

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Možnosti zvyšování účinnosti ohřevu kovů
elektromagnetickou indukcí**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš VOJTA**
Osobní číslo: **E17N0095P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Možnosti zvyšování účinnosti ohřevu kovů
elektromagnetickou indukcí**
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. Uveďte možnosti ohřevů kovů elektromagnetickou indukcí s teoretickým zdůvodněním.
2. Uveďte změny fyzikálních vlastností ohříváných materiálů v závislosti na teplotě a jejich působení na ohřev elektromagnetickou indukcí.
3. Uveďte, které základní parametry ovlivňují ohřevy pro žíhání, kalení, prohřívání a tavení a jejich vliv na účinnost ohřevu.
4. Uveďte možnosti ke zvyšování účinnosti ohřevů elektromagnetickou indukcí a stanovte závěry pro praxi.



[Handwritten signature]

V Plzni dne 8. října 2018

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

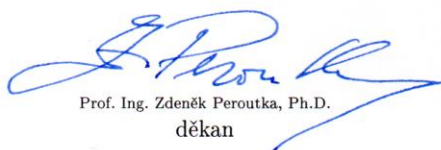
1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na možnosti zvyšování účinnosti ohřevů kovů elektromagnetickou indukcí. V úvodu je teoreticky popsána problematika indukčních ohřevů se zaměřením na válcové elektromagnetické pole. Dále popisuje změny fyzikálních vlastností ohříváných materiálů v závislosti na teplotě. V následující části je popsáno kalení, žíhání, prohřívání a tavení. Také jsou rozebrány podmínky pro jejich efektivní provoz. V poslední části jsou nastíněny možnosti zvyšování účinnosti, speciální aplikace pro příčné pole, různé zdroje napájení pro indukční ohřevy a stínění tavicích pecí. Poznatky jsou shrnuty v závěrech pro praxi.

Klíčová slova

Elektromagnetická indukce, indukční ohřev, relativní permeabilita, elektrická vodivost, hloubka vniku, válcové vlnění, Curieho teplota, Maxwellovy rovnice, Poyntingův vektor, kalení, žíhání, prohřívání, tavení, induktor, vsázka.

Abstract

The presented master thesis is focused on the possibilities to increase efficiency during heating metals by means of electromagnetic induction. In the first part the theory of induction heating is described focusing on cylindrical charge. Next I describe changes in physical properties of the heated metals depending on temperature. In the next part I write about surface hardening, annealing, mass heating and melting. The optimal conditions for efficient operation are also described. The last part contains options for increasing efficiency, special applications for transverse flux induction heater, different possible sources of power for induction heating and shielding for melting furnaces. The findings are summarized in conclusions for practice.

Key words

Electromagnetic induction, induction heating, relative permeability, electrical conductivity, penetration depth, cylindrical wave, Curie temperature, Maxwell equations, Poynting vector, hardening, annealing, mass heating, melting, inductor, charge.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 29.5.2019

Bc. Lukáš Vojta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za jeho cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 INDUKČNÍ OHŘEV	12
1.1 HISTORIE	12
1.2 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU	13
1.3 OBECNÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	15
1.4 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR	20
1.5 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ.....	23
1.5.1 <i>Obecné rovnice válcového elektromagnetického vlnění.....</i>	<i>25</i>
1.6 TYPY INDUKČNÍCH PECÍ	27
1.6.1 <i>Indukční tavicí pec kanálková.....</i>	<i>27</i>
1.6.2 <i>Indukční tavicí pec kelímková.....</i>	<i>29</i>
1.6.3 <i>Indukční ohřívací zařízení</i>	<i>33</i>
2 ZMĚNY FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ OHŘÍVANÝCH MATERIÁLŮ.....	35
2.1 VLIV FREKVENCE.....	35
2.2 ELEKTROMAGNETICKÁ PRŮZAŘNOST	38
2.3 MĚRNÁ ELEKTRICKÁ VODIVOST	41
2.4 VLIV PERMEABILITY	42
2.4.1 <i>Střední permeabilita</i>	<i>46</i>
3 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ OHŘEVY KOVŮ INDUKČÍ.....	48
3.1 POVRCHOVÉ KALENÍ.....	48
3.1.1 <i>Válce pro válcovací stolice</i>	<i>49</i>
3.1.2 <i>Efektivní povrchové kalení.....</i>	<i>50</i>
3.2 ŽÍHÁNÍ	51
3.3 PROHŘÍVÁNÍ.....	51
3.3.1 <i>Efektivní prohřívání.....</i>	<i>52</i>
3.4 TAVENÍ.....	54
3.4.1 <i>Efektivní tavení v indukční kelímkové peci</i>	<i>54</i>
4 MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI INDUKČNÍCH OHŘEVŮ.....	57
4.1 PŘÍČNÉ POLE.....	57
4.2 ZDROJE PRO NAPÁJENÍ INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ	58
4.2.1 <i>Zdroje se síťovou frekvencí.....</i>	<i>58</i>
4.2.2 <i>Středofrekvenční zdroje</i>	<i>58</i>
4.2.3 <i>Vysokofrekvenční zdroje</i>	<i>60</i>
4.3 STÍNĚNÍ.....	61
4.4 ZÁVĚRY PRO PRAXI.....	63
ZÁVĚR	65
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	66

Úvod

Indukční ohřev je bezkontaktní ohřev vznikající na principu elektromagnetické indukce. V dnešní době je využíván pro velké množství aplikací od průmyslu, kde se používá k pájení, žíhání, tavení, tváření i lisování kovových materiálů, až po domácí užití při vaření, kdy dochází k indukčnímu ohřevu ocelového dna nádob. Mezi jeho hlavní výhody patří úspora energie, jelikož se materiál ohřívá přímo, dobrá regulovatelnost nebo možnost provádět ohřevy ve vakuu či ochranné atmosféře a tedy s vysokou čistotou procesu. Dále je u indukčního ohřevu možné využití mechanizace, případně automatizace, což poté umožňuje provoz i velmi výkonných zařízení. Tyto výhody znamenají v současnosti stále rostoucí možnosti využití tohoto typu ohřevu.

Předkládaná práce se zaměřuje na analýzu možností zvýšení účinnosti ohřevů kovů elektromagnetickou indukcí. Nejprve se soustředím na teoretické vysvětlení principu ohřevu elektromagnetickou indukcí. Bude zde popsáno elektromagnetické pole se zaměřením na válcové pole, které se v indukčních ohřevech často vyskytuje díky běžnému válcovému tvaru induktorů a vsázek.

Dále budou popsány změny fyzikálních vlastností ohřívaných materiálů v závislosti na teplotě a jejich působení na ohřev elektromagnetickou indukcí. Mezi ty patří změna frekvence, měrného odporu (respektive elektrické vodivosti) a relativní permeabilita.

V další kapitole budou řešeny základní parametry ovlivňující ohřevy pro žíhání, kalení, prohřívání a tavení. Probírána bude vhodná volba kmitočtů v závislosti na rozměru a tvaru ohřívaného materiálu, změny vlastností materiálu na teplotě a také vliv relativní permeability.

V závěru budou shrnuty možnosti ke zvyšování účinnosti těchto ohřevů a závěry pro praxi, ať již z hlediska vhodné volby frekvence, zvýšení efektivnosti napájecích zdrojů nebo možností stínění.

Seznam symbolů a zkratek

a	relativní hloubka vniku pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky (m)
B	magnetická indukce (T)
C	integrační konstanta (–)
d	průměr (m)
D	elektrická indukce ($C \cdot m^{-2}$)
E	elektrická intenzita ($V \cdot m^{-1}$)
E_i	indukované napětí (V)
f	frekvence (Hz)
H	magnetická intenzita ($A \cdot m^{-1}$)
h	vzdutí taveniny (m)
I	proud (A)
I_{ef}	efektivní hodnota elektrického proudu (A)
J	proudová hustota ($A \cdot m^{-1}$)
k	konstanta šíření elektromagnetického vlnění (–)
l	délka vodiče (m)
N	počet závitů (–)
P	tepelný tok, výkon (W)
q	příkon ($W \cdot m^{-2}$)
R	elektrický odpor (Ω)
r	poloměr (m)
S	obsah průřezu vodiče (m^2)
S	Poyntingův zářivý vektor ($W \cdot m^{-2}$)
t	čas (s)
T	teplota (K)
V	objem (m^3)
v	rychlost ($m \cdot s^{-1}$)
W_e	elektrická energie (J)
W_m	magnetická energie (J)
x_2	parametr hloubky vniku (–)
Z_{ch}	charakteristická impedance prostředí (Ω)

α	fázová konstanta (–)
β	měrný útlum (–)
γ	konduktivita ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
ε	permitivita ($\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$)
ε_r	relativní permitivita (–)
η	účinnost (–)
μ	permeabilita ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
μ_r	relativní permeabilita (–)
ρ	hustota vsázky ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ	rezistivita materiálu ($\Omega\cdot\text{m}$)
ρ_0	hustota náboje ($\text{C}\cdot\text{m}^{-3}$)
Φ	magnetický tok (Wb)
ω	úhlová frekvence ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
hloubka vniku.....	relativní hloubka vniku pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky

Důležité konstanty

$c = 3 \cdot 10^8$	rychlost šíření světla ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$	permitivita vakua ($\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$)
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	permeabilita vakua ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
$\pi = 3,14$	konstanta Pí

Matematické operátory

<i>rot</i>	rotace
<i>div</i>	divergence
∇	Laplaceův operátor
<i>grad</i>	gradient

Rozlišení veličin

Vektorové veličiny jsou psány *tučně kurzívou*

Skalární veličiny jsou značeny *kurzívou*

Fázorové veličiny jsou označeny pruhem nad veličinou, např. \vec{E}

1 Indukční ohřev

1.1 Historie

Základy pro ohřev kovů elektromagnetickou indukcí položil v roce 1831 anglický fyzik Michael Faraday. Během experimentu s dvěma cívkami omotanými kolem jádra ze železa od sebe navzájem izolovanými a napájenými pomocí baterie zjistil, že při vypnutí přívodu energie z baterie do první cívky tekla druhou cívkou po malou chvíli proud měřitelný pomocí galvanometru. Stejný, ale opačně orientovaný proud, detekoval i při zapnutí přívodu energie. Faraday z toho vyvodil, že elektrický proud může být vytvořen pomocí měnícího se magnetického pole. Tímto dokázal existenci elektromagnetické indukce a následně zformuloval Zákon elektromagnetické indukce. [1][2]

Po Faradayovi následovaly další důležité studie magnetického a elektrického pole. James Prescott Joule při svém studiu tepla generovaného v elektrickém obvodu formuloval Jouleův zákon, který říká, že množství tepla vyprodukovaná ve vodiči elektrickým proudem za sekundu je úměrné odporu vodiče a druhé mocnině proudu. Joule také studoval proměnu mechanické energie na tepelnou.

Velkou roli ve studiu elektromagnetismu měl samozřejmě James Clerk Maxwell, který na základě poznatků Faradaye, Ohma, Joulea a Ampereho ve studiu elektřiny a magnetismu a aplikací matematických aparátů odvozených Gaussem, Greenem a dalšími matematiky odvodil svoji teorii elektromagnetismu. Zkombinoval tím tehdejší poznatky o elektřině a magnetismu, vysvětlil fakta známá v této době a zároveň dokázal předpovědět další poznatky, jako například elektromagnetický charakter světla a další. Všechny své poznatky shrnul v Maxwellových rovnicích (viz. rovnice (1.3), (1.4), (1.5) a (1.6)).

O něco později objevil Nicola Tesla rotující magnetické pole a tím položil základy střídavým motorům. Studoval také vícefázové elektrické systémy následně uplatněné v transformátorech a rozvodech elektrické energie.

V druhé polovině 19. století se začala objevovat první využití tepla produkovaného elektrickou energií, nejprve využívající teplo vznikající díky odporu vodiče a při elektrickém oblouku. William Siemens, Henri Moissan a později také Paul Héroult vynalezli několik velmi účinných elektrických obloukových pecí.

V roce 1887 navrhl Angličan Sebastian de Ferranti využití indukční pece pro tavení kovů. Jeho prvotní návrh byl následně vylepšen F. A. Kjellinem a dalšími inženýry. Kjellin v roce 1899 nakonec postavil první funkční indukční pec s kanálkem, která dokázala roztavit až 50 kg oceli.

Na začátku 20. století byl připraven návrh indukční kelímkové pece, pro absenci vhodných zdrojů energie ale nebyla uvedena do praxe. V této problematice dále pokračovali další vědci, např. Francouz E. Saladin nebo Němec A. Debuch, oba uvažující o vysokofrekvenčních pecích, ale jejich experimenty byly zastaveny 1. světovou válkou. První návrh vysokofrekvenční kelímkové pece nakonec tedy připadl na Američana Edwina F. Northupa, který využil generátor o frekvenci 20 kHz.

Další rozvoj indukčního ohřevu přišel v roce 1922 s vývojem motor-generátorů, které výrazně zvýšily účinnost dodávky elektrické energie pro účely indukčního ohřevu.

S příchodem druhé světové války se indukční tavení, stejně jako mnohá další odvětví, intenzivně rozvíjela. Indukční tavení bylo hojně využíváno k výrobě zbraní a vojenské techniky.

Po konci druhé světové války nastal v tomto odvětví spíše postupný vývoj zaměřený na zvyšování účinnosti tavení. [3]

1.2 Princip indukčního ohřevu

Zařízení indukčního ohřevu je ve své podstatě vzduchový transformátor, kde primární stranou je cívka a sekundární stranou spojenou nakrátko vsázka. Indukční zařízení vždy sestává ze zdroje, cívky a vsázky. Cívkou prochází střídavý proud a do vsázky je přijímáno elektromagnetické vlnění cívkou vyzářené. Ve vsázce se tak indukují vířivé proudy. Vsázka musí být z elektricky vodivého materiálu, jelikož u elektricky nevodivých materiálů není indukční ohřev možný.

Materiál vsázky je charakterizovaný svým odporem podle vztahu:

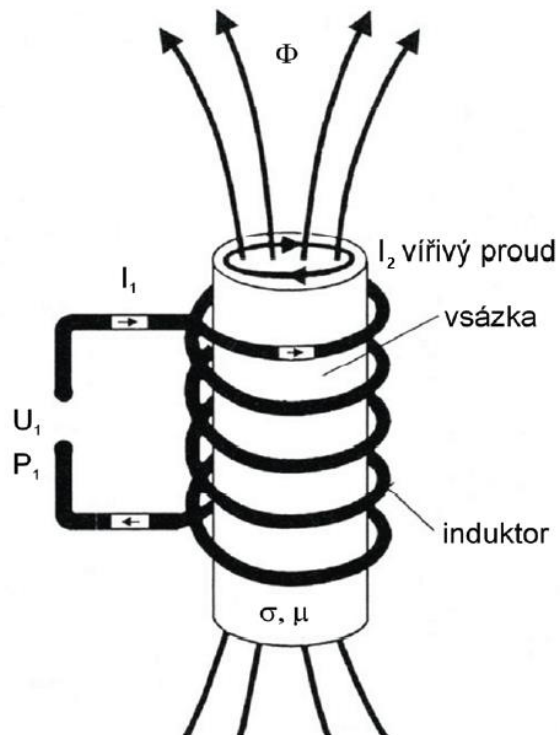
$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (1.1)$$

Ohřívání materiálu vsázky se poté dosahuje díky tomuto odporu, který brání průchodu proudů, a díky tomu vznikajícím Jouleovým ztrátám, které jsou popsány následujícím vztahem:

$$P = RI_{ef}^2 \quad (1.2)$$

Teplo se do vsázky nedostává přímo tepelným spádem, jako například u zařízení odporových, ale pomocí střídavého magnetického pole se vytváří až přímo ve vsázce.

Znamená to, že je zahřívána jen vsázka a zároveň není s žádnou další částí mechanicky vázaná. To je jednou z největších výhod indukčního ohřevu – všechny části mimo vsázku mohou zůstat studené, pokud je zařízení dobře odstíněno.



Obr. 1.1: Princip indukčního zařízení (převzato z [4])

U indukčního ohřevu je možné realizovat nezvykle velké měrné příkony do vsázky. S tím souvisí vysoká rychlost ohřevu a v porovnání s jinými metodami ohřevu vyšší účinnost. Dále můžeme vhodnou volbou kmitočtu proudu, kterým je napájen induktor a do kterého je umístěna vsázka, ovlivnit rozdělení tepla ve vsázce. Tento parametr se nazývá efektivní hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky. Tomuto parametru a jeho vlivu na indukční ohřevy se více věnuji v kapitole 2.1.

Další výhodou indukčního ohřevu je víření vsázky pomocí elektromagnetického působení proudu v cívce, kterým se dosahuje rovnoměrného promíchání vsázky. Výhodné je to zejména pro výrobu ocelí a slitin, pro které je indukční ohřev jediným vhodným ohřevem. Z principu indukce při tomto typu ohřevu také nevzniká žádný odpad nebo spaliny.

Mezi nevýhody je nutné zařadit hlavně vysokou cenu indukčních pecí s velkým objemem, jelikož je jejich konstrukce náročná. Při pořízení se také musí počítat s vyšší cenou měničů frekvence. [5]

1.3 Obecné elektromagnetické vlnění [6][7]

Elektromagnetické pole je obecně forma hmoty, kterou vybudí pohyb elektrických nábojů. Díky tomu má určitou hmotnost, energii, hybnost a moment hybnosti. Jeho interakce s jakoukoliv látkou je provedena pomocí elektrických nábojů v látce. Elektromagnetické pole je složeno ze dvou složek, elektrické a magnetické, jejichž vektory jsou na sebe navzájem kolmé. Elektrickou složku popisuje intenzita elektrického pole \mathbf{E} , magnetickou složku intenzita magnetického pole \mathbf{H} . Pokud se elektromagnetické pole šíří konečnou rychlostí, nazývá se elektromagnetická vlna. Tato elektromagnetická vlna se ve vakuu šíří rychlostí světla.

Pro odvození rovnic obecného elektromagnetického vlnění se vychází z Maxwellových rovnic. Uvažujeme neohrazené, homogenní, izotropní klidné prostředí, ve kterém se šíří elektromagnetické vlnění. Prostředí je charakterizováno materiálovými konstantami ε , μ , γ . Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru vypadají následovně:

$$\text{I. M. R.:} \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\text{II. M. R.:} \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$\text{III. M. R.:} \quad \text{div } \mathbf{D} = \text{div } \varepsilon \mathbf{E} = \rho_0 \quad (1.5)$$

$$\text{IV. M. R.:} \quad \text{div } \mathbf{B} = \text{div } \mu \mathbf{H} = 0 \quad (1.6)$$

Tyto 4 rovnice jsou doplněny materiálovými rovnicemi vyjadřující vliv prostředí na jevy v elektromagnetickém poli:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (1.7)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.9)$$

Dále platí také:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.10)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (1.11)$$

Uvažujme, že se v elektromagnetickém poli nenachází volný elektrický náboj, takže $\rho_0 = 0$ a poté III. Maxwellova rovnice vypadá následovně:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \operatorname{div} \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (1.12)$$

Z tohoto a ze IV. Maxwellovy rovnice (1.6) vyplývá:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \quad (1.13)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \quad (1.14)$$

Abychom se dostali k zobecněným rovnicím elektromagnetického vlnění, je výhodné nahradit první dvě Maxwellovy rovnice takovými rovnicemi, ve kterých se bude objevovat pouze jedna proměnná složka intenzity elektromagnetického pole, a to buď elektrická \mathbf{E} , nebo magnetická \mathbf{H} . Abychom se k tomu tvaru dostali, provedu nejprve rotaci první Maxwellovy rovnice (1.17) a dosadím za $\operatorname{rot} \mathbf{E}$ výraz z II. Maxwellovy rovnice (1.4):

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.15)$$

Pro dvojitou rotaci platí následující rovnice, pro kterou využijeme nezřídlovost pole ze IV. Maxwellovy rovnice ($\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$):

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{grad} (\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\nabla^2 \mathbf{H} \quad (1.16)$$

Rovnici (1.16) dosadím do rovnice (1.15):

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \gamma\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.17)$$

Tato rovnice je hledanou zobecněnou rovnicí elektromagnetického vlnění pro magnetickou složku intenzity pole. Analogickým odvozením rotací II. Maxwellovy rovnice a dosazením z I. se dostaneme i k rovnici pro elektrickou složku intenzity pole:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \gamma\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.18)$$

Tyto dvě rovnice jsou obecné rovnice elektromagnetického vlnění v prostředí s konstantními ε , μ a γ . Platí pro libovolné prostředí – elektricky vodivé nebo elektricky nevodivé – a pro libovolný časový průběh \mathbf{E} a \mathbf{H} .

Pro elektricky nevodivé prostředí platí $\gamma = 0$, v obou rovnicích tedy vypadne druhý člen:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon\mu} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r} \nabla^2 \mathbf{H} \quad (1.20)$$

Do této rovnice dosadíme rovnici pro rychlost šíření elektromagnetické vlny ve vakuu a v prostředí s permeabilitou μ a permitivitou ε :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (1.21)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad (1.22)$$

Dostáváme tedy následující rovnici:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \frac{c^2}{\varepsilon_r \mu_r} \nabla^2 \mathbf{H} = v^2 \nabla^2 \mathbf{H} \quad (1.23)$$

Obdobně pro elektrickou složku:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 \mathbf{E} \quad (1.25)$$

Pro prostředí dobře elektricky vodivé si upravíme rovnici (1.18):

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (1.26)$$

V závorce značí první člen v závorce vodivý proud ($\gamma \mathbf{E} = \mathbf{J}$) a druhý člen proud posuvný. Pro dobře vodivé vodiče se dá vůči vodivému proudu zanedbat proud posuvný, z čehož vyplývá:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \gamma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu} \nabla^2 \mathbf{E} \quad (1.28)$$

A znovu obdobně pro \mathbf{H} :

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu} \nabla^2 \mathbf{H} \quad (1.29)$$

Pro harmonicky proměnné průběhy intenzit \mathbf{E} a \mathbf{H} vycházíme z fázorového vyjádření veličin:

$$\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{E}_m e^{j\omega t} \quad (1.30)$$

Postupnou derivací dostáváme:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = j\omega \mathbf{E}_m e^{j\omega t} = j\omega \bar{\mathbf{E}} \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{E}_m e^{j\omega t} = -\omega^2 \bar{\mathbf{E}} \quad (1.32)$$

Obdobně pro intenzitu magnetického pole \mathbf{H} :

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_m e^{j\omega t} \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = j\omega \mathbf{H}_m e^{j\omega t} = j\omega \bar{\mathbf{H}} \quad (1.34)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{H}_m e^{j\omega t} = -\omega^2 \bar{\mathbf{H}} \quad (1.35)$$

Nyní upravíme rovnice elektromagnetického vlnění (1.17) a (1.18) dosazením předchozích rovnic do fázorového tvaru:

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j\omega \gamma \mu) \bar{\mathbf{E}} = \nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.36)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j\omega \gamma \mu) \bar{\mathbf{H}} = \nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.37)$$

Toto jsou vlnové rovnice harmonického elektromagnetického vlnění. Vyjadřují šíření obou složek elektromagnetické vlny. Tyto rovnice platí pro jakékoliv prostředí, tj. nevodivé i vodivé, a pro elektromagnetické vlnění rovinné a válcové.

V předchozích rovnicích se vyskytující činitel k je tzv. konstanta šíření elektromagnetického vlnění, která obsahuje elektrické vlastnosti prostředí a úhlovou rychlost vlnění.

$$k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - j\omega\gamma\mu = -j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon) \quad (1.38)$$

Konstanta šíření elektromagnetického vlnění má obecně reálnou a imaginární složku, reálnou část označíme α a imaginární část β .

$$k = \sqrt{-j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon)} = \alpha - j\beta \quad (1.39)$$

Reálnou a imaginární složku dostaneme dosazením rovnice (1.39) do rovnice (1.38). Upravením se dostaneme ke vztahům:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2} \right]} \quad (1.40)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2} \right]} \quad (1.41)$$

Konstanta α se nazývá fázová konstanta, konstanta β je měrný útlum.

Další konstanta, která vyjadřuje charakter prostředí, je i charakteristická impedance prostředí Z_{ch} .

$$Z_{ch} = \frac{\omega\mu}{k} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\gamma + j\omega\varepsilon}} \quad (1.42)$$

1.4 Poyntingův zářivý vektor [5][6]

Poyntingův zářivý vektor je zaveden jako názorný způsob pro výklad přenosu elektromagnetické energie a také pro pronikání elektromagnetického vlnění do vodivé stěny.

Poyntingův zářivý vektor značený \mathbf{S} ukazuje směr a hustotu toku elektromagnetické energie v prostoru za jednotku času.

Jeho hodnota v určitém bodě závisí na intenzitě pole elektrického \mathbf{E} a magnetického \mathbf{H} . Vychází se z úbytku celkového množství energie v uvažovaném objemu V , kdy používáme definici hustoty energie neboli množství elektromagnetické energie v jednotkovém objemu prostoru. Množství energie v tomto objemu je dáno množstvím elektrické energie W_e a magnetické energie W_m podle následujících vztahů:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{D} \mathbf{E} dV = \frac{1}{2} \varepsilon \int_V \mathbf{E}^2 dV \quad (1.43)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \mathbf{H} dV = \frac{1}{2} \mu \int_V \mathbf{H}^2 dV \quad (1.44)$$

Celková energie W elektromagnetického pole je tedy:

$$\begin{aligned} W = W_e + W_m &= \frac{1}{2} \int_V \mathbf{D} \mathbf{E} dV + \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \mathbf{H} dV = \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon \int_V \mathbf{E}^2 dV + \frac{1}{2} \mu \int_V \mathbf{H}^2 dV \end{aligned} \quad (1.45)$$

Intenzity elektrického pole \mathbf{E} a magnetického pole \mathbf{H} mají konstantní amplitudy, proto je úbytek množství energie z objemu V za čas t úměrný času t . Protože je rychlost ubývání konstantní, derivace podle času je rovna úbytku množství energie za 1 sekundu. Úbytek vyjadřuje znaménko minus před derivací.

$$P = -\frac{\partial W}{\partial t} \quad (1.46)$$

Energii W tedy zderivujeme:

$$P = -\frac{\partial W}{\partial t} = -\varepsilon \int_V \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} dV - \mu \int_V \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} dV \quad (1.47)$$

Z první (1.3) a druhé (1.4) Maxwellovy rovnice dosadíme za parciální derivace \mathbf{E} a \mathbf{H} :

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} (\text{rot } \mathbf{H} - \gamma \mathbf{E}) \quad (1.48)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{E} \quad (1.49)$$

Tyto dvě rovnice tedy dosadíme a upravíme:

$$\begin{aligned} P &= \int_V \mathbf{E}(\gamma \mathbf{E} - \text{rot } \mathbf{H}) dV + \int_V \mathbf{H} \text{rot } \mathbf{E} dV = \\ &= \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_V (\mathbf{H} \text{rot } \mathbf{E} - \mathbf{E} \text{rot } \mathbf{H}) dV \end{aligned} \quad (1.50)$$

Využitím vektorového počtu v rovnici (1.51), rovnici dále upravíme a dostaneme rovnici (1.52):

$$\mathbf{H} \text{rot } \mathbf{E} - \mathbf{E} \text{rot } \mathbf{H} = \text{div } (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \quad (1.51)$$

$$P = \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_V \text{div } (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV \quad (1.52)$$

Na tento vztah (1.52) použijeme Gauss-Ostrogradského větu (1.53), čímž nahradíme objemový integrál plošným integrálem:

$$\int_V \text{div } (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV = \oint_A (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dA = \oint_A \mathbf{S} dA \quad (1.53)$$

Po dosazení:

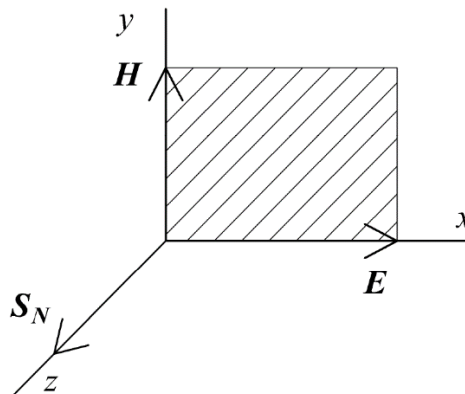
$$P = -\frac{\partial W}{\partial t} = \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \oint_A \mathbf{S} dA \quad (1.54)$$

První integrál ve vztahu (1.54) představuje Jouleovy ztráty, které se v objemu vyvíjí, pokud nepracujeme s dokonalým izolantem, tzn. $\gamma \neq 0$. Druhý integrál určuje, jaké množství elektromagnetické energie z objemu V vychází, neboli celkový vycházející výkon.

V rovnici (1.53) je hledaný Poyntingův vektor.

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.55)$$

Velikost Poyntingova vektoru představuje hustotu toku energie elektromagnetického pole neboli množství energie protékající jednotkovou plochou kolmou na plochu šíření za jednotku času. Tento vektor je určen vektorovým součinem \mathbf{E} a \mathbf{H} , které jsou na sebe navzájem vždy kolmé. Poyntingův vektor je proto vždy kolmý na rovinu, v níž fázory \mathbf{E} a \mathbf{H} leží. Směr Poyntingova vektoru se určí pravidlem levé ruky, tzn., pokud natočíme prsty ve směru \mathbf{E} a \mathbf{H} vstupuje do dlaně, prst ukazuje směr Poyntingova vektoru (viz. Obr. 1.2).



Obr. 1.2: Orientace Poyntingova vektoru (převzato z [7])

1.5 Válcové elektromagnetické vlnění [6]

V praxi je nejčastější pro zahřívání předměty i cívky nebo vinutí válcový tvar. Vzniká v nich poté válcové elektromagnetické vlnění. Z tohoto důvodu je výhodné se na válcové elektromagnetické pole zaměřit a blíže ho popsat.

Zdroj tohoto válcového elektromagnetického vlnění je plocha tvaru válce s poloměrem r_l , velmi dlouhou – teoreticky nekonečnou – délkou, a střídavý proud plochou protéká tak, že proudová vlákna jsou kolmá oproti ose válce. Díky tomu jevy závisí pouze na jednom parametru cylindrických souřadnic, obvykle na poloměru r , a na souřadnicích φ a z nezávisí.

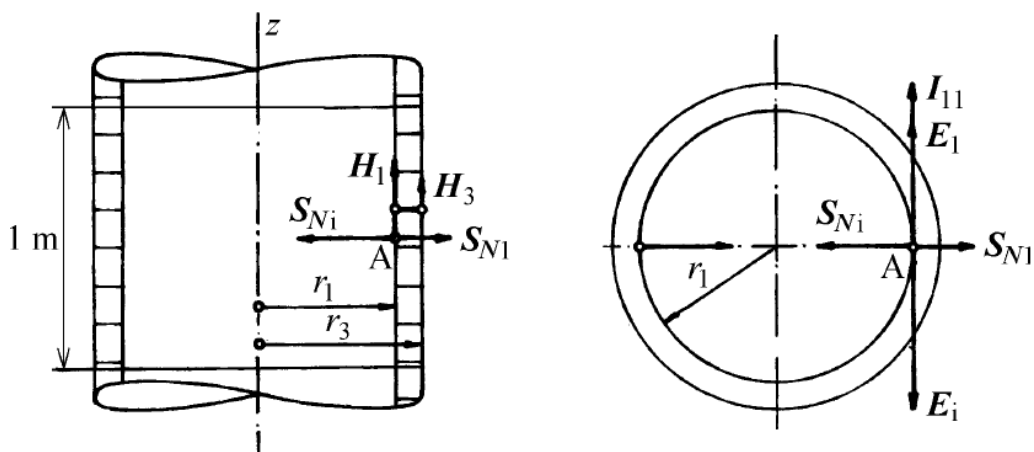
Abychom tuto nekonečně dlouhou válcovou plochu mohli realizovat, uvažujeme cívku navinutou z vodiče obdélníkového průřezu, která má mezi závity nulovou tloušťku izolace a stoupání závitů je proti poloměru cívky r_l zanedbatelné. Tím se splní podmínka pro proudová vlákna, která takto leží přibližně v rovinách kolmých k ose cívky. Rychlost šíření proudové vlny závity cívky předpokládáme nekonečně velkou.

Pokud je válec natočen tak, aby osa Z válcového souřadnicového systému splynula s osou válce, vektory \vec{E} , \vec{H} a \vec{S} jsou v libovolném místě cívky funkcí pouze poloměru r a nezávisí na úhlu natočení φ od výchozí polohy, kterou si zvolíme, ani na vzdálenosti z od výchozí roviny.

V případě označení počtu závitů připadající na část cívky o délce 1 m jako N_{11} , a proud v závitěch je \vec{I}_1 , je poté proud v závitěch \vec{I}_{11} roven následujícímu vztahu:

$$\vec{I}_{11} = N_{11}\vec{I}_1 \quad (1.56)$$

Vzájemná orientace vektorů \vec{E} , \vec{H} a \vec{S} je vidět na následujícím obrázku (Obr. 1.3). Intenzita elektrického pole \vec{E}_1 na poloměru r_l má stejný směr a smysl jako proud \vec{I}_{11} . Intenzita magnetického pole \vec{H}_1 směřuje nahoru na vnitřní straně induktoru v závislosti na směru okamžitého proudu. Zářivý vektor \vec{S}_{N1} je určen vektorovým součinem intenzit elektrického a magnetického pole, který je pak kolmý na oba tyto vektory a do cívky vstupuje kolmo. Zářivý vektor \vec{S}_{N1} určuje velikost ztrát v cívce. Magnetický tok v dutině cívky je vybuzen protékajícím proudem \vec{I}_1 , čímž se v závitěch naindukuje napětí \vec{E}_l . Napětí \vec{E}_l je proti intenzitě \vec{E}_1 opačně orientované, proto \vec{E}_l společně s intenzitou magnetického pole \vec{H}_1 vektorovým součinem vytvoří zářivý vektor \vec{S}_{Nl} , orientovaný opačně než \vec{S}_{N1} a směřující radiálně do dutiny induktoru.



Obr. 1.3: Model válcové plochy (převzato z [7])

Pokud učiníme teoretickou úvahu, že uvažovaná cívka má nekonečnou délku, pak platí, že je intenzita \overline{H}_3 na vnější straně cívky nulová. Pak pro proud \overline{I}_{11} odvodíme tento vztah:

$$\overline{I}_{11} = \oint_s \overline{H} ds = \overline{H}_1 \cdot 1 - \overline{H}_3 \cdot 1 = \overline{H}_1 \quad (1.57)$$

Z tohoto vyplývá, že je intenzita \overline{H}_1 na poloměru r_1 určena proudem v induktoru \overline{I}_{11} procházejícím N_{11} závity (na 1 metr délky induktoru).

1.5.1 Obecné rovnice válcového elektromagnetického vlnění [6]

Obecné rovnice válcového elektromagnetického vlnění odvodíme z obecných fázorových rovnic, neboli z rovnic (1.36) a (1.37). Platí pro prostředí elektricky vodivé i elektricky nevodivé. Laplaceův operátor je nutné převést z pravoúhlé soustavy souřadnic do soustavy válcových souřadnic. To je možné pouze pro vektor \mathbf{H} , který splňuje podmínku, že má tento vektor směr osy Z válcového souřadnicového systému. Obecný výraz pro $\nabla^2 \mathbf{H}$ ve válcových souřadnicích je následující:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \quad (1.58)$$

Jak již bylo řečeno dříve, v případě válcového pole nezávisí intenzita magnetického pole \mathbf{H} na souřadnicích φ a z , ale mění se pouze s poloměrem r . Derivace podle φ a z jsou tedy nulové:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = 0 \quad (1.59)$$

Rovnice (1.58) potom přechází do tvaru

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} + \frac{1}{r} r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} \quad (1.60)$$

a po úpravě platí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (1.61)$$

Tento výraz dosadíme do již zmíněné obecné fázorové rovnice pro intenzitu magnetického pole (1.37):

$$\frac{d^2 \bar{\mathbf{H}}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\bar{\mathbf{H}}}{dr} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.62)$$

Když tuto rovnici dělíme konstantou šíření k^2 , bude výsledkem Besselova diferenciální rovnice nultého řádu s argumentem (kr) .

$$\frac{d^2 \bar{\mathbf{H}}}{d(kr)^2} + \frac{1}{(kr)} \frac{d\bar{\mathbf{H}}}{d(kr)} + \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.63)$$

Řešením Besselovy diferenciální rovnice je pak lineární kombinace cylindrických funkcí.

$$\bar{\mathbf{H}} = C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr) \quad (1.64)$$

C_1 a C_2 jsou integrační konstanty, ke kterým se dostaneme pomocí mezních podmínek. $J_0(kr)$ je cylindrická funkce první druhu (funkce Besselova), $N_0(kr)$ je cylindrická funkce druhého druhu (funkce Neumannova). Obě jsou pro argument nultého řádu (kr) .

Pro získání obecného řešení i pro elektrickou vlnu nemůžeme využít analogický postup jako pro magnetickou, musíme respektovat závislost $\bar{\mathbf{E}}$ na $\bar{\mathbf{H}}$ a vycházet z rovnice (1.36), využijeme tedy 1. Maxwellovu rovnici (1.3) a předchozí Besselovu diferenciální rovnici (1.64).

$$\text{rot } \bar{\mathbf{H}} = \gamma \bar{\mathbf{E}} + j\omega\varepsilon \bar{\mathbf{E}} = (\gamma + j\omega\varepsilon) \bar{\mathbf{E}} \quad (1.65)$$

Z 1. Maxwellovi rovnice vyjádříme intenzitu elektrického pole $\bar{\mathbf{E}}$ a využijeme vyjádření rot $\bar{\mathbf{H}}$ pro válcové souřadnice (odvození viz. literatura [6]).

$$\text{rot } \bar{\mathbf{H}} = -\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial r} \quad (1.66)$$

$$\bar{\mathbf{E}} = -\frac{1}{\gamma + j\omega\varepsilon} \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial r} \quad (1.67)$$

Derivací rovnice (1.64) a dosazením do předchozího vztahu (1.67) dojdeme k vyjádření intenzity \mathbf{E} .

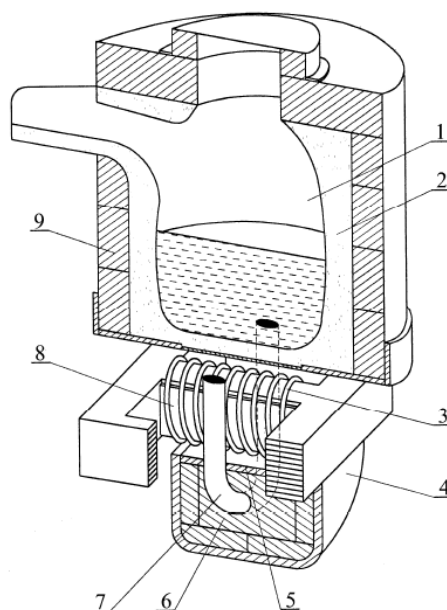
$$\bar{\mathbf{E}} = \frac{k}{\gamma + j\omega\varepsilon} [\mathbf{C}_1 J_1(kr) + \mathbf{C}_2 N_1(kr)] \quad (1.68)$$

kde $J_1(kr)$ a $N_1(kr)$ jsou cylindrické funkce I. a II. druhu, prvního řádu, obě argumentu (kr) .

1.6 Typy indukčních pecí

1.6.1 Indukční tavicí pec kanálková

Kanálkové pece se obvykle konstruují pro síťovou frekvenci 50 Hz, ojediněle na nižší (např. $\frac{50}{3}$ Hz). Pracují na principu transformátoru s uzavřeným magnetickým obvodem. Magnetický tok prochází železným jádrem z transformátorových plechů, tím je menší magnetizační proud v cívce a na chlazení induktoru – primární strany transformátoru - vystačí jen ofukování vzduchem. Nejčastěji se konstruují jako jednakanálkové, ale v některých případech se setkáme i s více kanálky, zejména se třemi, které jsou výhodné pro symetrickou zátěž třífázové sítě.



Obr. 1.4: Indukční kanálková pec (převzato z [7])

Základní schéma indukční kanálkové pece je na obrázku (Obr. 1.4). Sestává z nístěje 1, která je vyzděná žárupevným materiálem 2 na vrstvě izolace 9. Induktor 3 je uložen na prostředním sloupku magnetického jádra 8. Kanálek pece 7 je orientovaný vertikálně a ústí do nístěje pece. Také má kolem sebe žárupevnou vyzdívkou 6. Součástí obvodového pláště 4 je ochranný kryt 5, kterým je oddělena cívka a kanálek. Induktor, sloup magnetického jádra a kanálek tvoří dohromady indukční jednotku pece.

Promíchávání kovu v kanálku zajišťují elektrodynamické síly, které vznikají kolem kanálku. Jsou vybudeny proudem v kanálku a způsobují tlak na protékající kov, který je tím tlačěn od stěn kanálku a uvolňuje místo pro nový kov natékající podél stěn díky hydrostatickému tlaku. To zajišťuje materiální i teplotní homogenitu vsázky. Zároveň ale mohou elektrodynamické síly mít i negativní vliv, kdy se při překročení určitého příkonu pro daný hydrostatický tlak setkáváme s tzv. efektem uskrípnutí kovu v radiálním směru (neboli tzv. pinchefekt), kdy se tekutý kov může přetrhnout a přerušit procházející proud. To vede k nebezpečným výkonovým a silovým impulsům. U nových konstrukcích indukčních kanálkových pecí se využívá indukčních jednotek s usměrněným prouděním kovu, čímž omezíme nepříznivý pinchefekt.

V následující tabulce je vidět rozdíl mezi středními hodnotami hustoty proudu a měrného objemového výkonu pro neusměrněný a usměrněný pohyb kovu v kanálku.

Tab. 1.1: Hustoty proudů a měrných výkonů pro indukční kanálkové pece [8]

Tavený kov	Neusměrněný pohyb kovu v kanálku		Usměrněný pohyb kovu v kanálku	
	$P_{2,max}$	$J_{2,max}$	$P_{2,max}$	$J_{2,max}$
	(W·m ⁻³)	(A·mm ⁻²)	(W·m ⁻³)	(A·mm ⁻²)
Hliník	20	9,1	65	16,5
Zinek	50	12	90	16
Měď	50	15,4	95	21
Mosaz	60	12,2	100	15,8
Nikl	60	7,5	95	9,3
Ocel	60	6,6	95	8,3
Železo	60	6,9	95	8,7

Indukční kanálkové pece se využívají zejména pro tavení barevných kovů jako měď, hliník, nikl a jejich slitin. Také se používá na zušlechťování šedé litiny. Díky promíchávání kovů se užívá i jako dávkovač, případně mixér tekutých kovů. Podle typu použití existuje několik typů provedení indukčních kanálkových pecí.

Nevýhoda tohoto typu pecí je v nutnosti nalít již roztaveného kovu při první tavbě. Proto se využívají v místech, kde není provoz přerušován a nemění se složení tavených kovů. Přestože je jejich účinnost vyšší než účinnost indukčních tavicích pecí kelímkových, jejich celková energetická účinnost je nižší než u pece kelímkové, protože se část kovu musí udržovat na pracovní teplotě i mimo pracovní dobu. [5]

1.6.2 Indukční tavicí pec kelímková

Kelímkové indukční pece jsou v porovnání s kanálkovými konstrukčně jednodušší a jejich využití je více univerzální. Fungují na principu vzduchových jednofázových transformátorů, kde sekundární vinutí představuje tavený kov – ten může být umístěn v elektricky nevodivém, nebo méně často, v elektricky vodivém kelímku. Induktor s kelímkem jsou válcového tvaru. Elektromagnetické vlnění vyzářené z induktoru se přenáší elektricky nevodivým prostředím, vzduchem a stěnou kelímku, a v elektricky vodivém kovu se pohltí a přemění na Jouleovo teplo. Tím se vsázka postupně ohřívá a taví.

Indukční kelímkové pece se používají díky jejich univerzálnosti pro tavení nejrůznějších kovů – dá se v nich tavit v podstatě jakýkoliv magnetický nebo nemagnetický kov, různé oceli a litiny, převážně se ale využívají k výrobě vysoce kvalitní oceli. Dále se dají využít i jako udržovací nebo dohřívací pece.

Univerzálnost tento typ pecí dokazuje i v rozsahem používaných frekvencí, na kterých mohou být provozované. Na síťové frekvenci 50 Hz se používají pece pro tavení kovů a jejich slitin, kde se příliš nemění chemické složení. Obecně se využívají tam, kde probíhá sériová výroba, například pro železné kovy (ocele, litiny), méně často pro kovy s dobrou elektrickou vodivostí (hliník, měď) a speciálně pro lehké kovy (hořčík).

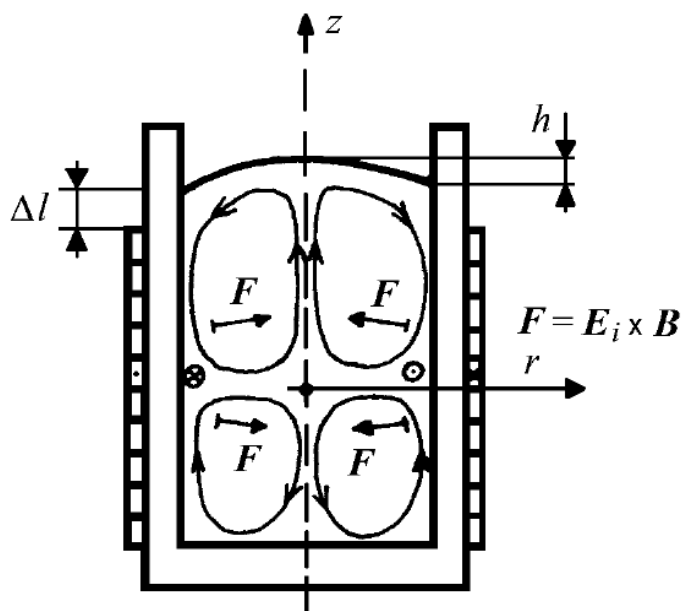
Středofrekvenční kelímkové pece, od 150 Hz až po 10 kHz, jsou použity pro tavení stejných kovů jako pece se síťovou frekvencí. Kelímky se konstruují s menším objemem, protože pro vyšší frekvence klesá hloubka vniku, a pro vyšší měrné výkony. Také se tu dají měnit tavené kovy, jelikož se vylévá celý obsah kelímku a pracují tedy na začátku tavby se studenou vsázkou.

Vyšší frekvence než 10 kHz jsou užívány pro speciální nebo laboratorní účely, kde se setkáme s mnohem menším objemem kelímků. [7]

Při tavení se využívá výhodných elektrodynamických sil působících na vsázkou v kelímku. Díky nim roztavený kov v kelímku silně víří – vlivem magnetických sil na vsázkou vznikne u stěny kelímku podtlak a v ose přetlak a tím se tavenina uprostřed kelímku vzdouvá. Toto vzdutí je vyjádřeno následujícím vztahem: [4]

$$h = 0,323 \cdot \frac{q}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}} \quad (1.69)$$

Vzdutí h tedy roste s příkonem q a s vodivostí γ a s klesající frekvencí f . Přestože je víření u tavení materiálů vítané, neboť zajišťuje homogenitu teplotní a materiálovou, u pecí pro frekvenci 50 Hz a u tavení lehkých kovů, jako je třeba hliník, víření limituje příkon pece. [5]



Obr. 1.5: Vliv elektrodynamických sil na tekutý kov v indukční kelímkové peci (převzato z [7])

Další problém tohoto typu pecí jsou 2 různá skupenství, ve kterých se při tavení vsázka nachází. Díky tomu se zvyšují nároky na optimalizaci pomocí výpočtů, na třídění vsázky a podobně. Také je to hlavní důvod k tomu, že pece pracující na síťové frekvenci ponechávají v kelímku 30 až 70 % roztaveného kovu, zvláště při tavení drobného šrotu, čímž se zkracuje doba tavení.

Tab. 1.2: Vliv kmitočtu na optimální kusovost vsázky [9]

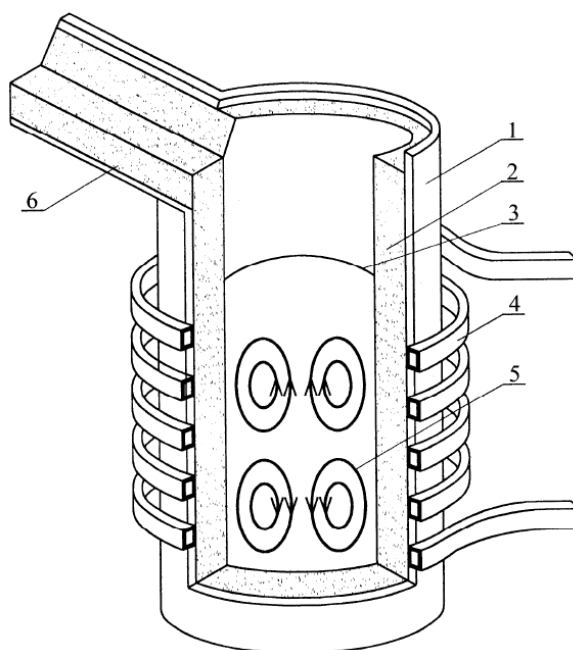
Frekvence (Hz)	d_{opt} (mm)		
	měď	ocel	
		20 °C	840 °C
50	44	320	340
500	14	99	107
2 000	7	50	54
10 000	3,1	23	24
100 000	1	7,2	8

Pro tavení v kelímkové peci se musí brát v potaz rozměr a kusovost vsazeného šrotu, kdy se optimální hodnoty vzhledem k materiálu a frekvenci výrazně mění. Také je důležitý vliv jakosti vsázky různých materiálů (viz. Tab. 1.3).

Tab. 1.3: Vliv jakosti vsázky na energetickou spotřebu (pro $f = 50$ Hz) [9]

Vsázka	Obsah (t)	Výkon (kW)	Produktivita (t/h)	Spotřeba energie (kWh/t)
Ocel	0,5 - 150	90 - 40 000	0,1 - 70	550 - 650
Litina	0,5 - 60	90 - 20 000	0,1 - 35	520 - 600
Měď	0,5 - 70	150 - 12 000	0,3 - 30	340 - 500
Mosaz	0,5 - 70	150 - 12 000	0,5 - 40	240 - 320
Hliník	0,5 - 25	80 - 6 000	0,1 - 12	480 - 650

Na obrázku (Obr. 1.6) je zobrazeno názorné schéma indukční kelímkové pece. Vnější obal kelímku je tvořen tepelně izolační vrstvou 1, pod kterou je žárupevná vrstva 2 kelímku, většinou z křemičitého písku. V kelímku je naznačeno víření tekutého kovu 5 a díky němu vznikající vzduť 3. Válcová ohřivací cívka 4 je navinutá jako jednovrstvá, většinou dutým měděným vodičem, kterým protéká chladicí voda. Zpracovaný tekutý kov se odlévá hubicí pece 6, kdy se celý kelímek nakloní ve většině případů pomocí hydraulických válců. Cívka je napájena proudem několika tisíc ampér, který je do ní zaveden měděnými lany a pásovým vedením, chladicí voda se přivádí izolačními hadicemi.



Obr. 1.6: Indukční kelímková pec (převzato z [7])

Kelímková pec s elektricky vodivým kelímkem funguje na stejném principu jako s elektricky nevodivým, má ale vyšší účinnost pro tavení dobře vodivých materiálů jako hliník a měď. Elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou dopadá na vnější povrch vodivého

kelímku, v jehož stěně následně indukuje proud. Kelímek se zahřívá a předává teplo vsázce. Menší část elektromagnetické energie přechází i do vsázky a přímo jí zahřívá.

Vodivý kelímek je oddělen od cívky keramickou vložkou. Při tavení hliníku a jeho slitin přicházejí v úvahu i nižší teploty, proto se využívá kelímek z ocelolitin. Pro vyšší teploty se setkáváme s tzv. grafitovými kelímky, které se zhotovují ze směsi šamotu a grafitu. Když zvýšíme poměr grafitu, zvýší se i vodivost, ale příliš velká vodivost není žádoucí.

Kelímkové pece s vodivým kelímkem se využívají například v mincovnách na výrobu slitin na ražení mincí. [7]

1.6.3 Indukční ohřívací zařízení

Indukční ohřívací zařízení se v principu podobají kelímkovým indukčním pecím. Využívají se ke zpracování hlavně kovových materiálů, a to jak magnetických, tak nemagnetických, pro novější typy v menším rozsahu i jiných materiálů (například v chemickém průmyslu). V porovnání s kelímkovou indukční pecí je jejich návrh ale komplikovanější, jelikož pracují na nižších teplotách a musí se brát v potaz i skutečná relativní permeabilita vsázky.

Tato ohřívací zařízení mají velmi široké možnosti použití a dělí se na následující tři hlavní typy.

1.6.3.1 Indukční ohříváče pro tváření kovů

Indukční ohříváče tohoto typu jsou určeny na různé způsoby tváření kovů. Mezi ně patří kování, válcování a podobné aplikace, kde se velká část objemu kovů musí ohřát na teplotu odpovídající danému účelu a zbytek objemu se ohřívá vedením tepla. V praxi je tento typ nejvíce využíván. Používá se ve strojírenství, hutnictví i automobilovém průmyslu.

Pro tyto účely je ohřívací zařízení sestaveno z více závitového induktoru vhodného tvaru, zařízení na dopravu vsázky, napájení, chladicího obvodu a také z regulačních a měřících členů. Podle určení indukčního ohříváče pro kusovou nebo sériovou výrobu se mění přizpůsobení konstrukce na periodický, respektive průběžný režim.

Základním požadavkem na tváření kovů je udržet teplotní rozdíl na charakteristickém rozměru vsázky v přípustných mezích. Z toho důvodu musí být ohřívací zařízení napájeno zdrojem správné frekvence, a to od frekvence menší než 50 Hz, přes síťovou frekvenci ($f = 50$ Hz), až po středně vysoké frekvence do 10 kHz. Zdroje napájecích proudů vyšší frekvence se využívají pouze výjimečně pro zpracování barevných kovů o malém

charakteristickém rozměru – a to o malém průměru válcové vsázky nebo o malé tloušťce vsázky deskové. [7]

1.6.3.2 Indukční ohřivače pro tepelné zpracování kovů

V této skupině ohřivačů se setkáme s přístroji na kalení, popouštění, nitridování, cementování, žíhání a podobně. Indukční ohřivače jsou využívány na zkvalitnění hlavně mechanických vlastností kovů, a to tvrdost, pevnost, tažnost a podobně. Na rozdíl od zařízení na tváření kovů se nepožaduje tak vysoká rovnoměrnost prohřátí, u povrchového kalení se dokonce vyžaduje pouze povrchový ohřev.

Ve srovnání s jinými typy ohřevů vykazuje indukční ohřev pro tyto účely velmi krátkou dobu procesu a nízkou měrnou spotřebu energie. [7]

1.6.3.3 Indukční ohřivače pro svařování, pájení a jiné účely

Díky novým statickým měničům frekvence a vysokofrekvenčním generátorům se dá indukčního ohřevu využít nejenom pro tavicí procesy a klasické tepelné zpracování, ale i v dalších technologiích. Ve strojním průmyslu se využívá indukčního ohřevu na sváření a pájení, v chemickém průmyslu se s indukcí setkáváme u výroby barev a laků a v menších aplikacích pro domácnosti soupeří s odporovým ohřevem, kde se stále více objevují indukční sporáky. Tento typ sporáků je výhodnější z energetického hlediska, protože se nepřenáší teplo, ale rovnou energii elektromagnetického vlnění a ve vhodné nádobě se naindukují vířivé proudy. Nevýhodou je nutnost speciálních nádob, které musí mít dno feromagnetické o určité tloušťce, kterému odpovídá také kmitočet zdroje ohřevu. [7]

2 Změny fyzikálních vlastností ohřivaných materiálů

2.1 Vliv frekvence [6]

Zásadní vliv na indukční ohřevy elektricky vodivých materiálů má hloubka vniku pronikání elektromagnetického vlnění do ohřivaného materiálu (zmíněno v kapitole 1.2). Hloubka vniku stanovuje, jak hluboko do materiálu prostoupí elektromagnetické vlnění a tedy kde se energie tohoto vlnění přemění na teplo. Vztah definující hloubku vniku je následující:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu_r\gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f\mu_0\mu_r\gamma}} \quad (m) \quad (2.1)$$

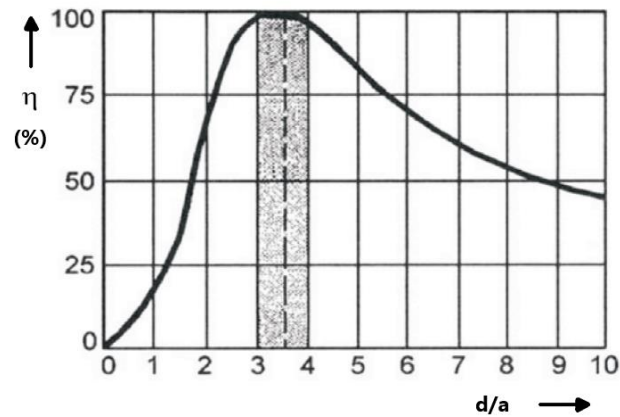
Pro praktické využití se vztah upravuje následovně:

$$a = \frac{\sqrt{10}}{2\pi} \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{f\gamma\mu_r}} = 5,033 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{1}{f\gamma\mu_r}} \quad (m, S \cdot m^{-1}) \quad (2.2)$$

Do výrazu (2.1) se dosadilo: $\omega = 2\pi f$, $\mu = \mu_0\mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7}\mu_r$.

Významným členem ve vztahu pro hloubku vniku a je frekvence f . S rostoucí frekvencí klesá hloubka vniku a dochází tak k ohřevu tenčí vrstvy vsázky, pokud naopak zvolíme frekvenci nižší, prohřeje se větší část vsázky. Tomuto jevu se říká skinefekt, při kterém je proudová hustota vytlačována k povrchu vsázky. Toho se dá využívat pro konkrétní účely daného ohřevu. Aby se materiál efektivně prohřál v co nejmenším čase, musí se správně zvolit poloměr prohřivaného tělesa. Z obrázku (Obr. 2.1) je vidět, že optimální poloměr je třikrát až čtyřikrát větší oproti hloubce vniku. Pro přesnější hodnoty se dá odvodit tzv. optimální tloušťka stěny (odvozeno v literatuře [6]), což je taková tloušťka stěny, při které je odpor pro naindukovaný střídavý proud, a tedy i ztráty ve stěně, minimální. Optimální tloušťka stěny je

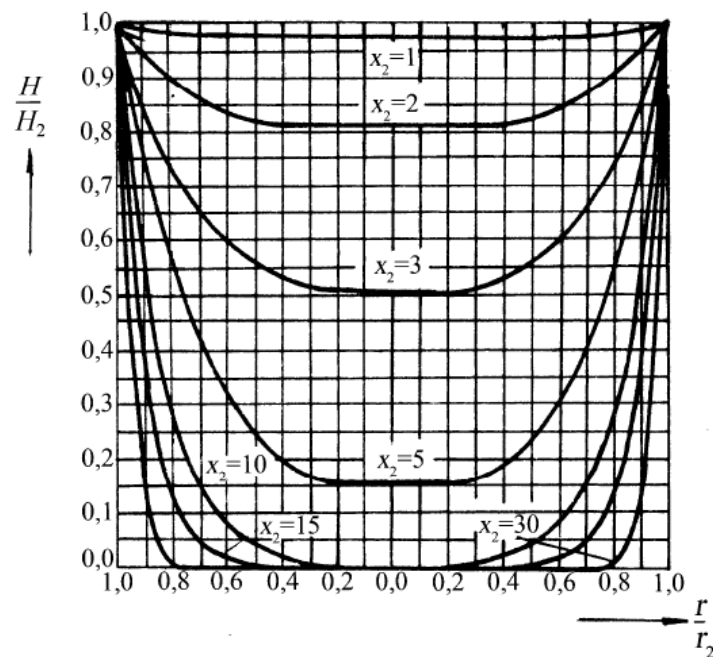
$$d_{opt} = 1,57 \cdot a \quad (2.3)$$

Obr. 2.1: Závislost účinnosti η na poměru d/a (převzato z [4])

Hloubka vniku je definována také jinou teorií, jako hloubka vniku naindukovaných proudů. S touto proudovou hustotou je spojen vznik tepla ve vsázce. Rozložení proudové hustoty je znázorněno v závislosti na parametru x_2 :

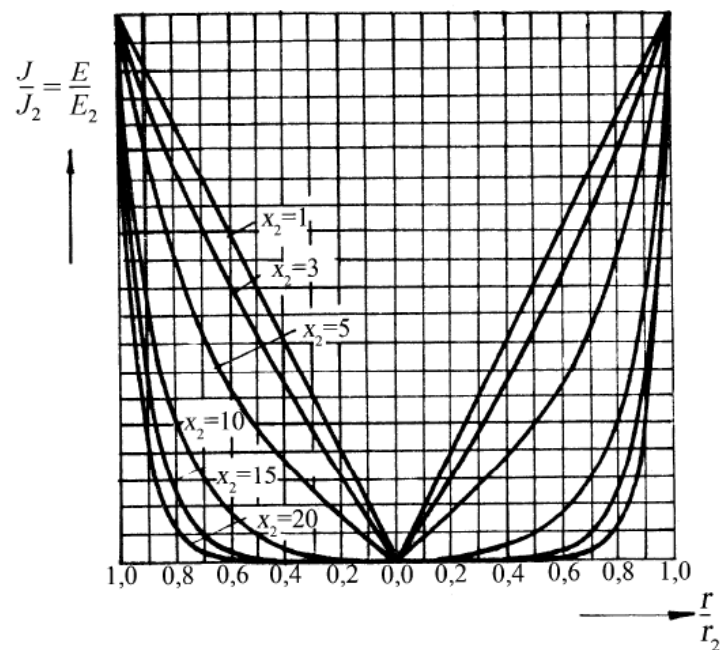
$$x_2 = \frac{r_2}{a} \sqrt{2} \quad (2.4)$$

kde r_2 je vnější poloměr vsázky a a je hloubka vniku definována ve vztahu (2.2). Rozložení magnetického pole a hustoty proudu ve válcové vsázce v závislosti na argumentu x_2 je na obrázcích (Obr. 2.2), resp. (Obr. 2.3).

Obr. 2.2: Rozložení magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti x_2 (převzato z [7])

Rozložení magnetického pole na obrázku (Obr. 2.2) se pro malý argument x_2 téměř nemění. Roste-li argument x_2 , magnetické pole se v ose vsázky zeslabuje a pro $x_2 > 10$, kdy je hloubka vniku a malá oproti vnějšímu poloměru vsázky r_2 , klesá H v ose válcové vsázky skoro na nulovou hodnotu. To je způsobeno tím, že proti magnetickému toku Φ_1 o konstantní intenzitě H_1 buzenému cívkou, působí magnetický tok Φ_2 posunutý téměř o plný úhel π proti toku Φ_1 , vybuzený naindukovaným proudem v cívce.

Rozložení hustoty proudu na obrázku (Obr. 2.3) klesá pro malé hodnoty argumentu x_2 lineárně od povrchu k ose válcové vsázky, pro velké x_2 je povrchový jev výraznější a převážná část naindukovaného proudu zůstane v povrchové vrstvě vsázky.



Obr. 2.3: Rozložení hustoty proudu ve válcové vsázce v závislosti x_2 (převzato z [7])

S rozložením hustoty proudu souvisí i množství vytvořeného tepla ve vsázce. Jelikož je hodnota hustoty proudu nejvyšší na povrchu vsázky, množství vyvinutého tepla je největší na povrchu a s přibližováním k ose vsázky ubývá. Vztah pro množství tepla P_a v povrchové vrstvě rovné jednonásobku hloubky vniku a je odvozen v literatuře [6] a vypadá následovně:

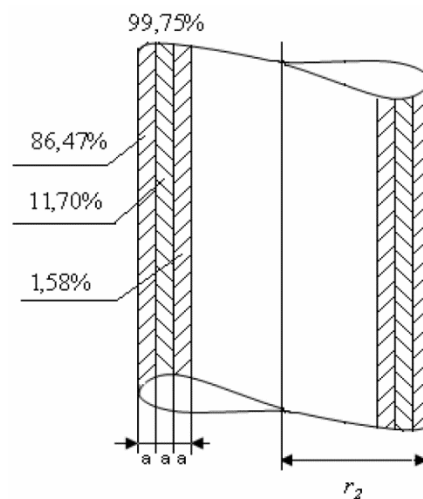
$$P_a = \rho \frac{2\pi r_2}{a} (N_{11} I_{1ef})^2 (1 - e^{-2}) = 0,8647 \cdot P_{21} \quad (2.5)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že se v povrchové vrstvě rovné hloubce vniku přemění 86,47 % z celkového absorbovaného množství elektromagnetické energie. Analogicky se dají stanovit vztahy pro dvojnásobně a trojnásobně tlustou povrchovou vrstvu $2a$, resp. $3a$.

$$P_{2a} = \rho \frac{2\pi r_2}{a} (N_{11} I_{1ef})^2 (1 - e^{-4}) = 0,9817 \cdot P_{21} \quad (2.6)$$

$$P_{3a} = \rho \frac{2\pi r_2}{a} (N_{11} I_{1ef})^2 (1 - e^{-6}) = 0,9975 \cdot P_{21} \quad (2.7)$$

Ve vrstvě s hloubkou $2a$ se utlumí dalších 11,7 %, ve vrstvě hloubky $3a$ ještě 1,58 %. Celkem se tedy prakticky všechno teplo, kromě 0,25 %, vyvine ve vrstvě o tloušťce $3a$. Například pro tavicí pece, kde bývá hloubka vniku oproti poloměru vsázky malá, tedy mluvíme o poměrně tenké vrstvě vsázky (viz. obrázek (Obr. 2.4)).



Obr. 2.4: Množství tepla vyvinuté v povrchových vrstvách vsázky (převzato z [6])

2.2 Elektromagnetická průzařnost [10]

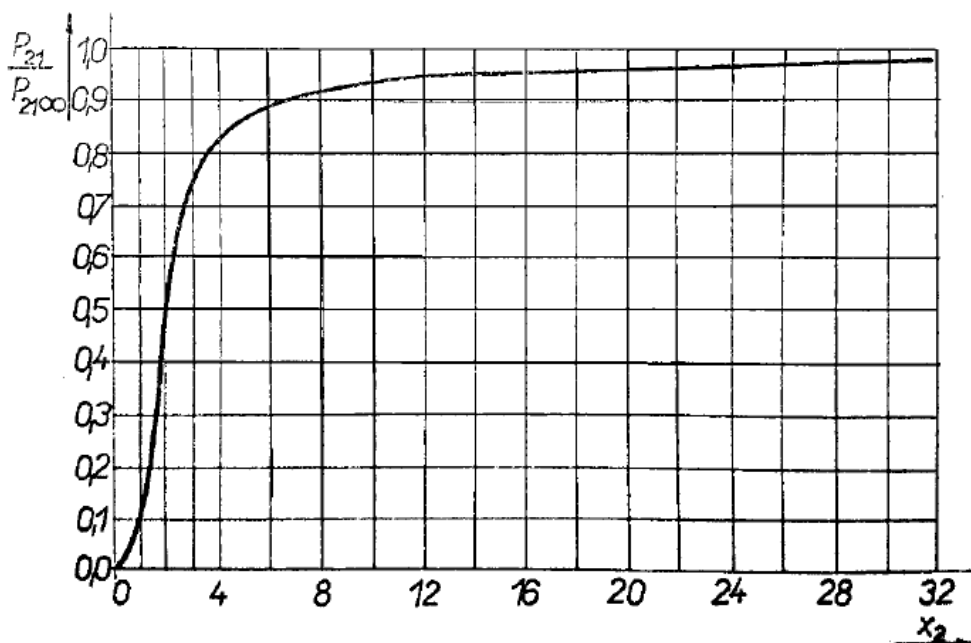
Při zvolení příliš nízké frekvence vzniká při indukčním ohřevu materiálu nežádoucí jev tzv. elektromagnetické průzařnosti. Pro rovinné vlnění se postupná vlna elektromagnetického vlnění vyruší s vlnou odraženou. Pro válcové pole se elektromagnetické vlnění dopadající radiálně na povrch vsázky vyruší s polem vlnění dopadajícího na protější stranu vsázky, pokud je zvolena příliš nízká frekvence a elektromagnetické vlnění se ve vsázce neutlumí (názorně viz. obrázky (Obr. 2.6), (Obr. 2.7)). Pokud bude válcová vsázka o průměru menším než $2\pi a_2 \approx 6a_2$, vzniká tedy nežádoucí jev

tzv. elektromagnetické průzařnosti, který omezí vznik tepla ve vsázce. To je pro indukční ohřev nevýhodné, a proto volíme pro ohřev vyšší frekvenci. Klesne tím hloubka vniku a , změní se poměr d/a a průzařnost klesne. Volba frekvence je důležitá, protože zároveň není výhodné prohřívání příliš tenké vrstvy vsázky, kdy by se výrazně prodloužila doba tavení materiálu, a tím se zvýšily tepelné ztráty. Například u transformátorových plechů je naopak průzařnost vítaná a nutná, aby se plechy transformátoru neohřívaly.

Pro množství tepla, které se vyvine ve válcové vsázce o průměru r_2 s intenzitou magnetického pole H_2 na povrchu, platí následující vztah:

$$P_{21} = \rho \pi x_2 P(x_2) H_2^2 \quad (2.8)$$

Závislost množství absorbované elektromagnetické energie, která se ve vsázce přeměňuje na teplo, na argumentu x_2 , je na následujícím obrázku (Obr. 2.5). Pro malý argument x_2 má funkce $P(x_2)$ také malou hodnotu, je tedy materiál průzařný, dané elektromagnetické vlnění projde materiálem a v teplo se přemění jen částečně.



Obr. 2.5: Závislost vzniklého tepla ve vsázce na argumentu x_2 (převzato z [10])

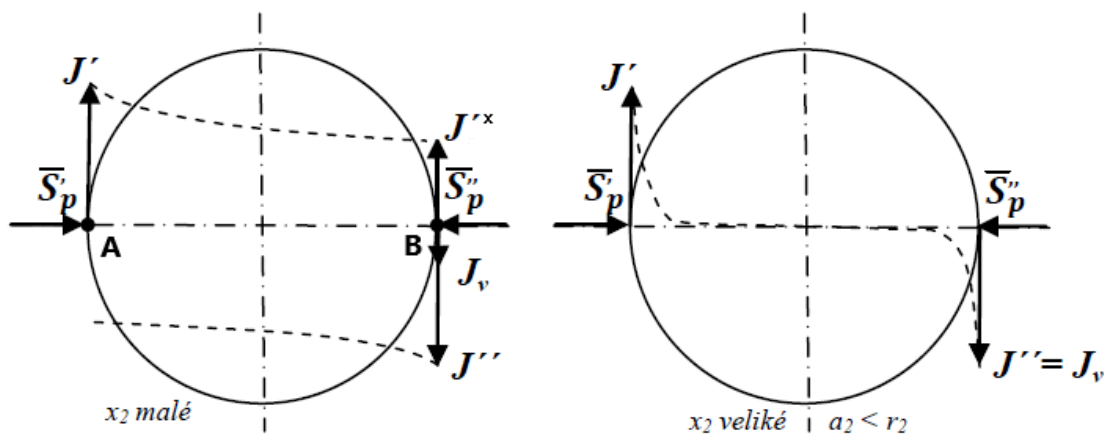
Na obrázku (Obr. 2.6) je názorně ukázán vliv průzařnosti pro určité elektromagnetické vlnění pro různé parametry x_2 . Z povrchu cívky je vyzářeno toto elektromagnetické vlnění, které na povrch válcové vsázky dopadá radiálně. Označeno je vektory S'_p a S''_p . Hustoty

proudů J' a J'' jsou vyvolané dopadajícím vlněním. Jejich výsledná hodnota J_v je daná jejich rozdílem v daném místě. Pro levý obrázek je v bodě B výsledná hodnota J_v rovna rozdílu J'' a neutlumené složky J'^x :

$$J_v = J'' - J'^x \quad (2.9)$$

Pro bod A se výsledná proudová hustota odvodí analogicky. Velikost neutlumené složky J'^x omezuje ohřev na požadovanou teplotu.

Na levém obrázku pro nízké x_2 odpovídající velké hloubce vniku se elektromagnetická vlna neutlumí a výsledná hodnota proudové hustoty je nízká, vsázka se tak ohřívá málo. Pravý obrázek pro velké x_2 , kterému odpovídá malá hloubka vniku, ukazuje druhý extrém, kdy se povrch vsázky přehřívá, a objevují se ztráty vyzařováním tepla do okolí.

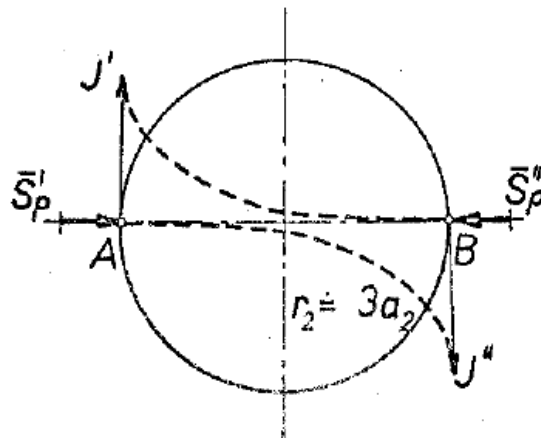


Obr. 2.6: Vliv průzařnosti na proudovou hustotu J (převzato z [10])

Nejvýhodnější varianta je znázorněna na obrázku (Obr. 2.7). Znázorňuje optimální kmitočet, pro který platí následující vztah mezi poloměrem vsázky r_2 a hloubkou vniku a :

$$r_2 = (2,5 \div 3) \cdot a \quad (2.10)$$

Vrstva, ve které se teplo vyvíjí, tak není příliš tenká a zároveň se elektromagnetické vlnění v povrchové vrstvě vsázky téměř utlumí a uprostřed má hustota proudu z obou stran nízkou hodnotu. To je výhodné zejména pro ohřevy celého objemu vsázky, například pro prohřívání.



Obr. 2.7: Vliv průzračnosti na podovou hustotu J pro dopadající vlnění z obou stran pro optimální poloměr r_2 (převzato z [10])

2.3 Měrná elektrická vodivost

Měrná elektrická vodivost je velmi výrazně závislá na teplotě. Při některých aplikacích může během ohřevu vzrůst měrný odpor až desetinásobně. Pro obvyklé indukční prohřívání trvá většinou ohřev delší dobu (v řádech minut) a v této době se působením tepelné vodivosti dostatečně vyrovná teplota a zároveň vodivost γ v celé tloušťce. Pokud není možné s tímto předpokladem počítat, využívá se střední teplota stěny, což je aritmetický střed teplot na obou rozhraních. K této střední teplotě se pak hledá odpovídající měrná elektrická vodivost. [6]

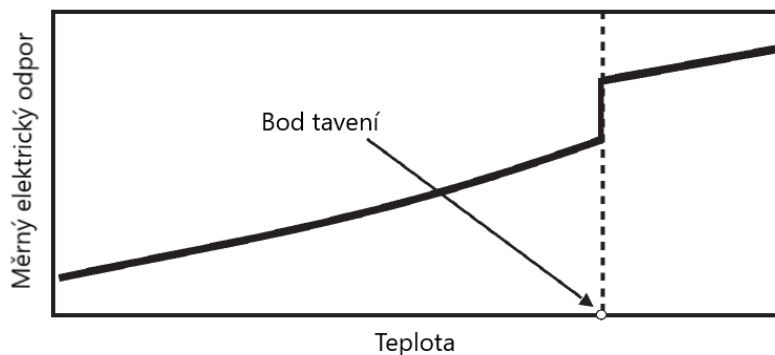
Závislost měrného odporu ρ se pro většinu čistých kovů dá aproximovat jako lineární funkce teploty, pokud nenastává změna fáze materiálu. [1]

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.11)$$

Člen ρ_0 je elektrická rezistivita při teplotě T_0 , $\rho(T)$ je rezistivita při teplotě T a α je teplotní koeficient elektrické rezistivity.

Pro některé elektricky vodivé látky může být α záporné (např. grafit) a rezistivita ρ s teplotou bude klesat. Pro jiné (např. uhlíkaté oceli atd.) je α nelineární funkcí teploty.

Při tavení se obvykle elektrický odpor kovů prudce zvýší (viz. obrázek (Obr. 2.8)).



Obr. 2.8: Výrazné zvýšení měrného odporu při tavení kovů (převzato z [1])

2.4 Vliv permeability [5]

Permeabilita μ je fyzikální veličina, která vyjadřuje vliv určitého materiálu nebo prostředí na účinky působícího elektromagnetického pole. Určit jí lze z následujícího vztahu:

$$\mu = \frac{B}{H} \text{ (H} \cdot \text{m}^{-1}\text{)} \quad (2.12)$$

Hodnota permeability vakua μ_0 je

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (2.13)$$

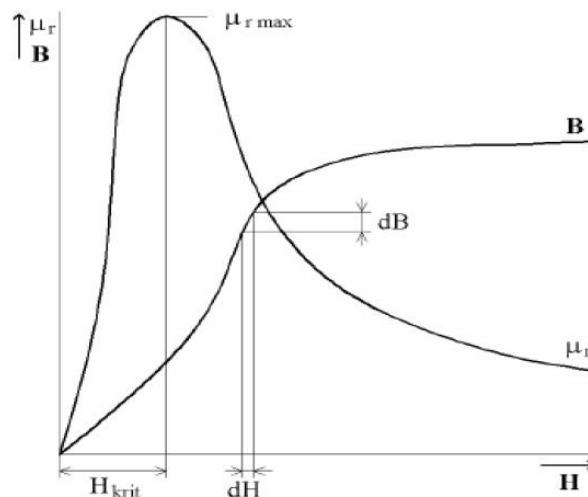
Materiály mají různý vliv na magnetické pole, některé ho zesilují, jiné naopak oslabují. Proto se zavádí bezrozměrná veličina relativní permeabilita μ_r nabývající hodnot od nuly do hodnot výrazně vyšších než 1. Látky s relativní permeabilitou větší než 1 magnetické pole zesilují, naopak látky s relativní permeabilitou menší než 1 magnetické pole oslabují. Vyjádřením relativní permeability je poměr permeability μ a permeability vakua μ_0 .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.14)$$

Dle hodnoty relativní permeability dělíme látky na diamagnetické ($\mu_r < 1$), paramagnetické ($\mu_r > 1$) a feromagnetické ($\mu_r \gg 1$). Paramagnetické látky zásadně neovlivňují magnetické pole a nejsou teplotně závislé. Diamagnetické látky magnetické pole zeslabují.

Naopak feromagnetické látky magnetické pole zesilují. Mají permeabilitu silně závislou na teplotě a důležitým parametrem je pro ně Curieho bod nebo Curieho teplota. Při dosažení teploty vyšší, než je Curieho teplota, ztrácí materiál skokově svoje feromagnetické vlastnosti a relativní permeabilita se změní z $\mu_r \gg 1$ (až 10^6) na $\mu_r = 1$. To výrazně ovlivňuje některé druhy indukčního ohřevu, například tavení oceli, při kterém je Curieho bod přibližně roven $760\text{ }^\circ\text{C}$. [10] Jelikož ovlivňuje hodnota relativní permeability také hloubku pronikání elektromagnetického vlnění pro ohřev elektromagnetickou indukcí, pak při skokové změně na Curieho teplotě dochází ke změně optimálních podmínek tavení a je nutno změnit frekvenci.

Ve všech základních vztazích jsme zatím uvažovali relativní permeabilitu μ_r jako konstantní, neboli že magnetická indukce \mathbf{B} závisí na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} lineárně. Taková závislost je pravdivá pro materiály nemagnetické, kde je $\mu_r \approx 1$ a také pro oceli při teplotách přesahující Curieho bod, neboli bod magnetické přeměny. Pokud ale počítáme ohřívací cívku pro ohřev oceli při teplotách pod Curieho teplotu, zaprvé bude relativní permeabilita $\mu_r > 1$, a zadruhé magnetická indukce \mathbf{B} nezávisí na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} lineárně, ale je dána magnetizační křivkou $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$. Magnetizační křivka je znázorněna na obrázku (Obr. 2.9).



Obr. 2.9: Magnetizační křivka a závislost relativní permeability na H (převzato z [5])

Podle obrázku (Obr. 2.9) se dá limitně napsat následující vztah:

$$d\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r d\mathbf{H} \quad (2.15)$$

Můžeme pak uvažovat μ_r konstantní na malém intervalu $d\mathbf{H}$. Z rovnice (2.15) si dále vyjádříme μ_r :

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{d\mathbf{B}}{d\mathbf{H}} \quad (2.16)$$

Křivka průběhu μ_r je derivační křivkou křivky magnetizační.

Pokud uvažujeme indukční ohřevy, hodnota \mathbf{H} je vždy velmi vysoká a tím ve všech případech výrazně přesáhne H_{krit} , ve které je relativní permeabilita maximální. Ohřívání materiálu se díky tomu magneticky silně přesycuje.

Magnetické toky jsou zdrojem elektromotorických sil, které omezují vířivé proudy v materiálu, proto je měřítkem topného účinku \mathbf{B} , které je závislé na \mathbf{H} dle magnetizační křivky. \mathbf{H} je závislé na čase, jelikož napájíme ohřívací cívku střídavým proudem, a závisí také na vzdálenosti x , která je měřená od povrchu ohřívání materiálu. Magnetická intenzita \mathbf{H} vlivem reakčních vířivých proudů směrem do vsázky rychle klesá. Platí tedy následující vztah:

$$\mathbf{H} = F_1(t; x) \quad (2.17)$$

Tento vztah (2.17) spojíme se dvěma přechozími a dostaneme:

$$\mathbf{B} = f[F_1(t; x)] \quad (2.18)$$

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{d\{f[F_1(t; x)]\}}{d[F_1(t; x)]} \quad (2.19)$$

Relativní permeabilita μ_r je tedy také funkcí času t i souřadnice x . Z toho vyplývá, že je permeabilita v každém okamžiku a v každé hloubce vsázky jiná. Obtížnému řešení Maxwellových rovnic s obecným μ_r se vyhneme, pokud budeme uvažovat následující zjednodušující předpoklady:

1. Průběh \mathbf{H} je sinusový v závislosti na čase

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_m \sin\omega t \quad (2.20)$$

2. Relativní permeabilita se rovná střední hodnotě $\mu_{stř}$ a je na čase nezávislá.

První předpoklad je v praxi dobře splněn. Kondenzátory připojené k ohřívací cívce s ní vytvoří rezonanční obvod naladěný přibližně na napájecí frekvenci. Aktivní obvod cívka-kondenzátory funguje jako přirozený filtr, který propouští jen sinusový průběh proudu.

Druhý předpoklad je pro praxi dostatečně splněn, pokud mluvíme o ohřívání obyčejných uhlíkatých ocelí.

Při sinusovém průběhu H_0 stoupá podle sinusovky a velmi rychle nastane nasycení vsázky do určité hloubky. Permeabilita μ_r výrazně klesne z důvodu překročení H_{krit} a dále se za kritickou hodnotou příliš nemění, můžeme permeabilitu μ_r nahradit střední hodnotou $\mu_{stř}$ příslušnou k H_{0ef} .

Nejprve tedy v prvním přiblížení řešíme Maxwellovy rovnice pro konstantní μ_r v celém rozsahu výpočtů a pak až ve druhém přiblížení počítáme s tím, že H směrem od povrchu vsázky do hloubky rychle klesá. S klesáním H roste μ_r podle magnetizační křivky do hloubky, z čehož vyplývá pokles hloubky vniku z hodnoty $a_{stř}$ na a_v . Protože poklesla hloubka vniku z $a_{stř}$ na a_v , vzrostl povrchový jev a klesl vodivý průřez, proto vzrostl i činný odpor vsázky $R_{2stř}$ na R_{2v} . Vlivem změny permeability na μ_v se změní také indukčnost vsázky z $L_{2stř}$ na L_{2v} .

Pro běžné uhlíkaté oceli je průběh magnetizační křivky pro vyšší hodnoty H u všech ocelí téměř totožný, došel L. P. Nejman teoreticky i měřeními k následujícím průměrným hodnotám:

$$R_{2v} = nR_{2stř} \quad (2.21)$$

$$L_{2v} \approx L_{2stř} \quad (2.22)$$

$$a_v = \frac{a_{stř}}{n} \quad (2.23)$$

kde $n = 1,37$.

Vztahy (2.21) a (2.23) platí jen za splnění podmínky, že se tloušťka materiálu ve směru šíření elektromagnetické energie (směr x) rovná alespoň 3 $a_{stř}$. Při malé tloušťce ve srovnání s $a_{stř}$ je pokles H směrem do hloubky vsázky (ve směru x) poměrně malý a popsáný jev vzrůstu permeability z $\mu_{stř}$ na μ_v se projeví méně – činitel n klesne z $n = 1,37$ například jen

na $n = 1,1$. Pro danou frekvenci jde už o průžařnost vsázky a neekonomický ohřev a je třeba zvážit, zda není vhodné zvolit vyšší frekvenci f nebo menší měrný příkon p_0 , čímž se sníží i H_0 a vzroste $\mu_{stř}$.

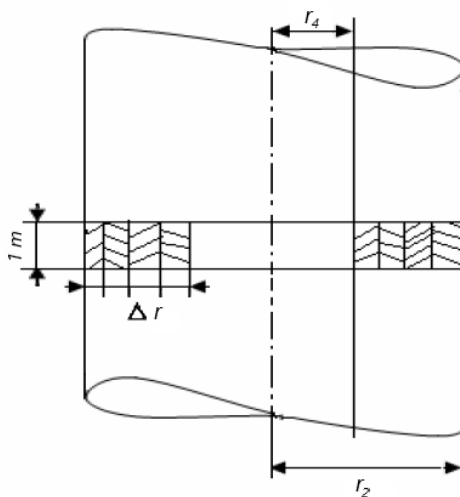
2.4.1 Střední permeabilita [10]

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, relativní permeabilita je závislá na teplotě a na intenzitě magnetického pole H . Intenzita magnetického pole při pronikání elektromagnetického vlnění do vodivé rovné stěny ubývá s rostoucí vzdáleností x od povrchu pro rovinné vlnění podle exponenciály, u válcového vlnění podle složitých cylindrických funkcí. Permeabilita má tak nejnižší hodnotu na povrchu, kde je maximální intenzita H , a směrem do vsázky její hodnota roste s klesající intenzitou H .

Střední permeabilita $\mu_{stř}$ se musí odvozovat jen ve výjimečných případech, kdy je konečná teplota prohřívání nižší, než je Curieho teplota. To nastane například u žíhání svarů ocelových trub při teplotě 600 °C. Pro tavicí pece a prohřívací zařízení pro kovárenské účely není třeba odvozovat střední permeabilitu $\mu_{stř}$, jelikož se výpočet provádí pro ocel již roztavenou (asi 1500 °C, resp. 1000 °C pro tváření), kdy je relativní permeabilita $\mu_r = 1$.

Abychom alespoň přibližně respektovali měnící se relativní permeabilitu uvnitř vsázky, odvodíme následujícím postupem hodnotu střední permeability $\mu_{stř}$, která bude dále považovaná konstantní v celém uvažovaném objemu.

Uvažujme válcovou magnetickou vsázku, u které je hloubka vniku a výrazně menší než poloměr r_2 , takže se válcové elektromagnetické vlnění může nahradit rovinným vlněním. Vsázku následně rozdělíme válcovými sousými řezy na jednotlivé vrstvy o tloušťce Δr (viz. obrázek (Obr. 2.10)).



Obr. 2.10: Vsázka (převzato z [10])

Magnetická intenzita \mathbf{H} v tomto případě ubývá se vzdáleností x od povrchu exponenciálně podle vzorce

$$\mathbf{H} = H_2 e^{-\frac{x}{a_2}} \quad (2.24)$$

kde je H_2 maximální hodnota magnetické intenzity na povrchu a a_2 je hloubka vniku definovaná ve vztahu (2.1), kde je hloubka vniku označena jako a . Upravený vztah vypadá následovně:

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \gamma}} \quad (2.25)$$

Pro určení průběhu \mathbf{H} musíme pro výpočet hloubky vniku nejdříve zvolit hodnotu permeability μ_v . Zvolená permeabilita μ_v by měla být stejná jako hledaná střední permeabilita $\mu_{stř}$. O správnosti volby μ_v se dozvíme dalším postupem. Pokud by se střední permeabilita $\mu_{stř}$ a zvolená permeabilita μ_v výrazně lišily, výpočet by musel být opakován.

Další postup řešení je v literatuře [10], kap. 1.5. Výsledkem je vyjádření hledané střední permeability $\mu_{stř}$ z rovnosti magnetických energií:

$$\mu_{stř} = \frac{\sum_{r_2}^{r_4} \mu_s \cdot H_s^2 \cdot r_s \cdot \Delta r}{\sum_{r_2}^{r_4} H_s^2 \cdot r_s \cdot \Delta r} \quad (2.26)$$

Pokud byla permeabilita μ_v zvolena správně, budou hodnoty střední permeability $\mu_{stř}$ a zvolené permeability μ_v značně blízké. V opačném případě je třeba celý výpočet zopakovat.

3 Parametry ovlivňující ohřevy kovů indukcí

Pro jednotlivé ohřevy kovů elektromagnetickou indukcí se setkáváme s různými požadavky. U prohřívacích zařízení je nutné co nejrovnoměrěji prohřát celý zahříváný materiál, naproti tomu při kalení chceme vsázku prohřát řádově do několikamilimetrové hloubky. Liší se i teploty, kterých je třeba při indukčním ohřevu dosáhnout. Aby bylo zařízení efektivní, je třeba ho správně navrhnout pro konkrétní případ využití. Tyto různé ohřevy kovů a parametry, ovlivňující jejich provoz, jsou popsány v následujících bodech této kapitoly.

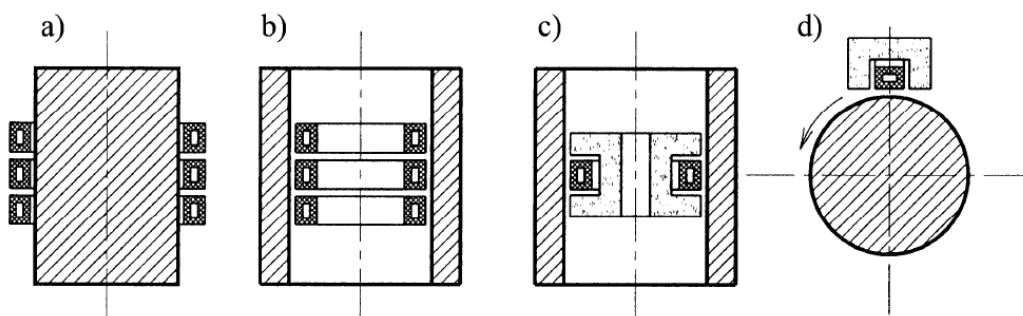
3.1 Povrchové kalení

Kalení je jedno z tepelných zpracování oceli, při kterém je snaha zlepšit její mechanické a fyzikální vlastnosti. Sestává ze dvou, okamžitě po sobě následujících operací – ohřevu a prudkého ochlazení. Tím se dosáhne zvýšení tvrdosti a pevnosti povrchové vrstvy materiálu. To je důsledkem změny struktury materiálu v této vrstvě, ve které při vhodné teplotě kalení vzniká martenzit nebo bainit s vysokou tvrdostí na úkor feritu a perlitu. Výhodou indukčního kalení je, že se vsázka nedeformuje teplem a kalením a vnitřek vsázky zůstává houževnatý.

Kalící teplota závisí na složení materiálu a rychlosti ohřevu. S rychlostí ohřevu stoupá i kalící teplota. Indukční kalení má vysokou rychlost ohřevu, pro obyčejné ocele bývá až 500 °C/s při teplotách tavení od 820 do 1020 °C.

Mimo doby kalení můžeme i vhodnou volbou kmitočtu regulovat tloušťku prokalení. Pro běžné kalení se používá frekvence od 150 do 10 000 Hz, ale pokud je materiál z drobných součástí, případně požadujeme malou hloubku prokalení, používají se vysoké frekvence (až 10⁶ Hz). Protože pro kalení je potřeba rychlý ohřev materiálu, aby se neohřívaly spodní vrstvy materiálu, používají se vysoké měrné výkony – pro středofrekvenční kalení 3·10⁶ až 5·10⁷ W·m⁻², pro vysokofrekvenční 5·10⁵ až 4·10⁶ W·m⁻².

Tvar induktoru je závislý na tvaru a velikosti vsázky. Vsázky s menším povrchem jsou obvykle ohřívány jednorázově pomocí cívky s jedním nebo málo závitů. Pro větší vsázky se používají průběžně pracující ohříváče s cívkou s více závitů, ve kterých se buď induktor anebo vsázka pohybují, aby se materiál rovnoměrně ohřál. [7]



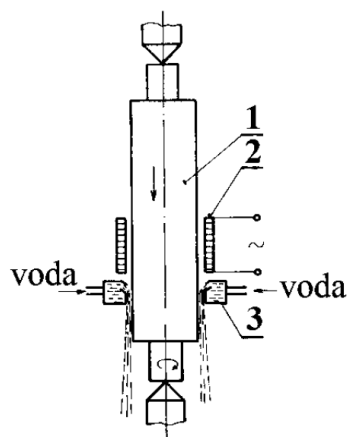
Obr. 3.1: Různé typy induktorů pro kalení: a) vícezávitový pro ohřev vnějšího povrchu; b) vícezávitový pro ohřev vnitřního povrchu; c) jednozávitový s jádrem pro ohřev vnitřního povrchu; d) jednozávitový plochý s jádrem pro ohřev válce s otáčivým povrchem (převzato z [8])

Induktory pro kalení mohou být v provedení s jádrem. Jádro funguje jako koncentrátor magnetického toku buzeného induktorem a omezuje tak vlivy induktoru na okolní konstrukce.

V praxi se kalení využívá pro povrchové kalení velkých ocelových válců pro válcovací stolice na plech, kalení klikových a vačkových hřídelí pro auta nebo kalení nástrojových ocelí.

3.1.1 Válcové pro válcovací stolice

Při kalení válce pro válcovací stolice je válec upevněn mezi hroty a při kalení se otáčí kolem své osy (viz. obrázek (Obr. 3.2)). Společně s tím, že válec při otáčení pomalu sjíždí dolů a prochází induktorem a sprchou, pomáhá udržet symetrii ohřevu. Válec se obvykle předeřeje bez sprchování a až poté se pustí voda do sprchy při válci v nejvyšší poloze. Ta válec prudce ochlazuje. Pokud by se válec kalil bez předeřevu, vznikal by směrem dovnitř příliš strmý teplotní spád. To by mělo za následek příliš ostrý přechod vrstev z tvrdé do měkké a vznik vnitřních pnutí a při válcování bychom se setkali s tzv. slupkovým jevem, kdy se tvrdé části válce od jádra mohou odlupovat, a válec by musel být z provozu vyřazen. [5]



Obr. 3.2: Postupné indukční kalení válců pro válcovací stolice (převzato z [7])

1 – válec, 2 - induktor, 3 – sprcha

3.1.2 Efektivní povrchové kalení

Jak už bylo zmíněno, u povrchového kalení je třeba zajistit, aby zahřátí povrchové vrstvy proběhlo velice rychle a zabránilo se šíření tepla k ose vsázky. Podle tloušťky vrstvy materiálu, kterou chceme prokalit, volíme vhodný kmitočet. Správně zvolen musí být i měrný příkon a doba kalení, které se volí na základě frekvence.

Frekvence se doporučuje volit podle vztahu

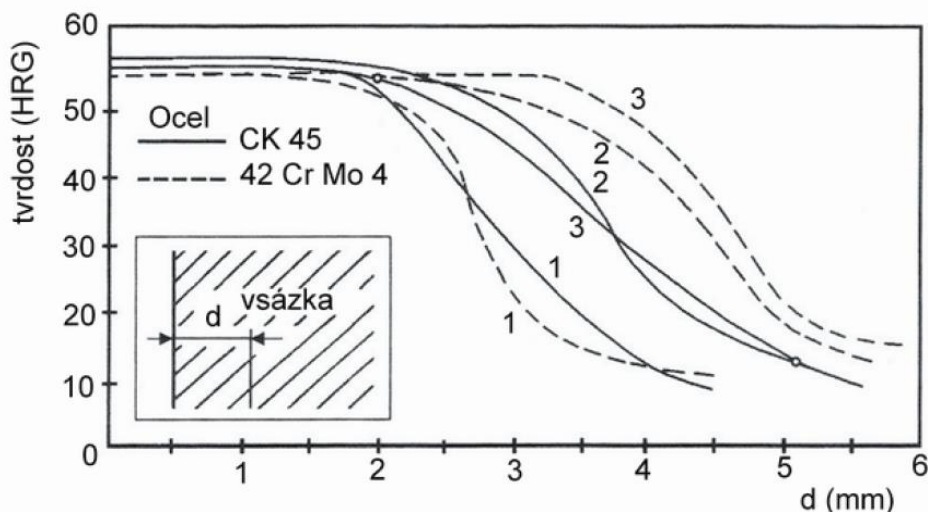
$$\frac{0,0144}{d^2} < f < \frac{0,25}{d^2} \quad (3.1)$$

ve kterém d je hloubka zakalení (mm) a f je frekvence.

Empiricky zjištěná závislost optimální frekvence (neboli takové frekvence, při které pracuje ohřívací zařízení s maximální elektrotepelnou účinností) je následující: [7]

$$f_{opt} = \frac{0,06}{d^2} \quad (3.2)$$

Z obrázku (Obr. 3.3), kde můžeme vidět hloubku zakalení pro ocel CK 45 (nelegovaná ocel k zušlechtnění) a 42 Cr Mo 4 (nízkolegovaná ušlechtilá chrom-molybdenová ocel k zušlechtování) je patrné, že pro různé požadované hloubky prokalení d budou vhodné různé frekvence. Pro menší hloubky je vhodná frekvence 400 kHz, u které bude ale vznikat až nepřijatelné přehřátí povrchu. Příliš výrazné přehřátí povrchu není z hlediska jakosti materiálu přípustné, proto je lepší pro větší hloubky prokalení volit nižší frekvence. [4]



Obr. 3.3: Hloubka zakalení pro různé frekvence (převzato z [4])

1 – $f = 400 \text{ kHz}$, 2 – $f = 10 \text{ kHz}$, 3 – $f = 4 \text{ kHz}$

Doba kalení se ve většině případů pohybuje v řádu sekund nebo zlomek sekund, jelikož je snaha ohřát povrchovou vrstvu vsázky co nejrychleji. Čím déle kalení trvá, tím větší roli hraje tepelná vodivost materiálu a tím více se zahřívá vsázka do hloubky. Pokud je zahřívání příliš rychlé a vnitřní pnutí příliš silné, mohou se objevovat praskliny na materiálu. Proto se zejména pro asymetrické části doporučuje prodloužit ohřivací čas s použitím nižší frekvence a nižšího měrného výkonu. [1]

3.2 Žihání

Žihání je tepelně-technologický proces pro zkvalitnění vlastností kovových materiálů. Obecně snižuje tvrdost, zlepšuje tažnost a snižuje vnitřní napětí. Spočívá v pomalém ohřevu kovů na požadovanou teplotu podle druhu žihání, z důvodu prohřátí výdrž na této teplotě a poté v pomalém ochlazování tak, aby gradient teploty v kovu byl ve všech fázích žihání malý. Podle požadované teploty ohřevu a pracovní atmosféry existuje několik typů žihání – například žihání naměkko, normalizační žihání nebo rekrystalizační žihání.

Žihací teploty se pohybují ve velkém rozsahu (od $500 \text{ }^\circ\text{C}$ do $1200 \text{ }^\circ\text{C}$), proto se pro různé typy žihání výrazně liší i jejich optimální podmínky.

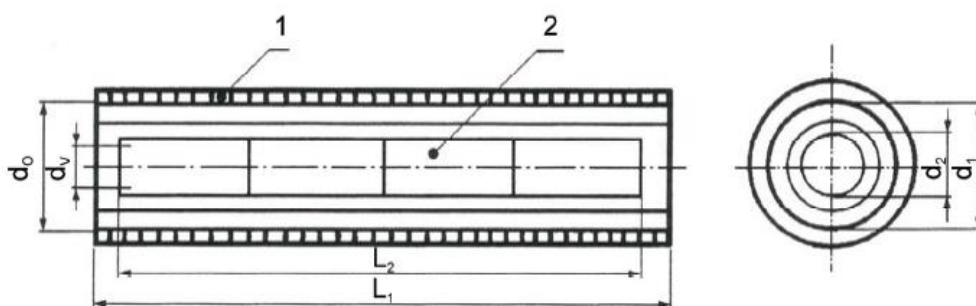
3.3 Prohřívání

Tato skupina indukčních ohřevů je v praxi nejvíce využívána. Indukční ohřevy pro tváření se osvědčily ve strojírenství, hutnictví a automobilovém průmyslu. Použití nachází

při hromadné výrobě zápusťkových výkovků, v továrnách na valivá ložiska, náradí, ohřevy tyčového materiálu a podobně.

Důležitým problémem pro tváření za tepla je rovnoměrné prohřátí materiálu. To znamená, že rozdíl mezi teplotou na povrchu materiálu ϑ_1 a teplotou v jeho středu ϑ_2 je minimální. Rovnoměrnosti je dosaženo, pokud na konci ohřevu je rozdíl těchto teplot menší než $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro kování a válcování různých ocelí, pro válcování barevných kovů by měl být do 20 až $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. [7] Válcové nebo čtyřhranné kovové vývalky je potřeba ohřát na kovací teplotu, která se u oceli pohybuje od $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dříve se k prohřívání využívaly pece palivové vytápěné plynem, práškovým uhlím nebo naftou, rovnoměrné prohřátí u tohoto typu pece trvá ale příliš dlouhou dobu a na povrchu materiálu dochází k oxidaci a ke ztrátám okujemi. Část materiálu je tak zničena a vzniklé okuje poškozují další zápusťky a zkracují jejich životnost. V porovnání s tímto typem pecí trvá prohřívání v indukční peci mnohem kratší dobu, nenastane tedy oxidace na povrchu. Ekonomicky je tedy indukční ohřev výhodnější. Jeho hlavní předností je vznik tepla přímo v ohřívaném materiálu elektromagnetickou indukcí a nikoliv sdílením tepla z teplejšího okolí, jako se děje u elektrických odporových pecí. [10]

Pro obvyklý válcový tvar je indukční ohřívací zařízení na obrázku (Obr. 3.4). Její hlavní částí je indukční cívka 1 o obvyklé délce asi 1 m . Jako vsázka 2 jsou např. vývalky, kterých je obvykle větší počet (4 až 7) stejné délky v induktoru. Podle průměru vývalků se volí i průměr induktoru ohřívacího zařízení.



Obr. 3.4: Indukční ohřívací zařízení na válcové vývalky (převzato z [10])

3.3.1 Efektivní prohřívání

Abychom dosáhli rovnoměrného prohřátí materiálu, je nutné správně zvolit kmitočet. Teplo se z povrchové vrstvy, kde vzniká indukčním ohřevem, šíří vedením dále směrem k

ose vsázky. Je výhodnější, aby povrchová vrstva nebyla příliš slabá, nesmíme tedy zvolit frekvenci příliš vysokou. Zároveň musí nastat absorbování energie s dostatečnou účinností a povrch se nesmí přehřívat. Optimální kmitočet je takový, pro který platí následující vztah:

$$r_2 = (2,5 \div 3) \cdot a_2 \quad (3.3)$$

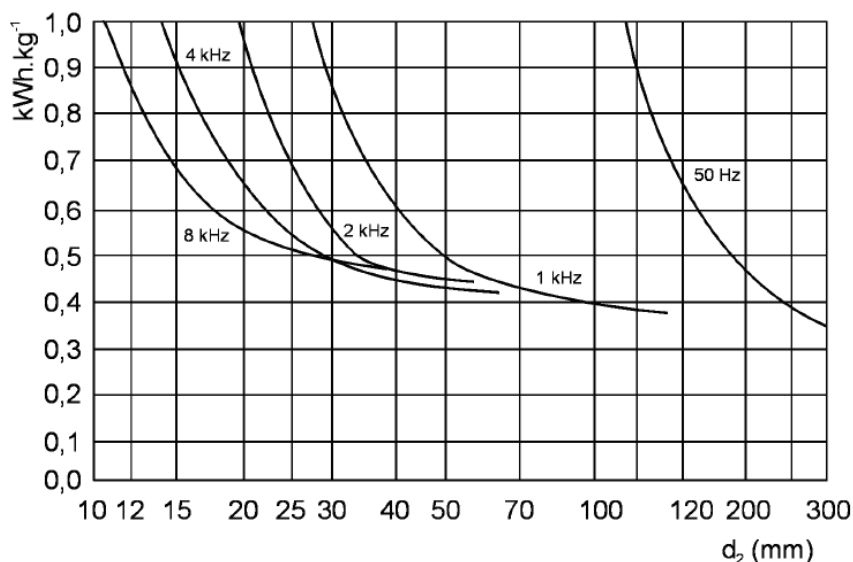
kde r_2 je poloměr vsázky a a_2 je hloubka vniku pro již prohřátý materiál (tj. nemagnetický, pokud jde o ocel). [4]

V praxi se využívají frekvence pro indukční prohřívání oceli v závislosti na průměru vývalků (viz. tabulka (Tab. 3.1)). Každý kmitočet se dá použít v širokém rozsahu průměrů vývalků.

Tab. 3.1: Volba frekvence pro indukční prohřívání oceli [4]

f (Hz)	50	500	1000	2000	4000	8000
d (mm)	160 ÷ 500	80 ÷ 280	50 ÷ 180	35 ÷ 120	22 ÷ 70	15 ÷ 50

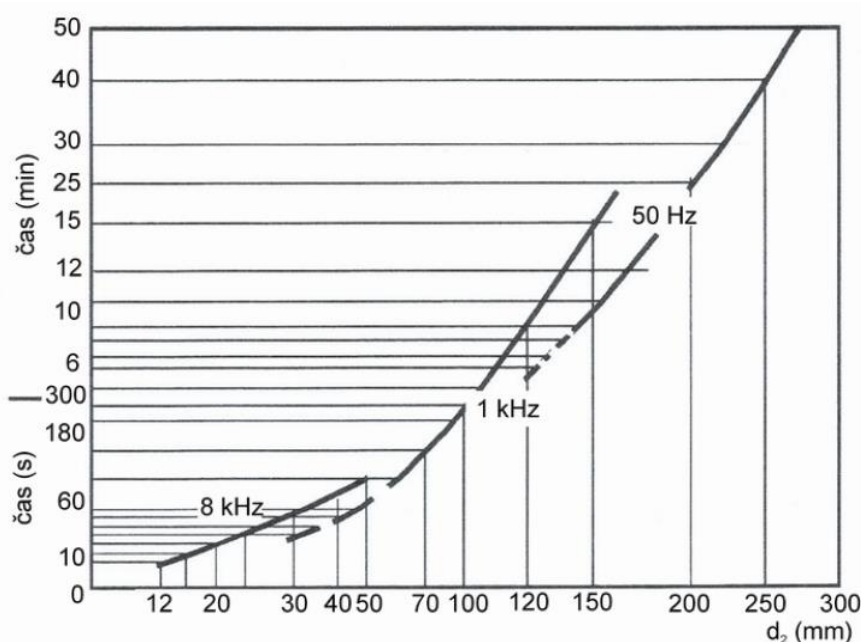
Jak je zřejmé z následujícího obrázku (Obr. 3.5), měrná spotřeba na prohřátí 1 kg oceli roste, když se blížíme k dolní hranici rozsahu. Je to tím, že se materiál stává elektromagneticky průzařným.



Obr. 3.5: Graf měrné spotřeby (převzato z [4])

Doba t , potřebná k rovnoměrnému prohřátí oceli, se obvykle nepočítá a bere se z příslušného diagramu, kterým je například prospekt belgické firmy ACEC

(viz. obrázek (Obr. 3.6)). Doba ohřevu se dá zkrátit asi o třetinu při použití tzv. rychloohřevu. Pro rychloohřev je část cívky na začátku induktoru provedena se zhuštěnými závitů. Tím v místě vstupu studených vývalků do induktoru vzroste intenzita magnetického pole a vložené kusy se tam zahřejí rychleji na vyšší teplotu. V dalším průběhu ohřevu, kdy je prohřívání pomalejší, se rozdíly teploty postupně vyrovnají. [10]



Obr. 3.6: Diagram doby prohřívání (převzato z [4])

3.4 Tavení

Tavení je proces, při kterém se změní skupenství taveného materiálu z pevného na kapalné. Využívá se hlavně ve slévárnách k tavení ocelí a v hutnictví pro výrobu vysoce kvalitní oceli. Popis indukční kanálkové a kelímkové pece, používaných na tavení, je v odstavci 1.6. Tato kapitola bude zaměřena na podmínky pro efektivní tavení.

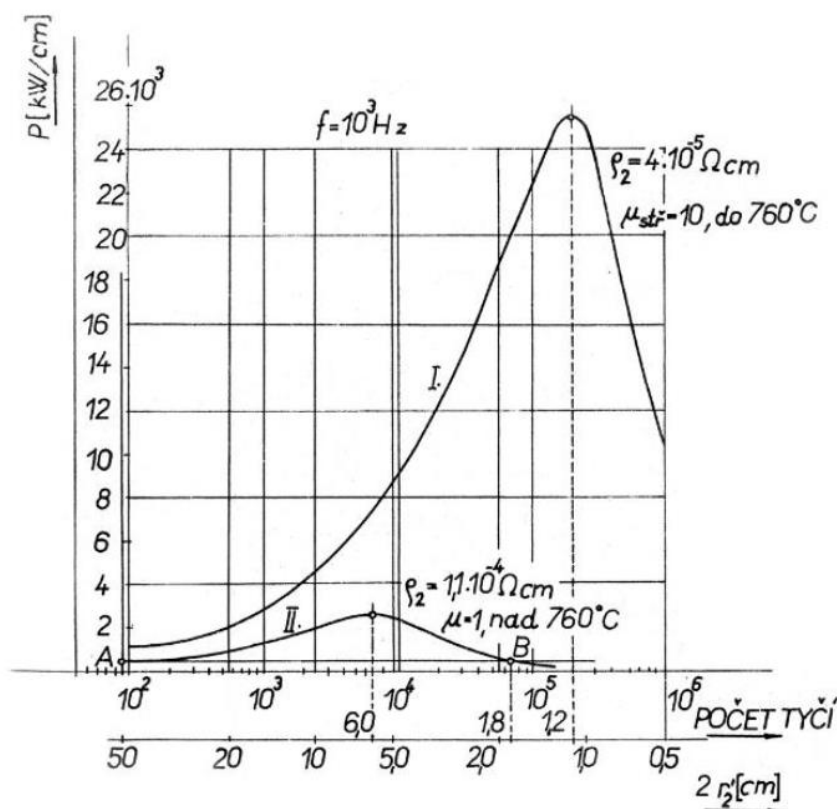
3.4.1 Efektivní tavení v indukční kelímkové peci

Vsázka se při tavení postupně ohřívá a po dodání dostatečného množství elektromagnetické energie se přemění z tuhé, kusové vsázky na tekutou, nekusovou. Při tomto procesu prochází třemi rozdílnými stavy, které se liší teplotou. První stav je do Curieho bodu (přibližně 760 °C), kdy je vsázka tuhá, v kusech a magnetická. Relativní permeabilita μ_r závisí na intenzitě magnetického pole a na druhu oceli – využívá se tzv. střední permeabilita $\mu_{stř}$ (viz. kapitola 2.4). Měrný odpor ρ roste s teplotou v rozmezí od 10^{-5} do $7 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{cm}$.

Nad Curieho teplotou je vsázka tuhá, v kusech a nemagnetická. K tavení dochází asi při 1400 °C. Relativní permeabilita μ_r je rovna 1. Měrný odpor dále roste až asi do hodnoty $1,2 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{cm}$.

Nad teplotou 1400 °C je vsázka tekutá a nemagnetická. Mění se pouze její měrný odpor, který stále stoupá až na $1,4 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{cm}$. [10]

Indukční tavicí pece jsou zpravidla plněny tříděným šrotem, který se skládá z kusů stejného druhu oceli různých tvarů a velikostí. Je stěžejní zvolit vhodný kmitočet napájecího proudu tak, aby vsázka nebyla průzařná a absorbovala tak co největší množství elektromagnetické energie. Je také třeba, aby velikost jednotlivých kusů šrotu byla přibližně stejně velká. Kdyby tomu tak nebylo, různé kusy by se prohřívaly jinak. Takto obecný případ nelze teoreticky vyšetřit, proto se kovový šrot nahrazuje soustavou válcových tyčí s poloměrem r_2 ze stejného materiálu, sousýdých s cívkou, s izolací nulové tloušťky mezi tyčemi. Pomocí této úvahy se sestavují diagramy, ze kterých můžeme určit kusovost vsázky. Na obrázku (Obr. 3.7) je diagram pro určení kusovosti pro tavení v kelímkových pecích.



Obr. 3.7: Diagram pro stanovení průměru tyčí (převzato z [10])

Průběhy závislostí *I* a *II* jsou stanoveny na základě výpočtu podle vztahu pro teplo vzniklé ve válcové vsázce P_{2I} (viz. rovnice (2.8)).

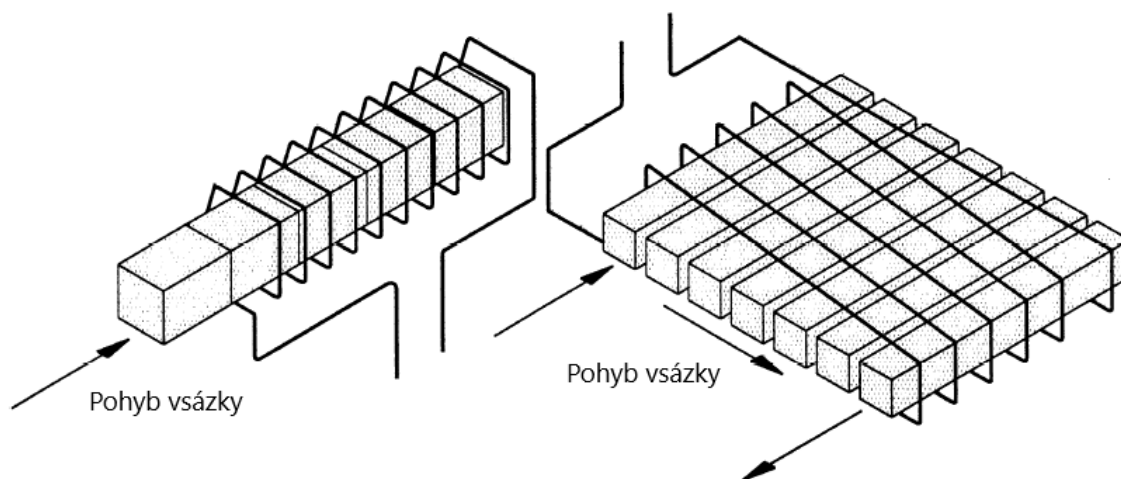
Křivka *I.* na předchozím obrázku představuje příkon do vsázky při magnetickém stavu, naproti tomu křivka *II.* ukazuje hodnoty pro nemagnetický stav. Množství absorbované elektromagnetické energie je v nemagnetickém stavu výrazně nižší, v maximu až desetkrát. Pro tavení šrotu v kelímkové peci je tedy rozhodující nemagnetický stav ($\mu_r = 1$). Minimální průměr bude dán bodem *B*, pro který je minimální hodnota řezu kusem šrotu 1,8 cm. Pokud budou rozměry řezů kusů šrotu větší než tato hodnota, bude se elektromagnetická energie rychle absorbovat i v nemagnetickém stavu, teplota bude stoupat a dojde k roztavení oceli.

Dalším limitujícím faktorem pro kelímkové pece je vzduť popsán v kapitole 1.6.2. Vzduť by mělo být u tavicích pecí menší, než je tloušťka strusky na povrchu taveniny. To bývá okolo 6 až 8 cm. Pokud je vzduť vyšší, nastává obnažování povrchu a tím rychlá oxidace. Tento poznatek je potřeba brát v úvahu hlavně u tavicích pecí na síťovou frekvenci 50 Hz. [11]

4 Možnosti zvyšování účinnosti indukčních ohřevů

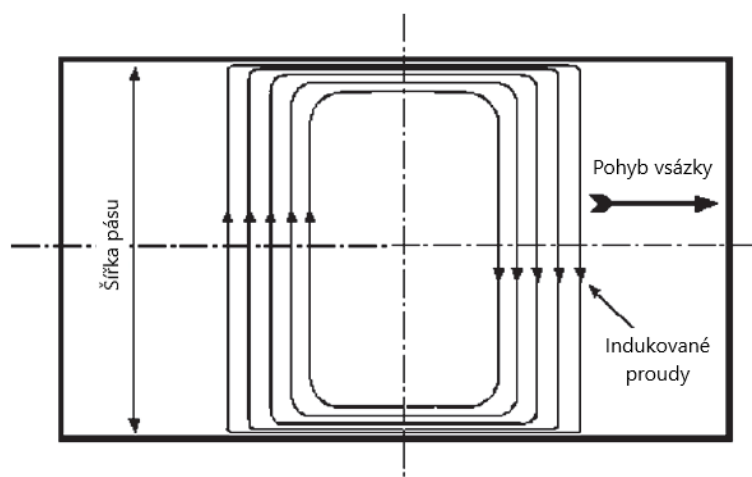
4.1 Příčné pole

Ohřevy elektromagnetickou indukcí v příčném poli jsou speciálním typem indukčních ohřevů. Osy vsázky a induktorů jsou navzájem kolmé a siločáry prostupují napříč materiálem. Rozdíl mezi podélným a příčným polem lze vidět na obrázku (Obr. 4.1).



Obr. 4.1: Porovnání podélného (vlevo) a příčného ohřevu vsázky (převzato z [7])

Indukční ohřev v příčném elektromagnetickém poli se využívá v případech, kdy nelze s ohledem na hloubku vniku naindukovaných proudů a vysoké průřažnosti využít ohřev v podélném elektromagnetickém poli. Příčné elektromagnetické pole je z důvodu orientace nezávislé na hloubce vniku, proto není třeba vysokého kmitočtu, a Jouleovy ztráty tvořené naindukovanými vířivými proudy vznikají i v tenké vsázce (viz. obrázek (Obr. 4.2)).



Obr. 4.2: Tok indukovaných proudů v tenkém pásu pro příčné elmag. pole (převzato z [1])

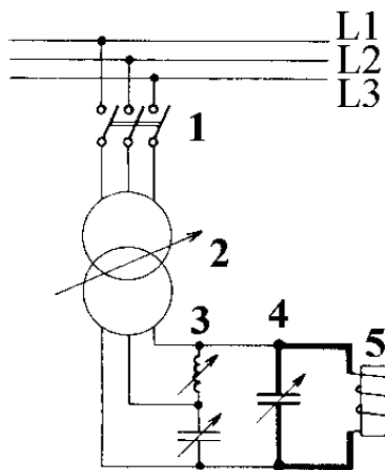
Tento typ ohřevu se tedy využívá pro tenké pásy například ve válcovnách při válcování za tepla, kde je nutné prohřívát rychleji chladnoucí okraje plechu, aby při válcování nedocházelo k jejich třepení. [7]

4.2 Zdroje pro napájení indukčních zařízení

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, pro indukční ohřevy je zásadní zvolit vhodný kmitočet zdroje. Pro jednotlivá využití indukčního ohřevu existuje velký rozsah frekvencí, podle kterého se zdroje dají rozdělit na tři hlavní kategorie: zdroje se sít'ovou frekvencí, středofrekvenční zdroje a vysokofrekvenční zdroje.

4.2.1 Zdroje se sít'ovou frekvencí

S kmitočtem 50 Hz se v některých případech provozují indukční kelímkové pece nebo podobně také indukční ohřívací zařízení válcových těles větších průměrů (pro ocel 16 až 50 cm). Indukční zařízení je jednofázová zátěž a trojfázovou síť zatěžuje nerovnoměrně. Protože se obvykle odebírají vysoké výkony až několika stovek kW, je nutné indukční zařízení připojit přes symetrizační zařízení, které zajistí symetrické zatížení sítě. [10]



Obr. 4.3: Schéma obvodu indukčního zařízení sít'ové frekvence se symetrizačním zařízením (převzato z [7])

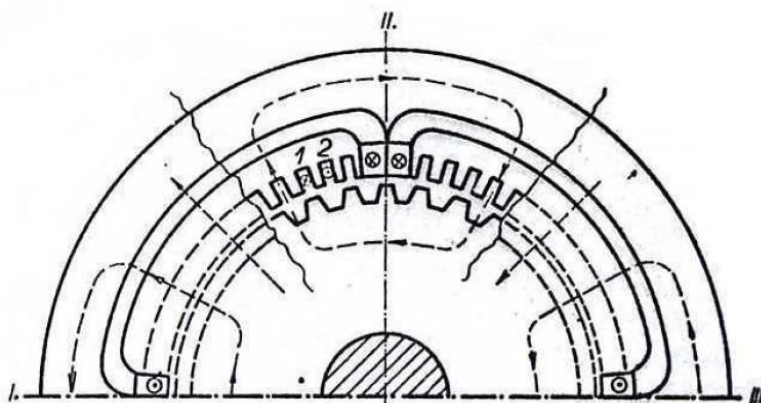
1 – výkonový spínač; 2 – regulační transformátor; 3 – symetrizační obvod;
4 – kondenzátorová baterie; 5 – induktor

4.2.2 Středofrekvenční zdroje

4.2.2.1 Rotační generátor

Rotační generátory se využívají pro napájení indukčních tavicích pecí a prohřívacích zařízení pro kmitočty od 500 Hz do 10 000 Hz. Ve statoru rotačního generátoru jsou dva

druhy drážek. V menších je uloženo pracovní vinutí z měděných lanek z většího počtu izolovaných drátů, ve kterém vznikají proudy zvýšených kmitočtů. Ve větších se nachází budící vinutí napájené stejnosměrným proudem. Budící vinutí může být dvoupólové, čtyřpólové nebo šestipólové. Rotor vinutí nemá, je vyrobený z ocelolityny a na povrchu má věnec z tenkých dynamických plechů s drážkami.



Obr. 4.4: Schematicky vyznačený čtyřpólový rotační generátor (převzato z [10])

Rotační generátor ztrácí účinnost s rostoucí frekvencí. Pro kmitočet 500 Hz je účinnost přibližně 90 %, pro kmitočet 10 000 Hz už pouze 70 %. [10]

4.2.2.2 Magnetické násobiče kmitočtu

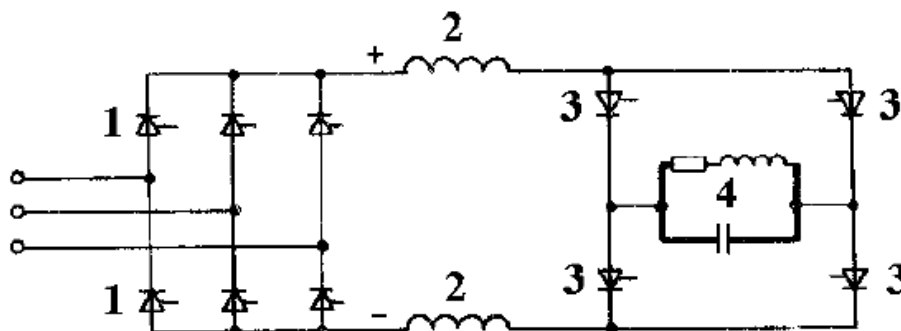
Magnetické násobiče kmitočtu jsou v principu transformátory nebo tlumivky se speciálně upravenými magnetickými obvody, ve kterých dochází díky vhodnému sycení ke zkreslení křivky napětí a tím vytvoření vyšších harmonických v sekundárním obvodu. Trojfázové zařízení poté působí jako zdroj o kmitočtu 150 Hz. Pokud využijeme například výraznou třetí harmonickou, dostaneme na výstupu 450 Hz. Magnetické násobiče kmitočtu se dají kombinovat např. s rotačním generátorem o kmitočtu 3 kHz a tím zvýšit frekvenci na 9 kHz – samotný rotační generátor pro tento kmitočet má nízkou elektrickou účinnost. [10]

4.2.2.3 Tyristorové měniče frekvence

Tyristorové měniče jsou oproti rotačním spolehlivější, mají vyšší životnost, menší hlučnost, vyšší účinnost (asi 95 %) a snadnější regulaci pracovní frekvence. Také není nutné stavět nákladné betonové základy. Výhodou je také automatické dodržování pracovního kmitočtu díky vazbě z vlastního kmitočtu obvodu, který je ovlivněn zahříváním vsázky.

Obvod sestává ze tří částí (viz. obrázek (Obr. 4.5)). První část je řízený trojfázový usměrňovač složený z tyristorů *I*. Může také pracovat v invertorovém režimu. Druhou částí

je meziobvodová tlumivka 2, která má omezovací (omezuje nárůst zkratového proudu při zkratu v usměrňovači), oddělovací (se zpožděním přenáší napět'ové rozdíly mezi usměrňovačem a střídačem) a vyhlazovací (vyhlazuje stejnosměrný proud z usměrňovače) funkci. Třetí část je střídač 3, mezi který je připojen obvod indukčního zařízení. [10]



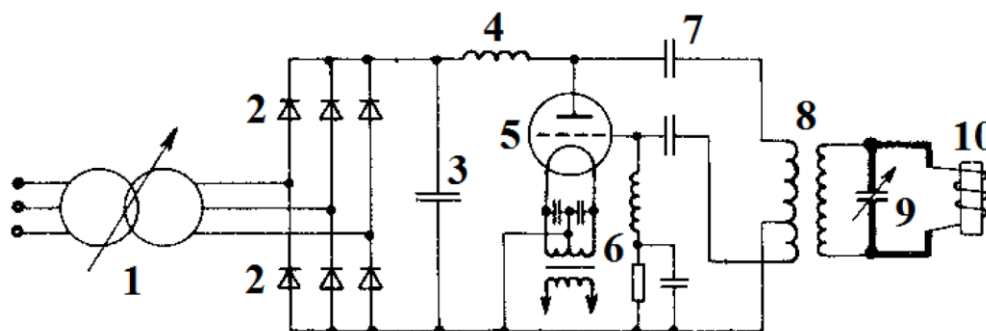
Obr. 4.5: Schéma tyristorového měniče s paralelním invertorem (převzato z [7])

1 – tyristory; 2 – meziobvodová tlumivka; 3 – tyristory střídače; 4 – paralelní rezonanční obvod

4.2.3 Vysokofrekvenční zdroje

Jako vysokofrekvenční zdroje se v současnosti využívají dva typy zdrojů: elektronkové generátory a výkonové tranzistorové měniče frekvence.

Elektronkové generátory se dají použít od 4 kHz až pro frekvence do 27,12 MHz. Skládají se z tří hlavních částí: vstupní zvyšovací regulační transformátor je připojený na trojfázovou síť a zvyšuje napětí na 5 až 8,5 kV; vysokonapět'ový usměrňovač, který je osazený polovodičovými diodami a jeho pracovní napětí je v rozmezí 6 až 11 kV; a vlastní vysokofrekvenční generátor s triodou. Účinnost elektronkové generátoru je relativně nízká, okolo 60 až 65 %.



Obr. 4.6: Schéma elektronkového generátoru (převzato z [7])

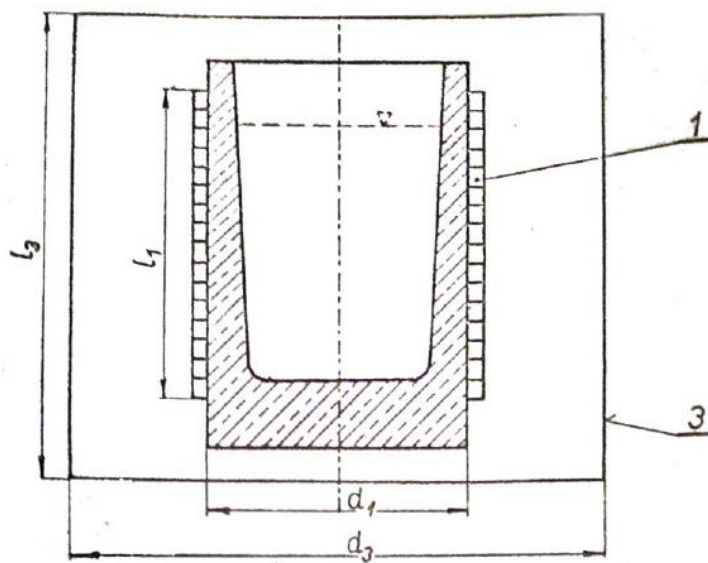
1 – vstupní transformátor; 2 – diody usměrňovače; 3 – vyhlazující kondenzátor; 4 – oddělovací tlumivka; 5 – výkonová trioda; 6 – obvod triody; 7 – vyhlazovací kondenzátor; 8 – vf transformátor; 9 – kompenzační baterie; 10 – induktor

Tranzistorové měniče frekvence jsou složeny z tranzistorů typu MOSFET nebo IGBT. Mají vysokou tepelnou stabilitu, nízký řídicí signál a další výhodné vlastnosti ve srovnání s dříve používanými bipolárními tranzistory. Tranzistorové zdroje se používají pro frekvence od 50 do 500 kHz. [7]

4.3 Stínění

Magnetický tok v kelímkových pecích a indukčních pecích obecně prochází dutinou cívky a uzavírá se vně cívky. Tím způsobuje zahřívání ocelových konstrukcí v okolí pece a dochází tak k nežádoucím ztrátám. Pro snížení ztrát na co nejnižší hodnotu se musí tento magnetický tok vně cívky zmenšit a to buď elektricky vodivým stínicím pláštěm, nebo dobře magneticky vodivými svazky transformátorových plechů.

Indukční kelímková pec s elektricky vodivým stínicím pláštěm je na obrázku (Obr. 4.7). Stínicí plášť 3 výrazně snižuje intenzitu magnetického pole vně pece. Stínicí plášť je obvykle vyroben z dobře elektricky vodivého materiálu – např. mědi, duralu nebo hliníku. Do stínění se indukuje rozptylovým magnetickým polem proud, který vyvolá vlnové pole stínicího pláště, které působí proti poli vyvolanému induktorem. Superpozicí těchto dvou polí se sníží intenzita magnetického pole jak částečně uvnitř induktoru, čímž se sníží elektrická účinnost ohřevu, tak vně stínicího pláště, čímž se pec odstíní.



Obr. 4.7: Stínění elektricky vodivým pláštěm indukční kelímkové pece (převzato z [10])

1 – cívka; 3 – stínění

Pro dodržení minimálních ztrát ve stínicím plášti je nutné správně zvolit jeho tloušťku. Optimální tloušťka stínicího pláště s_3 nastává při splnění následující podmínky

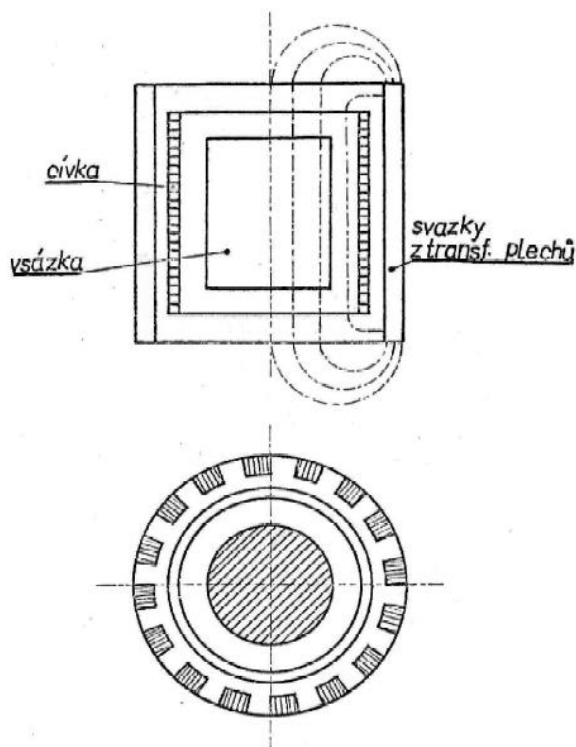
$$s_3 = \frac{\pi}{2} a_3 \quad (4.1)$$

kde a_3 je hloubka vniku pro stínicí plášť.

Ztráty ve stínicím plášti také klesají s rostoucím průměrem pláště v poměru k průměru cívky. Není ale žádoucí zvětšovat průměr pece z důvodu nedostatku místa, volí se tedy zpravidla průměr pláště d_3 jako dvojnásobek vnitřního průměru cívky d_1 . Pro tento případ jsou ztráty v měděném plášti přibližně rovny 1,51 % z příkonu pece, u duralu asi 2,5 % z příkonu pece (při respektování vlivu vsázky vycházejí ztráty u skutečné pece ještě o polovinu menší).

Tento typ stínění má nižší pořizovací cenu a menší hmotnost než stínění svazky transformátorových plechů.

Další možností odstínění je použití stínění ze svazků transformátorových plechů. Svazky transformátorových plechů se umísťují obdobně jako předchozí elektricky vodivý stínicí plášť. Magneticky vodivé svazky zmenší odpor pro magnetický tok buzený cívkou, který díky tomu vzroste a tím zvýší intenzitu magnetického pole. Za svazky transformátorových plechů je oblast lépe odstíněná než v případě stínicího pláště.



Obr. 4.8: Stínění svazky transformátorových plechů (převzato z [10])

Z hlediska elektrické účinnosti je stínění svazky transformátorových plechů výhodnější než stínění vodivým pláštěm, a to díky zvýšení intenzity magnetického pole. Transformátorové plechy také mají velký odpor, a proto malé Jouleovy ztráty. Nevýhodou je jejich vysoká hmotnost a cena, proto se tento typ stínění používá hlavně pro velké pece. [10]

4.4 Závěry pro praxi

Pro maximální účinnost indukčních ohřevů musíme při návrhu těchto zařízení brát v úvahu několik zásadních parametrů. Nejzásadnějším parametrem pro indukční ohřevy je zvolená frekvence zdroje, od ní se odvíjející hloubka vniku a případná nežádoucí průžařnost. Pokud se při ohřevu u magnetických materiálů překročí Curieho bod, relativní permeabilita materiálu se skokově změní a je třeba při návrhu počítat s hodnotou $\mu_r = 1$, čímž se zvětší hloubka vniku. Pro ohřevy s nižší finální teplotou se zavádí tzv. střední permeabilita $\mu_{stř}$, která bere v úvahu proměnnou hodnotu relativní permeability během ohřevu. Výraznou teplotní závislost má také měrná elektrická vodivost. Zmíněné parametry jsou popsány v kapitole 2.

Při povrchovém kalení požadujeme velmi rychlé prokalení pouze povrchové vrstvy materiálu, je tedy nutné správně zvolit kmitočet podle tloušťky této vrstvy a k němu správně

zvolit také měrný příkon a dobu kalení. Zároveň je nutné neohřívat materiál příliš rychle, jelikož může dojít k silným vnitřním pnutím v materiálu.

Žíhání existuje hned několik typů s výrazně odlišnými konečnými teplotami. Na rozdíl od kalení se požaduje ohřívání pomalé, aby bylo sníženo vnitřní napětí.

Prohřívání je nejvyužívanější skupinou indukčních ohřevů. Je nutné dosáhnout rovnoměrného prohřátí materiálu, čehož se dosáhne správným zvolením pracovní frekvence. Povrchová vrstva nesmí být s ohledem na rovnoměrné prohřátí příliš malá, zároveň se ale musí energie absorbovat s dostatečnou účinností. Pro zrychlení procesu prohřívání se využívá tzv. rychloohřev, kterým se dá snížit doba prohřívání až o třetinu.

Optimální podmínky pro tavení se při návrhu počítají z nejméně příznivé hodnoty relativní permeability, tzn. z hodnoty $\mu_r = 1$. Návrh se znovu provádí tak, aby vsázka nebyla průzařná. Tavicí pece jsou obvykle plněny tříděným šrotem, který je složen z různě velkých kusů stejného druhu oceli. Teoreticky se tento obecný případ nedá vyšetřit, využívá se náhrady kovového šrotu soustavou válcových tyčí, z které následně určíme kusovost vsázky. Kelímkové pece limituje také vzduť roztavené vsázky. Všechny předchozí indukční ohřevy a jejich optimální podmínky provozu jsou blíže popsány v kapitole 3.

Volba frekvence souvisí s volbou vhodného zdroje. Většina indukčních zařízení pracuje s frekvencemi vyššími než je 50 Hz, proto se na síť musí připojovat přes různé měniče. Dříve se využívalo hlavně rotačních měničů kmitočtů, dnes se ale přechází k účinnějším elektronickým měničům kmitočtu. Starší typy využívají tyristorové měniče kmitočtů, modernější IGBT nebo MOSFET tranzistory. Výhodou elektronických měničů kmitočtu jsou malé rozměry, menší hluk a možnost plynulé regulace frekvence i výkonu. Typy zdrojů pro indukční ohřevy jsou popsány v kapitole 4.2.

Dále je důležitá volba elektromagnetického stínění, zejména pro větší indukční zařízení. Existují dva typy stínění, a to stínění ze svazků transformátorových plechů, nebo stínění elektricky vodivým pláštěm. Svazky transformátorových plechů jsou elektricky účinnější, ale také dražší a mají vyšší hmotnost. Popsány byly v předchozí kapitole 4.3.

Dalším důležitým faktorem je také dodržování předepsaných technologických postupů a dostatečná kvalifikace obsluhy např. pro indukční kelímkové pece. Pro dobrou účinnost ohřevu v indukčních kelímkových pecích je zásadní vhodně vybrat skladbu zahřívajícího kovového šrotu.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo teoreticky vysvětlit princip indukčních ohřevů, popsat důležité fyzikální vlastnosti ohříváných materiálů a parametry ovlivňující ohřevy elektromagnetickou indukcí s následným rozбором jejich vlivu na účinnost těchto ohřevů.

V úvodní části jsem se zabýval teoretickým popisem indukčního ohřevu, soustředil jsem se na válcové elektromagnetické vlnění.

Druhá část je zaměřena na změny fyzikálních vlastností ohříváných materiálů. Zásadním faktorem pro účinný indukční ohřev je správná volba frekvence napájení induktoru. Na frekvenci je závislá tzv. relativní hloubka vniku pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky, kterou se ovlivňuje rozdělení tepla ve vsázce. Při zvolení příliš nízké frekvence zdroje vzniká nežádoucí jev tzv. elektromagnetická průzařnost, která omezuje vznik tepla ve vsázce a snižuje účinnost indukčního ohřevu. Dále je indukční ohřev závislý na měrné elektrické vodivosti, měnící se se změnou teploty. Změna teploty při ohřevu je významná také pro relativní permeabilitu ohříváného materiálu, zejména pro feromagnetické materiály, které při přesažení Curieho teploty skokově ztrácejí svoje feromagnetické vlastnosti. Pro konečné teploty indukčního ohřevu nižší než Curieho bod se odvozuje tzv. střední permeabilita.

V kapitole č. 3 se zabývám různými typy ohřevu kovů indukcí a parametry, které je ovlivňují. Kalení, žihání, prohřívání i tavení vyžadují rozdílné podmínky pro efektivní provoz. Kalení vyžaduje rychlý ohřev pouze tenké vrstvy materiálu a následné rychlé ochlazení, jsou tedy vhodné vyšší frekvence. Žihání je pomalý ohřev na různě vysoké teploty za účelem snížení vnitřního napětí v materiálu. Pro prohřívání je zásadní rovnoměrné prohřátí materiálu a kmitočet se volí takový, aby platil vztah ve vztahu (3.3) a elektromagnetické vlnění se rovnoměrně utlumilo v celém prohřívaném materiálu. Při volbě frekvence pro tavení se vychází z velikosti a kusovosti vsazeného šrotu.

V závěrečné kapitole popisují možnosti zvyšování účinnosti indukčních ohřevů. Zmiňuji speciální aplikaci příčného pole, které se používá pro ohřevy tenkých pásů ve válcovnách. Popisují důležitost správné volby zdroje napájení a typy zdrojů, které se pro indukční ohřevy využívají. Další částí této kapitoly je popis možností pro stínění s rozбором využití a výhod jednotlivých řešení, konkrétně stínicí pláště a stínění pomocí svazků transformátorových plechů, které se využívají u tavicích pecí. Součástí této kapitoly jsou také závěry pro praxi. Pro správný návrh indukčního zařízení je nutné respektovat vliv všech parametrů, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RUDNEV, Valery, Don LOVELESS a Raymond L. COOK. *Handbook of induction heating*. 2. vyd. 2017.
- [2] ZINN, S a S. L. SEMIATIN. *Elements of Induction Heating* [online]. 1988.
Dostupné z: doi:10.1361/eoih1988p001
- [3] MÜHLBAUER, Alfred. *History of Induction Heating & Melting*. 2008. ISBN 978-3-8027-2946-1.
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: ČVUT Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [5] RADA, Jan a kol. *Elektrotepelná technika*. 1985.
- [6] LANGER, Emil. *Teorie indučního a dielektrického tepla*. 2. vyd. 1979.
- [7] NOVÁK, Pavel. *Elektrické teplo*. 2010. ISBN 978-80-89284-48-1.
- [8] HERING, M. *Podstawy elektrotermii*. 1998. ISBN 83-204-2319-8.
- [9] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrotepelná zařízení*. 1997. ISBN 80-902333-2-5.
- [10] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce*. 1982.
- [11] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika, část V. - Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. 1975.