

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tavení kovů v indukčních kanálkových pecích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef KUBEŠ**

Osobní číslo: **E14B0029P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Tavení kovů v indukčních kanálkových pecích**

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 teorii a princip indukční kanálkové pece.
2. Zdůvodněte jejich výhody a nevýhody v porovnání s tavením kovů v indukčních kelímkových pecích.
3. Analyzujte technologický proces tavení.
4. Proveďte hodnocení tavicích procesů v kanálkové a kelímkové peci kritériem 3E.
5. Uveďte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

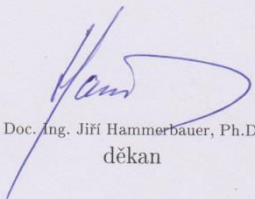
1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

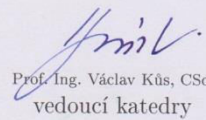
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce pojednává o využití indukčního ohřevu v různých aplikacích. Práce je primárně věnována kanálkovým indukčním pecím. Pojednává však i o principu indukčního ohřevu samotného, ale i o jeho využití v tavicích a přehřívacích aplikacích. Práce hodnotí odlišnosti užití indukčního ohřevu k tavbě v různých provedeních. Přináší závěry pro praktické užití a poskytuje hodnocení dle kritéria 3E.

Klíčová slova

Indukční ohřev, kanálková pec, kelímková pec, cívka, hloubka vniku, tavení materiálu, vsázka, kanálek, Poyntingův vektor, zarůstání kanálku, prohřívání, kalení, pájení, svařování, kritérium 3E.

Abstract

Presented bachelor's work deals with application induction heating in different applications. The work is primarily devoted to duct induction furnaces. It treats also the principle of induction heating itself but it also deals with its using in melting and overheating applications. The work evaluates differences of using induction heating to melting process in different implementations. It causes conclusions for practical application and it provides assessment according to the standard of 3E.

Key words

Induction heating, duct furnace, crucible furnace, coil, depth of penetration, melting down of material, loading, duct, Poynting vector, duct closing, throughout warming, hardening, soldering, welding, 3E criterion.

Prohlášení

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

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

.....
Podpis

V Plzni dne 4.6.2018

Josef Kubeš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za velmi cenné rady, připomínky, trpělivost a poskytnutí studních materiálů k vypracování práce.

Obsah

ÚVOD	8
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČÍN	9
1. PRINCIP KANÁLKOVÝCH PECÍ.....	12
1.1 TEORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU	12
1.2 OHŘEV V KANÁLKOVÉ PEČI.....	15
1.2.1 Ohřev v kanálkové peci s obdélníkovým kanálkem.....	15
1.2.2 Ohřev v kanálkové peci s kruhovým kanálkem	16
1.2.3 Víření taveniny.....	18
1.3 VÝHODY INDUKČNÍHO OHŘEVU V KANÁLKOVÉ A KELÍMKOVÉ PEČI	18
2. PRAKTICKÉ VYUŽITÍ INDUKČNÍHO OHŘEVU	20
2.1 KANÁLKOVÉ PECE	20
2.1.1 Pece na tavení barevných kovů.....	21
2.1.2 Pece na tavení hliníku a slitin.....	21
2.2 KELÍMKOVÉ PECE	22
2.2.1 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm.....	24
2.2.2 Indukční kelímková pec s železným jádrem vně cívky.....	25
2.2.3 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem.....	26
2.3 PROHŘÍVACÍ APLIKACE.....	26
2.4 POVRCHOVÝ OHŘEV	28
2.4.1 Kalení	28
2.4.2 Pájení.....	30
2.4.3 Svařování.....	31
3. TAVÍCÍ PROCES	32
3.1. KANÁLKOVÉ PECE	32
3.2. KELÍMKOVÉ PECE	33
3.3. KRITÉRIUM 3E.....	35
3.3.1. Energetické kritérium	35
3.3.2. Ekonomické kritérium.....	36
3.3.2. Ekologické kritérium	36
ZÁVĚR.....	37
SEZNAM LITERATURY	39
PŘÍLOHY	40

Úvod

Tato práce pojednává o problematice indukčního ohřevu, především v kanálkových pecích a o jeho výhodách i problémech souvisejících s jeho využitím v reálném provozu a různých aplikacích.

Indukční pece a aplikační ohřevy jsou dnes jedny z nejmodernějších typů ohřevu, které jsou taktéž přátelské k prostředí. Vzhledem k těmto dnes žádaným skutečnostem se jejich využití bude s časem stále zvyšovat.

Úvod první kapitoly je zde věnován samotnému principu indukčního ohřevu, a to bez aplikace na konkrétní využití této metody. Další část této kapitoly tvoří popis indukčního ohřevu v kanálkové peci, a to v kanálku obdélníkového nebo také kruhového průřezu spolu s následnou charakterizací víření taveniny. Závěrem je tato část věnována výčtu výhod a nevýhod kanálkové i kelímkové pece, a to jak mezi sebou, tak společně oproti jiným typům ohřevu.

V druhé části jsou informace o konkrétních aplikacích indukčního ohřevu. Začátek nejprve pojednává o tavných kanálkových pecích. Následuje popis pecí kelímkových. Zatímco druhá polovina pojednává o užití ohřevu na prohřívací aplikace a povrchové ohřevy. Tento ohřev lze užít ke kalení, svařování nebo i pájení.

Závěrečná kapitola pojednává o samotném průběhu tavného procesu pro kanálkové, ale stejně tak i kelímkové pece. A následně zde také hodnotí jejich provoz pomocí kritéria 3E.

Seznam použitých veličin

Symboly	Veličiny	Jednotky
I_2	proud ve vsázce	A
ε	permitivita	F/m
μ	permeabilita	H/m
f	frekvence	Hz
ω	úhlová frekvence	rad/s
S_n	Poyntingův vektor	W/m ²
E	intenzita elektrostatického pole	V/m
H	intenzita magnetického pole	H/m
γ	konduktivita	S/m
a	hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do vodivého prostředí	m
J	proudová hustota	A/m ²
R_{21}	činný odpor kanálku na jednotku délky	Ω/m
d	tloušťka kanálku	m
r_2	poloměr osy kanálku	m
r	poloměr osy vinutí induktoru	m
D_2	střední průměr tvaru kanálku	m
S	zářivý Poyntingův vektor	W/m ²
H_2	intenzita magnetického pole ve vsázce	H/m
E_2	intenzita elektrického pole ve vsázce	V/m
E_e	energie fotonů	J
h	Planckova konstanta	J/s
ρ	měrná hustota	kg/m ³
U	napětí	V
m	hmotnost	kg
W	absorbovatelná energie	J/kg
$\theta_1,$	doba tavby	s
θ_2	ztrátový čas	s
η_{tep}	tepelná účinnost	–
η_{el}	elektrická účinnost	–

c	součinitel plášťového transformátoru	–
M	hmotnost denní tavby	kg
P	výkon	W
S_s	zdánlivý výkon	VA
$\cos \varphi$	účinník	–
ψ	součinitel pro výpočet průřezu jádra	–
B_m	indukce v železe	T
B_l	magnetická indukce cívky	T
J_{Cu}	hustota proudu v mědi	A/m ²
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	W
S_{Fe}	skutečný obsah železného jádra	m ²
k_C	koeficient odstupňování jádra	–
S'_{Fe}	obsah jádra pro navinutí vodiče	m ²
k_d	činitel zaplnění dutiny	–
D_{Fe}	průměr kružnice jádra	m
D_i	průměr jádra s azbestovou lepenkou	m
S_{Cu}	průřez vodiče cívky	m ²
I_l	proud cívky	A
$D_{Cu\ Stř}$	střední průměr závitů	m
N_l	počet závitů pecní cívky	–
R_l	odpor cívky	Ω
ΔP_l	ztráty v cívce	W
δ	mezera mezi závitů cívky	m
h_l	délka cívky	m
U_2	napětí v kanálku	V
I_2	proud kanálku	A
J_2	proudová hustota vsázky	A/m ²
S_2	průřez kanálku	m ²
R_2	činný odpor kanálku včetně nístěje	Ω
D_2	průměr středního vlákna	m
k_p	součinitel pro výpočet odporu kanálku s nístějí	–
P_2	užitný výkon v kanálku	W
Z_l	impedance pece	Ω

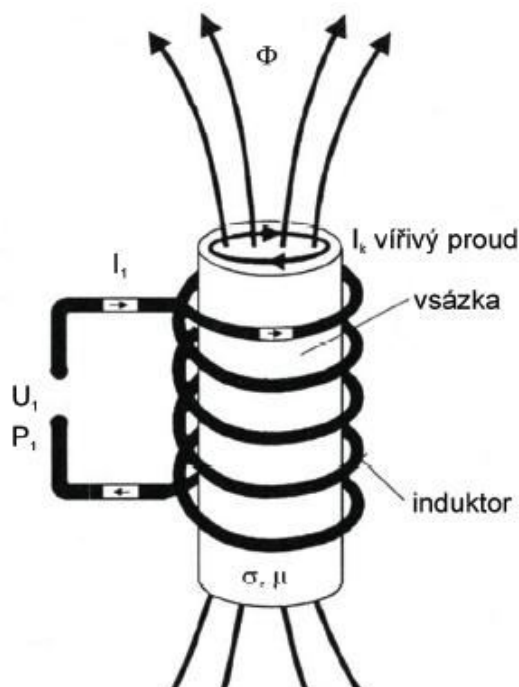
R_1	činný odpor pece	Ω
p	převod transformátoru	–
d_3	vzdálenost vodivého stínícího pláště od induktoru	m
h_v	vzdutí taveniny	m

1. Princip kanálkových pecí

1.1 Teorie indukčního ohřevu

Indukční ohřev je typ elektrického bezkontaktního ohřevu elektricky vodivých materiálů. Z tohoto důvodu nehrozí znečištěním samotnou technologií ohřevu oproti metodám nepřímého ohřevu.

Indukční zařízení sestává z cívky s procházejícím střídavým proudem, který ovlivňuje svým průchodem vsázku prostřednictvím elektromagnetického vlnění vyzařovaného z cívky. [6]



Obr. 1.1: Cívka s jádrem [6]

Při umístění elektricky vodivé vsázky souose s cívkou vstupuje přes povrch do vsázky ono elektromagnetické vlnění vyzářené z cívky. Směr a velikost indukovaného proudu závisí na charakteru a intenzitě pole. [3]

Prostřednictvím magnetického pole dle Lenzova pravidla je v sekundární straně vybuzeno proměnné magnetické pole. To zajistí naindukování napětí v kanálku, který protlačuje průchod proudu v uzavřeném obvodu kanálku. Poté, co dojde k průchodu proudu I_2 v sekundární straně pece, průchod proudu vybudí vířivé proudy a Joulovo teplo zajistí přeměnu elektrické energie v teplo a následně tak dojde k ohřevu materiálu.

Lenzovo pravidlo zní: *Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.*

Rozložení proudu je závislé na frekvenci zdroje a na materiálových vlastnostech, jakými je konduktivita (γ) a permeabilita (μ). Tyto tři parametry ovlivňují tzv. hloubku vniku elektromagnetické vlny do vsázky. [3]

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega * \gamma * \mu_0 * \mu_r}} \quad (m) \quad (1.1)$$

Hloubka vniku zde značí množství a místo vzniku tepla vygenerovaného do vsázky. Velikost tohoto parametru je vhodné navrhnout podle velikosti kanálku či dutiny kelímku. Samotná hloubka vniku je ale proměnná, vychází z již výše uvedeného vzorce, kdy většina jeho složek je určena právě samotným zpracovaným materiálem.

Tyto parametry taveného materiálu jsou však také ovlivněny vzhledem k jejich proměnlivosti v průběhu tavení při změnách teploty. [6]

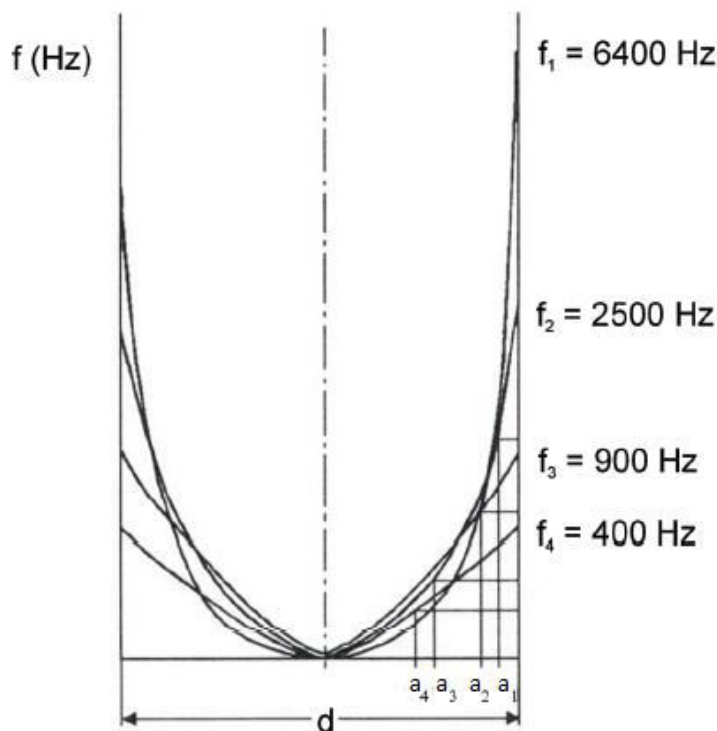
Materiál	Teplota (°C)	$\eta_{el. max}$ (%)
Cu	20	50
	1100	77
AL	20	56
	660	77
Ocel	20	93
	800	88

Tab. 1.1: Účinnost indukčního ohřevu v závislosti na teplotě [6]

Jediný z parametrů tohoto vzorce, který se s materiálem nemění, je úhlová rychlost ($\omega=2\pi f$), tou lze regulovat potřebnou hloubku vniku. [6]

Frekvence (Hz)	Hloubka vniku (mm)					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8	71,2
1000	2,1	7,1	2,7	7	1,8	15,9
10000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5
1000000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5

Tab. 1.2: Hloubka vniku dle užití frekvence [6]



Graf. 1.1: Závislost hloubky vniku na šíři materiálu [6]

Z grafu plyne závislost hloubky vniku a průměru vsázky. Tato závislost způsobuje utlumení či plné zatlumení elektromagnetické energie vstupující do vsázky. Toto zatlumení může způsobit nerovnoměrné prohřívání vsázky a ovlivní také účinnost ohřevu. [6]

Pro popis přenosu energie z induktoru pomocí elektromagnetického pole do vsázky a její následné přeměny na Joulovo teplo se provádí energetická bilance. Tato bilance se provádí pomocí Poyntingova vektoru. [3]

$$S_n = E \times H \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1.2)$$

Jak je psáno výše Poyntingův vektor se skládá z intenzity magnetického pole H a elektrického pole E . Tyto dvě složky určují elektromagnetické pole. Jejich výpočtem pomocí vlnových rovnic získáme parametry šíření pole. [3]

$$\nabla^2 \bar{H} - \gamma * \mu * \frac{\delta \bar{H}}{\delta t} - \varepsilon * \mu * \frac{\delta^2 \bar{H}}{\delta t^2} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla^2 \bar{E} - \gamma * \mu * \frac{\delta \bar{E}}{\delta t} - \varepsilon * \mu * \frac{\delta^2 \bar{E}}{\delta t^2} = 0 \quad (1.4)$$

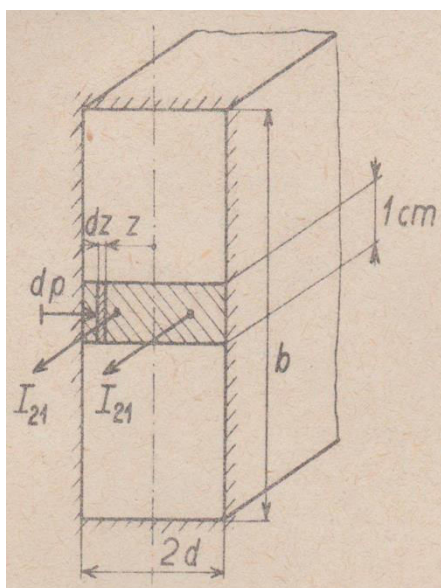
1.2 Ohřev v kanálkové peci

Konkrétně je u kanálkových indukčních pecí primární strana transformátoru umístěna pod nístějí ve středové části pece. Sekundární strana neboli kanálek primární stranu obepíná. Kanálek samotný společně s nístějí je naplněn roztavenou vsázkou a tím tvoří závit nakrátko.[2]

Přestože teplo vniká přímo v kanálku pece, pomocí elektrodynamického působení se teplota šíří do celé vsázky pece. Tomu už dle zákonů šíření tepla nelze zcela zabránit. [1]

V případě kanálkové pece je energie přenášena pomocí magnetického obvodu s železným jádrem. Obvod samotný vyvolává změny pole ve vsázce. Vektor intenzity magnetického pole H se uzavírá soustřednými kružnicemi kolem kanálku ve vsázce. Vektor intenzity elektrického pole E_2 nabývá osy vsázky kanálku a směřuje tak souběžně s jeho osou. [3]

1.2.1 Ohřev v kanálkové peci s obdélníkovým kanálkem



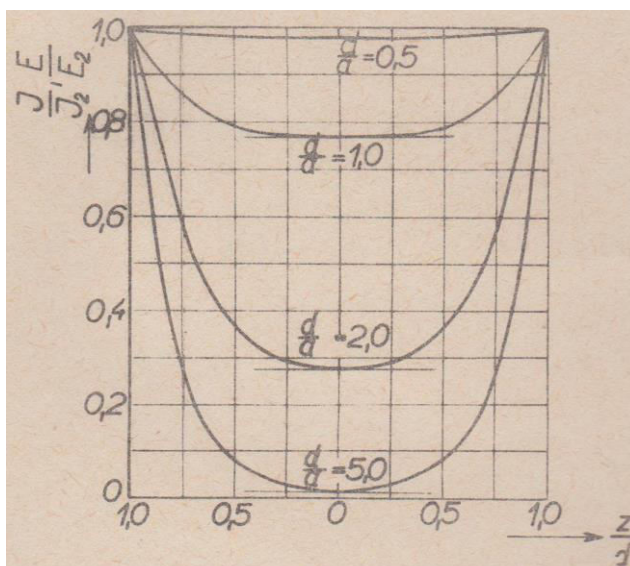
Obr. 1.2: Průřez kanálku s obdélníkovým tvarem [1]

Pro kanálek obdélníkového průřezu budeme uvažovat, že výška kanálku je značně větší než jeho tloušťka. Tento předpoklad určuje rozložení intenzity magnetického pole H a elektrického pole E v polovině kanálku. [1]

Díky symetrii kanálku ho lze rozdělit osou symetrie na dvě stejné poloviny. Proud ve vsázce I_2 v této polovině je tak také poloviční. Této symetrii odpovídají také křivky udávající průběh hustoty proudu s ohledem na tloušťku kanálku d a hloubku vniku a . [1]

$$\bar{H} = \bar{I}_{21} * \frac{\sinh(pz)}{\sinh(pd)} \quad (A/m) \quad (1.5)$$

$$\bar{E} = -\frac{1}{\gamma} * \bar{J} = -\frac{p}{\gamma} * \bar{I}_{21} * \frac{\cosh(pz)}{\sinh(pz)} \quad (V/m) \quad (1.6)$$



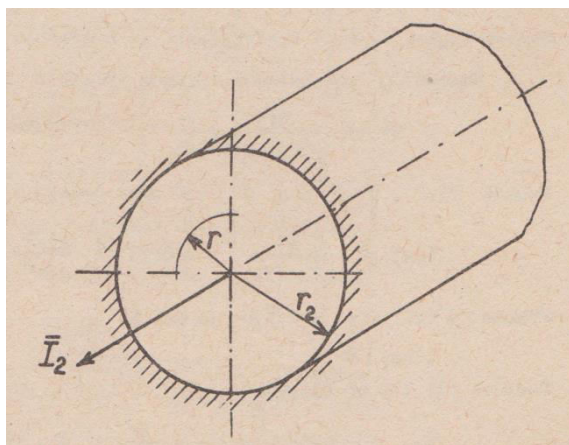
Graf 1.2: Průběh proudové hustoty v obdélníkovém kanálku [1]

Z grafu je patrné, že při poměru d/a 0,5 je průběh proudové hustoty J téměř konstantní, zatímco při poměru 5 dochází k jejímu ztlumení poblíž středu kanálku. [1]

$$R_{21} = \frac{1}{a * \gamma} * \frac{a}{d} (\Omega/m) \quad (1.7)$$

Důležitým parametrem pro výpočet pece je činný odpor kanálku. R_{21} udává odpor poloviny kanálku pece na jednotkovou délku. [1]

1.2.2 Ohřev v kanálkové peci s kruhovým kanálkem



Obr. 1.3: Průřez kanálku s kruhovým tvarem [1]

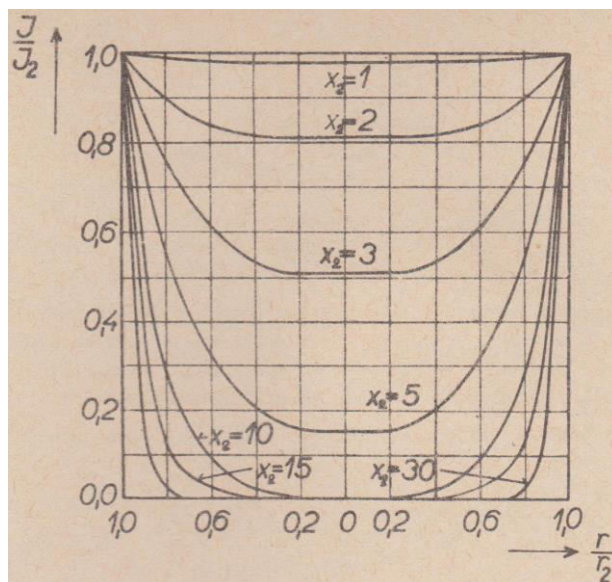
Dalším typem, obvykle používaného tvaru kanálku, je kruhový průřez. Pro kruhový průřez je popis veličin roven jiným vzorcům z důvodu konstrukce. Výraz pro proudovou hustotu je v peci s kruhovým průřezem roven vzorci níže. [1]

$$\bar{J} = \frac{1}{(1 + j) * \pi * r_2 * a} * \bar{I}_2 * \frac{J_0(x\sqrt{-j})}{J_1(x_2\sqrt{-j})} (A/m^2) \quad (1.8)$$

Na rozdíl od kanálku obdélníkového průřezu, kdy byl průběh proudové hustoty

roven poměru poloviny tloušťky kanálku d k hloubce vniku a , je pro kruhový průřez použitý parametr x resp. x_2 . [1]

$$x = \frac{r * \sqrt{2}}{a} \quad \text{resp.} \quad x_2 = \frac{r_2 * \sqrt{2}}{a} \quad (1.9)$$



Graf 1.3: Průběh proudové hustoty v kruhovém kanálku [1]

Z grafu opět vyplývá, pro které hodnoty argumentu x_2 je průběh proudové hustoty téměř nezměněn a pro které je v okolí středu kanálku ztlumen. Důležitou informací je zde skutečnost, že v důsledku možného „zarůstání“ kanálku v průběhu tavení některých kovů může být parametr x_2 a tím i r_2 proměnný. Jedním z hlavních představitelů této skutečnosti je hliník a z něj vznikající oxid hliníku. Z tohoto zarůstání dochází ke změně činného odporu kanálku R_{21} . [1]

$$R_{21} = \rho * \frac{a}{\sqrt{2} * \pi * r_2 * a^2} * \frac{Q(x)}{P(x)^2 + Q(x)^2} \quad (\Omega/m) \quad (1.10)$$

Ze vzorce vyplývá, že R_{21} je závislý na r_2 resp. x_2 . Při nízkých hodnotách x_2 je odpor R_{21} velký a s rostoucím parametrem x_2 rychle klesá. Z toho důvodu není $x_2 < 1$ vhodné pro konstrukci pece z důvodu, že i malá změna v důsledku zarůstání by vedla k prudké změně odporu. Proto je vhodné umístit kanálek až za mez $x_2 > 1,5$, ale také zároveň $x_2 < 3$ aby nenastal příliš malý odpor. [1]

Celkový odpor kanálku lze získat vynásobením R_{21} a $\pi * D_2$, kde D_2 reprezentuje zakřivení tvaru kanálku. Tento odpor je však trochu menší, a to z důvodu rozšíření kanálku do nistěje pece, neboť proud kanálku I_2 prochází větším průřezem. [1]

1.2.3 Víření taveniny

Průchod proudu vsázkou resp. vodičem vybudí na povrchu vodiče elektromagnetickou energii. Hustota a rovněž i směr jeho toku jsou dány zářivým Poyntingovým vektorem. [1]

$$\bar{S} = \bar{E}_2 * \bar{H}_2 \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (1.11)$$

Vektor je na povrchu tvořen dvěma složkami. Dominantní složka má průběh rovnoběžný s osou vodiče a lze ji definovat jako přenášenou energii. Sekundární složka je k povrchu kolmá a reprezentuje energii vstupující do vodiče. Vzhledem k tomu, že po vstupu je vodičem pohlcena, dochází po jejím vstupu k přeměně v teplo. Sekundární složka je tak totožná se ztrátami ve vodiči. [1]

Fyzikální podstatu sekundární složky si lze představit jako formu fotonů. Poté je možno energii tohoto fotonu definovat pomocí Planckovy konstanty a kmitočtu. [1]

$$E_e = h * f \text{ (J)} \quad (1.12)$$

Při kontaktu fotonů s atomy roztaveného kovu je kinetická energie fotonu předána a přispívá k rozkmitu atomů kovu a tím i zvýšení jejich teploty. Toto předání však produkuje nejen tepelnou, ale i samu kinetickou energii, což se projevuje jako mechanický tlak. Atomy kovu jsou pak tlačeny na atomy sousední a to vše v radiálním směru k ose vodiče. [1]

1.3 Výhody indukčního ohřevu v kanálkové a kelímkové peci

Specifická vlastnost kanálkových pecí oproti kelímkovým je schopnost tavit nejen klasické bloky, ale i kovový šrot. Ten se postupně rozpouští v tekuté vsázce, dokud není celý nataven a proces se poté opakuje. [1]

Oproti tomu do kelímkové pece je nutné nejprve usadit pevný válec plné vsázky. Ten však nemusí zabírat celý objem kelímku, je zde však nutné aby zajistil uzavření závitů nakrátko již v pevném stavu před začátkem tavby. Zbýlý prostor okolo pevné části se tak může vyplnit šrotem. Uzavření závitů je v kanálkové peci zajištěno již tepelně roztaveným kovem v kanálku.

Z této skutečnosti však vyplývá i výhoda kelímkových pecí v tom, že tuto pec je

možno rozbíhat a provozovat bez nutnosti roztavení kovu předem. Kanálkovou pec je taktéž možno rozběhnout znovu, musí však být v kanálku vychladlý kov, který plně zaplňuje kanálek a spodní část nístěje, ale v tomto případě značně degraduje vyzdívka pece. Proto se tyto pece nevypínají ani při krátkodobém přerušení tavby a nechává se zde malé množství neustále přehřívaného materiálu.

Vyzdívka samotná je přítomna u obou pecí, avšak u kelímkové je lépe přístupná. Snáze se vytváří nová a mezi tavbami je možno vyzdívku kontrolovat, případně i opravovat. Oproti tomu vyzdívka v kanálkové peci je neustále zaplněna kovem a svým umístěním je i po vypuštění kovu hůře dosažitelná.

Při tavení v kelímkové peci se na rozdíl od kanálkové nevíří tavenina v takové míře jako v kanálkové. Není zde totiž přítomen kanálek, z kterého by byl roztavený kov vytlačován, ale ohřev materiálu probíhá přímo v místě vložení vsázky. Nicméně k menšímu víření dochází i tak vlivem elektrodynamických sil. Proto je v obou typech pecí možné tavit slitiny s homogenním promísením materiálu. Nicméně hladina taveniny ani tak nebývá rovná.

Konstrukce kelímkové pece vyžaduje užití stínění, toto je způsobeno umístěním cívky, kdy cívka je víceméně vně pece. Kdežto u kanálkové pece je uvnitř cívky umístěno pouze jádro a zbytek pece cívku obepíná, o stínění se tak stará kanálek samotný a následně i stěna pece, která je dobře magneticky vodivá.

Užití kanálkové pece nevyžaduje užití frekvenčního měniče a to z důvodu jejího použití při síťových frekvencích. Oproti tomu kelímková pec se často používá při vyšších kmitočtech. [5]

U kanálkové pece je nebezpečí uskřipovacího jevu, kdy dojde k přerušení souvislosti taveniny v kanálku a z toho plynoucí rázy (lépe popsáno ve 3.1) Tento nežádoucí jev se u kelímkové pece nevyskytuje.

Umístění cívky u kanálkové pece je ale příčinou konstrukčně větší složitosti konstrukce pece samotné, než tomu je u kelímkové

Pro provoz kanálkové pece je nutné provést chlazení pomocí ventilátoru, tento způsob chlazení je značně jednodušší oproti řešení chlazení v peci kelímkové. V jejím případě proudí voda dutinou v pecní cívce, kde je nutné zajistit nejenom dobrý stav

potřebného čerpadla, ale i stálé těsnění tohoto okruhu.

2. Praktické využití indukčního ohřevu

Energetická efektivita samotného indukčního ohřevu je oproti například konvenčním tavicím pecím vysoká. Tato skutečnost platí hlavně z důvodu, že teplo vzniká přímo v taveném materiálu.

Indukční ohřev lze využít v nejrůznějších aplikacích, jakými jsou tavení, prohřívání, kalení či pájení. Všechna tato užití jsou rozepsána níže.

2.1 Kanálkové pece

Kanálková pec je vlastně transformátor s uzavřeným železným jádrem s cívkou připojenou k síti. Kanálek samotný se spodní částí nístěje je vyplněn roztaveným kovem a umožňuje tak uzavření závitu a víření taveniny. [6]

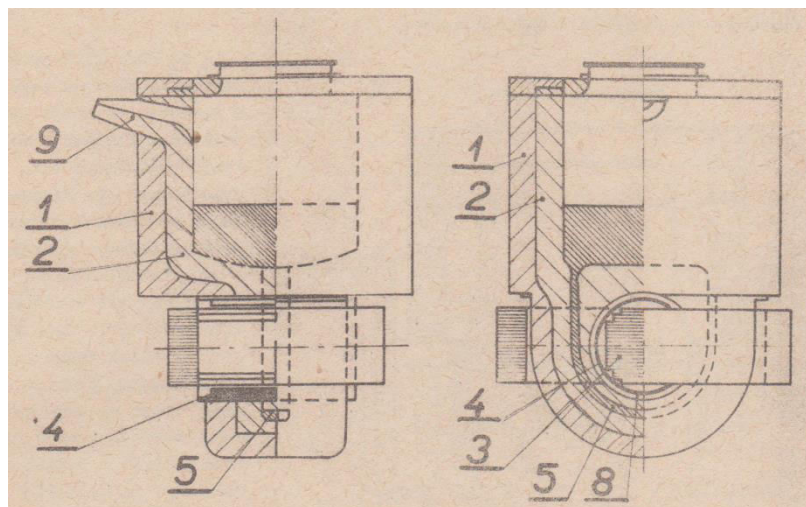
Tyto pece je vhodné použít k tavení barevných kovů, mědi a jejích slitin a v neposlední řadě k tavení hliníku. Je však možné je využít i k přehřívání litiny roztavené předem. [6]

Z pece se odlévá roztavený materiál pomocí naklápění pece. Je zde ovšem nutno nechat přibližně třetinu vsázky, což je dáno předpokladem neustálého zaplnění kanálku roztaveným materiálem. Poté je do pece umístěn další materiál na roztavení, například šrot. Elektrodynamické síly způsobí vytlačení kovu z kanálku do nístěje a stejně tak kovu z nístěje do kanálku. Tyto síly způsobí promísení kovu v peci, ovlivňují homogenizaci vsázky jak tepelně, tak i materiálově. [1]

U některých kovů, například mosazi je víření vsázky žádoucí. Ovšem není tomu tak u všech kovů. Víření vsázky lze potlačit použitím pece bez svislého kanálku. Nedochozí tak k promísení kovů vlivem samotné vsázky, teplejší kov je vytlačován nahoru. [1]

Při užití svislého kanálku je tavenina vytlačována kolmo k hladině roztaveného kovu. Při užití kanálku, který je do nístěje přiváděn pod menším úhlem, proudí tavenina do nístěje po delší dráze a také pod menším úhlem směrem k hladině taveniny. To zajistí snížení jejího rozrušení a tím i oxidaci hladiny taveniny.

2.1.1 Pece na tavení barevných kovů



Obr. 2.1: Kanálková pec na barevné kovy [1]

Zde je vyobrazena kanálková pec určená k tavení barevných kovů, například mědi. Kanálek 5 má obdélníkový průřez a kruhový tvar (s nístějí ve tvaru válce). Nístěj je tvořena z žáru a tepelně izolačních materiálů 1 a 2, které jsou určeny k tepelné izolaci roztaveného materiálu od stěny pece. Primární cívka 4 je třeba chladit, obvykle vzduchem, Chlazení probíhá pomocí ventilátoru vhánějícího vzduch do mezery 8, která je umístěna z vnější strany primární cívky. Pro odlití materiálu se pec musí nahnout a materiál se odleje hubicí 9. [1]

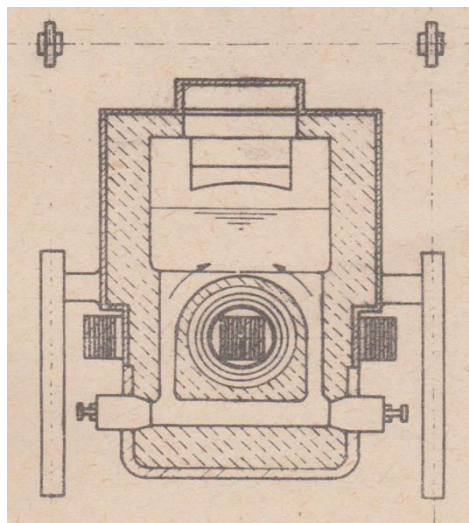
Vyzdívka nístěje není trvalá, ale je nutné ji po přibližně 4 tisících tavných výměnit. Novou vyzdívku je nutno vysušit a následně je do pece umístěna roztavená vsázka, která uzavírá závit nakrátko, tím zajistit před zapnutím pece uzavření kanálku. [1]

2.1.2 Pece na tavení hliníku a slitin

Kanálkové pece jsou vhodné pro tavení hliníku hlavně z důvodu nízkého opalu oproti jiným, například odporovým pecím. To plyne částečně ze snahy snížení oxidace hliníku. Snížení opalu znamená také při dalším přetavení značné úspory energie. [1]

U kanálkové pece k tavení hliníku ovšem není vhodné příliš intenzivní víření z důvodu narušení vrstev kysličníku hlinitého na povrchu taveniny, což způsobí větší oxidaci. Oxid jako takový má vyšší měrnou hmotnost, což je příčinou jeho poklesu ke dnu a následně proto kanálek „zarůstá“. Oxid hliníku má tavnou teplotu 2 045°C, zatímco samotnému hliníku postačí 660 °C. Nižšího víření dosáhneme použitím kanálku ve tvaru obdélníku rozšiřujícího se směrem k nístěji. Rozšíření zajistí rozprostření tlaku

roztaveného materiálu z kanálku na větší plochu hladiny taveniny a sníží tak nerovnoměrný tlak na hladinu jako takovou. [1]



Obr. 2.2: Kanálková pec na tavení hliníku [1]

Usazený oxid Al_2O_3 nelze odstranit změnou taveniny, například užitím oceli. Pro tavení oceli je třeba pro každý druh mírně odlišná teplota. Teploty se však příliš neliší a průměrně jsou okolo 1500°C , což je na tavení oxidu značně nedostatečné. Proto je nemožné zabránit zarůstání kanálku tavením obvyklých materiálů.

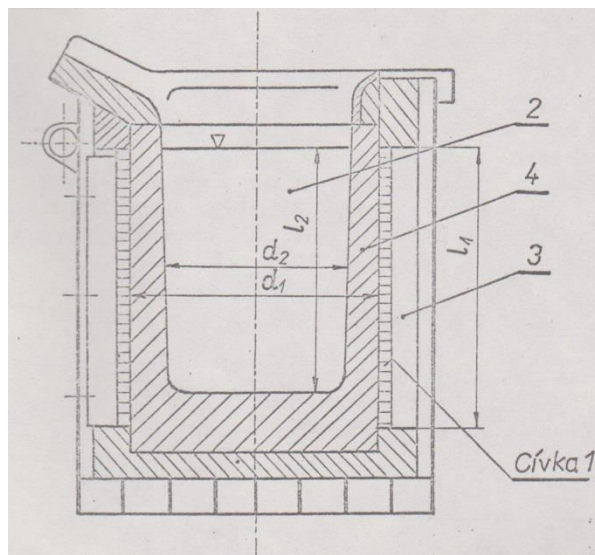
Vzhledem k nevyhnutelnému zarůstání kanálku a z toho plynoucího zhoršení účinníku $\cos \varphi$, je nutno kanálek čistit, k čemuž slouží přímočaré kanálky této pece. Při čistění vertikálních kanálků není nutno pec vypustit, což ale neplatí pro svislé kanálky, proto jejich čistění není tak časté. [1]

Kanálek nezarůstá pouze při tavení hliníku samotného, ale i jeho slitin jako například duralu. Ten je pro jeho lepší mechanickou pevnost vhodný například pro konstrukční aplikace, kde je hojně užívaný. Oproti více užívané oceli má dural nespornou výhodu například v nižší hmotnosti.

2.2 Kelímkové pece

Další významnou aplikací indukčního ohřevu jsou kelímkové pece. I přes využívání principu elektromagnetické indukce stejně jako u kanálkové pece je jejich konstrukce dosti odlišná.

Tyto pece je vhodné užít ve slévárnách k tavení vysokojakostních ocelí. To je způsobeno vířením vsázky a z toho plynoucí homogenní struktury kovu. [7]



Obr. 2.3: Schéma kelímkové pece [7]

Hlavní částí těchto pecí je cívka 1, kterou je veden střídavý proud. V dutině cívky je umístěn kelímek 4, který je naplněn vsázkou 2. Při průchodu proudem cívkou dochází k vybuzení magnetického pole. Pole se uzavírá vně cívky a vytváří negativní účinky. Proto je u těchto typů pecí nutno užít stínění 3.[7]

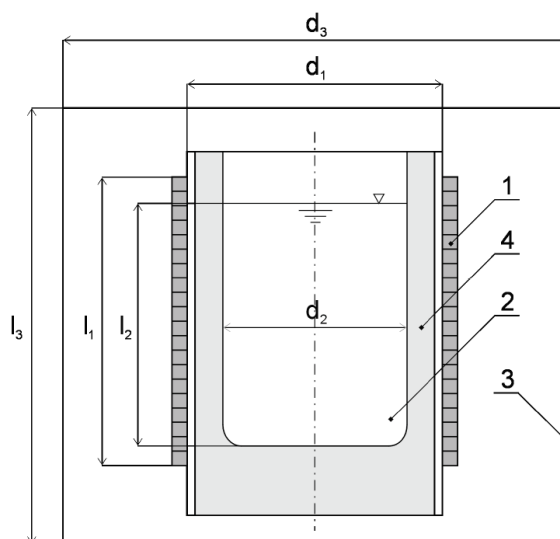
Stínění zajišťuje omezení magnetického indukčního toku, který působí vně cívky. Toto je nutné, aby došlo k omezení vlivu magnetizmu vně pece a také k omezení zahřívání nosných konstrukcí pece.

Dalším důležitým konstrukčním prvkem je cívka vinutá z měděné trubky, obvykle obdélníkového profilu. Kdy je proud veden po obvodu trubky a středem proudí chladicí kapalina, nejčastěji voda. Kapalina tvoří svůj vlastní okruh, ten se stará o odvod tepla z pecní cívky. Proto je k jeho provozu potřeba opatřit okruh čerpadlem a v případě potřeby také pasivním chladičem.

Pro efektivní chlazení je nutno dodržet maximální teplotu vody 60°C, aby nedošlo k lokální změně vody v páru, což by znemožnilo chlazení. To by následně vedlo ke zničení cívky.

Zavity pecní cívky jsou od okolí a samy od sebe izolovány mikrofoliovou páskou. V peci je přítomen také keramický kelímek, ten se tvoří vypěchováním. Běžně se tak děje přímo v peci pomocí speciální formy. [7]

2.2.1 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm



Obr. 2.4: Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm[6]

Zde vyobrazená pec je tvořena kruhovou cívkou 1. Tato cívka je vinuta z dutého měděného vodiče čtyřhranného průřezu. Cívkou prochází proud vysokých kmitočtů. Dutinou tohoto vodiče je vedena voda, jejíž průběh je zajištěn pro chlazení pece. Mezi induktorem a vsázkou je umístěn keramický kelímek 4. Uvnitř kelímku se nachází vsázka 2. [6]

Cívka vyzařuje elektromagnetické vlnění, které vstupuje do vsázky, kde se mění v energii tepelnou. Tok z cívky se však uzavírá nejen v jejím středu, ale také vně. Proto užijeme stínění, o stínění se zde stará měděný stínící plášť 3.[6]

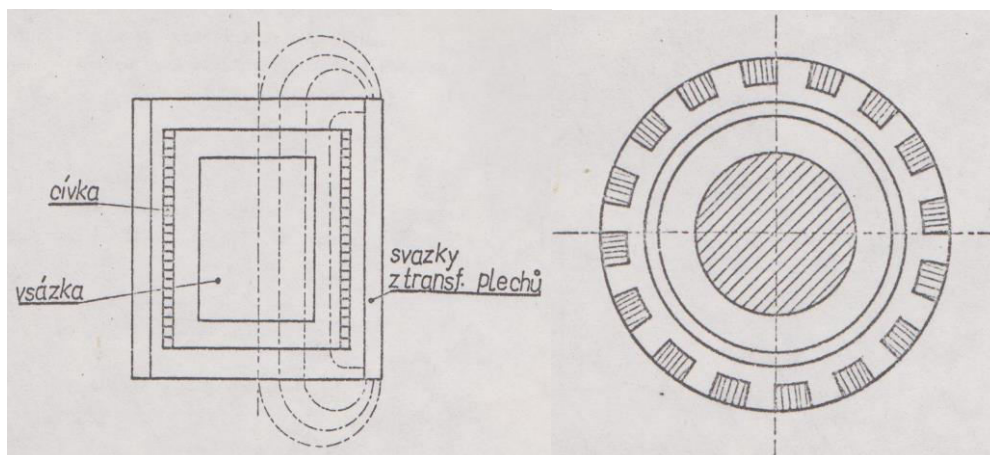
Stínění je umístěné na induktoru pece, kde se tok uzavírá, nepůsobí tak na okolní konstrukce. Tento plášť je umístěn dále od induktoru (přibližně dvojnásobek průměru cívky). Také je nutné užít dostatečnou tloušťku vodivé stěny, s jejímž rozměrem klesá odpor této stěny a tím i její oteplení. Pro zvolení tohoto rozměru užijeme vztahu:

$$d_3 = \frac{\pi}{2} a \quad (2.1)$$

Řešení s vodivým pláštěm je ekonomicky výhodnější, ale jeho užitím se část toku uzavře vsázkou, ovšem v opačném směru než tok přímo z cívky a trochu jej tak ztlumuje.

2.2.2 Indukční kelímková pec s železným jádrem vně cívky

Podobného účinku jako užitím vodivého stínícího pláště dosáhneme také i pokud použijeme stínění pomocí stínění složeného ze svazků transformátorových plechů, které jsou přichyceny na vnitřní straně pecního pláště. Jak je vidět na obrázku níže. [7]



Obr. 2.5: Indukční kelímková pec s železným jádrem vně cívky [7]

Většina magnetického toku vybuzeného induktorem se uzavírá v místech s transformátorovými plechy přes jejich magneticky dobře vodivou cestu. Vložením této dobře vodivé cesty se vlivem snížení magnetického odporu tok poněkud zvětší. [7]

Oproti vodivému stínícímu plášti jsou transformátorové plechy umístěny nesporně blíže. Oproti řešením s vodivým stínícím pláštěm se tok plechů uzavírá stejným směrem a podporuje tak tok v kelímku pece.

Tímto vzroste i vlastní indukčnost pecní cívky a stejně tak i vzájemná indukčnost mezi cívkou a vsázkou. Tato aplikace vyžaduje od cívky více závitů než v aplikaci s vodivým pláštěm a tím i větší kondenzátorovou baterii. [7]

Pokud použijeme pec se stíněním se svazky transformátorových plechů získáme nižší ztráty, vyšší užitný výkon a z toho plynoucí vyšší elektrickou účinnost než u pece s vodivým stínícím pláštěm, a to s rozdílem téměř 5%. To znamená při provozu ve slévárnách značné úspory energie, zejména u velkých pecí, kde tavba probíhá téměř nepřetržitě. Toto vše činí tuto aplikaci technicky dokonalejším řešením. [6]

Tyto výhody však vyvažuje podstatná nevýhoda, a to vyšší pořizovací náklady a skutečnost, že při poruše vlivem protavení kelímku je poškození rozsáhlejší. Proto je zde nutné zvážit, zda se bude pec natolik využívat, aby došlo ve výsledku k úspoře oproti

předchozímu řešení. Další nevýhodou je také zvýšení hmotnosti při využití této aplikace, proto je třeba zvolit i výkonnější naklápěcí mechanismus pro odlévání materiálu. [6]

2.2.3 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Při užití nevodivého kelímku je elektrická účinnost během tavení vodivých materiálů, jakými jsou například měď nebo hliník, nízká. Proto se zde s výhodou užívá elektricky vodivého kelímku. [6]

Kelímkem se zhotovuje z ocelolitinu, pokud v peci tavíme nízkoteplotní materiály jako hliník. Pokud chceme tavit kovy s vyšší teplotou tání, kelímkem bude vyroben ze směsi šamotu a grafitu. V elektricky vodivém kelímku jsou taveny materiály dobře elektricky vodivé, kde dochází k dobré vodivosti mezi vsázkou a kelímkem samotným. [6]

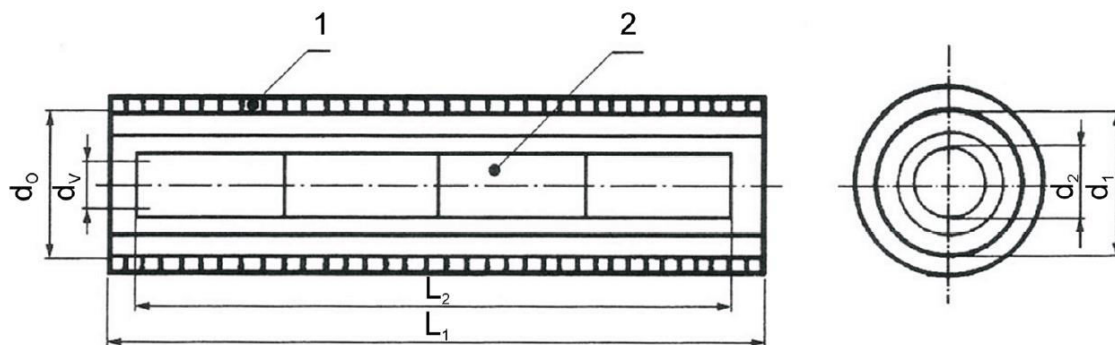
Při užití vysokoteplotního kelímku platí, čím více je v kelímku grafitu, tím je vodivější. Přílišná vodivost je ovšem nežádoucí. Pokud je vodivost příliš vysoká, do vsázky se teplo téměř neindukuje a veškeré teplo se vytváří přímo v kelímku samotném. Teprve od něj teplo prostupuje do vsázky. Velmi důležitý parametr je zde proto poměr tloušťky stěny k hloubce vniku naindukovaných proudů, který udává jak velký poměr energie je veden přímo do vsázky. [6]

2.3 Prohřívací aplikace

Ke kování či lisování objektů za horka je důležité rovnoměrné prohřátí materiálu. Dříve používané pece s plynovým vytápěním nejsou pro tento účel vhodné, neboť k požadovanému účinku by došlo až po dlouhé době provozu, z čehož plyne ztráta materiálu opalem. [6]

Proto se dnes vhodně užívá indukčních zařízení pro jejich velkou účinnost v kratším čase. [6]

K prohřívacím účelům již hotových odlitků je vhodné užití indukční cívky bez jádra, s průměrem o něco větším než prohříváný materiál, jak je vidět na obrázku níže. 1 je zde samotná cívka a bod 2 představuje prohříváný materiál. [6]



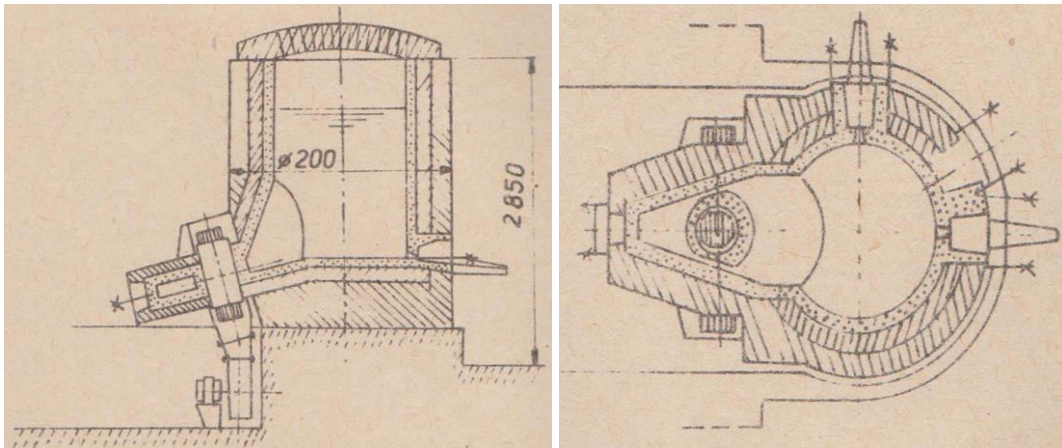
Obr. 2.6: Indukční prohřívací zařízení [6]

Pokud tento ohřev chceme ještě zrychlit, použijeme principu tzv. rychloohřevu. Toho dosáhneme použitím cívky, která má zhuštěné závity. Tím vzroste i H , která působí na materiál a společně s tím vzroste i způsobený tepelný výkon dle H^2 . Tento způsob zrychlí dobu ohřátí přibližně o třetinu. Pro tavení oceli jsou závity zhuštěny z teplejší strany, a to z důvodu Curieovy teploty (768°C). Po jejím dosažení ztrácí železo feromagnetické vlastnosti a je třeba více energie pro dosažení dostatečného výkonu pro rychlé ohřátí. [6]

Tato konstrukce je značně podobná principu kelímkové pece, jelikož je prohříváný materiál vlastně kelímkem umístěným v induktoru. Samozřejmě zde tedy platí zákon o hloubce vniku. Proto zde upravujeme frekvenci, abychom zajistili rovnoměrné prohřátí materiálu uvnitř cívky. Záleží na materiálu, který prohříváme, například pro prohřátí duté měděné trubky bude třeba malá hloubka vniku, zatímco pro plný odlitek bez vzduchové mezery uvnitř bude třeba hloubka vniku vyšší.

Pro optimální kmitočet je vhodné se řídit zákonitostí kdy $r_2=(2,5 \text{ až } 3)*a$. Tento poměr zajistí optimální prohřátí, pokud jde o plný materiál. [6]

Dále je zde další možná aplikace, a to udržování již roztaveného materiálu v tekutém stavu či zvýšení teploty již roztaveného materiálu při odlévání. K tomuto je vhodné užití pece kanálkové. [1]



Obr. 2.7: Udržovací kanálková pec [1]

Například chceme-li přehřívát litinu, která byla roztavena v kuplovně. Hlavní rozdíl při tomto užití pece oproti běžnému tavení je ten, že kanálek není třeba čistit od usazenin oxidů. [1]

2.4 Povrchový ohřev

2.4.1 Kalení

Kalení se provádí za účelem zvýšení tvrdosti kaleného materiálu. Tohoto se dosahuje zahřátím povrchu materiálu na vysokou teplotu a následné zajištění prudkého zchlazení. Tímto dojde k povrchovému vytvrzení materiálu daného předmětu.

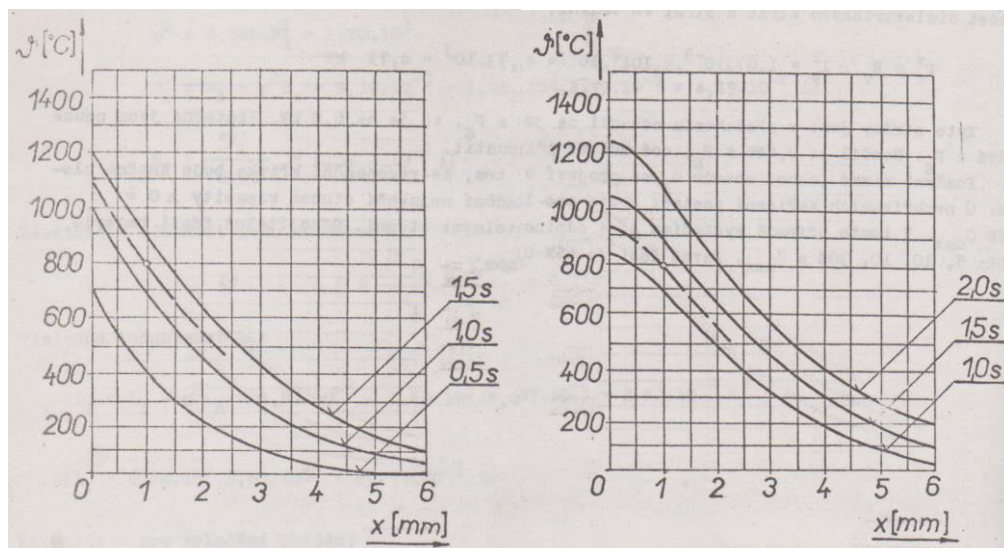
Vytvrzením je zajištěno zabránění vzniku určitých materiálů, u ocelí je žádoucí vznik feritu a perlitu, ale na jeho úkor dojde ke vzniku bainitu a martenzitu. To zajistí zvýšení tvrdosti, ale tím plynoucí ztrátu houževnatosti (zvýšení křehkosti materiálu). [8]

Toto zvýšení křehkosti se kompenzuje tím že kalená vrstva je tenká a o houževnatost se starají vnitřní vrstvy předmětu, které oproti povrchu nejsou namáhány na tvrdost. Tím se zajišťuje dostatečná houževnatost objektu jako celku.

Schopnost materiálu být kalen je dána tzv. kalitelností, která je závislá hlavně na obsahu uhlíku v daném materiálu. Pokud není v materiálu uhlíku dost (například 0,2% u oceli), je materiál považován za nekalitelný. Přítomnost uhlíku není jediným ukazatelem kalitelnosti, ale ostatní materiály na ni mají zanedbatelný vliv. [8]

Dle kalené vrstvy volíme vhodný kmitočet. U tohoto případu indukčního ohřevu je

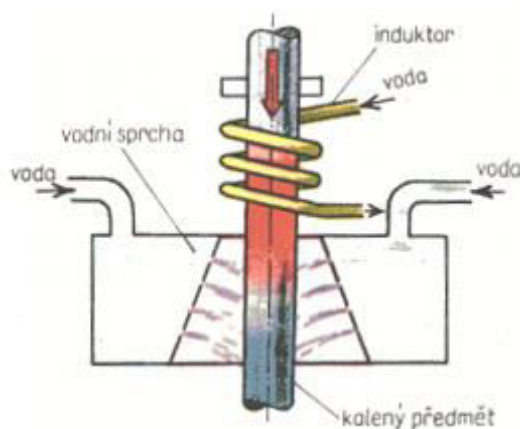
nutno užit velký měrný příkon, k velmi rychlému nahřátí, aby nedošlo k přenosu tepla blíže ke středu materiálu prostřednictvím vedení tepla. Tato skutečnost je zobrazena na grafu níže. [7]



Graf. 2.1: Průběh teploty do nitra kaleného materiálu [7]

Levý diagram popisuje průběh teploty při čistě povrchovém ohřevu s užitím vysokých kmitočtů. Zatímco pravý diagram uvádí ohřev s nižším kmitočtem, ohřev tedy není čistě povrchový, ale indukuje se do silnější povrchové vrstvy. [7]

Dle tohoto diagramu poté určíme pomocí teploty nutné ke kalení také jaké tloušťky dosáhneme při kalení v daném okamžiku. Je nutné si však dávat pozor, aby nebyla teplota příliš vysoká, to je pro jakost kaleného materiálu nežádoucí.



Obr. 2.8: Schéma indukčního povrchového kalení válce [8]

Na obrázku je znázorněno kalení válce malého průměru. Válec je zde zasunut do

souosé cívky napájené vysokofrekvenčním proudem. Délka této cívky je dána délkou úseku válce, který chceme zakalit. [7]

Při užití správně zvoleného kmitočtu a dostatečně velkého měrného výkonu dojde v induktoru k dostatečně velkému povrchovému ohřátí a proud vody pod tím zajistí i dostatečně rychlé ochlazení.

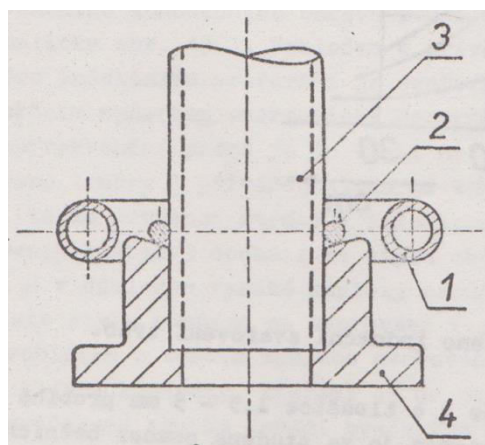
Po kalení už se předmět dále nepracovává vzhledem ke křehkosti povrchové vrstvy, proto se výsledného tvaru musí dosáhnout předtím. Dá se však alespoň brousit. [7]

2.4.2 Pájení

Indukční pájení se užívá v průmyslu pro vytvoření nerozebíratelného spoje, a to cínem či mosazí. Na rozdíl od konvenčního pájení je indukční verze bezkontaktní. Nedochází tak k tepelné deformaci okolí spoje.

Pájka 2 je vyrobena s vhodně připraveným tvarem, zde se konkrétně jedná o kroužek. Proud v induktoru 1 při zavedení vyvolává zahřátí a následné tavení pájky společně s trubkou 3 i přírubou 4. Pájka po roztavení vzlíná a vtéká do štěrbin, kde přilne k trubce i přírubě a zajistí jejich spojení. [7]

Toto pájení má v průmyslu široké využití pro velkokapacitní výrobu. Pro konkrétní aplikaci pájení vík plechových krabic se užívají vysoké kmitočty (stovky kHz). Tvar induktoru musí být vhodně upraven vzhledem k tvaru pájeného předmětu. [7]

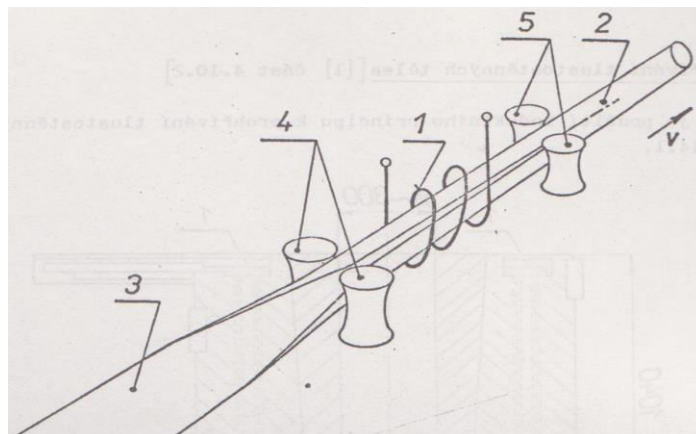


Obr. 2.9: Indukční pájení [7]

Pájet lze též mosazí, a to například pájením tvrdého kovu na držák soustružnického nože nebo také břitů z tvrdých kovů na těleso frézy.

2.4.3 Svařování

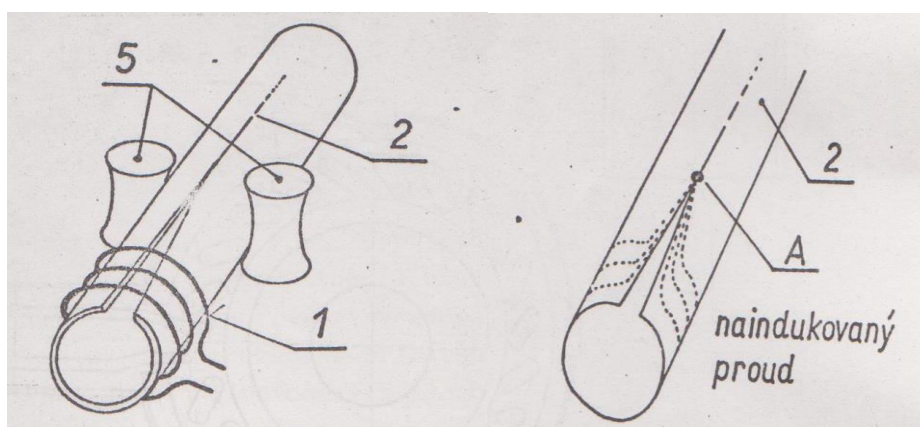
Indukční ohřev lze také užít k účelu svařování. Na obrázku níže je zobrazeno schéma svařování trubek. [7]



Obr. 2.10: Indukční svařování [7]

Induktor 1 zde obepíná trubku 2, která je tvořena z ocelového pásu 3. Tento pás ohýbají za studena speciální kladky 4 do požadovaného tvaru. Následně je tento ohnutý útvar posunut k cívice. [7]

Cívka s vysokofrekvenčním proudem zajistí naindukovaní proudů do dosud ne zcela uzavřené trubky. Proudů se snaží uzavřít na povrchu dosud neuzavřené materiálu. To způsobuje zhuštění naindukovaných proudů ve směru bodu svaru A. Zde je materiál vystaven nárůstu proudu a kladky 5 zajistí přitlačení svar již rozehrátého materiálu. [7]



Obr. 2.11: Detail dokončení indukčního svařování [7]

V tomto konkrétním případě má svar teplotu přibližně 1400°C, kmitočet je zde 300kHz s příkonem 600W. Se zachováním těchto parametrů lze říci, že čím větší je tloušťka svařované stěny, tím pomaleji ke svaru dochází. [7]

3. Tavicí proces

Jedním z hlavních požadavků na efektivní užití těchto pecí je hloubka vniku (podrobněji v kapitole 1.1), která je přímo ovlivňována změnou frekvence. Změna tohoto parametru je hlavním faktorem pro řízení pece, samozřejmě tehdy, pokud je vybavena měničem kmitočtu. Pro efektivní indukční ohřev je třeba užít správnou frekvenci, aby došlo k dobré absorpci energie ve vsázce.

U kanálkových pecí, kde se měnič kmitočtu nevyskytuje, se pec řídí pomocí přepínání odboček z primárního vinutí pece.

3.1. Kanálkové pece

Před započítím samotného procesu tavby je nutné do pece nejprve umístit již roztavenou vsázku z důvodu uzavření závitu nakrátko. Vsázky musí být dostatečné množství, aby roztavený kov vyplnil celý kanálek i spodní část nístěje, a tak „obejmul“ induktor umístěný uvnitř pomyslného válce vytvořeného kanálkem pece.

Z důvodu přítomnosti železného jádra pecní cívky je jejich účinnost vyšší než u pece kelímkové a tak je samotná tavba při využití stejného výkonu pece rychlejší.

Pec je ovšem nutno provozovat nepřetržitě, aby nedošlo k zatuhnutí vsázky, proto se při kratších odstavkách a pokud nedochází ke změně taveného materiálu, nechává pec zapnuta. Výkon je volen takový, aby nedocházelo ke zbytečnému plýtvání energií, ale tak aby byla vsázka stále tekutá. Před započítím nové tavby je poté nutný výkon cívky zvýšit, aby při přestupu tepla nemohlo dojít k zatuhnutí vsázky.

Pokud je v peci již umístěna tekutá vsázka, je možné do ní dodat další materiál. Následně poté začíná samotný proces tavení. Magnetický tok generovaný vinutím se celý uzavírá v železném jádře a pomocí elektromagnetické indukce vybuduje v kanálku průchod proudu I_2 a působení elektrodynamických sil. Tento proud následně generuje tepelnou energii, většina této energie vzniká přímo v kovu kanálku. [5]

Následné elektromagnetické síly způsobují plynulé vytlačování roztaveného kovu z kanálku a tak dochází k mísení kovu z kanálku s kovem v nístěji. K proudění pomáhá také zvláště u pecí s vertikálním kanálkem fakt, že vzhledem k rozdílu teplot teplejší kov stoupá vzhůru. [2]

Vložený materiál postupně prochází kanálkem a nabývá tekutého stavu. Doba tavby se odvíjí podle zvoleného výkonu pecní cívky. Rychlejší tavba je lepší volbou s ohledem na snížení tepelných ztrát, opalu materiálu a možnost tavit více materiálu za stejný čas. Je zde však několik nevýhod, jako je přehnané víření vsázky, nebezpečí vzniku uskřipovacího jevu, či další nevýhody a hlavně je zde nutno respektovat skutečnost, že výkon pecní cívky nelze zvyšovat donekonečna.

Poté, co je celá vsázka pece natavena na potřebnou teplotu se zahájí odlévání materiálu. Pec samotná bývá často umístěna na kloubovém ústrojí, které umožní pec naklonit a tak zajistit odlití materiálu hubicí pece. Ta je umístěna v horní části nístěje.

V peci se při odlévání ponechává část vsázky, konkrétně asi 1/3. Tato zbylá vsázka zajišťuje nepřerušované spojení závitů nakrátko v peci samotné. Uzavřený závit nakrátko tak stále může generovat teplo. [2]

Po odlití nataveného materiálu je do pece umístěn nový a proces tavby se opakuje.

Pro kanálkovou pec platí určitá kritická hodnota proudu procházejícího vsázkou. Při jejím překročení nastává v kanálku tzv. "uskřipovací jev". Takto se nazývá stav přerušení souvislosti roztaveného kovu v kanálku. Toto přerušení způsobují elektromagnetické síly, které působí směrem radiálně k ose kanálku. Vzhledem k tomu, že v tomto okamžiku dojde k přerušení proudu kanálkem, dojde i ke ztrátě působení elektromagnetických sil a následnému opětovnému spojení kanálku. Následně dochází k opětovnému spojení, jev se může poměrně snadno opakovat. Tento cyklicky se opakující jev způsobuje proudové rázy, které znemožňují správný a hlavně bezpečný provoz pece při tomto stavu. [2]

3.2. Kelímkové pece

Kelímkové pece jsou v průmyslu obecně rozšířenější. Obecně jsou užití k tavbě desítek až desetitisíců kilogramů tavného materiálu. [10]

Na rozdíl od kanálkových pecí se kelímkové startují bez problémů z chladného stavu. Před započítím tavby je samozřejmě nutno vložit tavenou vsázku, ta může být buď celistvá (ingot) nebo zde může být umístěna pevná vsázka ve středu kelímku a ta je poté obsypána kovovým šrotem. Podle toho jakou aplikaci zvolíme, je následně nutné zvolit potřebnou hloubku vniku, určující vhodné rozložení naindukovaného tepla ve vsázce.

Samotný šrot se v této peci netaví vzhledem k jeho nezpůsobivosti uzavřít závit nakrátko. Stykové odpory jednotlivých kusů mohou být příliš velké. Před započítáním tavby je nutné ještě zajistit proudění chladicí vody pecní cívkou, aby nedošlo k jejímu zničení přehřátím.

Během tavby pecní cívka obepínající kelímek vyzařuje elektromagnetické vlnění, které se uzavírá v její ose, kde je umístěna vsázka. Toto vlnění dopadá přímo kolmo na její povrch a je následně pohlceno a poté přeměněno v tepelnou energii. [6]

Magnetický tok cívky neprochází jen dutinou cívky, ale zároveň se uzavírá vně cívky. Tento jev je pro tavení nežádoucí, potlačuje se užitím stínění. Konstrukce pece, jakož i funkce stínění byla probrána již v kapitole 2.2. [6]

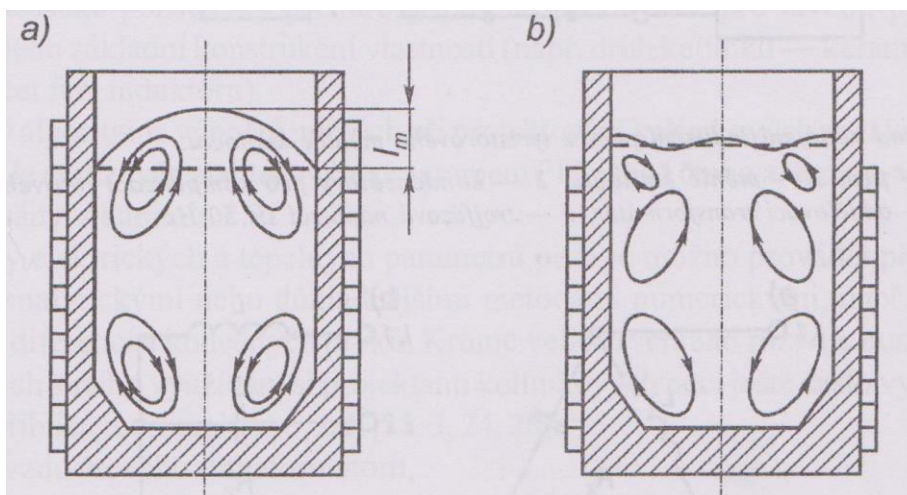
Elektromagnetická energie vyzařovaná induktorem se však nepřemění pouze v teplo, ale zajistí i působení elektrodynamických sil na vsázku. Tyto elektrodynamické síly působí na základě interakce proudů indukovaných ve vsázce a magnetického pole induktoru v tomto místě. Následně způsobují pohyb materiálu a tím i jeho mísení v kelímku. Intenzita a směr tohoto pohybu závisí mimo jiné na velikosti vsázky, umístění vnějšího induktoru nebo na dodané energii do kelímku. Pro elektrodynamické síly platí vztah: [5]

$$\vec{F} = \vec{J}_2 \times \vec{B}_1 (N) \quad (3.1)$$

Toto promísení zajistí stejnoměrnou teplotu v celém objemu vsázky a také její vysokou homogenitu. [10]

Víření se ovšem projeví i na hladině taveniny samotné. Tato reakce se projeví vzdutím hladiny, jak je zde graficky zobrazeno. Toto vydutí je dáno vztahem

$$h_v = k * \frac{P}{\gamma} * \sqrt{\frac{\mu_r * \gamma}{f}} \quad (3.2)$$



Obr. 3.1: Víření taveniny v kelímkové peci [5]

Z obrázku vlevo je vidět vzduť hladiny vsázky při symetrickém umístění induktoru. Tato nerovnost se zmenšuje s rostoucím kmitočtem proudu napájecí cívky. Jednodušším způsobem zmenšení tohoto stavu je možnost užití nesymetrického umístění induktoru, jak je vidět z obrázku vpravo. [5]

Po dokončení tavby je z hubice u horní části pece odlit natavený materiál. Pec bývá obvykle usazena v kloubovém mechanismu pro umožnění naklápění a tím i snadného odlití.

3.3. Kritérium 3E

3.3.1. Energetické kritérium

Dle energetického hlediska jsou tyto pece vhodné z důvodu jejich vysoké účinnosti oproti dříve užívaným typům pecí umístěných ve velkých závodech, jakými jsou odporové, obloukové nebo konvenční palivové.

Vysoká účinnost je způsobena vznikem tepla přímo ve vsázce a není tak nutné nejprve vyhřívát jiný objekt a teprve následně požadovanou vsázku. K ohřevu okolních částí tak dochází pouze přenosem tepla ze vsázky samotné a způsobuje proto menší tepelné ztráty.

Energetickou úsporu způsobí i rychlost tavby v těchto typech pecí. K urychlení dochází i u ostatních netavících aplikací, jakými je třeba kalení.

Nedochází zde ani k proudovým rázům jako u obloukových pecí. [9]

Energetická nevýhoda je zde vytížení pouze jedné fáze, protože tyto pece jsou obvykle jednofázové, provozované s kmitočtem 50Hz, toto se ale vyvažuje symetrizačním zapojením. [9]

Při připojení na 50Hz síť vyžadují některé pece užití měniče kmitočtu. Ty jsou připojeny na trojfázovou síť a zatěžují ji symetricky.

3.3.2. Ekonomické kritérium

S ohledem na vysokou energetickou účinnost je samotný provoz z důvodu nižší potřeby energie levnější než u jiných aplikací. Také zde není nutné konstruovat jakýsi mechanický dopravník pro doplnění paliva, jako například u konvenčních uhelných pecí, to značně zlevní jejich provoz s ohledem k nutnému zázemí. Namísto toho je zde nutné navrhnout připojení k elektrické síti, o které se není nutné krom situací nutných k údržbě starat. Tudíž z tohoto hlediska je zavedení těchto pecí do průmyslu vhodné.

Další úsporou je zde absence elektrod, jako je tomu například u obloukových pecí. Z toho plyne absence opalu elektrod a odpadá tak následná nutnost jejich výměny. [9]

Indukční pece produkují v důsledku víření taveniny vysoce homogenní kvalitní slitiny, které jsou z důvodu kvality samozřejmě cennější.

Tyto pece však mají i své nevýhody, tou největší z nich je jejich vysoká pořizovací cena. Kelímkové pece potřebují ke svému provozu obvykle nepříliš levný kmitočtový měnič a společně s tím také potřebné stínění. Náklady na stínění ale následně vyváží výhody, které jsem popsal v kapitole 3.2.

Kanálkové pece přesto, že se provozují většinou na síťových kmitočtech, jsou svou samotnou konstrukcí dost nákladné.

3.3.2. Ekologické kritérium

Z ekologického hlediska je provoz indukčních pecí bezproblémový, nezpůsobují žádné znečištění ovzduší spaliny vzhledem k tomu, že energie k jejich provozu pochází přímo ze sítě. A ani neuvolňují oxidy ze vsázky do ovzduší. [9]

Ekologický problém by mohl být snad způsoben jen tam, kde je energie vyráběna přímo provozovatelem anebo při likvidaci již vyřazených pecí.

Závěr

V této práci je řešen význam indukčních pecí a jejich využití v průmyslových aplikacích. Hlavním tématem jsou zde kanálkové pece a proto byla pozornost věnována především jim.

Začátek práce popisuje samotnou funkci indukčního ohřevu a způsob indukce energie při následné přeměně v teplo. Také ukazuje důležitost parametru hloubky vniku a způsob, jakým se projevuje na účinnosti a provozu pece.

Jelikož je tato práce zaměřena především na indukční kanálkové pece, jsou zde popsány variace s užitím kruhového kanálku, který se využívá například pro pece na tavení barevných kovů a také možnosti obdélníkového kanálku, ten se využívá k tavení hliníku. Tato část objasňuje i proměnu důležitého parametru jako odporu kanálku s ohledem na jeho možné zarůstání.

Výhody a nevýhody nejsou pro typy pecí stejné. Jejich rozdíly jsou zde popsány a poskytují tak ucelenější představu vhodnosti využití jednotlivých možností pro konkrétní aplikace.

Samotné praktické využití ohřevu popisuje druhá kapitola, kde je uvedena funkce indukčního ohřevu v konkrétních aplikacích. V této části se popisuje konstrukce, jakož i výhody a nevýhody jednotlivých ohřevů pro dané provedení. Nejsou však zde popsány jen samotné tavicí pece, ale je zde ukázáno i využití variací indukčního ohřevu pro tepelné úpravy již odlitých materiálů. Je zde dobře vidět, že ač při tavení lze využít kanálkové i kelímkové pece, pro jiné tepelné úpravy jako například svařování se užívá pouze principu podobného kelímkové peci.

Části tavicího procesu jsou v jednotlivostech rozmístěny v různých částech práce. Zvláštní pozornost je mu však věnována ve třetí kapitole, kde je tento proces popsán od spuštění pece až k odlití taveného materiálu. Mimo jiné jsou zde popsány i některé negativní jevy a možnosti, jak je odstranit či alespoň omezit, za příklad můžeme vzít odstranění či omezení vzniku uskřipovacího jevu.

Část, která je věnována závěrům pro praxi podle kritéria 3E objasňuje užití pecí podle tří důležitých aspektů. Energetický aspekt těchto pecí ukazuje na jejich vysokou účinnost. Od toho se odvíjí aspekt ekonomický, ten hovoří opět ve prospěch těchto pecí,

snad kromě vysokých pořizovacích nákladů. A poslední ekologické kritérium je vzhledem k jejich provozu při využívání elektrické energie, jako zdroje tepelné energie také vyhovující.

Jak již bylo řečeno, indukční pece mají také své nevýhody, ale jejich výhody je značně převyšují. Jsou tak vhodnou náhradou za dříve užívaná řešení. Jejich aplikace jsou využitelné v široké paletě možností.

Seznam literatury

- [1] Langer E.: *Elektrotepelná technika Část IV. Indukční pece kanálkové*, SNTL, Praha 1969
- [2] Hradílek Z. a kol.: *Elektrotepelná zařízení*, IN-EL, Praha 1997
- [3] Novák P.: *Elektrické teplo*, Equilibria, Košice 2010, ISBN 978-80-89284-48-1
- [4] Haimbaugh R.: *Induction heat treating*, ADM, USA Ohio 2015, ISBN 10:1-62708-089-9, dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=NjJ7CgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=induction+heating&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjF9OGoy-7aAhVDzqQKHxzeAzQQ6AEITzAF#v=onepage&q=induction%20heating&f=false>
- [5] Hradílek Z. a kol.: *Elektrotepelná technika: Simulace-počítačové programy*, VŠB-TU, Ostrava 2001, ISBN 80-7078-874-7
- [6] Hradílek Z., Lázníčková I., Král V.: *Elektrotepelná technika*, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04938-9
- [7] Langer E., Kožený J.: *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce*, VŠSE v Plzni, Plzeň 1982
- [8] Driml B.: *Kalení a popouštění*, Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [9] Krsňák J.: *Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích*, Plzeň 2015, Bakalářská práce, Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/18654/1/Bakalarska_prace_Josef_Krsnak_Taveni_kovu_v_indukcnich_kelimkovych_pecich.pdf
- [10] Uhlíř M.: *Elektromagnetická průzárnost při indukčních ohřevech*, Plzeň 2014, Diplomová práce, Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/14886/1/D_P_Uhliř%20Miroslav_Elektromagneticka%20pruzarnost%20pri%20indukcnich%20ohreveh_2014.pdf

Přílohy

Příloha - Příklad výpočtu kanálkové indukční pece

Výpočet jednofázové indukční kanálkové pece pro tavení mosazi (směs 62% Cu a 38% Zn). Hustota ρ je $42 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega/\text{cm}$ pro roztavený stav. Vsázka je 500kg mosazi s dobou tavby 60 minut. Napětí 230V a kmitočtem 50Hz. Teplota tání je 905°C , pro lití je však 1070°C . K zahřátí mosazi z 20°C na 1070°C je třeba $W=510,8 \text{ kJ/kg}$. Uvažujeme účinnost elektrickou 0,96 a tepelnou 0,81. Doba tavení $t_1=60$ minut a ztrátový čas $t_2=20$ minut. Za 80 minut se provede jedna kompletní tavba, během 24hodin je tak uskutečněno taveb 18, což je úměrné M s hodnotou 9000kg vytavené mosazi za 24hodin. Součinitel C je pro zvolený plášťový transformátor roven 0,34. Doporučená hodnota proudové hustoty mědi J_{Cu} v cívice induktoru je 4 A/mm^2 .

Nejprve je nutné určit potřebný výkon pece pro tuto konkrétní aplikaci.

$$P = \frac{M * W * (\Theta_1 + \Theta_2)}{24 * \eta_{el} * \eta_t * \Theta_1 * 860 * 4,187} = \frac{9000 * 510,8 * (60 + 20)}{24 * 0,96 * 0,81 * 60 * 860 * 4,187} = 92 \text{ kW}$$

Účinník $\cos \varphi$ je pro mosaz 0,7 to využijeme při výpočtu zdánlivého výkonu S_s :

$$S_s = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{92}{0,7} = 131 \text{ kVA}$$

$$\psi = \frac{G_{Fe}}{G_{Cu}} = 9,1$$

Provedeme kontrolu zvoleného výkonu přibližným způsobem (při kterém neuvažujeme ztráty). Nejprve vypočteme energii, z ní poté pomocí času tavení zjistíme výkon. Pro tento výpočet musíme uvažovat měrné teplo c_C , to je rovno $470,6 \text{ J/kg}$,

$$E = m * c_C * (v_2 - v_1) = 500 * 470,6 * (1070 - 20) = 247065 * 10^3 \text{ J}$$

$$P = \frac{E * \Theta_2}{(\Theta_1 + \Theta_2) * 60} = \frac{247065 * 10^3 * 20}{(60 + 20) * 60} = 103 \text{ kW}$$

Výsledná hodnota je zde o 11kW vyšší, to by mohlo být způsobeno neuvažováním ztrát během tavení.

Indukci v železe zvolíme $B_m=1,2T$, při ztrátách v plechu ΔP_{fe} , které jsou na 0,5mm rovny 2W/kg. Proudová hustota $J_{cu}=3A/mm^2$. Toto nám umožní určit aktivní průřez železného jádra pecní cívky.

$$S_{Fe} = C * \sqrt{\frac{S_s * \Psi * 10^3}{B_m * 10^4 * J_{cu} * f}} = 0,34 * \sqrt{\frac{131 * 9,1 * 10^9}{1,2 * 10^4 * 4 * 50}} = 239,62 \text{ cm}^2$$

Jádro samotné však není monolitický blok, ale je složeno z transformátorových plechů, které je od sebe nutné oddělovat papírovou izolací. Tloušťka plechů společně s papírovou izolací 0,3mm udává součinitel $k_c=0,88$.

$$S'_{fe} = \frac{S_{fe}}{k_c} = \frac{239,62}{0,88} = 272,3 \text{ cm}^2$$

Jádro není ale kulaté, je složeno z rovných plechů. Ty tvoří kruhové jádro pomocí jejich odstupňování. Odstupňování v polovině řezu volíme 4, z tohoto indexu získáme činitel zaplnění k_d 0,84.

$$D_{Fe} = \sqrt{\frac{4 * S'_{Fe}}{\pi * k_d}} = \sqrt{\frac{4 * 272,3}{3,14 * 0,84}} = 20,32 \text{ cm}$$

Jádro samotné je nutno ovinout vrstvou tepelně izolačního materiálu 0,6cm. Průměr cívky je $D_i = D_{Fe} + 2 * 0,6 = 21,52 \text{ cm}$.

Pro získání průřezu použité měděné cívky je třeba určit napájecí proud.

$$I_1 = \frac{S_s}{U_1} = \frac{131 * 10^3}{230} = 570 \text{ A}$$

$$S_{cu} = \frac{I_1}{J_{cu}} = \frac{570}{4} = 143 \text{ mm}^2$$

Je třeba zvolit dva paralelní pásy o $125mm^2$, ty nám rozšíří společně s průměrem jádra s izolačním materiálem D_i výsledný střední průměr závitů $D_{Cu \text{ stř}}$. Tuto hodnotu poté zahrneme do výpočtu odporu cívky R_1 .

$$D_{Cu \text{ stř}} = D_i + 2 * 1,25 = 21,52 + 2,5 = 24 \text{ cm}$$

Dále určíme počet závitů pecní cívky.

$$N_1 = \frac{U_1 * 10^8}{4,44 * B_m * 10^4 * S_{Fe} * f} = \frac{230 * 10^8}{4,44 * 1,2 * 10^4 * 239,62 * 50} = 36$$

$$R_1 = \rho_{Cu} * \frac{\pi * D_{Cu} stř}{S_{Cu}} * N_1 = 2 * 10^{-6} * \frac{3,14 * 24}{1,43} * 36 = 3,8 * 10^{-3} \Omega$$

Cívka samotná samozřejmě způsobuje vlastní ztráty, ty zohledníme výpočtem níže.

$$\Delta P_1 = R_1 * I_1^2 = 3,8 * 10^{-3} * 570^2 = 1234,62 W$$

Mezi závitů cívky je mezera š rovna 0,38cm. Což je potřeba k určení délky cívky a z toho plynoucí délky celé pece. Šíře kanálku d=1,5cm. Indukční pec má podstatu podobnou transformátoru, proto lze vypočíst napětí i proud v kanálku jako u transformátoru (s tím že uvažujeme $N_2=1$)

$$h_1 = (2 * 0,5 + 0,38) * N_1 = (2 * 0,5 + 0,38) * 36 = 49,68 cm$$

$$U_2 = \frac{U_1}{N_1} = \frac{230}{36} = 6,39 V$$

$$I_2 = N_1 * I_1 = 36 * 570 = 20520 A$$

Pokud hodnota proudové hustoty J_2 v kanálku je zvolena $8,5 A/mm^2$, pak pro průřez kanálku S_2 platí:

$$S_2 = \frac{I_2}{J_2} = \frac{20520}{8,5} = 2414,12 mm^2$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega * \mu_r * \mu_0 * \gamma}} = 4,61 cm$$

Oproti šíři kanálku 1,5cm je hloubka vniku velká, tudíž je proudová hustota v kanálku téměř konstantní.

$$R_{21} = \rho_2 * \frac{1}{S_2} = 42 * 10^{-6} * \frac{1}{24,1412} = 1,74 * 10^{-6} \Omega/cm$$

Kanálek není zcela uzavřen, část prochází nístějí, proto volíme součinitel $k_p=0,94$.

$$P_2 = P * \eta_{el} = 92 * 0,96 = 88 \text{ kW}$$

$$R_2 = \frac{P_2}{I_2^2} = \frac{88 * 10^3}{20520^2} = 2,09 * 10^{-4} \Omega$$

$$D_2 = \frac{R_2}{R_{21} * \pi * k_p} = \frac{2,09 * 10^{-4}}{1,74 * 10^{-6} * 3,14 * 0,94} = 40,67 \text{ cm}$$

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{230}{570} = 0,4034 \Omega$$

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{36}{1} = 36$$

$$R_1 = R_1 + p^2 * R_2 = 3,8 * 10^{-3} + 36^2 * 2,09 * 10^{-4} = 0,2747 \Omega$$

Po tomto by následovala kontrola zvoleného účinníku pomocí metody zrcadlového zobrazování.