

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Indukční ohřevy ve strojírenství

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

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

Jméno a příjmení: **Miroslav UHLÍŘ**
Osobní číslo: **E09B0242P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Indukční ohřevy ve strojírenství**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte stručně teoretické základy indukčního ohřevu.
2. Stanovte podmínky pro efektivní použití indukčního ohřevu.
3. Určete možnosti, kterými lze ovlivnit účinnost indukčního ohřevu pro tavení, prohřívání na povrchové kalení.
4. Porovnejte s ohřevy jinými zdroji tepla.
5. Stanovte závěry pro praxi.

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

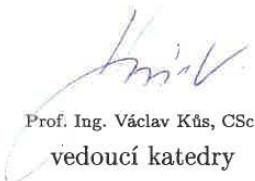
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

K.05

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku použití indukčního ohřevu ve strojírenství. Hlavním cílem práce je určit efektivní podmínky pro indukční tavení, tváření a povrchové kalení. V úvodu je stručně popsán princip samotného indukčního ohřevu. V druhé kapitole jsou zmíněny konkrétní zařízení pro indukční ohřev, jako jsou pece, ohřívačky a podobná zařízení. Třetí kapitola rozebírá různé zdroje indukčního ohřevu. V závěru práce je porovnán indukční ohřev s alternativními zdroji tepla.

Klíčová slova

Indukční ohřev, induktor, Curieova teplota, indukční pec, Maxwellovy rovnice, hloubka vniku naindukovaných proudů, povrchové kalení, tváření, tavení, vsázka, kmitočet.

Abstract

Title: Induction heating in engineering

This thesis is focused on application of the induction heating in engineering. The main aim of the thesis is to define the effective conditions for induction melting, forming and surface hardening. In the introduction is briefly described the induction heating principle itself. The second chapter deals with specific induction heating devices such as furnaces, heaters and similar facilities. Next chapter analyses various sources of the induction heating. At the end of work is comparison of induction heating and alternative sources of heat.

Key words

Induction heating, inductor, Curie temperature, induction furnace, Maxwell's equations, penetration depth of induced currents, surface hardening, forming, melting, melted material, frequency.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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 práce, je legální.

V Plzni dne 25. 5. 2012

Miroslav Uhlíř

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu KOŽENÉMU, CSc za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

0	Úvod.....	11
1	Teoretické základy indukčního ohřevu.....	12
1.1	Historie indukčního ohřevu	13
1.2	Princip indukčního ohřevu.....	13
1.3	Matematický popis indukčního ohřevu.....	14
2	Zařízení pro indukční ohřev	15
2.1	Indukční zařízení pro tavení	15
2.1.1	Kelímková indukční pec	15
2.1.1.1	Indukční kelímková pec se studeným kelímkem.....	16
2.1.1.2	Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem	17
2.1.2	Kanálková indukční pec	18
2.2	Indukční ohřevy pro tváření	19
2.2.1	Indukční ohřevy přířezů, ústřihů a úlomků	19
2.2.2	Průběžné indukční ohřevy tyčového materiálu	20
2.2.3	Indukční ohřevy konců tyčového materiálu.....	21
2.3	Indukční ohřev pro zvláštní účely.....	21
2.3.1	Indukční povrchové kalení	21
2.3.2	Indukční svařování trubek.....	23
2.3.3	Indukční pájení	24
2.3.4	Indukční žihání	25
3	Zdroje napájení pro indukční ohřevy	26
3.1	Zařízení se síťovým kmitočtem	26
3.2	Zařízení se středním kmitočtem.....	26
3.2.1	Trojnásobič kmitočtu.....	26
3.2.2	Rotační generátory	27
3.2.3	Tyristorové měniče.....	28
3.3	Zařízení s vysokým kmitočtem	29
4	Podmínky pro efektivní použití indukčních ohřevů	29
4.1	Hloubka vniku naindukovaných proudů	29
4.2	Účinnost indukčního ohřevu	32

5	Účinnost indukčních zařízení	32
5.1	Pro tavení.....	32
5.2	Pro prohřívání za účelem tváření.....	34
5.3	Pro povrchové kalení	35
6	Ostatní zdroje tepla	36
6.1	Odporový ohřev	36
6.2	Plynový ohřev.....	37
	Závěr	39
	Seznam použité literatury a informačních zdrojů	40
	Seznam obrázků a tabulek	43

Použité symboly

symbol	veličina	jednotka
H	intenzita magnetického pole	[A.m ⁻¹]
B	magnetická indukce	[T]
E	intenzita elektrického pole	[V.m ⁻¹]
J	proudová hustota	[A.m ⁻²]
L	indukčnost cívky	[H]
M	vzájemná indukčnost	[H]
R	elektrický odpor	[Ω]
I	elektrický proud	[A]
P	elektrický výkon	[W]
γ	konduktivita	[S.m ⁻¹]
ρ	rezistivita	[Ω.m]
μ_0	permeabilita vakua	[H.m ⁻¹]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
ϵ_0	permitivita vakua	[F.m ⁻¹]
ϵ_r	relativní permitivita	[-]
k	konstanta šíření	[-]
α	fázová konstanta	[-]
β	měrný útlum	[-]
η	účinnost	[%]
h	vzdutí vsázky	[m]
ω	úhlový kmitočet	[rad.s ⁻¹]
f	kmitočet	[Hz]
a	hloubka vniku	[m]
t	čas	[s]
ϕ	magnetický tok	[Wb]
l	délka	[m]
S	obsah	[m ²]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
r, r ₂	poloměr	[m]
Z	počet zubů	[-]
n	otáčky	[ot/min]

α	teplotní součinitel rezistivity	[K ⁻¹]
ϑ	teplota	[°C]
d,D	průměr	[m]
m	hmotnost	[kg]
$\Delta \vartheta$	rozdíl teplot	[°C]

Důležité konstanty

permitivita vakua: $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ [F.m-1]

permeabilita vakua: $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ [H.m-1]

Ludolfovo číslo: $\pi= 3,1415$

Rozlišení veličin

Skalární veličiny jsou psány *kurzívou*.

Vektorové veličiny jsou psány **tučně** kurzívou.

Fázory jsou označeny **tučně** kurzívou a s pruhem nad veličinou, např. \vec{U} .

Matematické operátory

∇ Hamiltonův operátor (nabla)

Δ Laplaceův operátor

div divergence

grad gradient

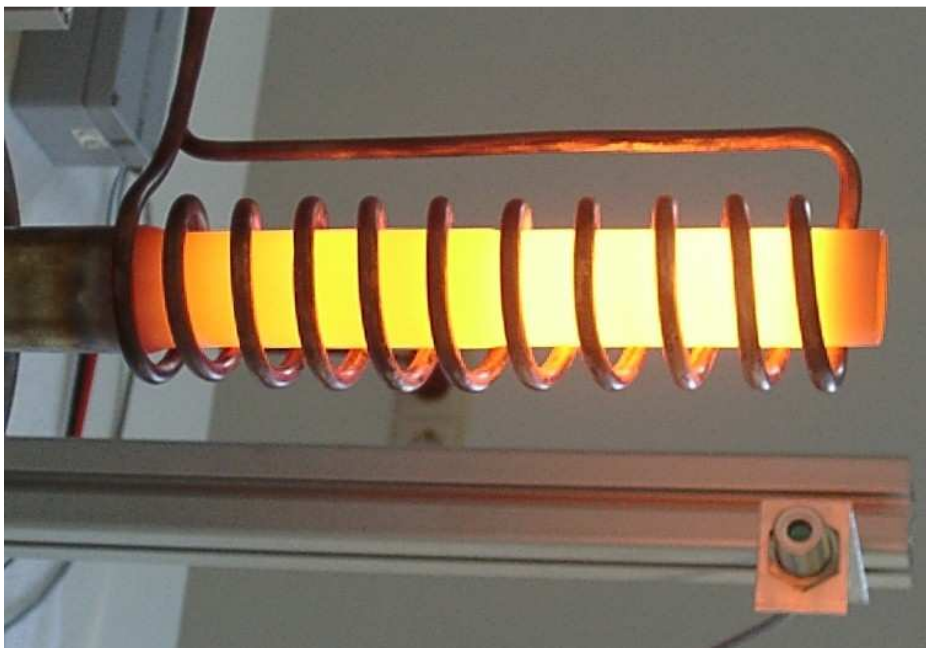
rot rotace

0 Úvod

V závěrečné práci mého bakalářského studia se zabývám problematikou indukčního ohřevu ve strojírenství. Indukční ohřev se používá ve strojírenství od 20. let minulého století a v dnešní době patří mezi nejmodernější způsoby ohřevu. Hlavní předností indukčního ohřevu je rychlost, čistota a bezpečnost ohřevu. Další předností indukčního ohřevu je přesné nastavení hloubky pronikání naindukovaných proudů do vsázky, velikost se mění hlavně kmitočtem. Základem indukčního ohřevu je zákon elektromagnetické indukce Michaela Faradaye z roku 1831.

Bakalářská práce obsahuje 6 kapitol o celkovém počtu 43 stran. Za každým odstavcem a popisem obrázku je odkaz na použitou literaturu na konci článku.

Hlavní cíl bakalářské práce je stanovit podmínky pro efektivní použití indukčního ohřevu zejména pro tavení, tváření a povrchové kalení.

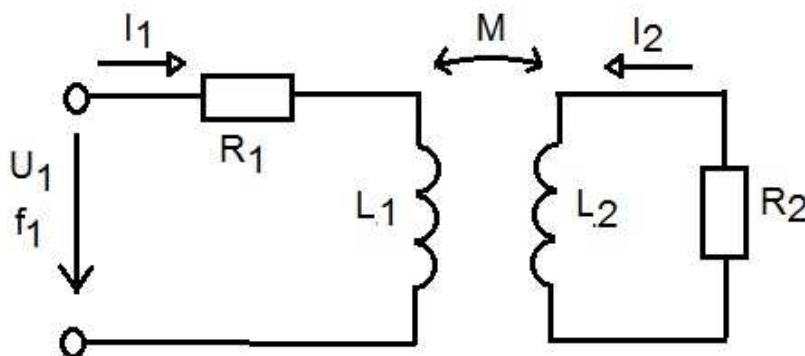


Obr. 0.1 Indukční ohřev plné válcové vsázky [25]

1 Teoretické základy indukčního ohřevu

Indukční ohřev se dá použít pouze u materiálů elektricky vodivých. Jestliže vodivý předmět (vsázka) vložíme do střídavého magnetického pole, indukují se do vsázky vířivé proudy, které v ní cirkulují díky její vodivosti. Vířivými proudy se předmět zahřívá, podle zákona Joulova. Doprava tepla do vsázky se neděje tepelným spádem z cizího zdroje tepla, jako například u nepřímého odporového zařízení. Teplo se do vsázky dopravuje střídavým elektromagnetickým polem, a tak vzniká přímo v elektricky vodivé vsázce. Vsázka patří mezi nejteplejší část soustavy, ostatní části mohou být i studené. Teplo vzniká pouze ve vsázce, která není s ničím mechanicky vázaná. Ztráty mezi zdrojem indukčního ohřevu a vsázkou jsou minimální, z čehož vyplývá jedna z výhod indukčního ohřevu, kterou je vysoká účinnost.

Indukční ohřev můžeme přirovnat k transformátoru (obr. 1.1), který má sekundární vinutí o jednom závitě zapojeném nakrátko. [1]



Obr. 1.1 Náhradní schéma indukčního ohřevu [3]

- M je vzájemná indukčnost
- L_1 pracovní indukčnost
- R_1 ztrátový činný odpor
- I_1 proud zdroje
- U_1 napětí zdroje
- f_1 kmitočet zdroje
- L_2 indukčnost vsázky
- R_2 činný odpor vsázky
- I_2 proud vsázkou

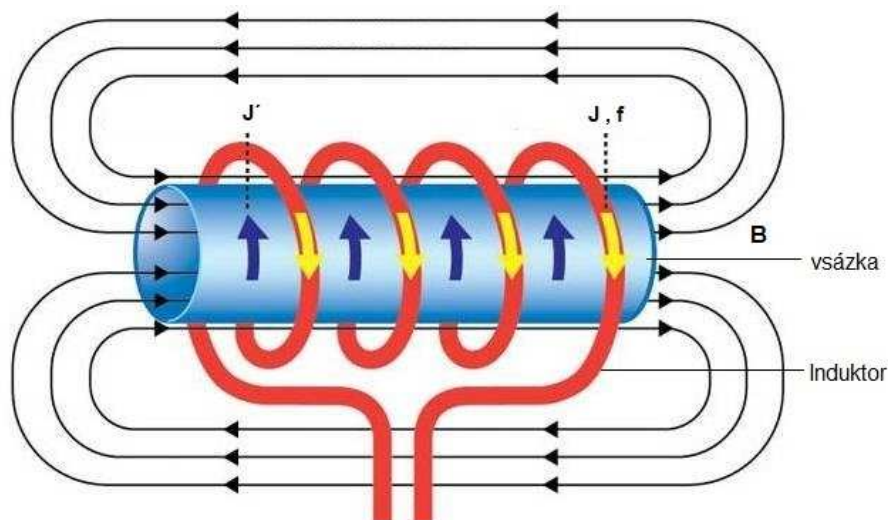
1.1 Historie indukčního ohřevu

V roce 1831 objevil Michael Faraday (1791-1867) zákon elektromagnetické indukce, což byl první krok k indukčnímu ohřevu. Zákon je o vzniku indukovaného elektromotorického napětí v magnetickém obvodu, způsobeným změnou magnetického indukčního toku. Vztah pro indukované elektromotorické napětí je $U_i = -\frac{d\Phi}{dt}$. Vztah mezi magnetickým a elektrickým polem popsal v roce 1865 James Clerk Maxwell čtyřmi níže zmíněnými rovnicemi.

Ve strojírenství se indukční ohřev poprvé objevil na konci 19. století. Nejprve se používal pro tavení v kanálkových pecí a později i v kelímkových. Při druhé světové válce se indukční ohřev používal při výrobě dílů do tanků, letadel, ponorek. Největší rozmach indukčního ohřevu nastal s objevem polovodičových frekvenčních měničů, které zastínily do té doby používané rotační měniče. [29]

1.2 Princip indukčního ohřevu

Princip indukčního ohřevu vidíme na obr. 1.2. Pracovní cívkou protéká střídavý proud o hustotě J a vysokém kmitočtu f . Tento proud vytvoří magnetické pole o indukci B , procházející vsázkou. Ve vsázce se poté indukují vířivé proudy o hustotě J' , které se uzavřou uvnitř vsázky, kde způsobují její ohřev. Vysoký kmitočet ve vsázce způsobuje skin efekt. Skin efekt zvýší odpor kovu, po průchodu velkého proudu, protože se mění plocha průřezu S [m²]. Pro velikost elektrického odporu platí vztah $R = \rho \frac{l}{S}$ [Ω]. Díky skin efektu protéká proud ve vrstvě na povrchu vsázky. [5], [3]



Obr. 1.2 Princip indukčního ohřevu [24]

1.3 Matematický popis indukčního ohřevu

Elektromagnetické pole indukčního ohřevu je popsáno vlnovými rovnicemi, které se odvozují od Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

Na rovnice (2.1) a (2.2) aplikujeme rotaci.

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \mathbf{H}) \quad (2.5)$$

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma (\operatorname{rot} \mathbf{E}) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \mathbf{E}) \quad (2.6)$$

Za $\operatorname{rot} \mathbf{E}$ a $\operatorname{rot} \mathbf{H}$ dosadíme první dvě Maxwellovy rovnice, tvar $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{X}$ přepíšeme jako $\operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{X} - \nabla^2 \mathbf{X}$ a upravíme.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Tímto jsme dostali vlnové rovnice pro \mathbf{E} a \mathbf{H} . V nevodivém prostředí dosadíme za γ nulu a ve vodivém prostředí dosadíme za ε nulu. Čímž se rovnice zkrátí. Operátor ∇^2 (nabla), neboli Δ (Laplaceův) je pro pravoúhlé souřadnice $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ a pro válcové souřadnice $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$. Vlnové rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění vyjádříme dosazením fázorů a jejich derivací.

Fázory $\bar{\mathbf{H}}$ a $\bar{\mathbf{E}}$:

$$\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{E} e^{j\omega t} \quad (2.9)$$

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H} e^{j\omega t} \quad (2.10)$$

První a druhá derivace $\bar{\mathbf{H}}$ a $\bar{\mathbf{E}}$:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t} = -j\omega \mathbf{E} e^{j\omega t} = -j\omega \bar{\mathbf{E}} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = \omega^2 \mathbf{E} e^{j\omega t} = \omega^2 \bar{\mathbf{E}} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial t} = -j\omega \mathbf{H} e^{j\omega t} = -j\omega \bar{\mathbf{H}} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial t^2} = \omega^2 \mathbf{H} e^{j\omega t} = \omega^2 \bar{\mathbf{H}} \quad (2.14)$$

Derivace dosadíme do vlnových rovnic, a úpravou dostaneme obecně platné vlnové rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění.

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (2.16)$$

Přičemž $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \gamma$, kde k je konstanta šíření elektromagnetického vlnění v uvažovaném prostředí.

$$k = \alpha - j\beta \quad (2.17)$$

$$k^2 = \alpha^2 - j2\alpha\beta - \beta^2 \quad (2.18)$$

α je fázová konstanta

β měrný útlum

[3]

2 Zařízení pro indukční ohřev

2.1 Indukční zařízení pro tavení

Pro tavení se používají indukční pece kelímkové nebo kanálkové.

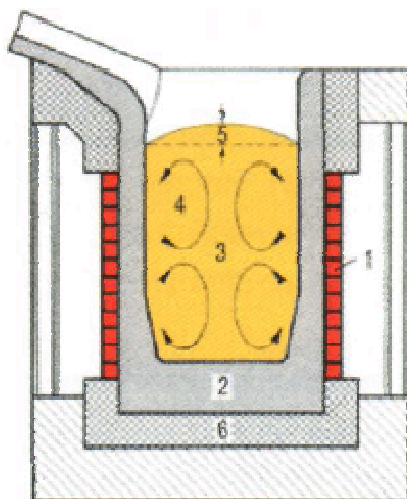
2.1.1 Kelímková indukční pec

Mezi hlavní indukční zařízení patří kelímková pec, její schéma je uvedeno na obr. 4. Hodí se pro tavení odporových kovů. Čím vodivější materiál, tím menší účinnost ohřevu. Induktor se nachází podél vnější stěny kelímku, k chlazení se používá voda, která protéká induktorem. Induktor je napájený střídavým proudem o kmitočtu 50 – 4000 Hz. Výhoda kelímkové pece je proudění taveniny uvnitř kelímku. Pohyb zaručuje rovnoměrné promíchání taveniny. K proudění dochází v důsledku vířivých proudů a elektromagnetických sil, což se projevuje i kopulovitým vzedmutím horní hladiny. Výška vzduť se dá vyjádřit:

$$h = K \frac{p_2}{\rho} \sqrt{\frac{\mu r \cdot \gamma}{f}} \quad (3.1)$$

- p_2 je příkon na jednotku plochy vsázky
 K konstanta
 μ_r relativní permeabilita vsázky
 ρ měrná hustota vsázky
 γ měrná elektrická vodivost
 f kmitočet střídavého proudu v cívce

Vidíme, že vzduší h a tím i intenzita víření roste s měrným příkonem p_2 a s klesajícím kmitočtem. U pecí napájených ze sítě (50 Hz) je maximální měrný výkon omezen na 300 kW na tunu taveného materiálu. Při překročení výkonu by bylo víření příliš intenzivní. Při vyšším kmitočtu může být měrný výkon na tunu větší a tím kratší doba tavení. [9], [1]



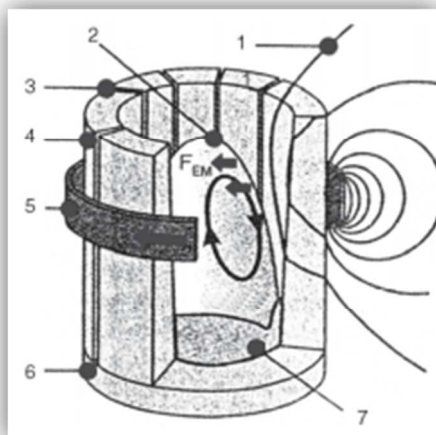
- 1 - induktor
 2 - kelímek
 3 - tavenina
 4 – víření taveniny
 5 - vzduší

Obr. 2.1 Kelímková indukční pec [23]

2.1.1.1 Indukční kelímková pec se studeným kelímkem

Používají se pro tavení kovových i nekovových materiálů s vysokým bodem tání. Induktor je tvořen ze segmentů, oddělenými od sebe tenkou mezerou. Segmenty a dno jsou chlazené vodou. Induktor se napájí proudem o vysokém kmitočtu. Díky teplotnímu rozdílu mezi roztaveným materiálem a vnitřním povrchem vodou chlazených segmentů se na rozhraní tvoří pevná a tenká vrstva z taveného materiálu, tzv. skull. Skull chrání segmenty a dno proti vysokým teplotám obvykle

vyšších než 2000 °C. Pece se používají při výrobě polovodičů, speciálních skel a oxido-keramických materiálů například na bázi titanu a hliníku. S požadavky na vysokou čistotu produktu. Schéma pece je na obr. 2.2. [9]

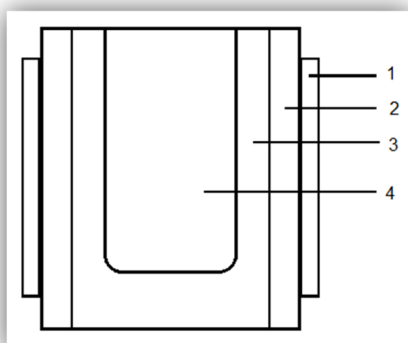


- | | |
|----------------------|--------------|
| 1 – magnet. pole | 5 - induktor |
| 2 – hladina taveniny | 6 - dno |
| 3 - mezera | 7 - skull |
| 4 – segment | |

Obr. 2.2 Indukční kelímková pec s chladnými stěnami [9]

2.1.1.2 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Indukční kelímková pec ztrácí účinnost při tavení dobře elektricky vodivých kovů, jako například Al a Cu. Díky vodivému kelímku elektromagnetické vlnění dopadá z cívky na stěnu vodivého kelímku. Kelímek se díky vířivým proudům bude zahřívat a teplo bude předávat vsázce. Menší část magnetického toku se uzavírá přímo do vsázky. Vodivý kelímek se vyrábí ze směsi šamotu a grafitu nebo z litiny. Induktor je chlazený vodou a mezi vodivým kelímkem a induktorem je keramická izolační vrstva. [4]

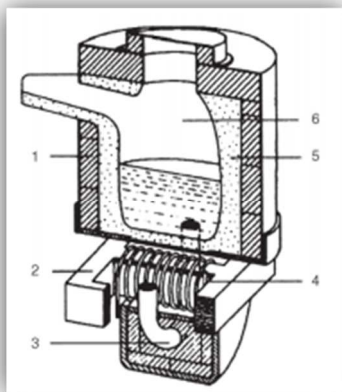


- | | |
|--------------|---------------------|
| 1 – induktor | 3 – vodivý kelímek |
| 2 – izolace | 4 – tavící prostory |

Obr. 2.3 Indukční kelímková pec s elektricky vodivým kelímkem [4]

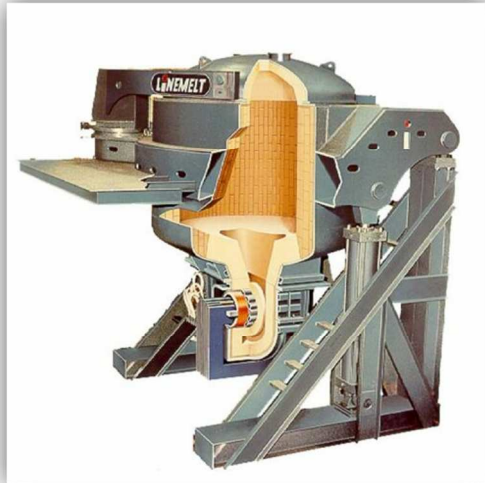
2.1.2 Kanálková indukční pec

Kanálkové indukční pece (obr. 2.4) se konstruují pro proudy o kmitočtu 50 Hz. Jsou určené pro tavení neželezných kovů a pro zušlechťování šedé litiny. Cívka je umístěna pod tavící nádobou a obklopena kanálkem, který ústí do tavící nádoby. V kanálku proudí roztavený kov a ten tvoří sekundární závit nakrátko. Tímto se tavený materiál promíchává a je homogenní materiálově i teplotně. Výhoda této pece je, že pracuje s vyšším účínkem, než pec kelímková. Magnetický tok prochází jádrem z transformátorových plechů, díky tomu se sníží velikost střídavého proudu v cívce. K chlazení není potřeba používat vodu, postačí pouze proud vzduchu z ventilátoru. Nevýhodou je, že se do pece musí nalít již roztavený kov. Nehodí se pro časté střídání složení kovu a přerušovaný provoz. Mohou vznikat nebezpečné pulsace, při uskřípnutí kovu v kanálku, působením elektrodynamických sil. Při tavení hliníku se kanálek zanáší vrstvou Al_2O_3 , kanálek se musí upravit tak aby se mohl čistit. Místo půlkruhového kanálku použijeme kanálek obdélníkový s postranními otvory. Kanálkové pece mají vyšší účinnost než kelímkové. U větších pecí se na jednu tavící nádobu napojují tři kanálky s třemi cívkami, pro rovnoměrné zatížení sítě. [9], [1]



- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| 1 - izolace | 4 – pracovní cívka |
| 2 – transformátorové plechy | 5 - vyzdívka |
| 3 - kanálek | 6 - tavící nádoba |

Obr. 2.4 Kanálková indukční pec [12]



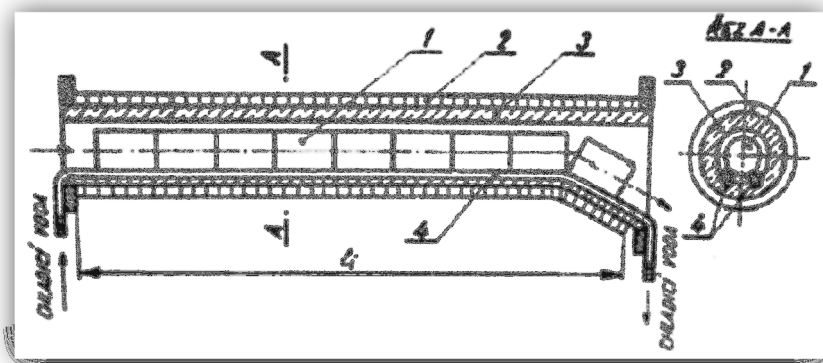
Obr. 2.5 Kanálková indukční pec LINEMELT [22]

2.2 Indukční ohřevy pro tváření

Pomocí indukčního ohřevu zahřejeme kov na teplotu určenou pro tváření, neboli kování, lisování, stříhání a řezání. Teplota pro tváření u oceli je přibližně 800 - 1000 °C. [16]

2.2.1 Indukční ohřevy přířezů, ústřihů a úlomků

Pro ohřev přířezů se používá speciální ohřívací stroj, který je plně automatizován, jeho schéma vidíme na obr. 2.6. Chladicí voda protéká induktorem a vodícími trubkami z nemagnetické oceli. Studené kusy zasouvá pneumatický mechanismus do vstupu induktoru v časovém taktu odpovídajícímu činnosti tvářecího stroje. Z výstupu induktoru vystupují kusy ohřáté na kovací teplotu. Hlavní výhodou je rovnoměrné prohřátí všech kusů. Teplotu měří optické pyrometry. [1]

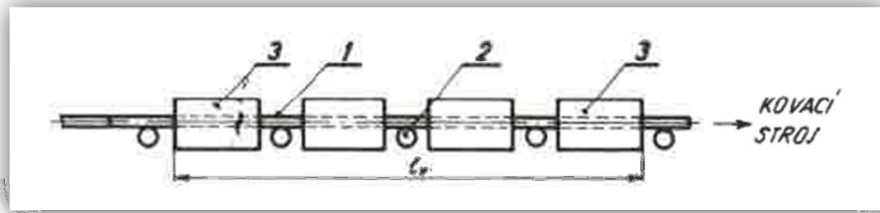


Obr. 2.6 Indukční ohřívací stroj [1]

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1 – vsázka (přířezy) | 3 – keramická ochrana |
| 2 – induktor | 4 – vodící trubky |

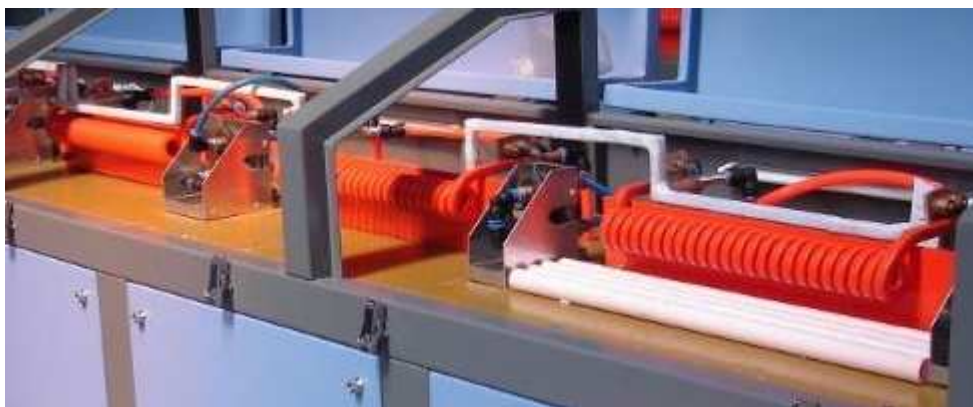
2.2.2 Průběžné indukční ohřevy tyčového materiálu

Tento mechanismus (obr. 2.7) si můžeme představit jako dopravníkový pás pro tyče, který prochází ohřívacími induktory. Tyče se ohřívají na tvářecí teplotu a poté jdou do kovacího zařízení. Studené tyče jsou automaticky odebírány ze zásobníku. Tento celek tvoří dohromady automatickou tvářecí linku. Linka se staví pro výkony od 500 kg ohřátého materiálu za hodinu až do výkonu několika desítek tun za hodinu. U velkých výkonů je linka delší, s více induktory a s příkonem až desítky megawatt. Výkon pecí je regulovaný podle teploty, která se měří pyrometry.



Obr. 2.7. Průběžný indukční ohřev tyčí [1]

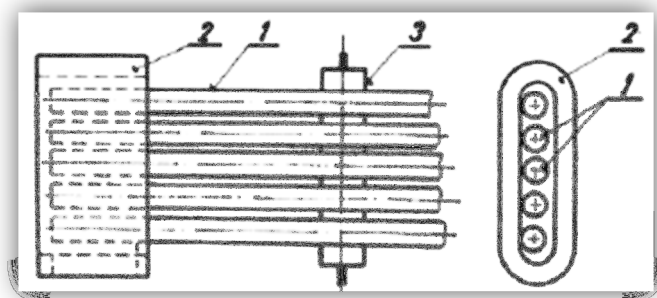
- 1 – ohříváná tyč
- 2 – vodící kladky
- 3 – induktory



Obr. 2.8 Průběžný indukční ohřev tyčí v praxi [21]

2.2.3 Indukční ohřevy konců tyčového materiálu

Mechanismus s oválným induktorem (obr. 2.9) se používá pouze pro ohřevy konců tyčí, například pro přikování příruby. Můžeme ohřívat více tyčí najednou, jejich množství je podle velikosti induktoru. Konce se zahřívají na kovací teplotu. Ohřev jde plně zautomatizovat. [1]



- 1 – tyče
- 2 – oválný induktor
- 3 – držák tyčí

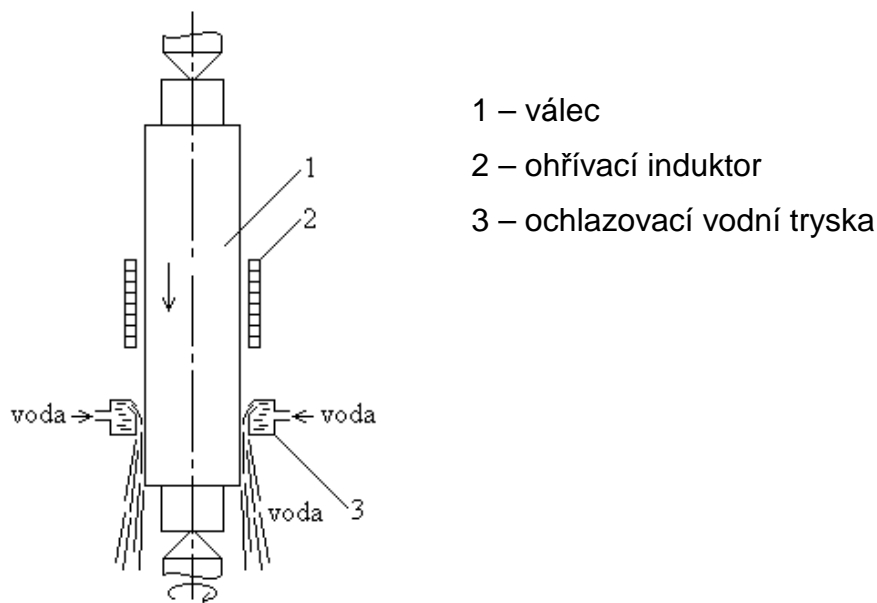
Obr. 2.9 Oválný induktor pro indukční ohřev konců tyčí [1]

2.3 Indukční ohřev pro zvláštní účely

2.3.1 Indukční povrchové kalení

Kalení je proces, při kterém se ocel ohřeje na kalící teplotu a poté se rychle ochladí. Účelem kalení je zlepšení mechanických vlastností materiálu, hlavně tvrdosti. Čím větší obsah uhlíku v oceli tím větší tvrdost po kalení. U povrchového kalení je výhoda, že materiál zůstane uvnitř houževnatý. Hloubku prokalení, neboli hloubku vniku nastavíme kmitočtem. Čím vyšší kmitočet, tím menší hloubka vniku pronikání elektromagnetického vlnění do ohřivané vsázky. [1], [15]

Na obr. 2.10 vidíme princip postupného indukčního kalení válců pro válcovací stolice. Ocelový válec vložíme mezi dva hroty a dobře vystředíme. Válec se otáčí kolem vlastní osy, aby byl prohřátý rovnoměrně. Další pohyb je nahoru a dolů přes ohřívací induktor a vodní trysky. Nežádoucí jev povrchového kalení je tzv. slupkový jev. Aby tento jev nevznikal, je potřeba materiál před kalením předeřhřát na teplotu nižší než kalící. Předeřhřátí se dnes provádí s kmitočtem 50 Hz. Poté vyjede válec do nejvyšší teploty, zpusť se voda a induktor začne kalený válec ohřívat na kalící teplotu. Pomalým posunem válce k nejnižší poloze se válec povrchově zakalí. Kalící kmitočet se používá 250 Hz. Válce mají průměr 300 – 1000 mm a délku 0,8 – 6 m. Příkony velkých kalících zařízení bývají 300 kW až 1000 kW. Výhoda povrchového indukčního kalení oproti normálnímu je, že uvnitř materiál zůstává houževnatý. [1], [6]



Obr. 2.10 Postupné indukční kalení pro válcové stolice [12]

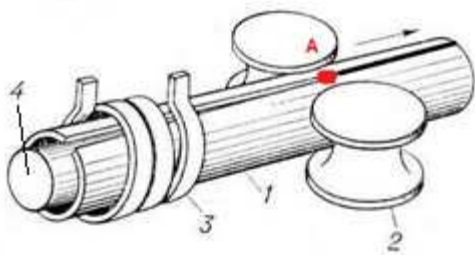
Na obdobném principu pracují zařízení, které kalí menší součásti, například vačkové a klikové hřídele. Kalí se místa, kde dosedají ložiska nebo jednotlivé vačky. Nejvýhodnější kmitočet pro kalení vačkové hřídele spočítáme ze vztahu $f = \frac{3760}{r^2}$ [hz], kde r [cm] je nejmenší průměr vačky. Pro normální kalení se používají zdroje s kmitočtem 50 Hz až 10 kHz. A pro kalení drobných součástí nebo větších součástí s velmi malou hloubkou pro kalení se používají kmitočty až 350 kHz. Rychlost ohřevu pro kalení dosahuje až 1000 °C za sekundu. [2], [6], [1]



Obr. 2.11 Indukční povrchové kalení v praxi [20]

2.3.2 Indukční svařování trubek

Princip indukčního svařování trubek vidíme na obr. 2.12. Trubku stlačují dvě speciální kladky až k sobě. Induktor se nachází před kladkami, kde je ještě malá mezera. Vířivé proudy musejí protékat místem spojení trubky, což je mezi kladkami. Tento bod je na obrázku označený jako A. Je zde velká koncentrace proudů a vzniká zde velká svařovací teplota. Trubka vyjíždí z kladkového mechanismu už pevně svařená. Zařízení má příkon stovky kilowatt s kmitočtem 8 – 500 kHz. Trubka může mít rychlost až 2 m/s. Obdobně se svařují trubky jiných tvarů a profilů. Svařovací teplotu v místě A hlídáme pyrometrem. [1], [6]



- 1 – svářená trubka
- 2 – kladky
- 3 – svařovací induktor
- 4 – magnetické jádro
- A – vysoká koncentrace proudů

Obr. 2.12 Indukční svařování trubek [19]



Obr. 2.14 Indukční svařování v praxi [17]

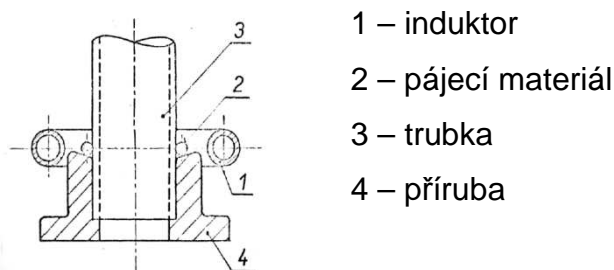


Obr. 2.13 Svár na obdélníkovém profilu [26]

2.3.3 Indukční pájení

Indukční pájení se rozděluje na dvě skupiny, pájení naměkko a natvrdo. Při pájení naměkko používáme teploty od 150 do 450 °C o výkonu 0,5 až 5 kW. U pájení natvrdo jsou teploty od 450 do 1050 °C o výkonech 3 až 30 kW. Kmitočet střídavého proudu v cívice bývá od 2kHz do 2,5 MHz. U tvrdého pájení proniká pájka do mezer mezi pájenými částmi. Výhodou je malá energetická náročnost, materiál se nedeformuje teplem kolem pájené oblasti a můžeme pájet i pozinkovaný plech bez poškození, např. na karoseriích aut. [6], [5]

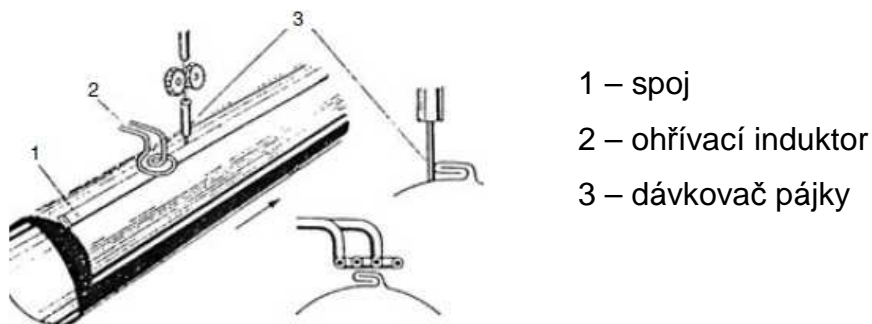
Indukční pájení se používá například pro pájení přírub na trubky, princip je na obrázku obr. 2.15. Pájecí materiál po roztavení vyplní prostor mezi přírubou a trubkou. [6]



- 1 – induktor
- 2 – pájecí materiál
- 3 – trubka
- 4 – příruba

Obr. 2.15 Indukční pájení trubek s přírubami [6]

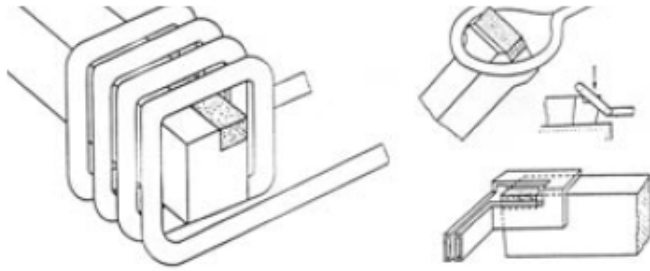
Další aplikace je podélné pájení trubek, princip je naznačen na obr. 2.16. Trubka je v místě spoje přeložená. Pájka se dávkuje na ohřátý materiál.



- 1 – spoj
- 2 – ohřívací induktor
- 3 – dávkovač pájky

Obr. 2.16 Indukční pájení trubky [10]

Na obr. 2.17 vidíme tři možnosti pájení destiček z velmi tvrdých kovů na obráběcí nože. [10]



Obr. 2.17 Pájení obráběcích nožů [10]

2.3.4 Indukční žíhání

Indukční žíhání se obecně se používá k odstranění vnitřních pnutí vzniklých při svařování. Pnutí vzniká díky značnému rozdílu teplot ve svaru a v okolním materiálu. Používá se například po svařování plynovodů a ropovodů. Žíhací teplota je obvykle 600 – 630 °C. Po pomalém zahřátí se žíhaný materiál pomalu ochlazuje. Na obr. 2.18 je znázorněno indukční žíhání obvodového svaru potrubí se zdrojem Heatmaster HM30 s výkonem 3,5 kW o kmitočtu 18 MHz. [14], [18]



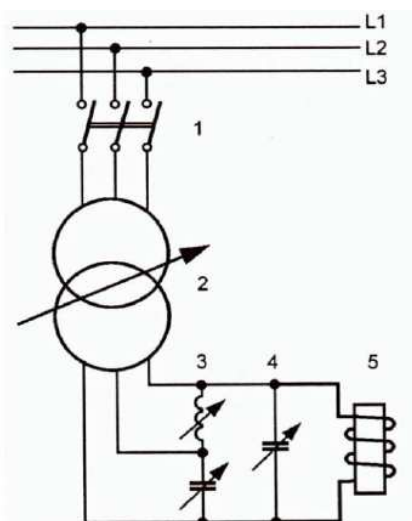
Obr. 2.18 Indukční žíhání obvodového svaru potrubí se zdrojem HM30 [18]

3 Zdroje napájení pro indukční ohřevy

Indukční elektrotepelná zařízení pracují s velkým výkonem s kmitočty od 50 Hz do jednotek MHz. Rozdělujeme je na zařízení se síťovým kmitočtem, středním kmitočtem a vysokým kmitočtem. [1]

3.1 Zařízení se síťovým kmitočtem

Síťový kmitočet 50 Hz se používá například na některé indukční kelímkové pece a na přehřev u povrchového kalení válců. Na obr. 3.1 vidíme schéma napájení jednofázové indukční pece. Je potřeba zapojit symetrizační obvod, aby se tato pec chovala jako symetrická zátěž. Symetrizační obvod přemění jednofázovou zátěž na třífázovou, je tvořen symetrizační indukčností a kapacitou, jejíž velikosti se určují z velikosti náhradního odporu vykompenzované pece. Kondenzátor připojený paralelně k pracovní cívce, kompenzuje jalový výkon pracovní cívky. [1], [4]



- 1 – třífázový spínač
- 2 – regulační transformátor
- 3 - symetrizační obvod
- 4 – kompenzační kondenzátor
- 5 – pracovní cívka se vsázkou

Obr. 3.1 Schéma síťového indukčního ohřevu [1]

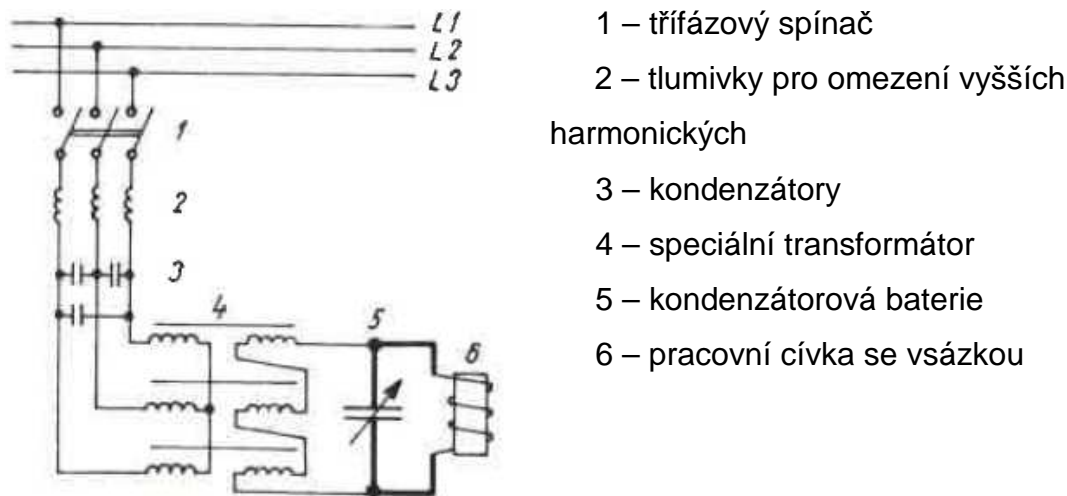
3.2 Zařízení se středním kmitočtem

Těmito zdroji napájíme indukční zařízení od 150 Hz do 20 kHz. [1]

3.2.1 Trojnásobič kmitočtu

Pro 150 Hz byly dříve používány speciální přesycené transformátory se zapojením hvězda – otevřený trojúhelník, který násobí síťový kmitočet tři krát. Kondenzátory na vstupu jsou pro kompenzaci jalového proudu a zkratování vyšších

harmonických proudů. Schéma je znázorněno na obr. 3.2. Trojnásobič kmitočtu se v dnešní době už nepoužívá. [1]



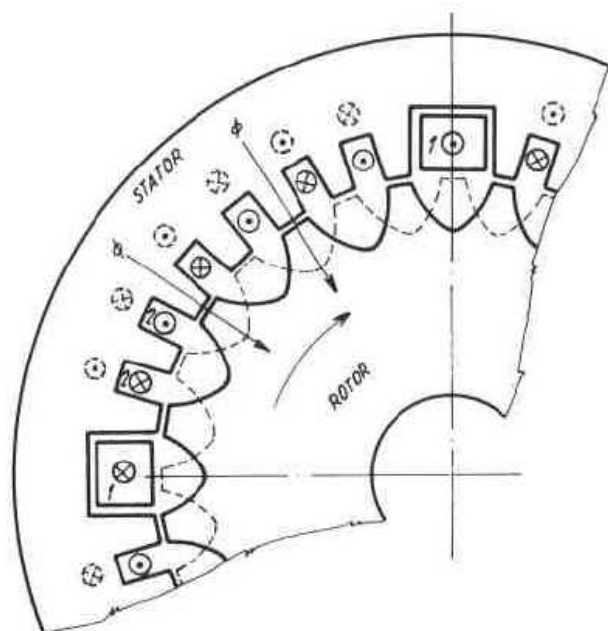
Obr. 3.2 Schéma trojnásobiče kmitočtu [1]

3.2.2 Rotační generátory

Rotační generátory generují kmitočty 500 Hz až 10 kHz. Rotační generátory byly nejvíce používané před zaváděním tyristorových měničů. Rotační generátor je spojený v jeden celek s poháněcím motorem, obvykle asynchronním. Účinnost se mění podle kmitočtu, čím vyšší kmitočet, tím menší účinnost a to v důsledku ztrát v železe úměrných druhé mocnině kmitočtu. Bývá 70 až 90 %. Generátor má stator s dvěma vinutími, budícím a pracovním. Budící je napájeno stejnosměrným budícím proudem. V pracovním vinutí se indukuje proud o středním kmitočtu. Na rotoru jsou pouze zuby bez vinutí. Na obr. 3.3 je vidět poloha zubů rotoru a statoru. Roztočíme-li motorem generátor, v poloze zub proti zubu se začne indukovat magnetický tok Φ . Jestliže je zub rotoru proti drážce statoru, tak magnetický tok rychle klesne. V pracovním vinutí se indukuje proud (zobrazený v drážce plně), jestliže jsou proti sobě zuby rotoru a liché zuby statoru (kreslené plnou čarou). Směr proudu se otočí, jakmile se potkají zub rotoru se sudým zubem statoru (kresleno čárkovaně). Kmitočet vypočítáme podle vztahu:

$$f = \frac{Z \cdot n}{60} \quad (3.1)$$

kde Z je počet zubů na rotoru a n počet otáček. [1], [2]

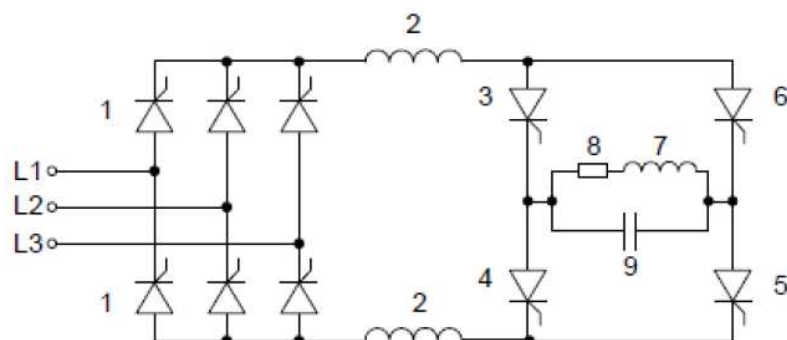


- 1 – budící vinutí
2 – pracovní vinutí

Obr. 3.3 Princip rotačního generátoru [1]

3.2.3 Tyristorové měniče

Tyristorový měnič se skládá z řízeného třífázového můstku (usměrňovače) a střídače. Mezi nimi je tlumivka, která kompenzuje rozdíly střídače a usměrňovače, vyhlazuje proud z usměrňovače a omezuje rostoucí proud střídače při jeho zkratu. Na obr. 3.4 je znázorněn princip. Pracují s výstupním kmitočtem 0,2 - 10 kHz. Na obrázku je paralelní zapojení zátěže, existuje také sériové zapojení. [1]

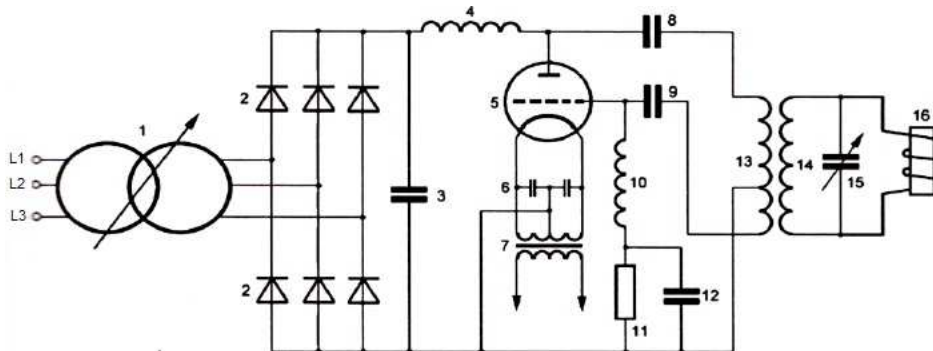


Obr. 3.4 Schéma tyristorového měniče [1]

- 1, 3-6 – tyristory
2 – tlumivky v mezi obvodu
7 – pracovní induktor
8 – činná zátěž pece (vsázka)
9 - kondenzátorová baterie

3.3 Zařízení s vysokým kmitočtem

Mezi zdroje s vysokým kmitočtem patří elektronkový měnič, který generuje kmitočty 50 kHz až 1 MHz. Použitelný například pro povrchové kalení s velmi malou hloubkou vniku naindukovaných proudů.



Obr. 3.5 Schéma indukčního ohřevu s elektronkovým měničem [1]

Na obr. 3.5 je znázorněno schéma měniče. Na vstupu je regulační transformátor 1 připojený na neřízený usměrňovač 2 s vyhlazovacím kondenzátorem 3. Tlumivka 4 slouží jako oddělení vf obvodu na anodě výkonové triody 5. Kondenzátory 6 propouští vf složky proudu z katody a zkratují ji na zem, oddělovací kondenzátor 8 propustí vf složku na transformátor 13. Kondenzátor 9 propustí vf složku z transformátoru 13 na mřížku triody 5 (zpětná vazba). Na rezistoru 11 vzniká záporné přepětí mřížky triody, které filtruje kondenzátor 12. Tlumivka 10 zabraňuje zkratování zpětného vf proudu na mřížku. Součástky 13, 14, 15, 16 tvoří oscilační obvod, oscilující na daném kmitočtu. [1], [4], [6]

4 Podmínky pro efektivní použití indukčních ohřevů

4.1 Hloubka vniku naindukovaných proudů

Díky skinefektu protéká proud ve vrstvě na okraji vsázky. Touto vrstvou prochází 40 % naindukovaných proudů a nazýváme ji hloubka vniku naindukovaných proudů a , kterou vypočteme podle vztahu:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu\omega}} \text{ [m]} \quad (4.1)$$

A můžeme ji zkrátit na $a = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu r \cdot f}}$ [m]. Ze vztahu vidíme, že při zvyšování kmitočtu ($\omega=2\pi f$) se hloubka vniku naindukovaných proudů zužuje. [3], [7]

Hloubku vniku také mění měrná elektrická vodivost $\gamma \left[\frac{S}{m}\right]$ (což je převrácená hodnota měrného elektrického odporu ρ) a permeabilita $\mu=\mu_r\mu_0$. [3]

Měrný elektrický odpor (rezistivita) se mění s teplotou podle vztahu

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (4.2)$$

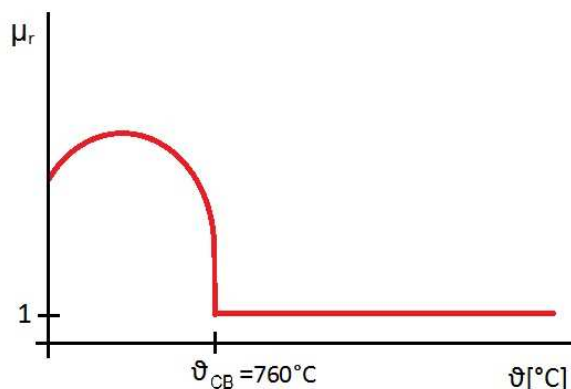
kde ρ_0 je počáteční rezistivita, α je teplotní součinitel elektrického odporu a Δt je rozdíl teplot. Rozdíl rezistivit mezi 20°C a 1000°C vidíme v tabulce tab. 2. [13]

Látky rozdělujeme na magnetické (feromagnetické) a nemagnetické (paramagnetické a diamagnetické). [11]

Tab. 1. Rozdělení látek z hlediska magnetismu [11]

Látka	Relativní permitivita	Materiál
Paramagnetická	$\mu_r > 1$	draslík, sodík, hliník
Diamagnetická	$\mu_r < 1$	voda, zlato, měď, rtuť
Feromagnetická	$\mu_r \gg 1$	ocel, železo, kobalt

Všechny feromagnetické látky mají určitou teplotu, při které ztratí své magnetické vlastnosti (změní se na paramagnetické). Tato teplota se nazývá Curieova. Například pro ocel je Curieova teplota 760°C, na obr. 4.1 vidíme graf v závislosti teploty a permeability u konstrukční oceli. [3]



Obr. 4.1 Graf v závislosti teploty a permeability konstrukční oceli [3]

Z grafu je vidět, že při zahřívání můžeme rozdělit ocel (vsázku) na tři etapy:

- 1) Tuhá magnetická vsázka (0-760°C)
- 2) Tuhá nemagnetická vsázka (760-1500°C)
- 3) Tekutá nemagnetická vsázka (1500°C a více)

[3]

V tabulce tab. 2. vidíme příklady hloubek vniku naindukovaných proudů pro různé materiály, kmitočty a teploty. Teplota ϑ_1 je pod Curieovým bodem a teplota ϑ_2 je nad Curieovým bodem. [3]

Tab. 2. Hloubka vniku pro různé materiály, teploty a kmitočty [3], [13]

Materiál	Teplota ϑ [°C]	Rezistivita ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	Permeabilita μ_r [-]	Hloubka vniku a [mm]						
				50Hz	500Hz	5kHz	50kHz	500kHz	5MHz	50MHz
Ocel	20(ϑ_1)	0,16	20	6	2	0,6	0,2	0,06	0,02	0,006
			100	3	1	0,3	0,1	0,03	0,01	0,003
			1000	1	0,3	0,1	0,03	0,01	0,003	0,001
	800(ϑ_2)	1,2	1	75	14	7,5	2,4	0,75	0,24	0,075
Měď	20	0,02	1	10	3	1	0,3	0,1	0,03	0,01
	600	0,7	1	18	5,8	1,8	0,6	0,18	0,06	0,018
Litina	20	0,8	100	6	2	0,6	0,2	0,06	0,02	0,006
Mosaz	20	0,085	1	20	6	2	0,6	0,2	0,06	0,02
	600	0,16	1	30	10	3	1	0,3	0,1	0,03
Koks	20	50	1	500	160	50	16	5	1,6	0,5
Grafit	20	10	1	225	70	22,5	7	2,25	0,7	0,22
	1800	5	1	160	50	16	5	1,6	0,5	0,16
Hliník	20	0,03	1	12	4	1,2	0,4	0,12	0,032	0,015
	650	0,7	1	20	6	2	0,7	0,2	0,065	0,02

Z tabulky vidíme, že hloubka vniku se dá dobře regulovat kmitočtem. Při přechodu přes Curieův bod u feromagnetických látek (ocel) se nám skokově zmenší relativní permeabilita a zvýší se nám hloubka vniku naindukovaných proudů, pokud chceme mít pořád stejnou hloubku vniku, kmitočty zvýšíme také skokově. Je nutné použít indukční ohřev s dvojnásobným kmitočtem. U paramagnetických (hliník) a diamagnetických (měď) je relativní permeabilita kolem jednotky, hloubka vniku se mění pouze zvyšováním rezistivity při zahřívání s konstantním kmitočtem. [3]

4.2 Účinnost indukčního ohřevu

Pro větší účinnost indukčního ohřevu musíme zajistit, aby tvar induktoru byl co nejvíce přizpůsobený tvaru vsázky. Účinnost pro válcovou vsázku lze spočítat dle vztahu:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left(1 + 6,25 \frac{a^2}{d^2}\right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}} * 100 [\%] \quad (5.1)$$

D – průměr induktoru

d – průměr vsázky

a – hloubka vniku naindukovaných proudů

ρ_1 – měrný elektrický odpor materiálu induktoru

ρ_2 – měrný elektrický odpor vsázky

μ – permeabilita

Člen $\left(1 + 6,25 \frac{a^2}{d^2}\right)$ musí být co nejmenší, dá se dosáhnout hodnoty 1,1. Z toho spočítáme velikost poměru $\frac{d}{a} > 8$. Hloubka vniku by neměla být větší než osmina průměru. Z výsledného vztahu dostaneme po dosazení za hloubku vniku vztah pro minimální kmitočet. [8], [3]

$$f_{min} = 16 * 10^6 \frac{\rho}{\mu d^2} [\text{Hz}] \quad (5.2)$$

V tab. 3. vidíme hodnoty účinnosti pro různé hodnoty poměru $\frac{d}{a}$, pro válcovou vsázku. [8]

Tab. 3. Účinnost v závislosti na d/a [8]

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

5 Účinnost indukčních zařízení

5.1 Pro tavení

U tavení v indukční tavící peci s nevodivým kelímkem, musíme nastavit přesný kmitočet, neboli hloubku vniku naindukovaných proudů, v závislosti na velikosti

taveného materiálu (d_{optim}). Kelímek je plněn železným šrotem nejlépe stejného materiálu a o stejné velikosti. Při velmi nízkém kmitočtu, nastává průtažnost materiálu, materiál se špatně ohřívá s malou účinností. Při vysokém kmitočtu je hloubka vniku velmi malá a materiál se ohřívá pouze na okraji kusu taveného materiálu, střed by se ohříval pouze vedením tepla. Při tavení magnetických materiálů musíme počítat se změnou permeability, hlavně při teplotě kolem Curieova bodu. V tab. 4. jsou znázorněny průměry kusů taveného materiálu pro ocel a měď při různém kmitočtu. [1], [5]

Tab. 4. Optimální průměry taveného materiálu pro různý kmitočet a materiál [4]

Kmitočet [Hz]	d_{optim} [mm]		
	měď	ocel	
		20°C	840°C
50	44	320	340
500	14	99	107
2000	7	50	54
10000	3,1	23	24
100000	1	7,2	8

Při tavení indukčními tavícími pecemi lze pro stanovení příkonu odebíraného ze sítě 50 Hz vyjít z přibližných hodnot v tab. 5. Hodnoty jsou udávány na jednu tunu materiálu za jednu hodinu tavení. Pec se středním kmitočtem nebo pec s nízkým kmitočtem (50 Hz) volíme podle velikosti kusu taveného materiálu (d_{optim}). [1]

Tab. 5. Přibližné měrné spotřeby elektrické energie [1]

Materiál	Měrný příkon [kW.h.t ⁻¹]	
	Pec se středním kmitočtem	Pec s nízkým kmitočtem
ocel	600 - 750	570 - 700
litina	520 - 650	500 - 650
měď	380 - 400	250
mosaz	360 - 400	330 - 350
hliník	600 - 700	600 - 650
nikl	620 - 700	600 710

5.2 Pro prohřívání za účelem tváření

Pro ohřev na tvářecí teplotu používáme například indukční ohřivačku přířezů, ústřihů, úlomků a ohřivačku tyčového materiálu (viz. kapitoly 3.2.1 a 3.2.2). Požadavek je aby byl materiál zahříván co nejrovnoměrněji. Může zde nastat stejný problém jako u tavení. Při malém kmitočtu nastává průtažnost materiálu a při velkém kmitočtu se materiál ohřívá pouze na povrchu. Z teoretických poznatků víme, že poměr d/a u ploché vsázky by měl být alespoň větší než 2. Z čehož si vypočítáme minimální kmitočet. [1]

$$a = \frac{d}{2} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f_{\min} \gamma \mu}} \quad [\text{mm}] \quad (6.1)$$

Po umocnění vytkneme f_{\min} , a dostaneme.

$$f_{\min} = \frac{4}{d^2 \pi \gamma \mu} = \frac{10^6}{d^2 \gamma \mu_r} \quad [\text{Hz}] \quad (6.2)$$

Minimální kmitočet je stejný i pro válcovou vsázku $r_2 = d$. Nejvyšší kmitočet by měla být volen maximálně do $6 \cdot f_{\min}$. Minimální kmitočet se nám bude v průběhu ohřevu měnit, kvůli změně relativní permeability a měrné elektrické vodivosti. Proto zvolíme průměrný kmitočet f_{\min} . V tab. 6. je vidět průměr polotovaru D pro různé kmitočty. [1]

Tab. 6. Průměry polotovaru pro různé kmitočty u oceli [1]

D [mm]	kmitočet [kHz]
13 - 30	10
22 - 60	4
35 - 100	2
50 - 150	1

V tab. 7. jsou znázorněny doby ohřevu t_0 v závislosti na průměru D , pro dostatečné rovnoměrné rozložení teplot v polotovaru. [1]

Tab. 7. Závislost doby ohřevu na průměru polotovaru [1]

D [mm]	t_0	D [mm]	t_0
20	15 s	90	4,3 min
30	30 s	100	5,5 min
40	50 s	110	6,5 min
50	70 s	120	8 min
60	100 s	130	9 min
70	2,5 min	140	11 min
80	3,5 min	150	12,5 min

Při prohřívání ocelových polotovarů se čtvercovým průřezem, můžeme použít uvedené tabulky. Obsah čtvercového průřezu je rovný kruhovému průřezu. Z obsahu kruhu spočítáme průměr D . [1]

Příkon ohřívacího zařízení o hmotnosti m se za 1 hodinu přibližně vypočítá ze vztahu. [1]

$$P = m (0,35 \text{ až } 0,45) [kW] \quad (6.3)$$

5.3 Pro povrchové kalení

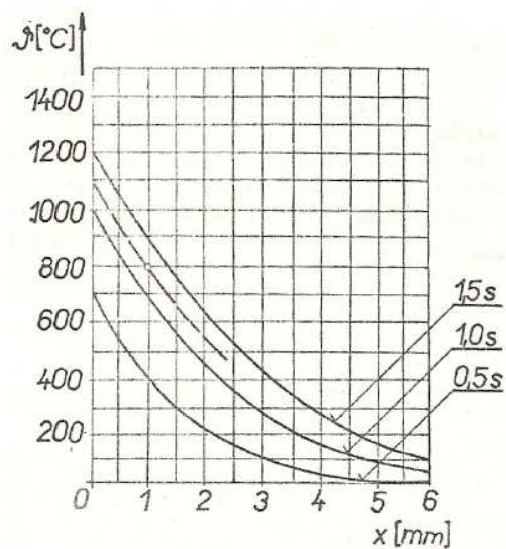
Při povrchovém indukčním kalení zahříváme vsázku pouze na povrchu, abychom toho dosáhli, zvolíme vhodný kmitočet. Pro indukční povrchové kalení je důležitý vysoký měrný příkon, čím rychleji bude povrchová vrstva ohřátá, tím méně tepla pronikne vedením do středu vsázky.

Na grafech (obr. 5.1 a obr. 5.2) je znázorněn rozdíl při napájení vysokým nebo středním kmitočtem. Grafy udávají průběh teplot v závislosti na hloubce od povrchu x v časových intervalech od zapnutí. Časové intervaly pro obr. 5.1 jsou 0,5 – 1 – 1,5 sekundy a pro obr. 5.2 to je 1 – 1,5 – 2 sekundy. Pro oba případy je měrný příkon 1,5 kW/cm².

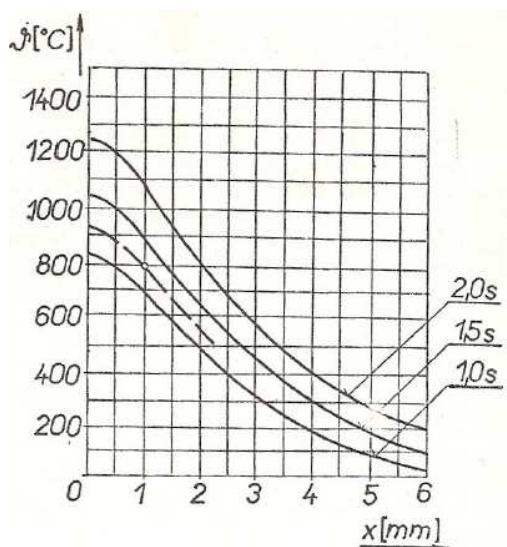
Pro první případ byl použit kmitočet $f = 10$ MHz. Hloubka vniku a při které se uvolní 86,4% tepla je u oceli při 20°C asi 0,02 mm, při 700°C asi 0,08 mm a při 800°C asi 0,3 mm.

V druhém případě je použit kmitočet 100 kHz. Hloubka vniku a je při 20°C asi 0,2 mm, při 700°C asi 0,8 a při 800°C asi 3 mm. Takže asi 10 krát větší než v prvním případě.

Z grafů vidíme, že máme-li kalící teplotu pro kalený materiál 800°C a kalíme vrstvu 1 mm od povrchu. Tak této teploty dosáhneme v obou případech přibližně stejně, a to za 1,3 sekundy. V prvním případě bude po této době teplota na povrchu asi 1100°C, což je přehřátí povrchu $\Delta \vartheta = 300^\circ\text{C}$, v druhém případě 930°C což je přehřátí povrchu $\Delta \vartheta = 130^\circ\text{C}$. Z hlediska materiálu je velké přehřátí materiálu nežádoucí, proto je lepší použít nižší kmitočet pro vrstvu 1 mm. Má-li mít prokalená vrstva šířku desetiny milimetru, je lepší použít kmitočet $f = 10$ MHz. [2]



Obr. 5.1 Závislost teploty a hloubky prohřátí při $f = 10$ MHz [2]



Obr. 5.2 Závislost teploty a hloubky prohřátí při $f = 100$ kHz [2]

6 Ostatní zdroje tepla

Rozdíl mezi indukčním ohřevem a ostatními ohřevy, jako je odporový, plynový.

6.1 Odporový ohřev

V odporových elektrotepelných zařízeních energie závisí na odporu ohřivaného materiálu a na druhé mocnině proudu protékajícím přes ohřivaný materiál. Tento vztah se nazývá Joulov zákon. [1]

$$P_j = R I^2$$

P_j - Joulův výkon

R – elektrický odpor

I – elektricky protékající proud

Odporová elektrotepelná zařízení se dělí podle vzniku tepla na zařízení s přímým a nepřímým odporovým ohřevem. [1]

U přímého odporového ohřevu teplo vzniká průchodem proudu přímo v elektricky vodivé vsázce nebo kapalině. Zařízení s přímým odporovým ohřevem se používají například pro ohřívání ocelových tyčí, ocelových pásů, skla, vody atd. [1]

U nepřímého odporového ohřevu teplo vzniká v topných tělesech, které jsou umístěny v pecním prostoru odporové pece. Teplo se do vsázky přenáší sáláním, vedením a prouděním. Pece se rozdělují podle teploty, atmosféry v pecním prostoru, použití a dle toho jestli se vsázka pohybuje nebo ne. Se stabilní vsázkou používáme pece komorové, vozové, šachtové, pokloповé, elevátorové a kelímkové (tavící). A průběžné pece používáme pásové, válečkové, narážecí, střešací, krokové, bubnové a rotační. [1]

Odporový ohřev se používá hlavně pro kalení, prohřívání a cementování. Nevýhodou je nutnost plné pece, když bude plná z poloviny, tak se nám proces ohřívání prodraží, protože musíme ohřát celou pec. [27]

6.2 Plynový ohřev

Teplo vzniká v plynovém hořáku spalováním zemního plynu. Teplo se do vsázky dostává sáláním, konvekcí a vedením. Plynové pece jsou vysoce tepelně ztrátové. Až sedmdesát procent z celkových ztrát tvoří ztráta tepla odcházejících spalin (komínová ztráta). Ztráta je způsobena vysokými teplotami ve spalovacím prostoru pecí, kde probíhají technologické procesy jako je tavení skla, oceli nebo prohřívání oceli pro tváření.

Plynová zařízení pro použití ve strojírenství jsou:

- ohřívací pece narážecí, krokové, hlubinné, komorové, vozové, karuselové
- pece pro tepelné zpracování kovů (komorové, vozové, pokloповé, válečkové)

- tavicí pece pro barevnou metalurgii
- pece pro sušení slévárenských písků, forem a jader
- pece pro chemickou úpravu kovů (cementace, nitridace)
- fosfátovací a zinkovací pece

[28]

Závěr

Práci jsem si vybral s ohledem na to, že indukční ohřev je velice prosperující obor a v budoucnu o něm určitě ještě hodně uslyším. Indukční ohřev se v dnešní době ve strojírenství velmi často používá a je velmi propracovaný. Používá se hlavně na tavení, kalení a prohřívání. Hlavní výhody indukčního ohřevu jsou. Snadná regulace ohřevu a rozložení teplot. Na povrch ohříváného materiálu nepůsobí chemické vlivy jako u plynového ohřevu, nenastává oxidace povrchu, díky vysoké rychlosti ohřevu. Při tavení, prohřívání nebo kalení nevznikají žádné produkty spalování. U indukčního ohřevu nevzniká „komínová ztráta“.

Indukční ohřev je málo ztrátový, protože teplo vzniká přímo uvnitř ohříváného materiálu a nemusí se předávat sáláním, prouděním nebo vedením, jako je toho u odporových a plynových pecí. Účinnost je vyšší oproti plynovým a odporovým pecím. Používáme-li například průběžnou pec užívanou k ohřevu ocelových polotovarů o výkonu 100 kW, můžeme ji nahradit vysokofrekvenčním generátorem o výkonu 25 kW.

Při tavení, kalení nebo prohřívání magnetické vsázky musíme vždy nastavit přesný kmitočet a počítat s tím, že se nám hloubka vniku naindukovaných proudů skokově změní při přechodu přes Curieův bod. Při kalení zahříváme pouze povrch materiálu, tady je důležitá rychlost ohřevu, aby se vedením nezahřival i střed. U tavení a prohřívání je hloubka vniku větší, při příliš velké hloubce vniku nastane průžařnost materiálu, což je nežádoucí jev.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA, Josef et al. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 344 s.
- [2] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. 1. vyd. Plzeň, 1982, 185 s.
- [3] KOŽENÝ, Jiří. *Základy elektrotepelné techniky: Poznámky z přednášek*. Západočeská univerzita Plzeň, 2011.
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk et al. *Elektrotepelná zařízení*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1997, 174 s. ISBN 80-902-3332-5.
- [5] POTŮČEK, Milan. *Průmyslové využití indukčních ohřevů*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita Plzeň. Vedoucí práce Oldřich Kroupa.
- [6] MILKA, Jiří. *Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ilona Lázničková.
- [7] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (1). *Časopis Elektro*. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2002, č. 10, s. 56. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el100256.pdf>
- [8] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (2). *Časopis Elektro*. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2002, č. 11, s. 55. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110255.pdf>
- [9] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (3). *Časopis Elektro*. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2002, č. 12, s. 55. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267
- [10] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (4). *Časopis Elektro*. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2003, č. 1, s. 55. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010355.pdf>
- [11] REICHL, Jaroslav. *Magnetické vlastnosti látek*. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [12] *Indukční ohřev + Relativně tlustá stěna* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: http://panther.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev

- [13] Rezistivita. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita>
- [14] Žíhání (metalurgie). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Žíhání_\(metalurgie\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Žíhání_(metalurgie))
- [15] Kalení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kalení>
- [16] *Kování (tváření)* [online]. 10. 2. 2012 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Kování_\(tváření\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kování_(tváření))
- [17] Pohled na polovodičový vysokofrekvenční svařovací generátor [online]. 2009 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/polovodicovy-vysokofrekvencni-svarovaci-generator-s-vykonem-300-az-400kw-pro-vyrobu-ocelovych-uzavrenych-profilu>
- [18] Индукционная система нагрева с воздушным охлаждением «Heatmaster HM30» [online]. 2010 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.svarka-truboprovoda.ru/predvaritelnyy-podogrev/33-indukcionnaya-sistema-nagreva-s-vozdushnym-ohlazhdeniem-heatmaster-hm30.html>
- [19] Высокочастотная сварка [online]. 2001 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://slovari.yandex.ru/~книги/БСЭ/Высокочастотная%20сварка/>
- [20] Оборудование поверхностной цементации индукции для ролика или вала [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://russian.alibaba.com/product-gs/induction-case-hardening-equipment-for-roller-or-shaft-312821923.html>
- [21] Холоднопрокатное пошущенное над стальное адвокатское сословие закаляя машину обработки [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://russian.alibaba.com/product-gs-img/cold-rolled-ribbed-steel-bar-tempering-treatment-machine-517535502.html>
- [22] Linemelt: indukční pec [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://ordal.by/catalog/4.html>
- [23] НАДЁЖНАЯ И ЭКОНОМИЧНАЯ ПЛАВКА В СРЕДНЕЧАСТОТНОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ НАДЁЖНАЯ И ЭКОНОМИЧНАЯ ПЛАВКА В СРЕДНЕЧАСТОТНОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: http://www.lityo.com.ua/li/s_240.html

- [24] *Induction Heating Equipment* [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z:
<http://www.gpgyjr.com.cn/Induction-Heating-Equipment-37.html>
- [25] Annealing using induction heating [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z:
<http://www.germanflux-noha.com/en/heat-treatment.html>
- [26] Indukční svařování [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z:
<http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-svarovani/>
- [27] BAMBUSZ, Michal. Elektrické ohřevy v praxi. 2008. Bakalářská práce. Západočeská univerzita Plzeň. Vedoucí práce Černý.
- [28] FÍK, Josef. Plynové spotřebiče (III) [online]. 23.6.2004, 23.6.2004 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2039-plynove-spotrebice-iii>
- [29] PAVLÍČEK, Karel. Stínění indukční kelímkové pece. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Oldřich Kroupa.

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 0.1 Indukční ohřev plné válcové vsázky [25]	11
Obr. 1.1 Náhradní schéma indukčního ohřevu [3]	12
Obr. 1.2 Princip indukčního ohřevu [24]	13
Obr. 2.1 Kelímková indukční pec [23].....	16
Obr. 2.2 Indukční kelímková pec s chladnými stěnami [9].....	17
Obr. 2.3 Indukční kelímková pec s elektricky vodivým kelímkem [4]	17
Obr. 2.4 Kanálková indukční pec [12].....	18
Obr. 2.5 Kanálková indukční pec LINEMELT [22]	19
Obr. 2.6 Indukční ohřívací stroj [1].....	19
Obr. 2.7. Průběžný indukční ohřev tyčí [1].....	20
Obr. 2.8 Průběžný indukční ohřev tyčí v praxi [21]	20
Obr. 2.9 Oválný induktor pro indukční ohřev konců tyčí [1]	21
Obr. 2.10 Postupné indukční kalení pro válcové stolice [12]	22
Obr. 2.11 Indukční povrchové kalení v praxi [20].....	22
Obr. 2.12 Indukční svařování trubek [19].....	23
Obr. 2.13 Svár na obdélníkovém profilu [26]	23
Obr. 2.14 Indukční svařování v praxi [17]	23
Obr. 2.15 Indukční pájení trubek s přírubami [6].....	24
Obr. 2.16 Indukční pájení trubky [10].....	24
Obr. 2.17 Pájení obráběcích nožů [10]	25
Obr. 2.18 Indukční žíhání obvodového sváru potrubí se zdrojem HM30 [18]	25
Obr. 3.1 Schéma síťového indukčního ohřevu [1]	26
Obr. 3.2 Schéma trojnásobiče kmitočtu [1].....	27
Obr. 3.3 Princip rotačního generátoru [1]	28
Obr. 3.4 Schéma tyristorového měniče [1].....	28
Obr. 3.5 Schéma indukčního ohřevu s elektronkovým měničem [1].....	29
Obr. 4.1 Graf v závislosti teploty a permeability konstrukční oceli [3].....	30
Obr. 5.1 Závislost teploty a hloubky prohřátí při $f = 10$ MHz [2].....	36
Obr. 5.2 Závislost teploty a hloubky prohřátí při $f = 100$ kHz [2]	36
Tab. 1. Rozdělení látek z hlediska magnetismu [11]	30
Tab. 2. Hloubka vniku pro různé materiály, teploty a kmitočty [3], [13].....	31
Tab. 3. Účinnost v závislosti na d/a [8]	32
Tab. 4. Optimální průměry taveného materiálu pro různý kmitočet a materiál [4].....	33
Tab. 5. Přibližné měrné spotřeby elektrické energie [1].....	33
Tab. 6. Průměry polotovaru pro různé kmitočty u oceli [1].....	34
Tab. 7. Závislost doby ohřevu na průměru polotovaru [1].....	34