrickou  $\mathbf{E}$ , musí se respektovat vazba  $\mathbf{E}$  na  $\mathbf{H}$ , neboť nikdy neexistují samostatně, proto je vyjádřena z 1. Maxwellovy rovnice.

$$\mathbf{E} = \text{rot}\mathbf{H} \frac{1}{j\omega\epsilon}, \quad (2.7)$$

kde výraz  $\text{rot}\mathbf{H}$  představuje práci, kterou konají jednotky magnetického množství po obvodu elementární plochy dělenou elementární plochou

$$\text{rot}\mathbf{H} = \frac{H\Delta z - \left(H + \frac{\partial H}{\partial x} dx\right)\Delta z}{dx\Delta z} = -\frac{\partial H}{\partial x} \quad (2.8)$$

Vyřešením derivace rovnice (2.6) dle rovnice (2.8) a dosazením do (2.7) je

$$\mathbf{E} = 120\pi \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} (\mathbf{A}_1 e^{-j\alpha x} - \mathbf{A}_2 e^{j\alpha x}) \quad (2.9)$$

Integrační konstanty  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ , se určí z mezních podmínek v jednotlivých případech.

Vyjádření  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{E}$  ve **vodivém** prostředí. Jiný tvar řešení rovnic (1.21-22) je

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}e^{\lambda_2 x} + \mathbf{B}e^{\lambda_1 x} \quad (2.10)$$

kde  $\lambda^2 = j\omega\gamma\mu$ . Dosazením výrazu  $\sqrt{j} = \frac{1+j}{\sqrt{2}}$  je

$$\lambda_{1,2} = \pm(1+j)\sqrt{\frac{\omega\gamma\mu}{2}} = \pm\frac{1+j}{a} \quad (2.11)$$

Výraz  $a$  je hloubka vniku a výsledná rovnice je

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}e^{-\left(\frac{1+j}{a}\right)x} + \mathbf{B}e^{\left(\frac{1+j}{a}\right)x} \quad (2.12)$$

pro zjednodušení je výraz položen rovný  $p = \frac{1+j}{a}$ .

Výraz s  $\mathbf{A}$  opět představuje postupnou vlnu, výraz  $\mathbf{B}$  naopak vlnu odraženou.

Nyní je  $\mathbf{E} = \frac{1}{\gamma} \text{rot}\mathbf{H}$ . Z toho lze vyjádřit intenzitu  $\mathbf{E}$  derivací rovnice (2.12)

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} = -p\mathbf{A}e^{-px} + p\mathbf{B}e^{px} = -\gamma\mathbf{E} \quad (2.13)$$

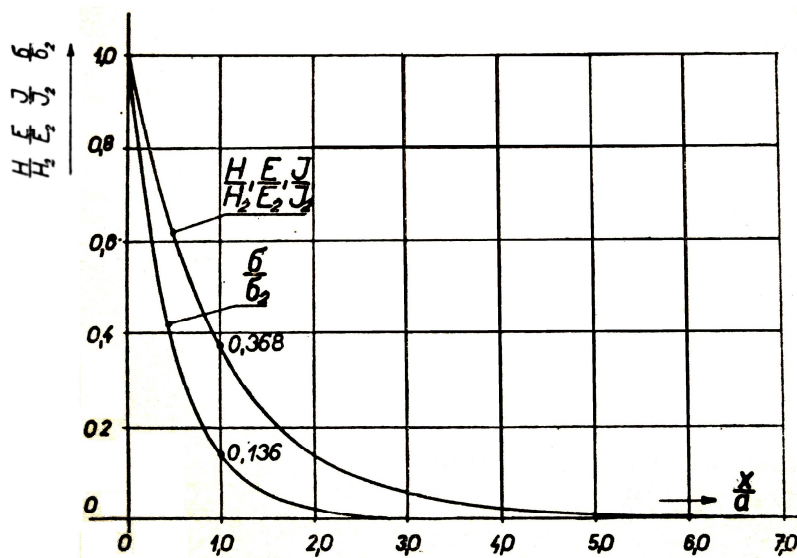
$$\mathbf{E} = \frac{p}{\gamma} (\mathbf{A}e^{-px} - \mathbf{B}e^{px}) \quad (2.14)$$

Pokud je tloušťka stěny, ve které se tlumí postupující vlnění, velká, vlnění se utlumí ještě před tím, než narazí na zadní stěnu a odražená vlna je nulová. V takovém případě se jedná o



stěnu tzv. velké tloušťky. V jiném případě, kdy se šířka stěny malá, se mluví o stěně malé tloušťky.

Diagram rovinného vlnění:



Obr. 1: Obecný diagram poměrů  $H/H_2$ ,  $E/E_2=J/J_2$  ve stěně velké tloušťky v závislosti na poměru  $x/a$   
Převzato z [2]

## 2.4 Válcové elektromagnetické vlnění [1,2]

Většina předmětů, které se indukčně ohřívají, jsou válcového tvaru. Za zdroj je uvažována válcová plocha o poloměru  $r_1$  nekonečné délky, protékána střídavých proudem. [2]

### 2.4.1 Obecné rovnice válcového vlnění

Vychází se z obecných fázorových rovnic (1.21) a (1.22), které jsou odvozeny již v předešlé části. Ve válcovém vlnění se používají válcové souřadnice. Proto Laplaceův operátor se převede též do této soustavy souřadnic. Musí být splněna podmínka, že uvažovaný vektor bude ve směru osy  $z$ .

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \quad (2.15)$$

U vlnění se intenzita mění pouze se souřadnicí  $r$ , nezávisí na souřadnicích  $\varphi$  a  $z$ . Proto derivace s těmito souřadnicemi jsou nulové. Získá se tento výraz

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (2.16)$$

Do výrazů (1.21) a (1.22) se dosadí za  $\nabla^2 \mathbf{H}$  a bude platit:

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{H}}{dr} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.17)$$

Dělením konstantou šíření  $k^2$  se dostane Besselova diferenciální rovnice nultého řádu pro argument  $(kr)$ :

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{d(kr)^2} + \frac{1}{(kr)} \frac{d\mathbf{H}}{d(kr)} + \mathbf{H} = 0 \quad (2.18)$$

Řešením je lineární kombinace cylindrických funkcí, kde  $\mathbf{C}_1$  a  $\mathbf{C}_2$  jsou integrační konstanty a  $J_0(kr)$ ,  $N_0(kr)$  jsou cylindrické funkce nultého řádu prvního a druhého druhu.

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_1 J_0(kr) + \mathbf{C}_2 N_0(kr) \quad (2.19)$$

Podle 1. Maxwellové rovnice (1.9) lze odvodit výraz pro intenzitu elektrického pole:

$$\mathbf{E} = \frac{k}{\gamma + j\omega\epsilon} [\mathbf{C}_1 J_1(kr) + \mathbf{C}_2 N_1(kr)] \quad (2.20)$$

### 2.4.2 Válcové elektromagnetické vlnění v prázdné dutině cívky

Konstanta šíření je již odvozena. Pro prázdnou dutinu cívky, kde je vodivost  $\gamma = 0$ , je

$$k = \alpha = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Z obecné rovnice (2.17), dosazením za  $k = \alpha$ , je

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{H}}{dr} + \alpha^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.21)$$

Vydělením rovnice (2.21) výrazem  $\alpha^2$  se dostane Besselova diferenciální rovnice nultého řádu pro reálný argument ( $\alpha r$ ),

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{d(\alpha r)^2} + \frac{1}{\alpha r} \frac{d\mathbf{H}}{d(\alpha r)} + \mathbf{H} = 0 \quad (2.22)$$

jejímž řešením je

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_1 J_0(\alpha r) + \mathbf{C}_2 N_0(\alpha r) \quad (2.23)$$

Pro intenzitu elektrického pole dle vztahů daných 1. Maxwellovou rovnicí (1.9), se pro  $\mathbf{E}$  získá tento výraz:

$$\mathbf{E} = \frac{\alpha}{j\omega\epsilon} [\mathbf{C}_1 J_1(\alpha r) + \mathbf{C}_2 N_1(\alpha r)] \quad (2.24)$$

Nyní se určí integrační konstanty z mezních podmínek:

Ve ose cívky je proudová hustota nulová a intenzita elektrického pole také. Pro  $r = 0$  je  $E_0 = 0$ . Protože  $J_1(0) = 0$ ,  $N_1(0) = -\infty$  je integrační konstanta  $\mathbf{C}_2 = 0$ .

Na poloměru  $r_l$  je  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_l = N_{11} I_l = \mathbf{C}_1 J_0(\alpha r_l)$ , konstanta  $\mathbf{C}_1$  je tedy

$$\mathbf{C}_1 = \frac{\mathbf{H}_1}{J_0(\alpha r_1)} \quad (2.25)$$

Po dosazení integračních konstant a výrazu  $\frac{\alpha}{\omega \epsilon} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\left(\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}\right)} = 120\pi \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$  do (2.23)

a (2.24) jsou výrazy pro  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{E}$  v prázdné dutině:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_p = \mathbf{C}_1 J_0(\alpha r) = \mathbf{H}_1 \frac{J_0(\alpha r)}{J_0(\alpha r_1)} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p = -j120\pi \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \mathbf{H}_1 \frac{J_1(\alpha r)}{J_0(\alpha r_1)} \quad (2.27)$$

Z důvodu, že v praktických případech jsou rozměry cívky velmi malé oproti vlnové délce, je argument  $(\alpha r) = 0$ . Z čehož vychází, že v celé dutině je  $H = H_1 \frac{J_0(0)}{J_0(0)} = H_1$ . [2]

### 2.4.3 Válcové elektromagnetické vlnění v plně elektricky vodivé vsázce

Ve vodivém prostředí podle výrazu (1.20) je konstanta šíření nyní

$$k = \frac{1-j}{a} \quad (2.28)$$

Při odvozování se využije rovnice z obecného elektromagnetického vlnění (2.19) a (2.20). Získaly se tyto rovnice

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_1 J_0(kr) + \mathbf{C}_2 N_0(kr) \quad (2.29)$$

$$\mathbf{E} = \frac{k}{\gamma} [\mathbf{C}_1 J_1(kr) + \mathbf{C}_2 N_1(kr)] \quad (2.30)$$

Argument  $(kr)$  je

$$(kr) = \frac{1-j}{a} r = \frac{1-j}{\sqrt{2}} \frac{r\sqrt{2}}{a} = \sqrt{(-j)x} \quad (2.31)$$

kde  $x = \frac{r}{a} \sqrt{2}$ .

Cylindrické funkce  $J_0(kr)$  a  $J_1(kr)$  komplexního argumentu  $(kr) = (x\sqrt{-j})$  jsou místo reálného argumentu  $x$  definovány jako řady ve kterých se střídají členy reálné a imaginární. Součet reálných členů se označuje *ber*  $x$  a imaginárních členů *bei*  $x$ .

Nyní se určí integrační konstanty z mezních podmínek:

Pro  $r = 0$  je intenzita  $E_0 = 0$ . Dosazením se získá konstanta  $\mathbf{C}_2 = 0$ .

V mezeře mezi cívkou a vsázkou je homogenní pole o intenzitě  $\mathbf{H}_1$ , na poloměru  $r_2$  je  $\mathbf{H}$  rovna též  $\mathbf{H}_1$ . Obdobně jako u výrazu (2.25) se dostane

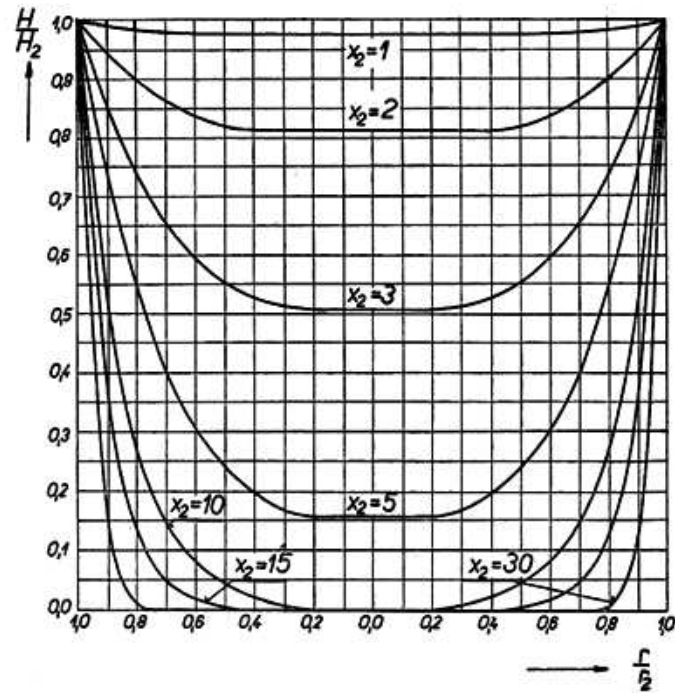
$$\mathbf{C}_1 = \frac{\mathbf{H}_2}{J_0(kr_2)} \quad (2.32)$$

Po dosazení konstant se získají rovnice

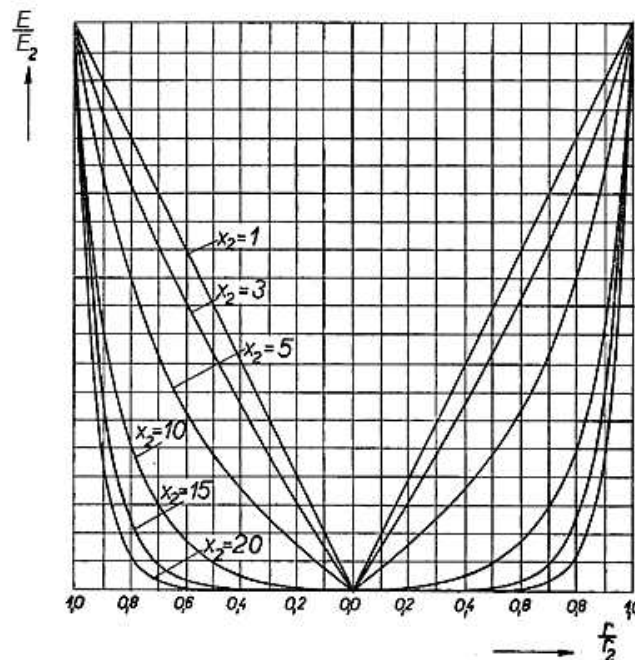
$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_2 \frac{J_0(x\sqrt{-j})}{J_0(x_2\sqrt{-j})} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{E} = \frac{k}{\gamma} \mathbf{H}_2 \frac{J_1(x\sqrt{-j})}{J_0(x_2\sqrt{-j})} \quad (2.34)$$

Diagram rozložení intenzity:



Obr. 2 Rozložení intenzity magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti na argumentu  $x_2$ .  
Převzato z [2,3]



Obr. 3 Rozložení intenzity elektrického pole ve válcové vsázce v závislosti na argumentu  $x_2$ .  
Převzato z [2,3]

Z diagramu je patrné, že pro malé hodnoty parametru  $x_2 = \frac{r_2}{a} \sqrt{2}$  se intenzita  $\mathbf{H}$  skoro nemění a také ubývá hustoty proudu téměř lineárně. Vsázka je pro malý parametr průzařná, protože je poloměr vsázky menší než hloubka vniku. Jen část energie se přemění na teplo. Je požadováno, aby se co nejvíce energie přeměnilo na teplo. U tavicích pecí je hloubka vniku menší než poloměr vsázky, proto je argument poměrně velký.

## 2.5 Poyntingův vektor

Využívá se pro výpočet indukčního ohřevu, přídatných ztrát a též představuje elektromagnetický výkon, který vystupuje z objemu přes jeho povrch do okolního prostředí. Vyjadřuje hustotu toku v daném bodu pole. Velikost se rovná elektromagnetické energii, která prochází za 1s jednotkovou plochou jejíž normála má směr vektorového součinu intenzity elektrického a intenzity magnetické pole. [1]

$$S = [EH] \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.35)$$

$$P = \int_S N \cdot dS \quad (2.36)$$

### 3 Výhody tavení elektromagnetickou indukcí

Tavení elektromagnetickou indukcí má řadu výhod.

#### 3.1 Teplo vzniklé ve vsázce

Výhodou tavení elektromagnetickou indukcí je jeho účinnost, neboť teplo vzniká přímo ve vsázce. V elektricky vodivé vsázce se indukují vířivé proudy, které doprovází Jouleovy ztráty, díky kterým vzniká teplo a vsázka je ohřívána.

Rovnoměrné prohřátí taveniny nastává, stejně jako její homogenizace, vlivem působení elektrodynamických sil na roztavenou vsázku. [4]

Induktor je protékán harmonicky proměnným proudem, budí časově proměnné magnetické pole. Vektory magnetického pole  $\mathbf{B}$  jsou orientovány ve směru osy kelímku a obvodové vířivé proudy ve vsázce o hustotě  $\mathbf{J}$  mají opačný směr než budící proud v induktoru. Spolupůsobením magnetického pole a vířivých proudů se vyvolají síly, které působí na částice taveného kovu a směřují k ose kelímku a udělují částicím rychlost  $\mathbf{v}$ . [4]

Vlivem elektrodynamických sil vzniká silné víření, vlivem tlaku je u stěny podtlak a v ose přetlak. Vlivem hydrostatických sil tavenina vtéká ke stěně a vzdouvá se ke středu. [2]

#### 3.2 Indukční tavící zařízení

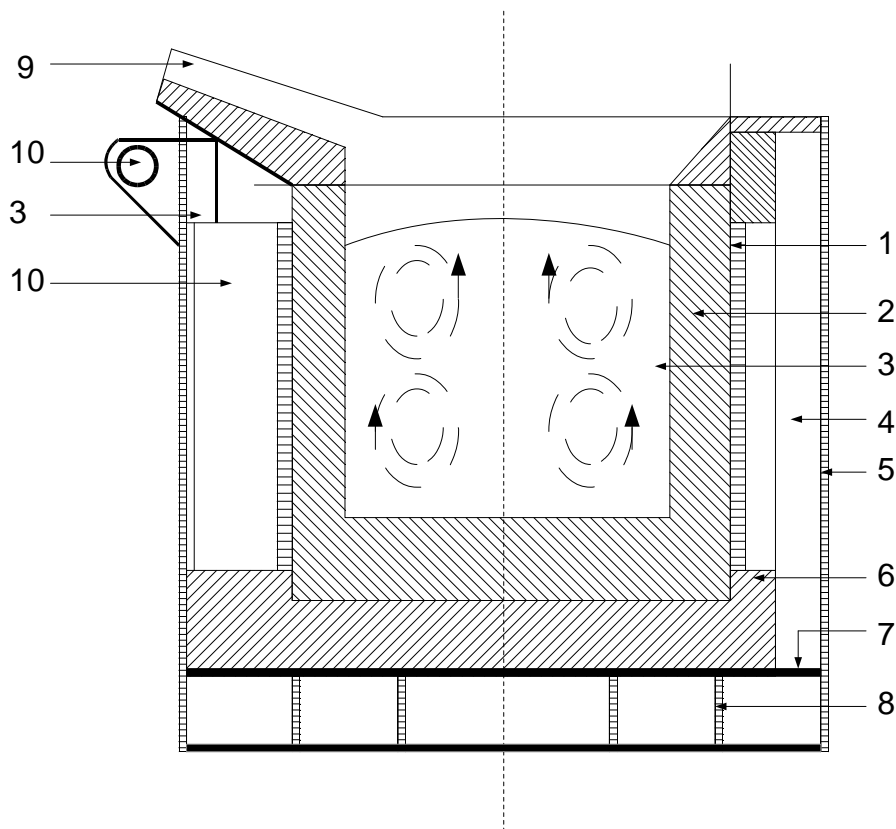
##### 3.2.1 Indukční kelímková pec

Používají se k tavení různých druhů kovů a především se v nich vyrábí oceli vysoké kvality. Pece se napájejí střední frekvencí 500 Hz - 4 kHz, nebo frekvencí 50 Hz a 150 Hz. [2] U frekvence 50 Hz je maximální měrný výkon omezen přibližně na 300 kW na tunu taveniny. [5] Při vyšších hodnotách výkonu by bylo vzduť taveniny v kelímku  $h$  příliš velké, protože závisí přímo úměrně na příkonu ( $P_1$ ), a nepřímo úměrně na odmocnině kmitočtu, což vidíme z výrazu (3.1)

$$h = K \frac{P_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}} \quad (3.1)$$



Schéma indukční kelímkové pece vidíme na *obr. 4*.

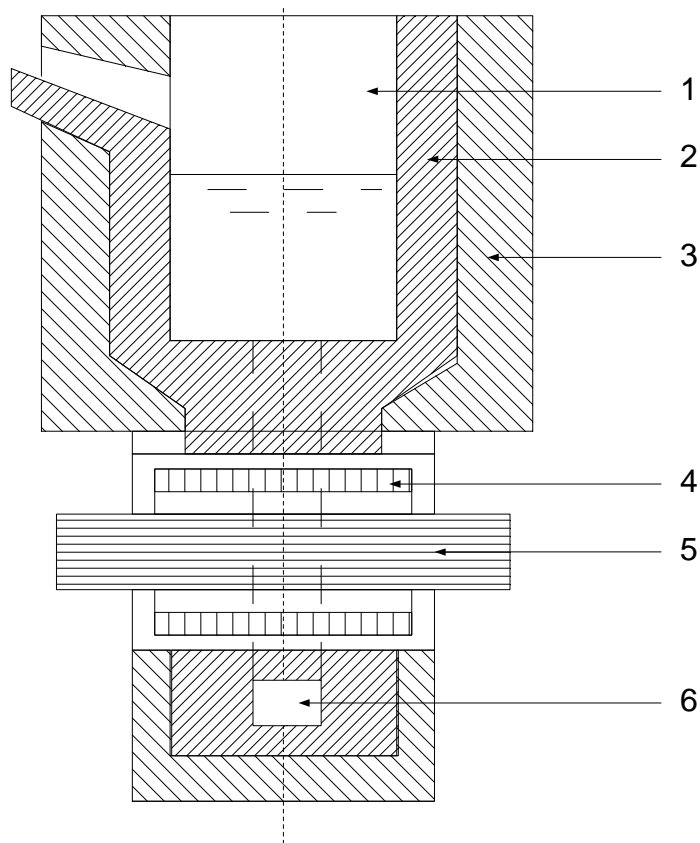


*Obr. 4: Konstrukce kelímkové: 1 kruhová ohřívací cívka, 2 kelímek, 3 tavenina, 4 svazky elektrotechnických plechů, 5 ocelový plášť pece, 6 cihlová keramická vyzdívka, 7 stínící měděný plech, 8 mřížové dno pece, 9 hubice pro odlévání, 10 osa, kolem které se pec otáčí při vyklápění, 11 středící trámce ze žarobetonu*  
Převzato z [2,3]

### 3.2.2 Indukční kanálková pec

Pece se používají hlavně pro tavení barevných kovů a zušlechťování slitiny železa a uhlíku, tzv. šedé litiny. V kanálku víří roztavený kov, kolem kterého vzniká elektromagnetické pole vybuzevané proudem kanálku. Pole způsobuje vytlačování kovu od stěn k ose kanálku. Tím se do kanálku dostává kov nový a promíchává se. [2]

Do těchto pecí se musí nalít již roztavený kov, nebo se taví se „zbytkem“ taveniny, aby kanálek zaplněný taveninou a zbytek taveniny v tavícím prostoru tvořily závit nakrátko, což je jejich velká nevýhoda, musí se udržovat na pracovní teplotě a to zhoršuje jejich jinak vyšší účinnost.[2]



Obr. 5: Konstrukce kanálkové pece: 1-tavící prostor, 2-ohnivzdorná vyzdívka, 3- izolace, 4-primární cívka, 5-jádro transformátoru, 6-kanálek  
Převzato z [2,3]

### 3.3 Elektricky nevodivé materiály

U elektricky nevodivých materiálů je důležitá závislost elektrického odporu na teplotě, protože tím se mění hloubka vniku. Jak je známo, tak u elektricky nevodivých materiálu elektrický odpor klesá se vzrůstající teplotou. A to až o několik řádů.

Uvedme si příklad u oxidu hlinitého. Oxid v pevném skupenství má hloubku vniku 92 cm a jako tavenina pouhých 2,9 cm. [6]

#### 3.3.1 Studený kelímek

Studený kelímek je malá indukční pícka o rozměrech několik centimetrů. V kelímku lze tavit materiály až do teplot 3000 °C. Teplo stejně jako v indukčních pecích vzniká přímo ve vsázce. Okolí kelímku je studené, pouze vsázka má vysokou teplotou. [7]

### 3.3.1.1 Konstrukce studeného kelímku

Výhoda studeného kelímku spočívá v možnosti tavení teplotou až 3000 °C a také splňuje požadavek na vysokou čistotu a homogenitu materiálu. V klasických pecích není možno takto vysokou teplotou tavit, neboť dochází k brzkému opotřebení a protavení kelímku. Vysoká čistota je díky absenci keramického kelímku, protože tavení probíhá ve vlastním materiálu a tedy nedochází ke kontaminaci materiálů. [8] Na rozhraní roztaveného materiálu a kelímku se vlivem intenzivního ochlazování vytvoří slabá tuhá vrstva z taveného materiálu a tak nedojde ke styku s materiálem kelímku a k jeho znečištění. Je tedy možné připravovat vysoce čisté homogenní slitiny.

Konstrukce kelímku je z měděných segmentů chlazených vodou. Stěny kelímku jsou rozděleny na segmenty z důvodu přenosu toku do vsázky. Kolem segmentů je navinut induktor. Poyntingův vektor jako vektorový součin intenzity elektrického a magnetického pole směřuje do osy vsázky mezerami mezi segmenty. Plocha segmentů je menší než stěna klasického kelímku a tím je možnost uzavírání vířivých proudů a následných ztrát těmito proudy menší. [6]

Problém nastává při tavení kovů, protože mezi vnitřním povrchem kelímku a taveninou vzniká elektrický kontakt. Magnetické pole procházející mezi mezerami vytvoří proud protékající segmenty a mezerami. [6] Účinnost lze zvýšit izolační vrstvou oxidu hlinitého či oxidu zirkoničitého a tím se proud bude uzavírat již jen taveninou. [3]

Naproti tomu tavení nevodivých materiálů a oxidů má účinnost přenosu tepla do vsázky vysokou, přibližně nad 90 %, neboť magnetické pole má stejnou intenzitu ve všech bodech. Technologie tavení ve studeném kelímku se tedy mimo jiné využívá jako technologie pro vitifikaci vysoce radioaktivního odpadu. [6]

Tavení probíhá v ochranné atmosféře či vakuu a tak je možnost pracovat i se škodlivými plyny a bez zvýšení objemu kyslíku. [4] Toho lze využít například při tavení jak čistého titanu, tak i jeho slitin, protože titan výrazně ochotně reaguje s kyslíkem, vodíkem a dusíkem a látkami tvořícími formovací hmotu. To vede k destrukci struktury. [10]

### 3.3.2 Vitrifikace

Už jsem se zmiňovala, že jednou z aplikací studeného kelímku je i možnost zpracování radioaktivního odpadu do skelných tabulí, které se následně ukládají do skladu odpadu.

#### 3.3.2.1 Sklo a jeho vlastnosti

Sklo je amorfní tuhá látka, která vzniká roztavením viskózní skloviny za vysokých teplot. Materiál se následně rychle zchladí a tak hmota nestihne zkrystalizovat a získáme nekystalickou strukturu. Sklo je poměrně pevný materiál s dobrou odolností proti opotřebení, biologicky neaktivní a inertní. Samotné sklo je v podstatě křehký materiál, ale je možno tuto vlastnost měnit přidáním jiných sloučenin a jiným tepelným zpracováním. Základní složkou je především oxid křemičitý, který se vyskytuje v křemenu či křemičitém písku. Protože teplota tání křemene je 2000 °C jsou do směsi přidávány materiály, které teplotu sníží až na 1000 °C. [11] [12]

Vitrifikace jako způsob zpracování radioaktivních látek byla také zvolena z důvodu malé vylouhovatelnosti skla. Z důvodu možnosti zatopení úložných dolů s odpadem je právě ta výhoda, že sklo je proti vodě odolné. [13] Protože se do skla přidávají alkálie na snížení teploty tání a tyto látky odolnost vůči vodě snižují, přidává se jako další látka oxid vápenatý, který tuto odolnost zase zvyšuje. [12]

Pro proces vitrifikace se používají nejvíce skla borosilikátová (základní dvě složky jsou oxid křemičitý a oxid boritý). Obsah oxidu křemičitého je přibližně 40-50 %. Jako další materiály se používají skla fosfátová a keramická. Každý druh skla má jinou teplotou tání a měknutí. [13]

Vodivost skla je způsobena příměsí iontů. Nejvíce ji snižuje oxid vápenatý a naopak zvyšuje oxid sodný. Jak je známo, skla čistá jsou výborným izolantem, neboť mají velký elektrický odpor. [13]

### 3.3.2.2 Indukční ohřev

Tento způsob vitrifikace byl vyvinut ve Francii v v Marcoule 1978 a dnes je druhým nejpoužívanějším způsobem vitrifikace. [11] Dodnes nejpoužívanější je dvoustupňový francouzský postup. Proces spočívá ve dvou fázích.

Některé vlastnosti skla mají dopad na indukční ohřev. Mezi tyto vlastnosti patří špatná elektrická vodivost v pevném skupenství. Naopak, při vysokých teplotách v kapalném stavu je sklo lepším elektrickým vodičem. Důvodem je struktura skla, kde proud prochází vzhledem k pohyblivosti iontů. Zvýšená teplota má za následek rozpad struktury a ionty jsou stále více schopny nést elektrický náboj. V první fázi je využíváno odporového přímého ohřevu. Používané elektrody musí být odolné proti korozi, dostatečně mechanicky pevné i při vysokých teplotách a mít malý odpor. V průmyslu se obecně používají elektrody grafitu a molybdenu. Koncentrace energie kolem elektrod způsobí lokální ohřev, což vede k pohybu skla směrem nahoru. [11]

Kalcinační systém převádí kapalný odpad do tuhé formy. [14] Teplota v kalcinátoru se pohybuje okolo 400°C a používá se rotační odporová pec. [13]

Ve druhé fázi se kalcinát společně se skelnou hmotou vkládá do indukční pece, kde materiál zeskelnatí. [14] Teplota dosahuje 1150 °C. Z kalcinátoru vede vývod do tzv. pračky plynů, které unikají při zpracování, kde probíhá horká vypírka plynů. Poté se opět vrací do kalcinátoru. [13] Oddělení funkce spočívá ve zjednodušení zařízení, kovové tavící zařízení je malé a energie elektromagnetického vlnění je použita na roztavení materiálu. Kdyby to bylo spojené, tak celých 60 % energie by se spotřebovalo na odpaření vody. [14] Největší nevýhodou je malá životnost kovové nádoby, neboť koroduje materiál působením agresivních látek a teploty. Životnost je uváděna cca 5000 hodin provozu. [13]

Jako druhá možnost využití indukčního ohřevu pro vitrifikaci je studený kelímek.

Jedním z hlavních a prvotních důvodů, proč používat studený kelímek pro zpracování radioaktivního odpadu byla možnost vitrifikovat odpad z přepracovaného paliva, které pochází z reaktoru chlazeného plynem. U stávajících indukčních zařízení to nebylo možné z důvodu koroze při vysokých teplotách. Bylo nutné dosáhnout teplot až 1300 °C. [13]

Naopak nevýhody studeného kelímku jsou v komplikovaném startu, nesnadném udržování stálé teploty kolem 1200 °C a vyšších investičních nákladech. [13]

## 4 Elektické parametry

### 4.1 Hloubka vniku naindukovaných proudů do elektricky vodivé vsázky[1]

Hloubka vniku je dána výrazem  $a = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_r\mu_0}}$ . Lze ji v jednotlivých případech

indukčního ohřevu jednoduše vypočítat, tím lze získat představu o rozložení tepla v prohřivaném předmětu. Pokud se hloubka vniku zanesse do grafu v závislosti na kmitočtu a zvolí se obě stupnice logaritmické, je jejich vztah lineární. Předpokládá se, že vodivost a relativní permeabilita jsou konstantní po celé tloušťce stěny, jenomže reálně jsou tyto veličiny závislé na teplotě, relativní permeabilita navíc na intenzitě magnetického pole.

### 4.2 Měrná vodivost [1,15]

Hodnota měrného odporu v závislosti na teplotě je velmi výrazná. Závislost je vyjádřena vztahem  $\rho = \rho_0(1 + \alpha_t \Delta t)$ , kde  $\rho_0$  je počáteční rezistivita,  $\alpha$  teplotní součinitel elektrického odporu a  $\Delta t$  rozdíl teplot.

### 4.3 Frekvence [2,16]

Od povrchu vsázky do vzdálenosti  $a = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_r\mu_0}}$  je vyvinuto přibližně 86 % celkového tepla. Proto volbou frekvence lze řídit hloubku vniku.

Pokud se použije příliš vysoká frekvence, ohřeje se pouze tenká vrstva na povrchu a vnitřní část se ohřeje vedením tepla. Naopak když je použita velmi nízká frekvence, nastane jev elektromagnetické průzařnosti vsázky. Jestliže se vlna stěnou neutlumí, tak se jednotlivé složky vzájemně ovlivňují a výsledná intenzita je velmi malá.

U plochých vsázek má ohřev dobrou účinnost, pokud je poměr  $d/a > 2$ . Pro nižší hodnoty je vsázka již průzařná. Pro válcové vsázky je třeba  $x_2 > 3$ . Nejnižší frekvence pro plochou vsázku je dle vztahu pro hloubku vniku

$$a = \frac{d}{2} = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}} \quad (4.1)$$

$$f_{\min} = \frac{4}{\pi d^2 \gamma \mu} = \frac{10^6}{d^2 \gamma \mu_r} \quad (4.2)$$

Nejnižší frekvence pro válcovou vsázku

$$r_2 = \frac{3a}{\sqrt{2}} = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}} \quad (4.3)$$

$$f_{\min} = \frac{9}{2\pi r_2^2 \gamma \mu} = \frac{10^6}{r_2^2 \gamma \mu_r} \quad (4.4)$$

Například pro ocelový válec o průměru 30 mm s parametry:  $r_2 = 0,015$  m,  $\gamma = 10^6$  S/m,  $\mu_r = 1$  bude minimální frekvence:  $f_{\min} = \frac{10^6}{0,015^2 \cdot 10^6 \cdot 1} = 4444$  Hz. Stejná frekvence bude i u stěny tloušťky  $d = r_2$ .

#### 4.4 Příkon pro ohřev v celém průřezu

Průměrné teplo na ohřátí v 1 kg oceli z 20 °C na 1200 °C je 0,22 kWh. Účinnost je přibližně 65 %, takže je třeba dodat 0,338 kWh. Proto na ohřátí daného množství materiálu  $m$  (kg) s určitou rezervou musíme dimenzovat středofrekvenční měniče frekvence a volí se  $P = m(0,35 \text{ až } 0,45)$  kW. Jestliže v ohřevech vznikají přestávky je potřebný příkon ze sítě 50 Hz s dalšími ztrátami v měničích, transformátorech apod.  $P = m \cdot 0,45 \frac{t_c}{t_c - t_p}$ , kde  $t_c$  je doba cyklu a  $t_p$  doba přestávek.

Například pro 100 kg vytaveného materiálu za 1 hod bez přestávek je třeba příkon pece  $P = 100 \cdot 0,45 \cdot 1 = 45$  kW.

## 4.5 Účinnost indukčního ohřevu [16]

Pro vyšší účinnost je třeba, aby induktor byl co nejvíce přizpůsobený tvarově vsázce. Přibližná účinnost je dle vztahu:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left( 1 + 6,25 \frac{a}{d^2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}} \quad (4.5)$$

- $D$  průměr induktoru
- $d$  průměr válcové vsázky
- $a$  hloubka vniku
- $\rho_1$  měrný odpor materiálu induktoru
- $\rho_2$  měrný odpor materiálu vsázky
- $\mu$  permeabilita

V tabulce jsou uvedeny orientační hodnoty účinnosti indukčního ohřevu válcové vsázky

d/a	8	6	4	2	1	0,6	0,4
účinnost [%]	95	85	65	30	10	4	1

Tab. 2: Účinnost indukčního ohřevu, kde  $d$  je průměr válcové vsázky,  $a$  je hloubka vniku.

## 5 Indukční ohřev magnetické a nemagnetické vsázky

### 5.1 Magnetismus

Podle chování v magnetickém poli se rozlišují materiály na: diamagnetika, paramagnetika a feromagnetika. Rozdělují se podle hodnoty relativní permeability.

diamagnetika  $\mu_r < 1$  (stříbro, měď, zinek, rtuť)

paramagnetika  $\mu_r > 1$  (sodík, hliník, draslík)

feromagnetika  $\mu_r \ll 1$  (železo, kobalt, nikl)

[17]

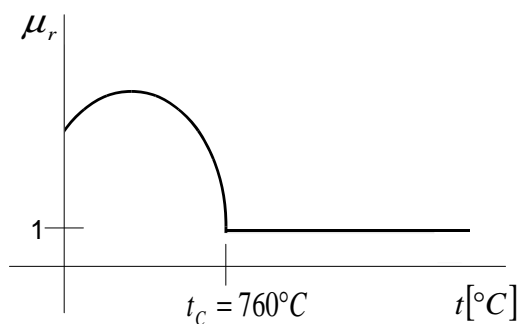
Feromagnetické látky působením i slabého magnetického pole toto pole výrazně zesilují. Magnetizace probíhá působením tzv. výměnných sil mezi atomy. I bez vlivu vnějšího magnetického pole dochází k souhlasnému uspořádání magnetických polí v malých oblastech tzv. magnetických doménách. V tuto chvíli jsou domény orientovány nahodile, ale působením



vnějšího pole se orientují souhlasně. Objem domén se postupně zvyšuje, až doménová struktura zmizí a je magnet nasycen. [18]

## 5.2 Curieova teplota

Každá feromagnetická látka má určitou teplotu, po které látka ztrácí své feromagnetické vlastnosti. Stane se látkou paramagnetickou. Po překročení této teploty je tepelný pohyb příliš intenzivní až tak, že vzniklé domény se rozpadají na samostatné atomy. Tato teplota se nazývá Curieova teplota. [18]



Obr. 5: Závislost relativní permeability na teplotě pro konstrukční ocel [19]

V tabulce jsou uvedeny příklady Curieovy teploty u různých materiálů

látka	Curieova teplota [°C]
ocel	760
kobalt	1130
nikl	358

Tab. 3 Hodnoty Curierovy teploty [19,20]

## 5.3 Vliv relativní permeability

Dle grafu závislosti relativní permeability na teplotě lze vidět, že od Curieovy teploty se látka stává nemagnetickou. Bod tání oceli je přibližně 1350-1400 °C. Proto můžeme ohřev ocelové vsázky rozdělit na 3 části.

0-760 °C – magnetická vsázka, tuhá forma

760-1400 °C – nemagnetická vsázka, tuhá forma

>1400 °C – nemagnetická vsázka, kapalná forma

[19,21]

Na daných látkách lze ukázat rozdílné hodnoty hloubky vniku v závislosti na teplotě, frekvenci a permeabilitě. Od každé skupiny feromagnetik, diamagnetik a paramagnetik je uveden jeden zástupce. Podle již zmiňovaného vztahu lze spočítat hloubku vniku.

materiál	teplota [°C]	rezistivita [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ]	relativní permeabilita [-]	hloubka vniku [mm]				
				50 Hz	500 Hz	5 kHz	500 kHz	5 MHz
Ocel	20	0,16	100	2,8	0,90	0,28	0,03	0,009
			500	1,27	0,40	0,13	0,01	0,004
			1000	0,90	0,28	0,09	0,009	0,0028
	800	1,2	1	77,97	24,66	7,80	0,78	0,25
Měď	20	0,02	1	10,07	3,18	1,01	0,10	0,03
	600	0,7	1	59,56	18,83	5,96	0,60	0,19
Hliník	20	0,03	1	12,33	3,90	1,23	0,12	0,04
	700	0,11	1	23,61	7,47	2,36	0,24	0,07

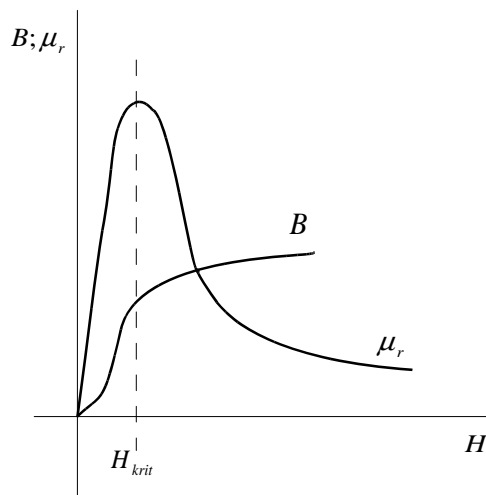
Tab. 4: Hodnoty hloubky vniku v závislosti na různé teplotě, rezistivitě a permeabilitě materiálu.[15,16]

Teplotní součinitel elektrického odporu hliníku je  $0,004 \text{ K}^{-1}$ . Rezistivita u hliníku při  $700 \text{ °C}$  je vypočtena dle vztahu  $\rho = \rho_0(1 + \alpha_t \Delta t) = 0,03(1 + 0,004 \cdot 680) = 0,11 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Předpoklad, že magnetická indukce  $B$  závisí na intenzitě magnetického pole lineárně a tedy podle vztahu  $B = \mu H$  je  $\mu_r = \text{konst.}$ , platí pouze pro látky nemagnetické a pro látky magnetické, které ale ztratily magnetickou vlastnost po překročení Curieovy teploty. Musí se tedy brát v potaz, že relativní permeabilita není konstantní a  $B$  na  $H$  nezávisí lineárně, ale je dána magnetizační křivkou  $B = f(H)$  na obr.6, kde je znázorněna i křivka průběhu  $\mu_r$ . [2]

V limitě křivky platí  $dB = \mu_0 \mu_r dH$ , protože na krátkém úseku lze brát  $\mu_r$  konstantní. Křivka průběhu  $\mu_r$  je derivační křivkou magnetizační křivky, neboť  $\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$ . Hodnoty intenzity magnetického pole  $H$  jsou při ohřevěch vysoké a vždy přesahují několikrát  $H_{krit}$ , kde je permeabilita nejvyšší. Ohřívání předmět je silně magneticky přesycován. [2]

Intenzita  $H$  závisí ještě i na čase, protože cívka je napájena střídavým proudem a také na vzdálenosti od povrchu. Směrem dovnitř vsázky  $H$  rychle ubývá kvůli ohřívajícím proudům, které působí proti primárnímu  $H$ . [2]



Obr. 6: Magnetizační křivka a závislost poměrné [2]

## Závěr

Při zpracování této bakalářské práce jsem získala další teoretické poznatky, díky kterým jsem si utříbila informace o daném problému, u jiných naopak zjišťuju, že je ještě mnoho zajímavých informací, které bych se do budoucna ráda dozvěděla.

V první části jsem se věnovala teorii indukčního ohřevu, obecným rovnicím, které elektromagnetické pole popisují, ve druhé části se již konkrétněji věnuji rovinnému a válcovému vlnění a problematice související se zadáním práce obecně. Tím jsem splnila první zásadu vypracování.

Druhou zásadu jsem řešila v třetí části, kde jsem se věnovala výhodám indukčního ohřevu při tavení, oblastem využití. Vlivu elektrických parametrů jsem se věnovala ve čtvrté části, kde jsem popsala, co parametry ovlivňují a jaké podmínky efektivní ohřev doprovázejí.

Poslední zásadě jsem se věnovala v poslední části, kde jsem popsala relativní permeabilitu, která závisí jak na intenzitě magnetického pole, tak na teplotě, a s tím také Curiovu teplotu.

Díky nízké spotřebě elektrické energie a ekologičnosti, protože neprodukuje žádné produkty spalování, má indukční ohřev širokou oblast využití, např. tavení, kalení, pájení, prohřívání, sváření apod.

## Použitá literatura

- [1] LANGER, Emil. Teorie indukčního a dielektrického tepla. Praha: Academia, 1979. 320 s.
- [2] RADA, Josef. Elektrotepelná technika. Praha: SNTL, Alfa, 1985. 352 s.
- [3] KEŠNER, M. Ohřevy elektromagnetickou indukcí v podélném a příčném elektromagnetickém poli. Bakalářská práce, ZČU Plzeň, 2010
- [4] DOLEŽEL, Ivo; MUSIL, Ladislav; ULRYCH, Bohuš. Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem. Elektro [online]. 2003, 11, [cit. 2013-04-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25605](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25605)>
- [5] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (3). Elektro [online]. 2002, 12, [cit. 2013-04-12]. Dostupný
- [6] PREJZA, Radek. Teorie a aplikace tavení materiálů metodou „studeného kelímku“. Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2011
- [7] GINTEROVÁ, Monika. Podivuhodný kelímeček. 3pól [online]. 2004, 1/04, [cit. 2013-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://3pol.cz/232-podivuhodny-kelimek>>.z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25267](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267)>.
- [8] JIŘINEC, S. Tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku
- [9] Laboratoř studených kelímků. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/program-jpc/laborator-studenych-kelimku/>>
- [10] Titan a jeho slitiny [online].[cit. 2013-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://ptc.zshk.cz/vyuka/proteticke-slitiny-titan.aspx>>
- [11] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Vitrification Technologies for Treatment of Hazardous and Radioactive Waste [online]. Washington DC, 1992. Dostupný z WWW: <<http://www.epa.gov/nscep/index.html>> klíčové slovo: *vitrification*
- [12] Sklo. [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklo>>
- [13] RÜTHER, Tomáš. Vitrifikace s využitím technologie indukčního ohřevu. Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2012
- [14] Industrial experience of HLW vitrification at La Hague and Marcoule. [online]. [cit. 2013-04-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.wmsym.org/archives/1998/html/sess14/14-05/14-05.htm>>
- [15] Rezistivita. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita>>
- [16] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (3). Elektro [online]. 2002, 11, [cit. 2013-05-20]. Dostupný zWWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25235](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25235)>
- [17] Kučerová, E. Přednášky z předmětu EMAP
- [18] Vlastnost látek. [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.labo.cz/mft/vl.php?latka=364>>
- [19] Kožený, J. Přednášky z předmětu ZETP
- [20] Curieova teplota. [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Curieova\\_teplota](http://cs.wikipedia.org/wiki/Curieova_teplota)>
- [21] Magnetické vlastnosti látek. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>>