

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Tavení elektromagneticky průzařné vsázky v indukční
kelímkové peci**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Živko MACUROSKI**
Osobní číslo: **E11N0027K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Tavení elektromagneticky průzařné vsázky v indukční kelímkové peci**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Objasněte jev elektromagnetické průzařnosti při indukčním ohřevu vsázky a jeho důsledky.
2. Popište metodu "tavení se zbytkem" v indukční kelímkové peci.
3. Proveděte analýzu vzniku a přenosu tepla při "tavení se zbytkem".
4. Určete optimální množství "zbytku" při požadavku získat konstantní hodinové množství taveniny.
5. Stanovte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na vyřešení optimálního množství zbytku taveniny, při získání konstantního hodinového množství vsázky. Ohřev je vytvářen v indukční kelímkové peci.

Práce je rozdělená do pěti částí. První část je věnována vzniku a dopadu elektromagnetické průzařnosti na železný materiál. V druhé části je popsána metoda „Tavení se zbytkem“. Další část je věnována analýze přenosu a vzniku tepla při tomto tavení. Následně je určeno optimální množství zbytku taveniny. V závěrečné části jsou zhodnoceny výsledky pro praktické užití.

Klíčová slova

Indukční pec, elektromagnetické vlnění, tavení se zbytkem, průzařnost, Maxwellovy rovnice, hloubka vniku.

Abstract

This thesis is focused on solving the optimizing amount of residual melt, at obtain a constant hourly amount of the workpiece. Heat is generated in the induction crucible furnace.

Thesis is divided into five parts. The first one is focused on creation and effect of electromagnetic transparency of the ferrous material. Second part describe method of „Melting with the rest”. Third part is devoted to the analysis of transfer and emergence at heat melting. Next, was determined the optimal amount of residual melt. Last part contains results of evaluated for practical using.

Key words

Induction furnace, electromagnetic waves, melting with the residue, transparency, maxwell's equations, skin depth...

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 27.6.2013

Živko Macuroski

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiří Kožený, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1. TEORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU	12
1.1 PRINCIP INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ	12
1.2 ODVOZENÍ VLNOVÝCH ROVNIC ELMG. VLNĚNÍ	13
1.3 ROVINNÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ.....	16
1.4 ODVOZENÍ ROVINNÉHO HARMONICKÉHO ELMG. VLNĚNÍ	17
1.5 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ.....	20
1.6 ODVOZENÍ VÁLCOVÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	21
1.7 ELEKTROMAGNETICKÁ PRŮZAŘNOST	23
1.7.1 Průzařnost v rovinném vlnění	24
1.7.2 Průzařnost ve válcovém vlnění.....	25
2 ELEKTRICKÉ INDUKČNÍ PECE	28
2.1 INDUKČNÍ PECE KELÍMKOVÉ	28
2.1.1 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm	28
2.1.2 Indukční kelímková pec se svazky transformátorových plechů	30
2.1.3 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem	31
2.2 INDUKČNÍ PECE KÁNÁLKOVÉ	32
2.2.1 Indukční pec kanálková s odkrytým kanálkem	32
2.2.2 Indukční pec kanálková se zakrytým kanálkem	32
2.3 METODA „TAVENÍ SE ZBYTKEM“	33
3 ANALÝZA VZNIKU A PŘENOSU TEPLA PŘI „TAVENÍ SE ZBYTKEM“	34
3.1 ANALÝZA VZNIKU TEPLA	34
3.2 POPIS PROCESU TAVENÍ DROBNÉ VSÁZKY	37
4 URČENÍ OPTIMÁLNÍHO MNOŽSTVÍ „ZBYTKU	38
5 ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	46
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

\bar{A}_1, \bar{A}_2	Integrační konstanty
B [T].....	Magnetické indukce
C_1, C_2 [-].....	Integrační konstanty
\bar{D} [C/m ²].....	Fázor elektrické indukce
E [V/m].....	Vektor intenzity elektrického pole
F [m ²].....	Průřez kelímku
H [A/m].....	Vektor intenzity magnetického pole
I_1 [A]	Proud procházející cívkou
I_{11} [A/m]	Proud na jednotku délky cívky
J [A/m ²].....	Vektor proudové hustoty
N_1 [-]	Počet závitů cívky
N_{11} [-]	Počet závitů cívky na jednotku délky
P [W].....	Výkon
P [W/m]	Výkon na jednotku délky
P_{21} [kW/h].....	Příkon
Q [J]	Tepelná energie
S [W/m ²].....	Poyntingův zářivý vektor
U_1 [V].....	Napájecí napětí cívky
V [m ³].....	Objem
W [J].....	Elektrická energie
a [m].....	Hloubka vniku naindukovaných proudů
c [kJ/kg K]	Měrná tepelná kapacita
d [m]	Průměr
f [Hz].....	Frekvence
h [m]	Výška
k^2 [-]	Komplexní číslo
n_t [-].....	Počet tyčí
α, β [-]	Reálná a imaginární část komplexního čísla
n_t [-].....	Počet tyčí
r_1 [m]	Poloměr cívky

r_2 [m]	Poloměr vsázky
s [kg/m ³]	Měrná hmotnost kapaliny
t [s]	Čas
v [m/s]	Rychlost
γ [S/m]	Elektrická vodivost
ϵ [F/m]	Permitivita
ϵ_0 [F/m]	Permitivita vakua
ϵ_r [-]	Relativní permitivita
η [Ns/m ²]	Absolutní vazkost kapaliny
λ [m]	Vlnová délka
μ [H/m]	Permeabilita
μ_0 [H/m]	Permeabilita vakua
μ_r [-]	Relativní permeabilita
ρ [C/m ³]	Hustota nábojů
σ [S/m]	Konduktivita
ω [m/s]	Úhlový kmitočet

Značení veličin

\mathbf{H} , $\left(\frac{H}{x}\right)$ Vektorová veličina, (zápis ve zlomku)

\bar{H} , $\left(\frac{\bar{H}}{x}\right)$ Fázor veličiny, (zápis ve zlomku) – časově proměnný

Konstanty

$\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$ [F/m] Permitivita vakua

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]..... Permitivita vakua

$\pi = 3,14159$ Ludolfovo číslo

$g = 9,81$ [m/s]..... Gravitační zrychlení

Úvod

Při výrobě a zpracování ocelí vznikají zbytky v podobě odřezků, pilin a třísek. Protože vzrůstá množství odpadu, je ekologické i ekonomické ho dále zpracovat - recyklovat. Výhoda železných materiálů spočívá v možnosti opakované tavitelnosti. Ve své diplomové práci se zabývám indukčním tavením, protože při něm nedochází k přenosu tepla, nýbrž teplo vzniká přímo v materiálu. Výsledkem je že, téměř veškerá energie se spotřebuje na ohřátí ohřívajícího materiálu, i když není s ničím mechanicky vázaný. Indukční ohřev je výhodný nejen pro tavení, ale i pro zpracování oceli např. při kalení, kdy je třeba pouze povrch materiálu ohřát a následně prudce zchladit. Nebo při rozebírání strojních částí za tepla uložených, kde potřebujeme pouze jeden díl rychle ohřát, tj. dle frekvence určíme přesnou hloubku, do které materiál ohřejeme, a za pomoci tepelné roztažnosti se nám umožní ho rozebrat.

Protože ocelový šrot má různé rozměry, dochází při indukčním ohřevu k jeho průžařnosti. Abychom mohli průžařný materiál roztavit, použijeme metodu indukčního ohřevu tzv. „Tavení se zbytkem“. Tavit je vhodné v indukční kelímkové peci. Při této metodě dochází k přenosu tepla do neroztavené vsázky nejprve vedením. Využívá se „zbytku“ který nataví elektromagneticky průžařný šrot. Jakmile se natavený materiál začne spojovat, zvětší se jeho objem a přestane být průžařný. V tuto chvíli dojde ke změně rychlosti ohřevu vsázky, protože přenos tepla se bude konat vedením a indukcí. Rychlost se bude zvyšovat se vzrůstajícím objemem taveniny. Šrot je možné přisypat najednou, nebo postupně po určitém množství. Tím se změní doba tavení. Další vliv na dobu tavení má množství zbytku. V neposlední řadě účinnost pece. Všechny výše zmíněné faktory zohledním a nastíním postup s výpočtem pro určení optimálního množství zbytku.

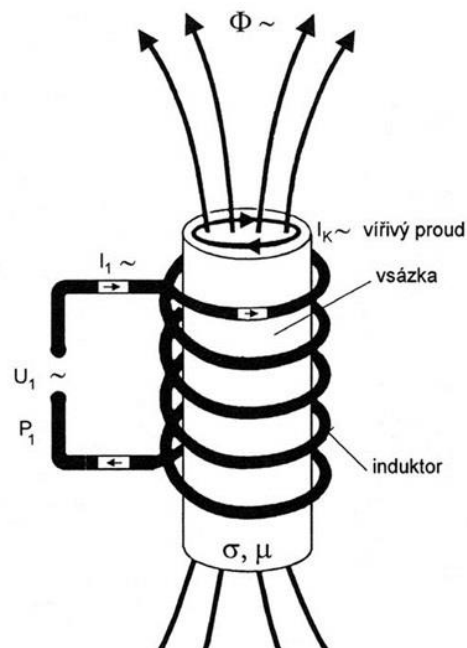
1. Teorie indukčního ohřevu

Indukční ohřev umožňují materiály elektricky vodivé. V předmětu z vodivého materiálu, který je vložen do střídavého magnetického pole, se indukují vířivé proudy. Tyto proudy předmět zahřívají. Přenos tepla do vsázky se neděje tepelným spádem, jako je tomu u zařízení odporových (s nepřímým ohřevem). Teplo vzniká přímo ve vsázce a přenáší se střídavým magnetickým polem. Vsázka je nejteplejším objektem celé soustavy – vše ostatní může být studený. K největším výhodám indukčního ohřevu patří vznik elektrického tepla přímo ve vsázce, přičemž vsázka není mechanicky s ničím vázána a skutečnost, že volbou kmitočtu volíme tloušťku vrstvy u povrchu vsázky, ve které teplo vzniká.

[1]

1.1 Princip indukčních zařízení

Všechna indukční zařízení se skládají z cívky, kterou napájí zdroj střídavého proudu a vsázkou, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou. Často se pro zjednodušení k transformátoru, kde výstupní vinutí představuje vsázka a je spojeno nakrátko. V okolí rovinného zářiče průchodem proudu vzniká v jeho okolí elektromagnetické vlnění rovinné. V okolí válcového zářiče průchodem proudu vzniká v jeho okolí elektromagnetické vlnění válcové. Na obr 1.1 je znázorněno, že po připojení zdroje napětí U_1 , začne procházet proud I_1



Obr. 1.1 Princip indukčního zařízení [2].

induktorem o hustotě \mathbf{J} a kmitočtu f . Ten vyvolá magnetické pole \mathbf{B} procházející vsázkou a dochází ke vzniku vířivých proudů o hustotě \mathbf{J} , za předpokladu, že vsázka je elektricky vodivá. Zvýší se kinetická energie volných elektronů obsažených v materiálu. Při nárazu elektronů na molekuly dojde k předání kinetické energie, tím se zvýší jejich rozkmit, což znamená zvýšení termodynamické teploty materiálu. Ve vodivém prostředí dojde k útlumu elektromagnetického vlnění a jeho energie se přemění na energii tepelnou a mechanickou. Protože děje uvažujeme periodické, mechanická energie se mění dále na tepelnou.

Hloubka vniku záření je závislá na kmitočtu, kde δ je hloubka vniku [m], f je frekvence [Hz], μ je permeabilita [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$], σ je konduktivita [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma_r}}$$

Teorie indukčního ohřevu je založena na elektrodynamice vyplývající z Maxwellových rovnic. Tyto rovnice určují vlnový charakter elektromagnetického pole. Podstatou vlnových jevů je konečná rychlost šíření těchto jevů. Kdyby se daný jev šířil rychlostí nekonečně velkou, nebylo by jeho šíření postupné, jev by byl ihned v celém prostoru a nebylo by proto ani vlnění.

[1]

1.2 Odvození vlnových rovnic elmg. vlnění

Základní 4 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru.

$$1. \text{rot } \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1)$$

$$2. \text{rot } \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$3. \text{div } \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (3)$$

$$4. \text{div } \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

$$\text{kde } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\varepsilon_0 \doteq \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

\mathbf{H} ... vektor intenzity magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

\mathbf{E} ... vektor intenzity elektrického pole [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]

γ ... konduktivita [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]

ρ ... hustota nábojů [$\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$]

Uvažujeme neohraničené homogenní izotropní klidné prostředí, charakterizované konstantami ε , μ , γ , ve kterém se šíří elmg. vlnění. Rovnice šíření elmg. vlnění v uvažovaném prostředí odvodíme z Maxwellových rovnic. U první a druhé Maxwellové rovnice místo intenzity magnetického pole \mathbf{H} budeme uvažovat magnetickou indukci $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, protože první rovnice obsahuje všechny tři konstanty prostředí

$$\text{rot } \mu\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{B} = \mu\gamma\mathbf{E} + \mu\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (7)$$

Uvažujeme prostředí bez vnitřních zdrojů elektřiny, takže objemová hustota elektřiny ρ ($\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$) na pravé straně třetí rovnice je rovna nule. Třetí a čtvrtá rovnice Maxwellova potom budou

$$\text{div } \mathbf{D} = \text{div } \varepsilon\mathbf{E} = 0, \quad \text{div } \mathbf{E} = 0 \quad (8)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = \text{div } \mu\mathbf{H} = 0, \quad \text{div } \mathbf{H} = 0 \quad (9)$$

Abychom z rovnice (6) vyloučili \mathbf{B} , aplikujeme na (7) operaci rot.

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = -\text{rot} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \mathbf{B} \quad (10)$$

Dosaďme do (10) za rot \mathbf{B} z (6)

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu \varepsilon \mathbf{E} + \mu \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = -\mu \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (11)$$

Z vektorového počtu je známo, že

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = \text{grad div } \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} \quad (12)$$

$\nabla^2 \mathbf{E}$ je Laplaceův diferenciální operátor vektoru \mathbf{E} . Po dosazení do (11)

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

Obdobně můžeme z (6) vyloučit \mathbf{E} a dostaneme rovnici pro vektor \mathbf{B}

$$\text{rot rot } \mathbf{B} = \mu \gamma \mathbf{E} + \mu \gamma \text{rot} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Za rot \mathbf{E} dosaďme z (7)

$$\text{rot rot } \mathbf{B} = \mu \gamma \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) + \mu \varepsilon \left(-\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \right) = -\nabla^2 \mathbf{B}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

Rovnice (13) a (14) jsou zobecněné rovnice elmag. vlnění pro vektory \mathbf{E} a \mathbf{B} v prostředí s konstantami ε , μ , γ . Stejně diferenciální rovnice platí pro vektory \mathbf{D} , \mathbf{J} a \mathbf{H} , jež se od \mathbf{E} a \mathbf{B} liší pouze materiálovými konstantami ($\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$, $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$). Dále budeme uvažovat vektor \mathbf{H} místo vektoru \mathbf{B}

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

Elektromagnetické vlnění upravíme pro prostředí vodivé z rovnice (13)

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

První člen v závorce značí proud posuvný, druhý člen je proud vodivý $\gamma \mathbf{E} = \mathbf{J}$. V dobrých vodičích můžeme zanedbat proud posuvný proti vodivému, takže bude

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\mu \gamma} \nabla^2 \mathbf{E}$$

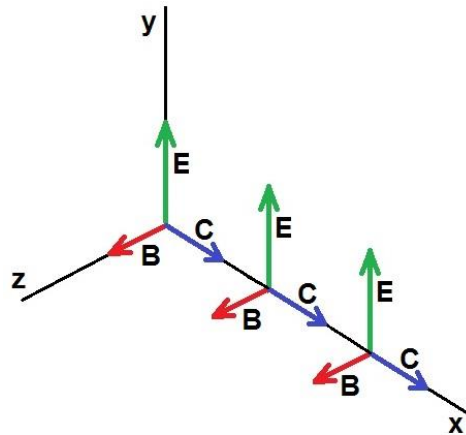
Obdobně

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\mu \gamma} \nabla^2 \mathbf{H}$$

[1, 3]

1.3 Rovinné elektromagnetické vlnění

Pouze rovná vodivá stěna může být zdrojem rovinného elmag. vlnění. Stěnou prochází jedním směrem střídavý harmonický proud. Elektromagnetická vlna se šíří prostorem v kladném směru osy +x s elektrickým polem \mathbf{E} mířícím ve směru +y a magnetickým polem \mathbf{B} ve směru +z. Vyobrazeno na obr. 1.2. V libovolném okamžiku jsou vektory \mathbf{E} a \mathbf{B} homogenní. V každé rovině kolmé ke směru šíření vlny.



Obr. 1.2 Rovinná elektromagnetická vlna.

[3]

1.4 Odvození rovinného harmonického elmg. vlnění

Odvození začneme z připravené rovnice (15) předchozí kapitoly.

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + \omega^2 \mu\epsilon \bar{\mathbf{H}} - j\omega\mu\gamma \bar{\mathbf{H}} = \nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + (\omega^2 \mu\epsilon - j\omega\mu\gamma) \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (16)$$

Součinitele při $\bar{\mathbf{H}}$ označme symbolem k^2 .

$$k^2 = (\omega^2 \mu\epsilon - j\omega\mu\gamma) = -j\omega\mu(\gamma + j\omega\epsilon)$$

Rovnice (16) pro $\bar{\mathbf{H}}$ obdobně pro $\bar{\mathbf{E}}$, potom budou

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0, \quad \nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0$$

Vyjádríme Laplaceův operátor v soustavě pravoúhlých souřadnic.

$$\left[\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} \right] + k^2 \mathbf{E} = 0$$

Rovinné elmg. vlnění je charakterizováno tím, že vektory \mathbf{E} a \mathbf{H} jsou invariantní k souřadnicím y a z , derivace \mathbf{E} a \mathbf{H} podle y a z jsou proto rovny nule. V Laplaceově operátoru odpadnou druhé derivace podle y a z . Fázové rovnice pro $\bar{\mathbf{E}}$ a $\bar{\mathbf{H}}$ pro rovinné harmonické vlnění budou

$$\frac{d^2\bar{\mathbf{E}}}{dx^2} + k^2\bar{\mathbf{E}} = 0, \quad \frac{d^2\bar{\mathbf{H}}}{dx^2} + k^2\bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (17)$$

Vyřešíme tyto dvě rovnice lineární kombinací dvou exponenciálních funkcí typu: $\bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{A}}e^{\lambda x}$. Exponent λ dostaneme z charakteristické rovnice.

$$\lambda^2\bar{\mathbf{A}}e^{\lambda x} + k^2\bar{\mathbf{A}}e^{\lambda x} = 0$$

Komplexní číslo k^2 má reálnou a imaginární. Odmocníme-li $\pm k$, vznikne komplexní číslo s reálnou a imaginární částí α a β .

$$k = \alpha - j\beta, \quad k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta - \beta^2 \quad (18)$$

Dle vzorců (18)

$$\alpha_{1,2} = \pm jk = \pm j(\alpha - j\beta) = \pm(\beta + j\alpha)$$

Následné řešení (17), z čehož vznikne obecné řešení harmonického rovinného elmg. vlnění pro prostředí vodivé i nevodivé.

$$\bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{A}}_1 e^{jkx'} + \bar{\mathbf{A}}_2 e^{-jkx'} = \bar{\mathbf{H}}_p + \bar{\mathbf{H}}_r$$

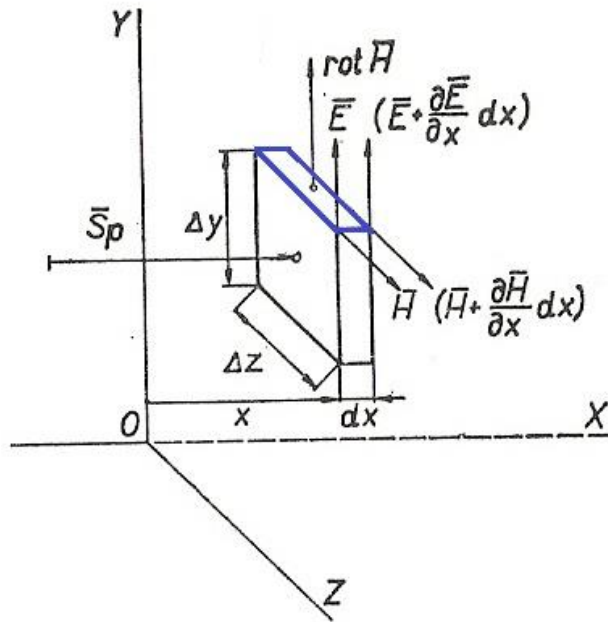
První člen na pravé straně je elmg. vlnění postupující ze zářiče vycházející. Druhý člen je elmg. vlnění odražené zpět od předpokládané rovne vodivé stěny. $\bar{\mathbf{A}}_1$, $\bar{\mathbf{A}}_2$ jsou integrační konstanty, které se určují z mezních podmínek. Chceme-li dodržet kladný smysl x .

$$\bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx'} + \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx'} = \bar{\mathbf{H}}_p + \bar{\mathbf{H}}_r \quad (19)$$

K fázoru $\bar{\mathbf{H}}$ přiřadíme fázor elektrického pole $\bar{\mathbf{E}}$, dle 1. Maxwellovi rovnice.

$$\text{rot } \bar{\mathbf{H}} = \gamma \bar{\mathbf{E}} + j\omega \varepsilon \bar{\mathbf{E}} = (\gamma + j\omega \varepsilon) \bar{\mathbf{E}} \quad (20)$$

Pro určení $\text{rot } \bar{\mathbf{H}}$, zapíšeme do čitatele výrazu (17) práci, kterou vykoná jednotka magnetického množství, pohybuje-li se po obvodu modře vyznačené elementární plošky viz. obr.1.3. Do jmenovatele zapíšeme obsah elementární plošky (Δz , dx). Podílem čitatele se jmenovatelem velikost $\text{rot } \bar{\mathbf{H}}$.



Obr. 1.3 Prostorový obrazec pro vyjádření $\text{rot } \mathbf{H}$ [3].

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

Derivací výrazu (19) dostaneme $\text{rot } \bar{\mathbf{H}}$

$$\text{rot } \bar{\mathbf{H}} = -\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial x} = jk \bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - jk \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx} = jk [\bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx}]$$

Rot $\bar{\mathbf{H}}$ dosadíme do 1. Maxwellovy rovnice (20) a dostaneme hledaný výsledek.

$$\bar{\mathbf{E}} = \frac{j\sqrt{(-j)}\sqrt{\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon)}}{\gamma + j\omega\varepsilon} [\bar{\mathbf{A}}_1 e^{jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{-jkx}] = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\gamma + j\omega\varepsilon}} [\bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx}] =$$

$$\bar{\mathbf{Z}} (\bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx}) = \bar{\mathbf{E}}_p + \bar{\mathbf{E}}_r \quad (21)$$

Rovnice (19) a (21) jsou obecnými výrazy fázorů $\bar{\mathbf{E}}$ a $\bar{\mathbf{H}}$ harmonického rovinného elmg. vlnění. Platí pro vodivé i nevodivé prostředí.

[3]

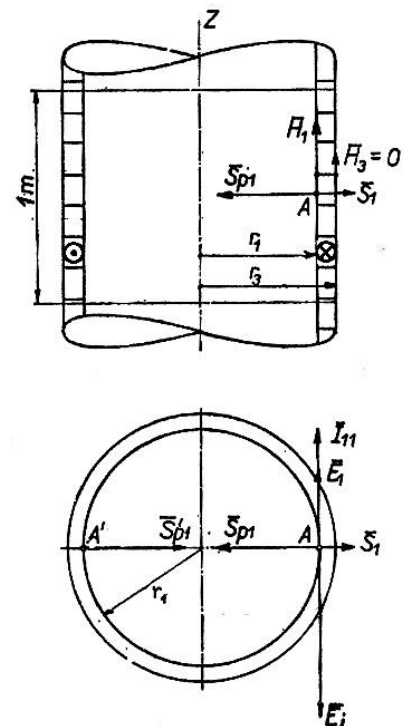
1.5 Válcové elektromagnetické vlnění

Pouze válcová plocha o poloměru r , nekonečné délky, protékající střídavý elektrickým proudem tak, že proudová vlákna leží kolmo k ose válce je zdrojem válcového elmg. vlnění. Válcová cívka, kterou prochází střídavý proud, vyzářuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění.

Na obrázku obr. 1.4 máme naznačenou cívku s n závitů, kterou protéká proud I_I . Máme-li počet závitů N_{11} při osově délce 1m , pak prochází cívkou proud I_{II} . Jeho velikost bude následující:

$$I_{II} = N_{11} \cdot I_I \text{ [A/m]}$$

Proud I_{II} jak je z obrázku obr. 1.4 patrné protéká vyznačeným směrem a intenzita elektrického pole \mathbf{E}_I na poloměru r_1 má stejný směr a smysl. Součin vektorů \mathbf{E}_I a \mathbf{H}_I určuje zářivý vektor \mathbf{S}_I vstupuje kolmo do stěny cívky a označuje velikost ztrát v cívce. Ze smyslu vektoru I_{II} vyplívá vektor intenzity \mathbf{H}_I na poloměru r_1 . Proud I_I uvnitř



Obr. 1.4 Válcová plocha [3].

cívky vybudí v dutině cívky magnetický tok indukující se v závitech napětí E_i opačného smyslu, než je intenzita E_I . Zářivý vektor S_{pI} je tvořen intenzitou magnetického pole E_I a indukovaného napětí E_i .

[3]

1.6 Odvození válcového elektromagnetického vlnění

Při odvozování rovnic budeme vycházet z odvozených obecných fázorových rovnic z principu indukčního zařízení v kapitole 1.1

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0, \quad \nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (22)$$

Pro válcové elmg. vlnění používáme válcovou soustavu souřadnic a musíme Laplaceův operátor převést do této soustavy. Laplaceův operátor vektoru můžeme převést ze soustavy pravoúhlých souřadnic do soustavy válcových souřadnic, jedině za předpokladu, že vektor má směr osy Z válcového souřadnicového systému. Podmínka platí jen pro vektor \mathbf{H} . Vyjádříme obecný výraz pro $\nabla^2 \mathbf{H}$.

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

Intenzita \mathbf{H} válcového vlnění závisí na poloměru r , ale nemění se souřadnice φ a z , jsou derivace.

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = 0$$

Z čehož plyne

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\mathbf{H}}{dr} \right) = \frac{1}{r} \frac{dr}{dr} \frac{d\mathbf{H}}{dr} + \frac{1}{r} r \frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} = \frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{H}}{dr}$$

Dosadíme za $\nabla^2 \mathbf{H}$ do výrazu (22)

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{H}}{dr} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (23)$$

Besselovu rovnici získáme podílem výrazu (23) konstantou šíření k^2 . Besselova rovnice bude diferenciální nultého řádu pro argument (kr) .

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

Vyřešením Besselovi diferenciální rovnice je lineární kombinace cylindrických funkcí.

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_1 J_0(kr) + \mathbf{C}_2 N_0(kr) \quad [\text{A/m}] \quad (24)$$

Pro zjištění intenzity elektrického pole \mathbf{E} použijeme 1. Maxwellovu rovnici

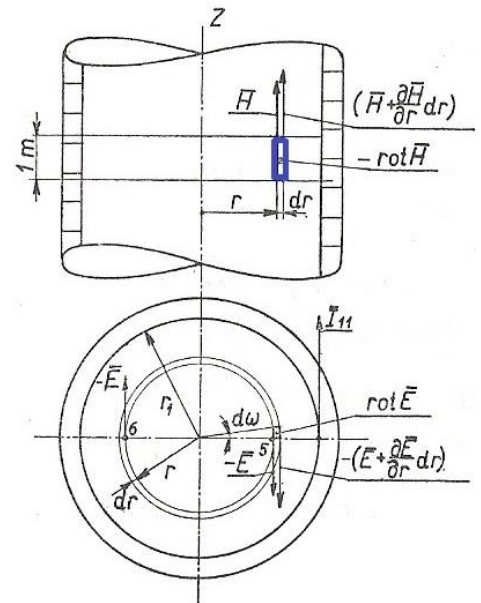
$$\text{rot } \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + j\omega \epsilon \mathbf{E} = (\gamma + j\omega \epsilon) \mathbf{E} \quad (25)$$

Velikost $\text{rot } \mathbf{H}$ určíme za pomoci obr. 1.5. Na poloměru r je vyznačen vektor intenzity \mathbf{H} , na poloměru $(r + dr)$ je magnetická intenzita $\left[\mathbf{H} + \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r}\right) dr\right]$. Vyjádřením práce, kterou vykoná jednotka magnetického množství po obvodu modře vyznačené plochy, získáme rotaci \mathbf{H} na poloměru r . Vzniklý vztah dělíme velikostí této plochy. Při pohledu proti ose Z vektor $\text{rot } \mathbf{H}$ je kolmý k modré ploše, vystupuje proti nám, takže je záporný.

$$-\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\left(\mathbf{H} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} dr\right) 1 - \mathbf{H} 1}{1 dr} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (26)$$

Sloučením vzorců (25) a (26) vyjádříme \mathbf{E}

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{\gamma + j\omega \epsilon} \frac{d\mathbf{H}}{dr}$$



Obr. 1.5 Odvození $\text{rot } \mathbf{H}$ a $\text{rot } \mathbf{E}$.

Intenzitu E získáme derivací cylindrických funkcí výrazu (24).

$$\frac{d[J_0(kr)]}{d(kr)} = -J_1(kr)$$

$$\frac{d[J_0(kr)]}{dr} = -kJ_1(kr)$$

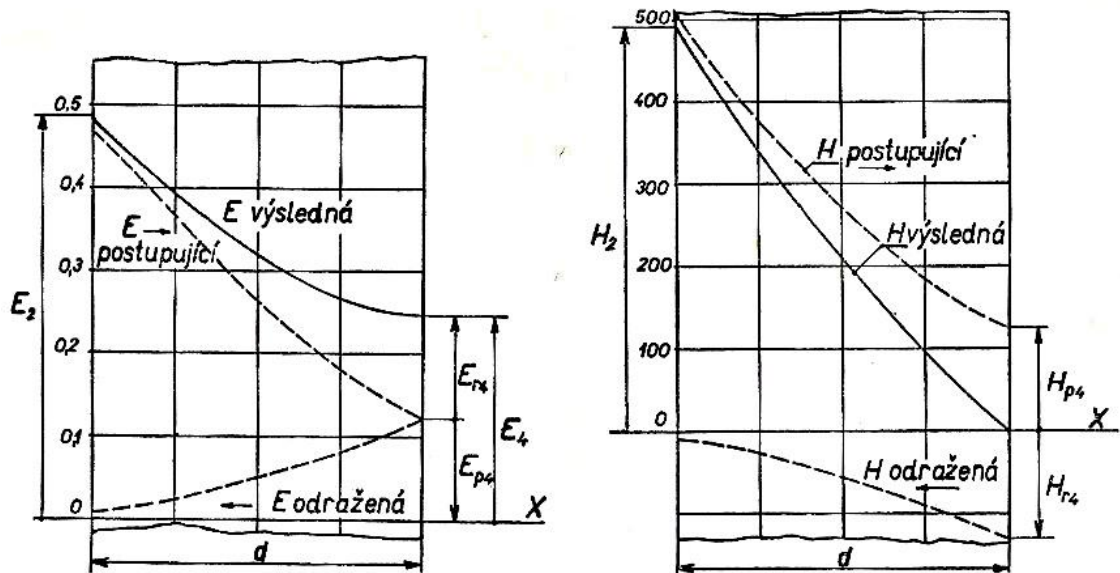
$$\frac{d[N_0(kr)]}{dr} = -kN_1(kr)$$

$$E = \frac{k}{\gamma + j\omega\epsilon} [C_1 J_1(kr) + C_2 N_1(kr)] \quad [\text{V/m}]$$

[3]

1.7 Elektromagnetická průzařnost

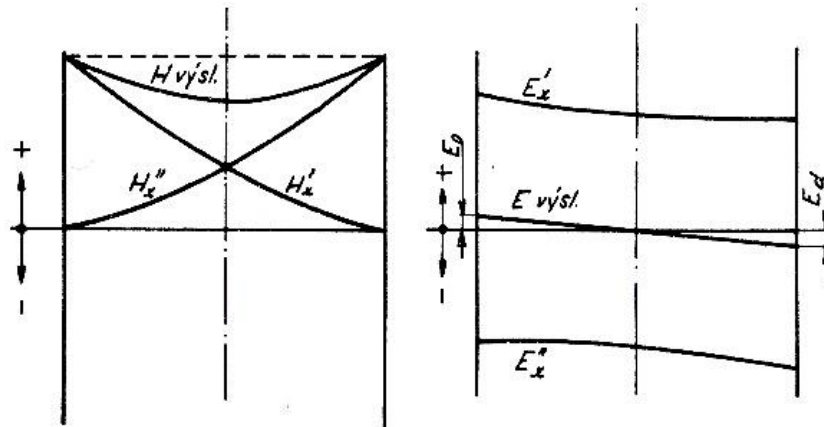
Jak bylo výše rozvinuto elektromagnetická vlnění jsou rovinná i válcová. V obou způsobech vlnění může nastat elektromagnetická průzařnost.



Obr. 1.6 Průběh vln E a H [3].

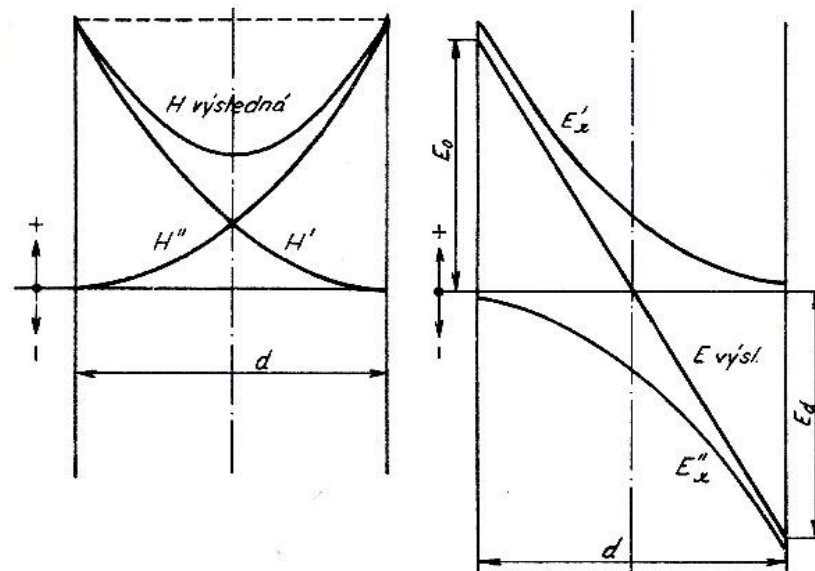
1.7.1 Průzařnost v rovinném vlnění

U rovinného vlnění vycházíme z průběhu vln E a H dopadajících z jedné strany na tenkou stěnu viz. obr. 1.6. Na obrázku je vidět, že odražená vlna elektrické intenzity má stejnou fázi, ale odražená vlna magnetické intenzity má opačnou fázi oproti postupné vlně, se stejnou amplitudou. Bude-li elektromagnetické vlnění dopadat z obou stran výsledné E i H budou jiný. Na obrázku obr. 1.7 je vidět jak se elektromagnetické vlnění E_x' a E_x'' navzájem ruší, protože se nestačilo v tenké stěně utlumit. Vzniklá E je malá, průzařnost je vysoká.

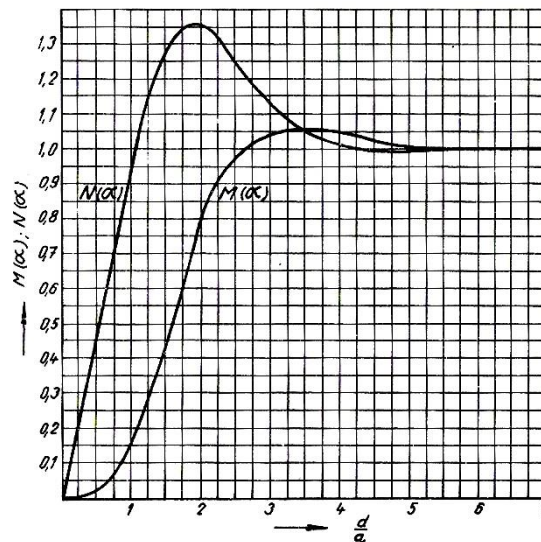


Obr. 1.7 Průběh E a H průzařné stěny [1].

Na obrázku 1.8 jsou znázorněny průběhy neprůzařné stěny, u kterých je výsledné E a H velké, protože se stačilo v tenké stěně utlumit. To je pro indukční ohřev výhodné.



Obr. 1.8 Průběh E a H neprůzařné stěny [1].

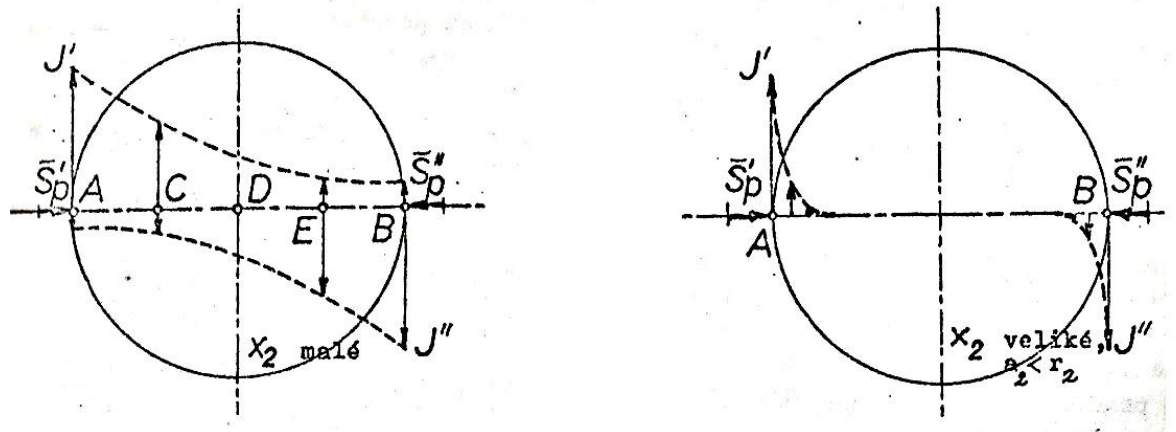
Obr. 1.9 Funkce M a N [1].

Chceme-li vědět jaký podíl činného a jalového výkonu absorbuje stěna konečné tloušťky z výkonu, který by vstřebala stěna nekonečné tloušťky, vyjádříme ho z funkce $M(\alpha)$ a $N(\alpha)$ na obr. 1.9. Z grafu plyne, že pro $\alpha = d/a = 2$, nebo-li $d=2a$ absorbuje stěna 80% výkonu, kde d je tloušťka stěny, a je hloubka vniku. Pro $\alpha < 1$ je stěna průzařná – neabsorbuje téměř výkon. Totéž platí i pro válcové vlnění.

[1]

1.7.2 Průzařnost ve válcovém vlnění

Válcová vsázka, na kterou dopadá radiálně z povrchu cívky elmg. vlnění vyznačené zářivými vektory S_p' a S_p'' v protilehlých bodech A a B. Na obrázku 1.10 vlevo jsou vyznačeny průběhy hustoty proudů J' a J'' . Obě hustoty mají vzájemně opačný smysl. Hloubka vniku je velká, naindukovaný proud je malý i vyvinuté množství tepla, účinnost malá. Na obr. 1.10 vpravo je hloubka vniku oproti poloměru malá, elektromagnetické vlnění se utlumí v tenké vrstvě na povrchu. Obě vlnění se nesetkají, nemohou na sebe vzájemně působit. Povrch se přehřívá a zvětšují se ztráty vyzařováním do okolí. Z toho vyplývá, aby vrstva, ve které se teplo vyvíjí, nebyla příliš tenká, tj. kmitočty ke vztahu k poloměru nepřilíš vysoký.



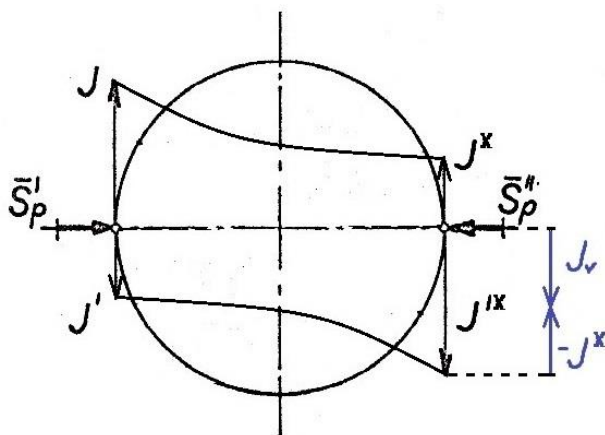
Obr. 1.10 Průběhy hustoty proudu válcové vsázky z obou stran [3].

Na obr. 1.11 graficky vyjadřujeme výslednou hodnotu proudů J_v . Matematicky by to vypadalo takto.

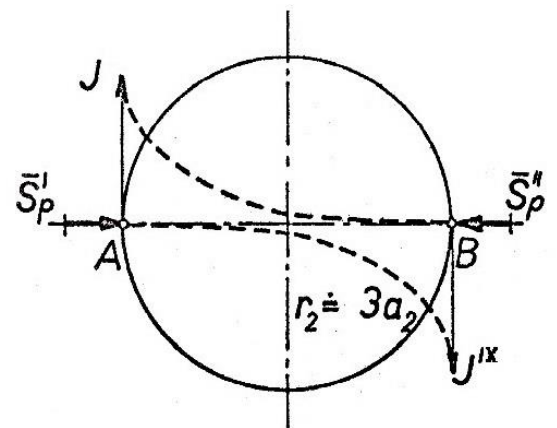
$$J_v = J - J' = J^x - J^x$$

Aby nedocházelo k průzařnosti, nebo přehřívání povrchu materiálu volíme optimální kmitočet takový, u kterého platí přibližný vztah $r_2 = (2,5 \div 3,0)a_2$, kde r_2 je poloměr vsázky, a_2 je hloubka vniku obr. 1.12. V ose válcové vsázky mají hustoty proudu z obou stran již malé hodnoty. Střední hodnota poloměru $r_2 = 2,75a_2$. Z toho vyjádříme x_2

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = 2,75\sqrt{2} = 3,89 \quad (27)$$



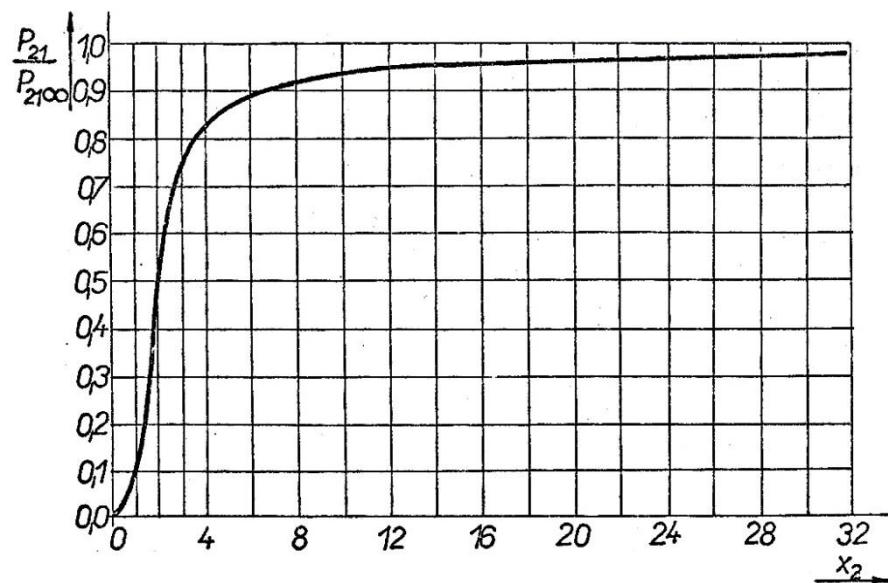
Obr. 1.11 Vyjádření výsledné hustoty proudu.

Obr.1.12 Průběh J pro střední hodnotu r_2 [3].

Pro vyjádření množství tepla P_{21} , které se vytvoří ve válcové vsázce o průměru r_2 , s intenzitou pole magnetického H_2 platí vztah

$$P_{21} = \rho \pi x_2 \cdot P(x_2) \cdot H_2^2 \quad [\text{W/m}] \quad (28)$$

Graf v obr. 1.13 ukazuje závislost množství absorbované elmg. energie ve válcové vsázce, které se přemění v teplo, na argumentu x_2 . Funkce $P(x_2)$ má malé hodnoty, je-li argument x_2 malý. Z toho vyplývá, že vlnění projde materiálem, jen částečně se přemění v teplo a zbytek se bez užitku prozáří. Pro dané elmg. vlnění je materiál pružný.



Obr. 1.13 Závislost množství absorbované elmg. energie na argumentu x_2 [3].

Ze vztahu (27) a obr. 1.13 vyplývá, že pro malé x_2 platí

$$r_2 \leq a_2.$$

Z diagramu obr. 1.13 je možné odečíst např., že pro $x_2 = 6$ je z dopadajícího elmg. vlnění množství pohlcené energie cca 89 %.

[3]

2 Elektrické indukční pece

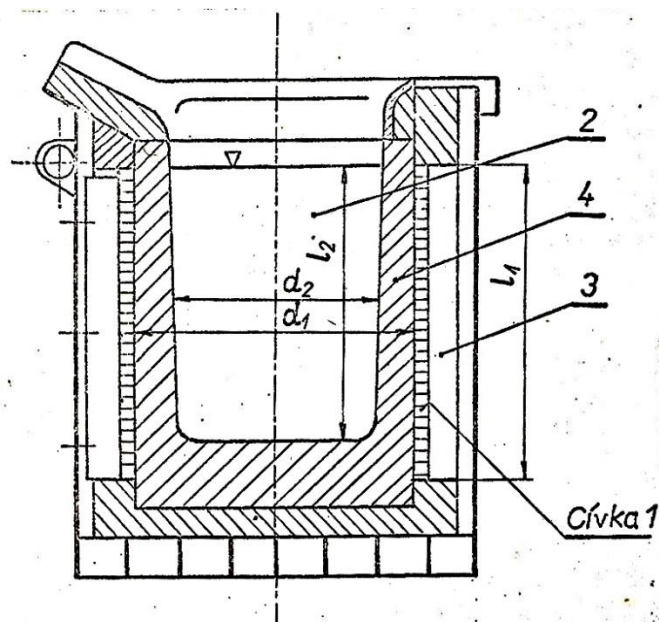
Tyto pece jsou využívány ve slévárenství pro tavení ocelí, hliníků, litin a dalších neželezných kovů. Tavení vsázky je na principu elektromagnetické indukce, která je zdrojem vířivých proudů naindukovaných v sázce. Tímto způsobem ohřevu vsázky nedochází k přímému předávání tepla ze zdroje, protože zdrojem tepla jsou naindukované vířivé proudy přímo v taveném kovu. Elektrické indukční pece se rozdělují na kelímkové a kanálkové.

2.1 Indukční pece kelímkové

Název vyplývá ze způsobu tavení vsázky, která je umístěna uvnitř cívky v kelímku. Jejich hlavní výhodou je intenzivní víření roztavené vsázky v kelímku, které se uskuteční vždy, prochází-li cívkou proud. Po roztavení vsázky vznikne dokonale homogenní slitina, nedosažitelná v žádném jiném typu pece.

2.1.1 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

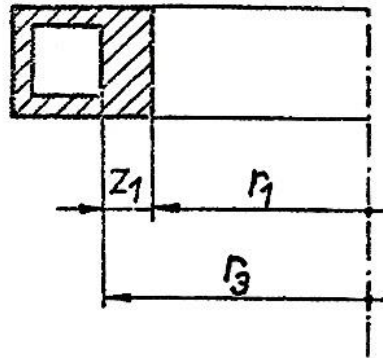
Pec obr 2.1 se skládá z cívky 1, kterou prochází střídavý elektrický proud. Uvnitř cívky se nejčastěji nachází elektricky nevodivý kelímk 4 vyplněný materiálem 2, který chceme tavit. Cívkou, připojenou ke zdroji, prochází střídavý proud, tím se vytvoří magnetické pole procházející kelímkem.



Obr. 2.1 Indukční kelímková pec [4].

Cívka je vinuta z měděného dutého vodiče obvykle obdélníkového tvaru. Aktivní stěna vodiče z_1 (obr 2.2) vede prakticky všechen proud. Laboratorní pece s hmotností vsázky do 10 kg jsou napájeny proudem od 4 do 10 kHz. Malé pece mají tloušťku vnitřní stěny vodiče z_1 1,5 – 2 mm.

Pece s hmotností 2 – 3 tuny mají tloušťku vnitřní stěny z_1 cca 4 mm a jsou napájeny



Obr. 2.2 Svazek transformátorových plechů [4].

proudem s frekvencí 0,6 – 1 kHz. Závity cívky jsou izolovány mikafoliiovou páskou a mezery mezi nimi jsou s izolačními vložkami. Izolace je navržena tak, aby vydržela namáhání cca 15 V/mm. Dutinou vodiče cívky prochází chladicí voda. Průchodem vody jednotlivými závity se zahřívá. Aby nedošlo k přehřátí vody, následného vzniku páry a tím znemožnění průtoku je třeba dbát na správnou rychlost proudění. Vodní chlazení musí odvést elektrické ztráty v cívce asi 20 – 25% příkonu a dále teplo procházející stěnou kelímku ze vsázky o teplotě až 1650 °C. Důležité je, aby proudění vody ve vodiči induktoru bylo turbulentní. Toho dosáhneme, bude-li Reynoldsovo číslo $Re > 2320$. Kontrolu provedeme dosazením do výrazu (29).

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot s}{\eta \cdot g} > 2320 \quad (29)$$

v... střední rychlost vody [m/s]

d... vnitřní průměr trubky [m]

s... měrná hmotnost kapaliny [kg/m^3]

$g...$ zrychlení tíže = $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

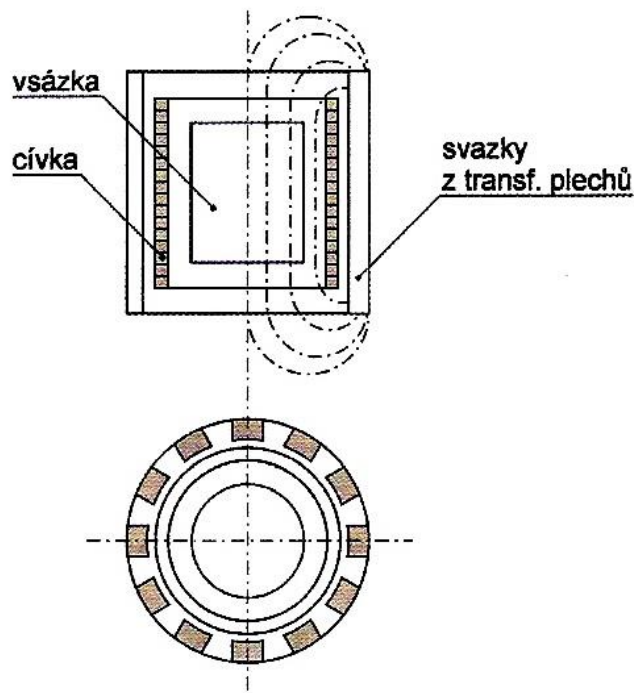
$\eta...$ absolutní vazkost kapaliny $[\text{Ns/m}^2]$

V okolí pece se nachází různé ocelové konstrukce, u nichž může dojít k nežádoucímu zahřívání, proto musíme učinit nezbytná opatření, aby magnetický tok těmito konstrukcemi neprocházel. Zahříváním ocelových konstrukcí by došlo k zvýšením ztrát, které by snižovaly účinnost pece, ale i by mohlo dojít k jejich poškození. Tomuto nežádoucímu jevu se bráníme stíněním, a to dvěma způsoby. Buď pec opatříme válcovým, dobře vodivým pláštěm, souosým s cívkou, nebo vně cívky jádrem ze svazků trafoplechů.

[4]

2.1.2 Indukční kelímková pec se svazky transformátorových plechů

Kelímková pec je opatřena vodivým stínícím pláštěm, pomocí kterého se výrazně sníží intenzita magnetického pole vně pláště. Nebo vně cívky místo stínícího pláště umístíme železné jádro z většího počtu svazků transformátorových plechů, jak je zobrazeno na obrázku obr 2.3.



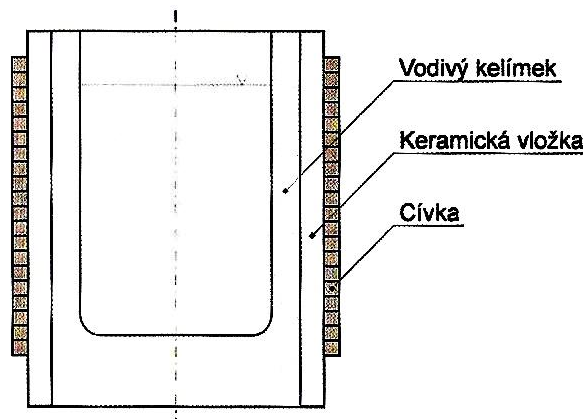
Obr. 2.3 Indukční kelímková pec se železným jádrem vně cívky [2].

Transformátorové plechy mají vysokou mg. vodivost. Způsobí zvýšení vzájemné indukčnosti M_{12} . Další výhodou je cívka s nižším počtem závitů a menší kondenzátorová baterie. Užitečný výkon se zvýší a ztráty v cívce sníží. Účinnost pece se svazky transformátorových plechů je téměř o 5 % vyšší, než u pece se stínícím pláštěm. Což ve výsledku přináší značné úspory elektrické energie, hlavně u velkých pecí, které pracují v nepřetržitém provozu.

[2]

2.1.3 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Jestliže pec opatříme vodivým kelímkem, stoupne elektrická účinnost. Nejčastěji se používají dva typy vodivých kelímku. Kelímek z ocelolityny, který se používá při nižší teplotě tavení např. hliníku a jeho slitin. Nebo kelímek grafitový, který se používá pro vyšší teploty tavení. Pro zmenšení ztrátového tepelného toku ze žhavého kelímku do vodou chlazené cívky používáme keramickou izolační vložku, která je vyobrazena na obr. 2.4



Obr. 2.4 Indukční kelímková pec s vodivým kanálkem [2].

Po připojení cívky ke zdroji střídavého elektrického proudu, dopadá elektromagnetické vlnění z vnitřního povrchu cívky na vnější povrch vodivého kelímku, vstupuje do jeho stěny, naindukují se proud ve stěně a jeho průchodem se kelímek zahřeje. Ohřátý kelímek předá teplo vsázce. Menší část elektromagnetického vlnění projde kelímkem a ohřívá přímo vsázku. Množství naindukovaného tepla ve vsázce a kelímkem určuje vzájemný poměr mezi hloubkou vniku d a tloušťkou stěny kelímku δ . Je-li $d \ll \delta$ pohltí se všechna elektromagnetická energie ve stěně kelímku.

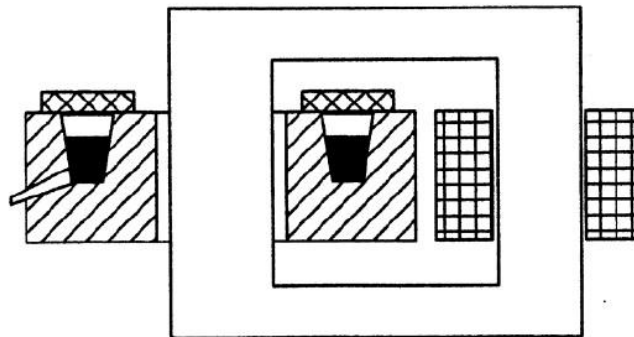
[2]

2.2 Indukční pec kánálkové

Konstrukčně se jedná o transformátor s uzavřeným železným jádrem a primární cívkou připojenou na síť. Sekundární stranou transformátoru je kanálek vyplněný roztaveným kovem. Tento kanálek vytváří závit na krátko. První pece tohoto typu byly konstruovány s odkrytým kanálkem, výhodnější se ukázaly pece se zakrytým kanálkem.

2.2.1 Indukční pec kanálková s odkrytým kanálkem

Výhodou těchto pecí jsou možnosti regulace. Vnější vlivy neovlivňují dokonalé víření vsázky. Při tavení v radiální rovině působí elektromagnetické síly, které vytvoří šikmou hladinu s gradací k vnějšímu okraji. Zvýšením výkonu pece může dojít k nežádoucímu přerušení prstence taveniny, přestanou působit elektrodynamické síly a tavenina se vrací do rovnovážného stavu. Při opakování jevu dochází k proudovým rázům a poruše správného provozu pece. Výhodnější jsou pece se zakrytým kanálkem. Schéma pece s odkrytým kanálkem je na obr. 2.5.

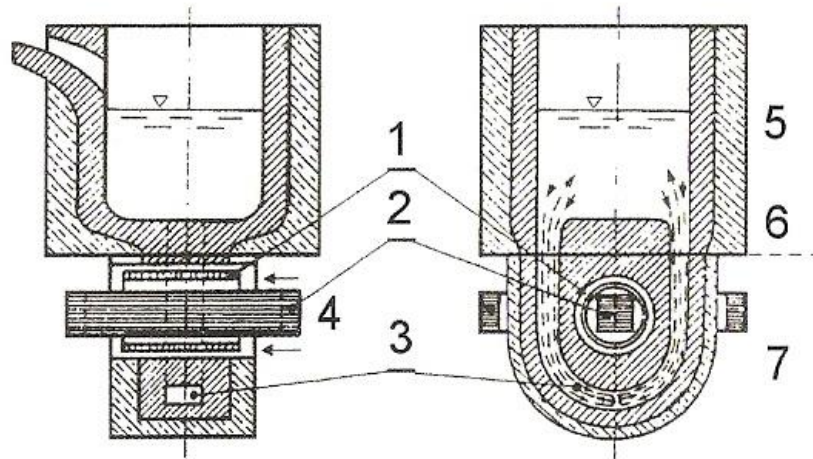


Obr. 2.5 Indukční pec kanálková s odkrytým kanálkem [5].

[5]

2.2.2 Indukční pec kanálková se zakrytým kanálkem

Pec se zakrytým kanálkem sestává z ohřivací cívkou 1, která je chlazená vzduchem 4 (vyznačeno šipkami), jádra z transformátorových plechů 2, na jehož středním sloupcu je ohřivací cívka, kterou obepíná kanálek 3, jako závit na krátko. Nad cívkou se nachází dělicí spára 6 a nad ní vana pece 5. Poslední důležitou částí je induktor 7.



Obr. 2.6 Indukční pec kanálková se zakrytým kanálkem [2].

Tyto pece se vyznačují vyšším účínkem, protože magnetický tok prochází železným jádrem. Elektromagnetické pole vznikající kolem kanálku je tvořeno proudem v kanálku. Kov je tak odtačován od stěn k ose kanálku. Kov se promíchává za pomoci ferostatického tlaku, který studený kov dopravuje do kanálků a teplejší kov stoupá a vytéká do vany. Kanálkové pece se zakrytým kanálkem se nehodí pro přerušovaný provoz a střídání druhů taveného kovu, protože se plní při první tavbě. Pec se musí udržovat v provozní teplotě při technologických přestávkách i přerušení výroby. Tento typ pecí se používá na tavení barevných, lehkých kovů a jejich slitin, litin a i jako pece udržovací.

[2]

2.3 Metoda „Tavení se zbytkem“

Použití této metody je z technologického hlediska vhodné pro indukční pece kelímkové. Chceme-li tavit drobný šrot (např. třísky z obrábění, nebo odpad z lisoven) v indukční kelímkové peci nastane problém s jeho elektromagnetickou průzařností. Řešením je princip „Tavení se zbytkem.“

Nejprve musíme naplnit část kelímku buď taveninou, nebo do něj vložit vhodnou vsázku elektromagneticky neprůzařnou. Za pomoci elektromagnetické indukce roztavíme kov na požadovanou teplotu.

Po dosažení požadované teploty postupně budeme pomocí speciálního plnicího koše dosypávat elektromagneticky průzařnou drobnou vsázku. Můžeme vložit kus slisovaného šrotu ve tvaru kvádrů, nebo krychle a zbylé místo vyplnit drobným šrotem.

Pro natavení vsázky využijeme přenosu tepla z taveniny prouděním a vedením na neprůzařnou vsázku a dodáme ji energii. Postupně jak se bude vsázka tavit, přestane být neprůzařná a začne se zahřívat i indukčně.

Jakmile tavenina dosáhne požadované teploty, můžeme nasypat další šrot. Děj opakujeme tak dlouho až dosáhneme jmenovité výšky naplnění pece. Pak odstraníme strusku a roztavený kov odlijeme.

Aby nám kelímek nevychladl, než roztavíme část vsázky, kterou bychom použily pro další proces tavení, je vhodné, aby se při odlévání část taveniny ponechala v kelímku. Rychlost tavení je závislá na geometrických, elektrických a fyzikálních parametrech zvoleného materiálu k tavení a použití indukční kelímkové pece.

3 Analýza vzniku a přenosu tepla při „Tavení se zbytkem“

Dopadající elektromagnetické vlnění naindukují proud do vsázky, který se přemění v teplo. Při tavení v indukční kelímkové peci je uvažována plná válcová vsázka. Tavíme-li metodou se zbytkem, na místo plné válcové vsázky je v kelímku obsažen tříděný šrot kusů téhož druhu oceli s různou velikostí a různého tvaru. Pro dobrou účinnost tavení je třeba dodržet vztah mezi velikostí částic šrotu a použitou frekvencí.

3.1 Analýza vzniku tepla

Abychom se dopracovali k co nejlepší účinnosti např. při tavení oceli, nejprve musíme rozlišit tři různé stavy vsázky podle závislosti na teplotě během tavení.

Teplota vsázky je od 20 °C do 760 °C. Vsázka je tuhá magnetická. Měrný odpor ρ_2 roste s teplotou od 10^{-5} do $7 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$. Střední permeabilita je v rozmezí $\mu_{\text{stř}} = 30$ až 10. Při teplotě 760 °C ztrácí vsázka elektromagnetické vlastnosti.

Teplota vsázky je od 760 °C do 1400 °C. Vsázka je tuhá a nemagnetická. Měrný odpor ρ_2 roste až do hodnoty $1,2 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu_r = 1$. Při teplotě 1400 °C je počátek tavení.

Teplota vsázky je od 1400 °C do 1600 °C. Vsázka je tekutá. Měrný odpor ρ_2 roste do $1,4 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu_r = 1$ a po dosažení požadovaného chemického složení je připravena k odlití.

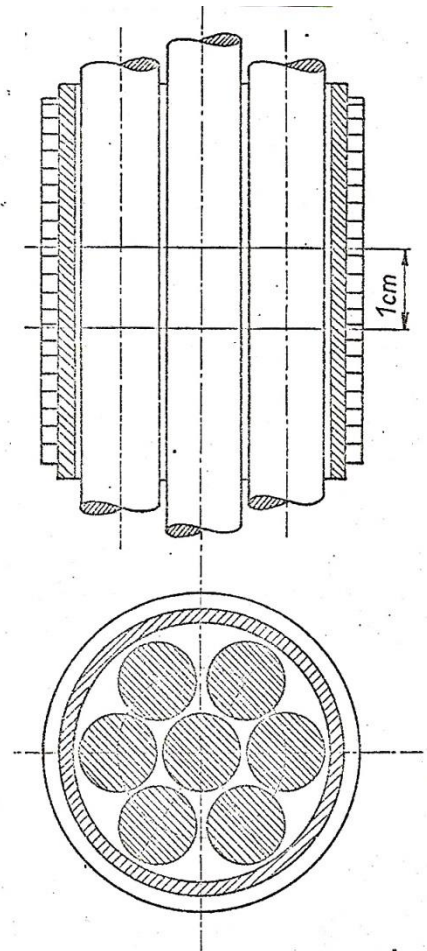
Jak jsme si výše vysvětlili vsázka má různé velikosti. Řešení by bylo nemožné, proto budeme uvažovat, že kelímek vyplníme soustavou tyčí téhož materiálu, souosých s cívkou jak je zobrazeno na obr 3.1. Budeme uvažovat, že mezi tyčemi je izolace nulové tloušťky. V mezerách mezi tyčemi je homogenní magnetické pole velikosti

$$H_1 = N_{11} \cdot I_1 = I_{11} \text{ [A/cm]}$$

Pro určení indukovaného tepla v každé tyči o délce např. 1cm a intenzitě H_1 použijeme vztah (28)

$$P_{21} = \rho_2 \pi x_2 \cdot P(x_2) \cdot H_1^2 \text{ [W/cm]}$$

Vnitřní průměr kelímku budeme předpokládat $2r_2 = 500 \text{ cm}$, aby bylo dobré zaplnění prostoru pece tyčemi do průměru 50 cm. Plochu dutiny kelímku vyjádříme



Obr. 3.1 Schéma náhradních tyčí [4].

$$F_2 = \pi r_2^2 = 3,14 \cdot 250^2 = 196,35 \text{ cm}^2$$

Plochu tohoto fiktivního kelímku budeme zaplňovat postupně tyčemi vždy o stejném průměru. Každou tyčí opíšeme šestiúhelníkem a určíme jeho plochu F' podle obr. 3.2

$$F' = 12 \cdot F'' = 12 \cdot 0,5 \cdot \frac{c}{2} \cdot r'_2$$

$$= 3r'_2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot r'_2 =$$

$$= 2\sqrt{3} \cdot r'_2 = 3,464 r'_2 \quad (30)$$

Průměr tyčí volíme dle řady:

$$2r'_2 = 50 - 20 - 10 - 5 - 2 - 1 - 0,5 \text{ cm}$$

Z rovnice (30) vypočteme množství tepla P_{21} v jedné tyči. Dle vztahu (31) vypočteme plochu F'

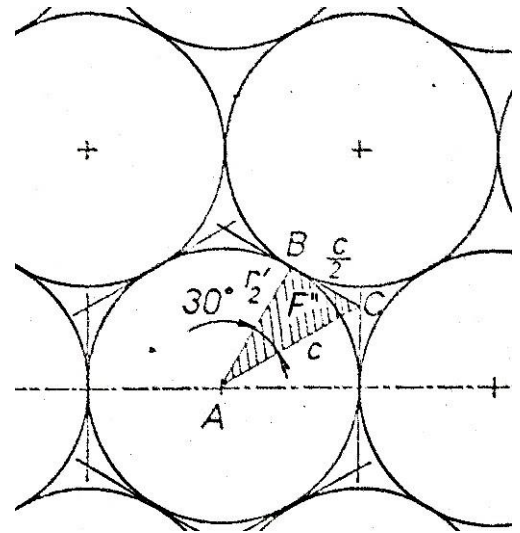
$$P_{21} = \frac{\rho_2 \pi r'_2 \sqrt{2}}{a_2} \cdot P(x_2) \cdot H_1^2 \left[\frac{W}{cm} \right] \quad (31)$$

Počet tyčí n_t o zvoleném průměru, které se do kelímku vejdou, dostaneme ze vztahu:

$$n_t = \frac{F_2}{F'} \text{ [ks]}$$

Součinem příkonu P_{21} a počtu tyčí n_t dostaneme výkon, který absorbuje celá vsázka (část o délce 1cm).

$$P = P_{21} \cdot n_t \text{ [kW/cm]}$$



Obr. 3.2 Schéma zvětšené tyče [4].

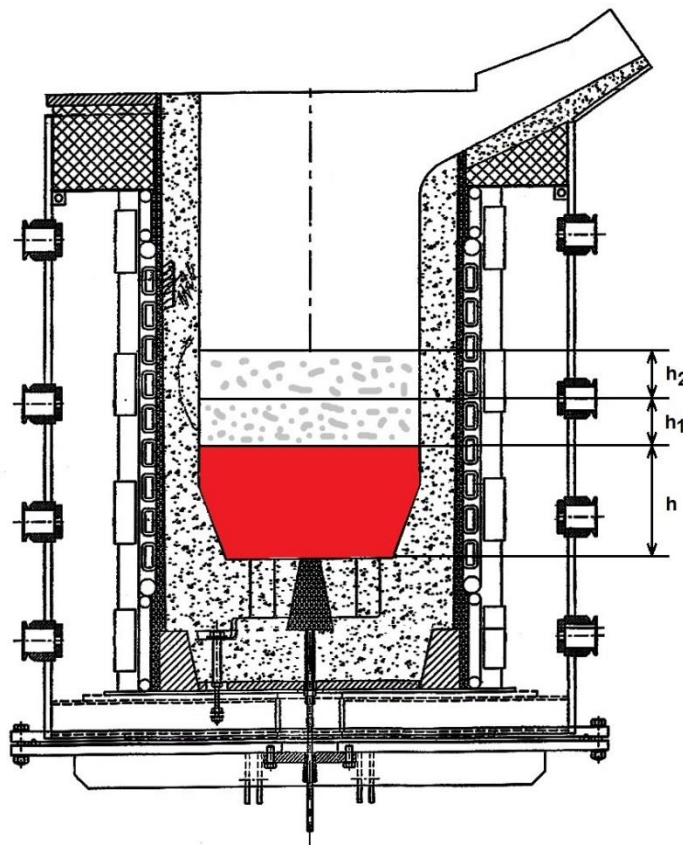
Zmenšením průměrů tyčí vzroste výkon absorbovaný vsázkou. Je-li hloubka vniku a_2 malá v porovnání s poloměrem r_2' , pak argument x_2 je velký a funkce $P(x_2) \doteq \frac{1}{\sqrt{2}}$.

$$P_{21} = \rho_2 \frac{\pi r_2'}{a_2} H_1^2 = \rho_2 \frac{2\pi r_2'}{a_2} I_{11e}^2 \text{ [W/cm]}$$

[4]

3.2 Popis procesu tavení drobné vsázky

Tavíme-li se zbytkem, dochází k přenosu tepla prouděním a vedením.



Obr. 3.3 Indukční kelímková pec.

Po nasypání drobné vsázky do zbytku taveniny se drobná vsázka začne ohřívat teplem z taveniny a to převážně vedením. V důsledku víření zbytku vsázky elektrodynamickými silami je drobná vsázka „vtahována“ přímo do taveniny. To má za následek jednak ochlazování taveniny, ale také zvyšující se podíl sdílení tepla prouděním a s postupným tavením drobné vsázky se hladina taveniny začne zvyšovat.

Se současným zvyšováním hladiny taveniny tj. množství roztaveného kovu se také zvyšují podíl tepla elektromagnetickou indukcí do tavené vsázky.

Proces takového tavení je fyzikálně složitý, zejména s ohledem na přenos tepla prouděním (obtížnost určování součinitele přenosu tepla α).

4 Určení optimálního množství „zbytku“

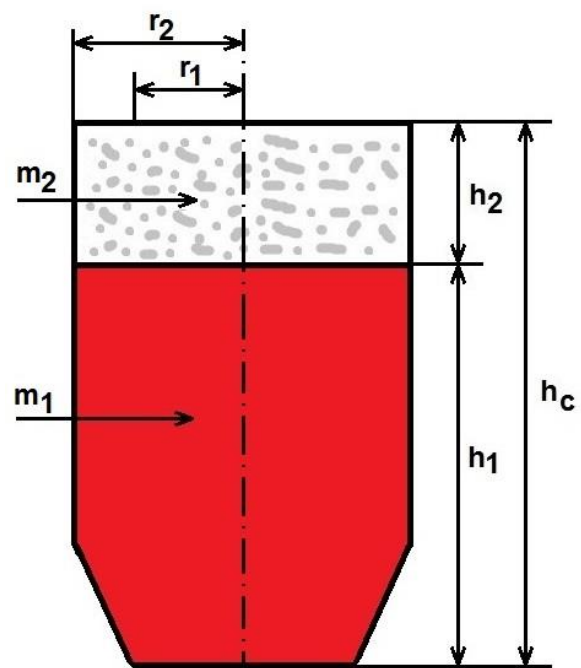
Pro výpočet optimálního množství zbytku jsem použil 2,5 t indukční kelímkovou pec vyobrazenou v příloze 1. Nákres je doplněn o rozměry pece a kelímku. V peci budu tavit ocel na 1400 °C.

Nejprve si načrtnu kelímek (Obr. 4.1) a vyznačím v něm základní parametry, které budu potřebovat. Hmotnost roztavené vsázky m_1 , hmotnost šrotu m_2 , výšku taveniny h_1 , výšku šrotu h_2 , výšku kelímku h_c a poloměry r_1 a r_2 . Pro vzorový výpočet si určím hmotnost šrotu $m_2 = 500$ kg. Zná-li hustotu vsázky $\rho = 6000$ kg/m³, pak mohu vypočítat objem vsázky V_2 .

$$V = \frac{m_2}{\rho} = \frac{500}{6000} = 0,08333 \text{ m}^3$$

Z objemu vypočtu výšku vsázky h_2 .

$$h_2 = \frac{V}{\pi r_2^2} = \frac{0,08333}{\pi \cdot 0,333^2} = 0,2392 \text{ m}$$



Obr. 4.1 Náčrtek kelímku.

Výkon indukční kelímkové pece je $P = 300$ kW, hmotnost naplněného kelímku je $m_c = 2500$ kg. Teplota, na kterou chci tavit $\vartheta_{\text{tav}} = 1400$ °C a teplota šrotu $\vartheta_{\text{poč}} = 20$ °C. Měrná tepelná kapacita oceli $c = 0,46$ kJ/kg°C. Nyní mohu vypočítat dodanou energii na tavení plného kelímku W_c .

$$W_c = m_c \cdot c \cdot \Delta\theta = 2500 \cdot 0,46 \cdot (1400 - 20) = 1587 \text{ MJ}$$

Podílem dodané energie a výkonu pece získám dobu na tavení plného kelímku.

$$t_c = \frac{W_c}{P} = \frac{1587000}{300} = 5290 \text{ s}$$

Dobu na ohřev 500 kg vsázky získám z procentuálního množství vsázky.

$$t_2 = \frac{m_2}{m_c} \cdot t_c = \frac{500}{2500} \cdot 5290 = 1058 \text{ s} \Rightarrow 17 \text{ min } 38 \text{ s}$$

Abych měl konstantní hodinové množství taveniny, potřebuji vyjádřit množství zbytku, které jsem schopen za 50 min roztavit. Zbýlých 10 min bude použito na odlévání a přípravu nové tavby.

$$W_{50} = P \cdot t_{50} = 300 \cdot 3000 = 900 \text{ MJ}$$

Nyní vypočtu hmotnost vsázky $m_{2_{50}}$.

$$m_{2_{50}} = \frac{W_{50}}{c \cdot \Delta\theta} = \frac{0,9 \cdot 10^6}{0,46 \cdot 1380} = 1418 \text{ kg}$$

Z hmotnosti vsázky potřebné pro konstantní hodinové množství spočítám objem šrotu.

$$V_{2_{50}} = \frac{m_{2_{50}}}{\rho} = \frac{1418}{6000} = 0,2363 \text{ m}^3$$

Nyní vypočítám výšku šrotu v kelímku.

$$h_{2_{50}} = \frac{V_{2_{50}}}{\pi r_2^2} = \frac{0,2363}{\pi \cdot 0,333^2} = 0,678 \text{ m}$$

Nyní chci vypočítat objem zbytku. Nejdříve vyjádřím objem rotačního komolého kužele V_k , který má poloměr podstavy $r_1 = 252.5$ mm, poloměr vrcholku $r_2 = 333$ mm, výšku $h_k = 220$ mm.

$$V_k = \frac{\pi h_k}{3} \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) = \frac{\pi \cdot 0,22}{3} \cdot (0,2525^2 + 0,2525 \cdot 0,333 + 0,333^2) = 0,0596 \text{ m}^3$$

Posléze objem válce.

$$V_v = \pi \cdot r_2^2 \cdot h_v = \pi \cdot r_2^2 \cdot (h_c - h_{250} - h_k) = \pi \cdot 0,333^2 \cdot (1,107 - 0,678 - 0,22) = 0,0728 \text{ m}^3$$

Celkový objem zbytku je dán součtem objemu válce a komolého kužele.

$$V_1 = V_v + V_k = 0,0728 + 0,0596 = 0,1324 \text{ m}^3$$

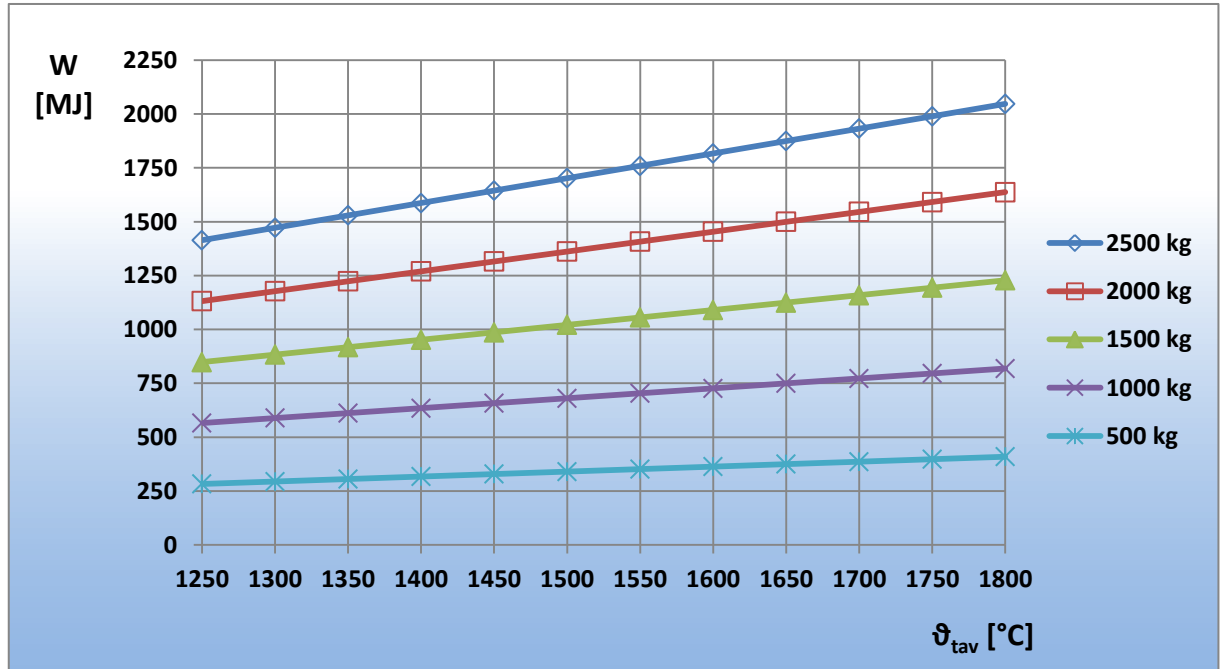
Měrná hmotnost oceli s 0,2 % uhlíku je $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, potom hmotnost zbytku je rovna.

$$m_1 = V_1 \cdot \rho = 0,1324 \cdot 7850 \doteq 1039 \text{ kg}$$

Budu-li zvyšovat tavicí teplotu, budou lineárně vzrůstat nároky na dodávanou energii. Pokud zvětším hmotnost vsázky, budou se s vyšší strmostí zvyšovat nároky na dodávanou energii. Výpočty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.1) a vyneseny v grafu (Graf. 4.1).

Hmotnost vsázky	500 kg	1000 kg	1500 kg	2000 kg	2500 kg
ϑ_{tav}	W	W	W	W	W
[°C]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]
1250	1415	1132	849	566	283
1300	1472	1178	883	589	294
1350	1530	1224	918	612	306
1400	1587	1270	952	635	317
1450	1645	1316	987	658	329
1500	1702	1362	1021	681	340
1550	1760	1408	1056	704	352
1600	1817	1454	1090	727	363
1650	1875	1500	1125	750	375
1700	1932	1546	1159	773	386
1750	1990	1592	1194	796	398
1800	2047	1638	1228	819	409

Tab. 4.1 Hodnoty dodávaného výkonu na tavicí teplotě

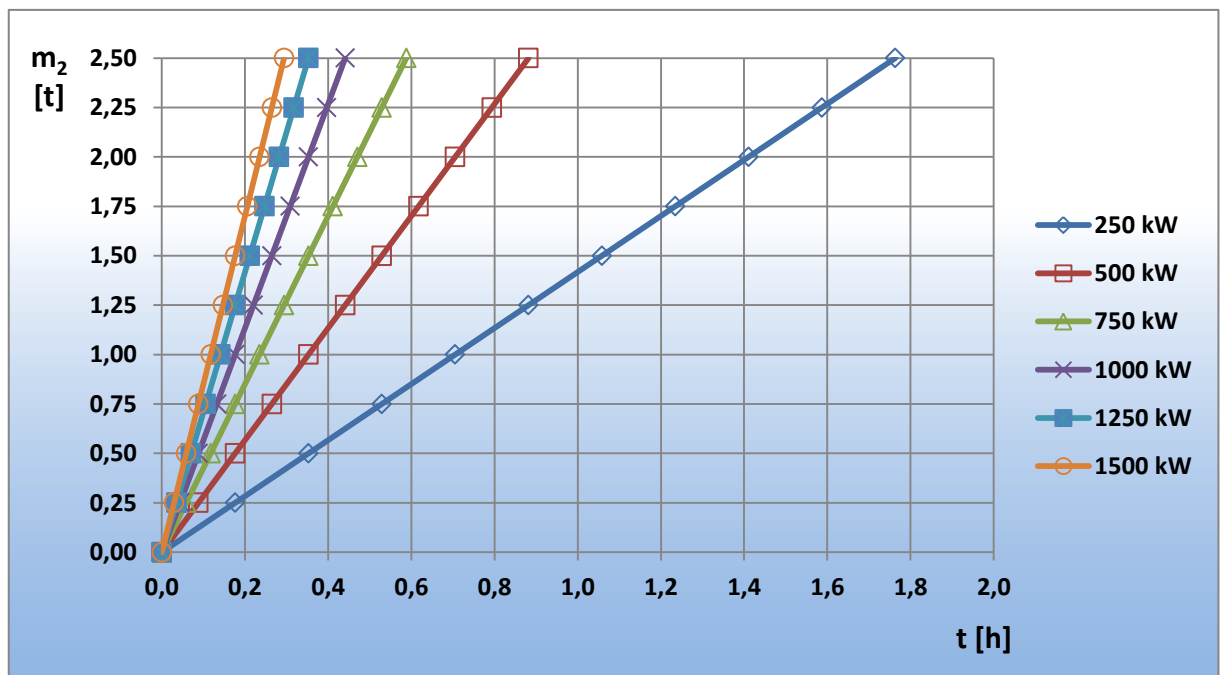


Graf. 4.1 Závislost dodaného výkonu na tavicí teplotě, při různé hmotnosti vsázky.

Druhý graf (Graf 4.2) znázorňuje, jak je závislá hmotnost vsázky na rychlosti tavby. Budu-li tavit malé množství vsázky, není třeba věnovat velkou pozornost použití správné velikosti výkonu. Při tavení velkého množství vsázky je důležité zvolit vhodně velikost výkonu pece, protože mezi jednotlivými výkony vznikají až několikahodinové rozdíly.

Výkon pece	250 kW	500 kW	750 kW	1000 kW	1250 kW	1500 kW
m [t]	t [hod]	t [hod]	t [hod]	t [hod]	t [hod]	t [hod]
0,25	0 : 11	0 : 05	0 : 04	0 : 03	0 : 02	0 : 02
0,50	0 : 21	0 : 11	0 : 07	0 : 05	0 : 04	0 : 04
0,75	0 : 32	0 : 16	0 : 11	0 : 08	0 : 06	0 : 05
1,00	0 : 42	0 : 21	0 : 14	0 : 11	0 : 08	0 : 07
1,25	0 : 53	0 : 26	0 : 18	0 : 13	0 : 11	0 : 09
1,50	0 : 03	0 : 32	0 : 21	0 : 16	0 : 13	0 : 11
1,75	1 : 14	0 : 37	0 : 25	0 : 19	0 : 15	0 : 12
2,00	1 : 25	0 : 42	0 : 28	0 : 21	0 : 17	0 : 14
2,25	1 : 35	0 : 48	0 : 32	0 : 24	0 : 19	0 : 16
2,50	1 : 46	0 : 53	0 : 35	0 : 26	0 : 21	0 : 18

Tab. 4.2 Hmotnosti vsázky na době tavení.

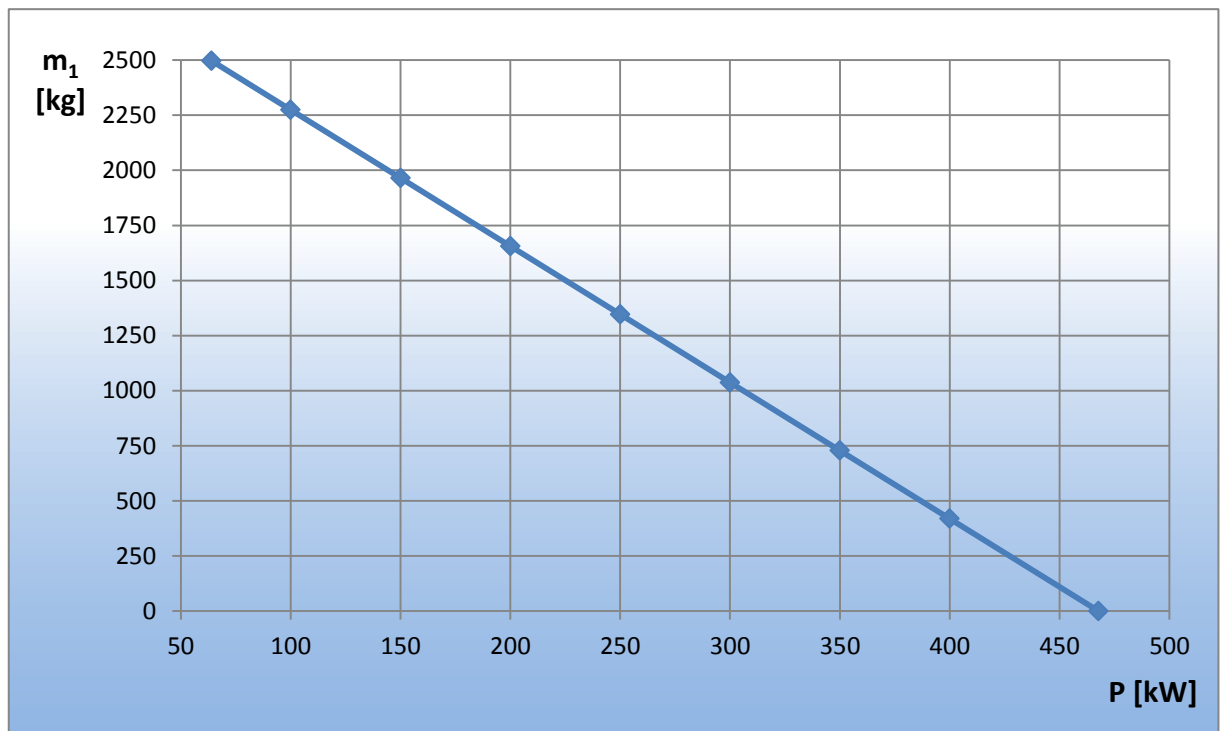


Graf. 4.2 Závislost hmotnosti vsázky na době tavení při různých výkonech pece.

Výše uvedený vzorový výpočet jsem za pomoci Ms. Excelu rozšířil (Tab. 4.3) o závislost množství zbytku na výkonu indukční kelímkové pece při požadavku hodinového odlévání (Graf 4.3). Pro jednotlivé hmotnosti zbytku m_1 lze z grafu odečíst potřebný výkon pece, pro dodržení doby tavby plného kelímku tj. 50 min. Maximální a minimální množství zbytku m_1 je omezeno velikostí kelímku viz. příloha 1, tj. do hmotnosti 2,5 t.

P	W	m_2	V_2	h_2	V_v	V_1	m_1
[kW]	[J]	[kg]	[m ³]	[m]	[m ³]	[m]	[kg]
64	192	302	0,050	0,145	0,258	0,318	2497
100	300	473	0,079	0,226	0,230	0,290	2274
150	450	709	0,118	0,339	0,191	0,250	1965
200	600	945	0,158	0,452	0,151	0,211	1656
250	750	1181	0,197	0,566	0,112	0,172	1347
300	900	1418	0,236	0,679	0,073	0,132	1037
350	1050	1654	0,276	0,792	0,033	0,093	728
400	1200	1890	0,315	0,905	-0,006	0,053	419
468	1404	2212	0,369	1,059	-0,060	0,000	0

Tab. 4.3 Výpočet zbytku pro získání při různých výkonech pece



Graf 4.3 Závislost množství zbytku, při konstantním hodinovém odlévání, na výkonu pece.

5 Závěr

Při řešení diplomové práce bylo zapotřebí nejprve objasnit teorii indukčního ohřevu, která je založena na přenosu elektromagnetického vlnění. Pro jeho pochopení jsem z Maxwellových rovnic odvodil vlnové rovnice. Dále jsem postupoval odvozením rovinného a válcového elektromagnetického vlnění, které je příčinou ohřevu rovné a válcové vsázky. Působením elektromagnetického vlnění na materiál elektricky vodivý, ale takové tloušťky, že se v něm vlnění nestačí utlumit, dojde k elektromagnetické průzařnosti. Dochází k ní jak v rovinném tělese, tak ve válcovém. Rozdíly jsem popsal a uvedl další možnost (pro indukční ohřev používanější), a to dopadající vlnění z obou stran.

Po vysvětlení indukčního ohřevu jsem vytvořil přehled indukčních pecí, ve kterých můžeme tímto způsobem tavit. Rozdělují se na kelímkové a kanálkové. U obou druhů je možné tavit drobnou vsázku (třísky, odpad z lisování). Výhodou kanálkových indukčních pecí je vyšší účinnost, než u kelímkových pecí. Nevýhoda spočívá v náročné údržbě kanálků, který časem zarůstá.

Touto metodou je vhodné tavit železný materiál elektromagneticky průzařný. Takové materiály jsou například drobný šrot, či železné piliny, u kterých je příliš malý průřez na utlumení elektromagnetického vlnění. Při této metodě se využívá přenosu tepla ze zbytku do drobného šrotu. Postupně, jak se bude vsázka tavit, přestane být neprůzařná a začne se zahřívat i indukci.

Analýzu vzniku tepla jsem popsal za pomoci zjednodušené úvahy, kdy velikostně rozdílná vsázka byla nahrazena soustavou tyčí. Při metodě „Tavení se zbytkem“ dochází k přenosu tepla prouděním a vedením. Obě metody jsem jednoduše vysvětlil, nicméně při závěrečném výpočtu optimálního množství zbytku jsem počítal jen s indukčním ohřevem.

Pro přesný výpočet přenosu tepla z roztavené vsázky do šrotu by bylo třeba spočítat součinitele přestupu tepla prouděním, sáláním a nejspíše i vedením. Samotný výpočet těchto veličin by přesáhl rozsah diplomové práce. Proto bylo třeba výpočet zjednodušit. Po zanedbání přestupu tepla z roztavené vsázky, následného postupného natavení šrotu a postupně zvětšující se výšky neprůzařné vsázky a tím i zvětšujícího se výkonu pece, jsem

počítal vždy s plným kelímkem. Naplněný kelímek byl složen z poměru taveniny a šrotu k jeho maximální výšce.

Postupnými výpočty jsem dospěl ke grafu, kde přímka určuje velikost výkonu pece pro jednotlivé hmotnosti zbytku. Tento graf platí pouze pro mou 2,5 t pec. Ze závislosti hmotnosti šrotu na době tavení jsem zjistil, že se vzrůstající hmotností šrotu značně vzrůstá rozdíl doby tavby.

Pro mnou navržené parametry výkonu pece $P = 300 \text{ kW}$, teplota tavení $\vartheta_{\text{tav}} = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$, měrná hmotnost vsázky $\rho = 6000 \text{ kg/m}^3$ mi vyšel objem zbytku $V_1 = 0,1324 \text{ m}^3$ a hmotnost šrotu $m_{250} = 1418 \text{ kg}$. Při hustotě oceli $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ vychází hmotnost $m_1 = 1039 \text{ kg}$. Dobu tavení jsem zvolil 50 min. Zbýlých 10 min. je určeno pro odlití a přípravu nové tavby. Při uvažování přenosu tepla vedením a prouděním, by se proces ohřevu zkrátil.

Jedním ze způsobů urychlení tavby by bylo např. postupné dosazování šrotu ve dvou či více dávkách. Dále by bylo možné část železného šrotu před tavením slisovat do tvaru krychle, nebo kvádrů a zbylá místa vysypat drobnou vsázkou. Výhoda této metody spočívá v tom, že se slisovaný šrot od začátku tavby bude ohřívat jak přenosem tepla z taveniny, tak indukčně a pomůže urychlit proces tavení drobné vsázky.

Při tavení drobného šrotu a třísek po obrábění, je nutné před jeho vsazováním do kelímku pece, provést jeho čištění, tj. odstranit zbytky emulze, vody a mastnot před ohřevem s důrazem na odpaření zbytků vody.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA J. A KOLEKTIV, *Elektrotepelná technika*. Praha 1985
- [2] HRADÍLEK Z., LÁZNIČKOVÁ I., KRÁL V., *Elektrotepelná technika*, ČVUT Praha 2011
- [3] LANGER E., *Teorie indukčního a dielektrického tepla*, Academia Praha 1979
- [4] LANGER E., KOŽENÝ J., *Elektrotepelná zařízení indukční*, VŠSE v Plzni 1982
- [5] DVOŘÁK Z., *Procesní inženýrství III, Elektrické teplo* [on-line]. Zlín, 2008 Dostupné z: http://web.ft.utb.cz/cs/docs/T7PY_elektricke_teplo.pdf
- [6] <http://cs.wikipedia.org/>
- [7] BAXANT P., *Užití elektrické energie*, VUT Brno 2003
- [8] LANGER E., *Elektrotepelná technika část V.*, VŠSE v Plzni 1973
- [9] RYSKA Z., *Elektrotepelná technika část III.A*, ČVUT Praha 1960
- [10] RADA J., *Elektrotepelná technika I*, ČVUT Praha 1980
- [11] LANGER E., *Elektrotepelná technika část IV- indukční pece kanálkové*, VŠSE v Plzni 1969
- [12] RADA J., *Elektrotepelná technika II*, ČVUT Praha 1983
- [13] HRADÍLEK Z., *Elektrotepelná technika*, Vysoká škola Báňská – technická univerzita Ostrava 1996

Přílohy

Příloha 1 – Indukční kelímková pec

