

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Teorie ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí
ve studeném kelímku

vedoucí práce: Prof. Ing. Jiří Kožený CSc.

2013

autor: Lucie Míková

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lucie MÍKOVÁ**
Osobní číslo: **E11N0026P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Teorie ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte základy teorie indukčního ohřevu
2. Objasněte tavení ve "studeném kelímku"
3. Uveďte možné aplikace
4. Určete elektrické a geometrické parametry studeného kelímku pro tavení Ti, ZrO₂
5. Provedte energetické hodnocení a uveďte závěry pro praxi

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Určí vedoucí DP a konzultant

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na indukční tavení ve studeném kelímku. Popisuje stručně teorii indukčního tavení a druhy zařízení k tomu používaných. Dále jsou zde uvedeny možné tepelné ztráty těchto pecí. Ve čtvrté kapitole je uveden princip indukčního tavení ve studeném kelímku. Následně se zabývá se analytickým výpočtem pro konkrétní materiály (ZrO_2 , Ti, Al_2O_3). V další kapitole jsou shrnuty výhody a nevýhody indukčního tavení ve studeném kelímku. Nakonec je popsána energetická náročnost tavení. Závěr práce je věnován zhodnocení tavení ve studeném kelímku.

Klíčová slova

Indukční tavení, studený kelímek, frekvence, hloubka vniku, tepelné ztráty, účinnost, energetická náročnost, tavení ZrO_2 , tavení titanu

Abstract

The thesis presents the induction melting in cold crucible. It describes shortly the theory of induction melting and types of equipment to be used. Then there are the possible heat losses of these furnaces. The fourth chapter describes the principle of induction melting in a cold crucible. After that it is introduced with analytical computation for selected materials (ZrO_2 , Ti, Al_2O_3). Next chapter is summarized advantages and disadvantages of the induction melting in cold crucible. At the end is described energy consumption of melting. The conclusion is devoted to the evaluation of melting in cold crucible.

Key words

Induction melting, cold crucible, frequency, penetration depth, heat losses, efficiency, energy consumption, ZrO_2 melting, melting titanium

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 3. 5. 2013

.....

Lucie Míková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému CSc. za profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Také bych chtěla poděkovat pedagogickému sboru Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni za získání všech odborných znalostí během mého studia.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 TEORETICKÉ ZÁKLADY INDUKČNÍHO OHŘEVU	14
1.1 PRINCIP VZNIKU TEPLA V INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍCH	14
1.2 ELEKTRICKÉ SCHÉMA INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	15
1.3 HLOUBKA VNIKU ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	18
1.4 TEORETICKÉ VZDUTÍ TAVENINY	19
2 INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE	21
2.1 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC S VODIVÝM STÍNÍCÍM PLÁŠTĚM	21
2.2 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC SE SVAZKY Z TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ	23
2.3 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC PRO SÍŤOVÝ KMITOČET	24
3 ZTRÁTY V INDUKČNÍCH KELÍMKOVÝCH PECÍCH	29
3.1 ZTRÁTY VEDENÍM TEPLA STĚNOU KELÍMKU	29
3.2 ZTRÁTY VEDENÍM TEPLA DNEM PECE	30
3.3 ZTRÁTY VYZAŘOVÁNÍM Z POVRCHU VSÁZKY	31
3.4 ZTRÁTY V CÍVCE	31
3.5 ZTRÁTY NA PÁSOVÉM VEDENÍ	32
4 PRINCIP TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU	33
4.1 TAVENÍ ZrO_2	34
4.2 TAVENÍ TITANU	36
5 ELEKTRICKÉ A GEOMETRICKÉ PARAMETRY	41
5.1 STUDENÝ KELÍMEK PRO TAVENÍ ZrO_2	41
5.2 STUDENÝ KELÍMEK PRO TAVENÍ TITANU	47
5.3 STUDENÝ KELÍMEK PRO TAVENÍ Al_2O_3	51
6 ZHODNOCENÍ PROCESU TAVENÍ VSÁZKY ELEKTROMAGNETICKOU INDUKCÍ VE STUDENÉM KELÍMKU	52
6.1 VÝHODY:	52
6.2 NEVÝHODY:	54

7	ENERGETICKÉ HODNOCENÍ.....	56
7.1	ELEKTRICKÁ ÚČINNOST.....	56
7.2	TEPELNÁ ÚČINNOST	57
7.3	ENERGETICKÁ BILANCE.....	57
	ZÁVĚR	59
	POUŽITÁ LITERATURA	62

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na teorii ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku.

Je rozdělena do sedmi hlavních částí, první je zaměřena na teorii indukčního ohřevu. Je zde vysvětlen princip vzniku tepla v indukčních zařízeních. Následuje popis elektrického schéma těchto zařízení. Poté je zde uvedena hloubka vniku elektromagnetického vlnění do vsázky. První část je zakončena vysvětlením teoretického vzduť taveniny.

Druhá část se zabývá indukčními kelímkovými pecemi. Jsou zde popsány pece s vodivým stínícím pláštěm, pece se svazky z transformátorových plechů a pece pro síťový kmitočet.

Dále jsou zde uvedeny ztráty v indukčních kelímkových pecích. Jsou to ztráty vedením tepla stěnou kelímku, ztráty vedením tepla dnem pece, ztráty vyzařováním z povrchu vsázky, ztráty v cívce a ztráty na pásovém vedení.

Čtvrtá část objasňuje princip tavení ve studeném kelímku. Seznamuje nás s tavením ZrO_2 , které je uvedeno jako příklad tavení elektricky nevodivých materiálů. Jako zástupce elektricky vodivých materiálů je zde popsán princip tavení titanu.

Je zde proveden analytický výpočet elektrických a geometrických parametrů studeného kelímku pro tavení ZrO_2 , titanu a Al_2O_3 .

V šesté části je uvedeno zhodnocení procesu tavení vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Jsou zde shrnuty výhody a nevýhody této metody.

Poslední část je zaměřena na energetické hodnocení tavení ve studeném kelímku. Je zde vysvětlena elektrická i tepelná účinnost. Poté následuje popis energetické bilance indukčního tavení ve studeném kelímku.

Závěr práce je věnován zhodnocení tavení ve studeném kelímku.

Seznam symbolů

a [m]	Hloubka vniku elektromagnetického vlnění
$\cos\varphi_i$ [-]	Účinitel induktoru
c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita
d_1, d_2 [m]	Vnitřní průměr induktoru a vsázky
d_c [m]	Náhradní průměr induktoru
d_{ind} [m]	Průměr induktoru
d_{kel} [m]	Vnitřní průměr kelímku
d_v [m]	Náhradní průměr vsázky
\mathbf{E} [V . m ⁻¹]	Vektor intenzity elektrického pole
ϵ_0 [-].	Součinitel emisivity
f [Hz]	Kmitočet
F_1 [m ²]	Vnější plocha dna kelímku
F_2 [m ²]	Vnitřní plocha dna kelímku
F_3 [m ²]	Plocha dna podezdívky
F_I, F_{II} [m ²]	Střední plochy pro výpočet
\mathbf{H} [A . m ⁻¹]	Vektor intenzity magnetického pole
h_{ind} [m]	Výška induktoru
h_{kel} [m]	Výška kelímku
h_o [m]	Teoretická výška vzduť
I [A]	Proud
I_i [A]	Proud induktoru
I_m [A]	Proud ve vsázce
k_1 [-]	Korekční součinitel induktoru
L [H]	Vlastní indukčnost
l_1, l_2 [m]	Délka induktoru a vsázky
L_1, L_2 [H]	Vlastní indukčnosti induktoru a vsázky
m [kg]	Hmotnost vsázky
M_{12} [H]	Vzájemná indukčnost
m_{me} [g]	Optimální množství materiálu k tavení

n [-]	Počet závitů induktoru
P_{11} [kW]	Ztráty v cívce
P_2 [W]	Výkon do taveniny
P_b [W]	Ztráty dnem kelímku
P_c [W]	Celkový tepelný výkon dodávaný zdrojem
P_i [W]	Příkon induktoru
p_k^2 [-]	Transformační poloměr mezi dvěma indukčně svázanými obvody
P_L [W]	Celkový ztrátový výkon
P_m [W]	Výkon do taveniny
P_{os} [Pa]	Elektrodynamický tlak
P_p [W]	Ztrátový výkon povrchem vsázky
P_{rad} [W]	Ztrátový výkon sáláním
P_v [W]	Tepelný výkon absorbovaný vsázkou
P_w [W]	Ztrátový výkon stěnami kelímku
q [$W \cdot m^{-2}$]	Měrný příkon
Q [kJ]	Teplo potřebné k roztavení vsázky
Q_1 [kW]	Ztráty vedením tepla stěnou kelímku
Q_2 [kW]	Ztráty vedením tepla dnem pece
Q_3 [kW]	Ztráty vyzařováním z povrchu vsázky
q_{rad} [W/cm^2]	Měrné tepelné ztráty z povrchu taveniny
q_w [W/cm^2]	Měrné tepelné ztráty do stěn
R [Ω]	Odpor
R_1, R_2 [Ω]	Odpor induktoru a vsázky
R_e [Ω]	Ekvivalentní odpor
R_i [Ω]	Odpor induktoru
r_{kel} [m]	Vnitřní poloměr kelímku
R_m [Ω]	Odpor vsázky
s [$kg \cdot m^{-3}$]	Měrná hmotnost taveného kovu
S_2 [m]	Tloušťka dna pece
S_3 [m]	Tloušťka podezdívky

S_i [VA]	Zdánlivý výkon induktoru
s_{ind} [m]	Tloušťka stěny induktoru
s_{kel} [m]	Tloušťka stěny kelímku
S_m [m ²]	Plocha ve vzduchové mezeře
T [°C]	Teplota v ustáleném stavu
t [s]	Čas
T_{mel} [°C]	Teplota tavení
U [V]	Napětí
U_g [V]	Napětí zdroje
U_i [V]	Napětí induktoru
V [cm ³]	Objem vsázky
V_{st} [cm ³]	Objem startovacího materiálu
X_0 [Ω]	Rozptylová reaktance
X_{10} [Ω]	Reaktance prázdné cívky
x_2 [-]	Argument cylindrické funkce
X_e [Ω]	Ekvivalentní reaktance
X_i [Ω]	Reaktance induktoru
X_m [Ω]	Reaktance vsázky
X_S [Ω]	Rozptylová reaktance vsázky
Z_e [Ω]	Ekvivalentní impedance
α_1 [W/m ² °C]	Součinitel přestupu tepla mezi měděnou stěnou cívky a tekoucí chladicí vodou
α_2 [W/m ² °C]	Součinitel přestupu tepla mezi vsázkou a vnitřním povrchem kelímku
α_3 [W/m ² °C]	Součinitel přestupu tepla mezi vsázkou a dnem kelímku
α_4 [W/m ² °C]	Součinitel přestupu tepla na vnější straně dna
γ [S . m ⁻¹]	Konduktivita
ε [-]	Stupeň černosti vyzařujícího povrchu
ε [F . m ⁻¹]	Permitivita
η_E [%]	Elektrická účinnost
η_i [%]	Účinnost induktoru
η_T [%]	Tepelná účinnost

Θ [K]	Absolutní teplota vyzařujícího povrchu
ϑ_1 [°C]	Teplota chladící vody v cívce
ϑ_2 [°C]	Teplota roztavené vsázky
ϑ_3 [°C]	Teplota vzduchu pod dnem pece
λ_1 [W/m °C]	Tepelná vodivost materiálu kelímku
λ_2 [W/m °C]	Tepelná vodivost tepelné izolační vrstvy
μ [H/m]	Permeabilita
ρ [C . m ⁻³]	Hustota nábojů
ρ [Ω.m]	Měrný odpor
ρ_1 [Ω.m]	Měrný odpor materiálu induktoru
ρ_2 [Ω.m]	Měrný odpor materiálu vsázky
σ_ε [W/m ² K ⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta
ω [rad . s ⁻¹]	Úhlová rychlost

1 Teoretické základy indukčního ohřevu

1.1 Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních

Indukční ohřev je možné použít jen u materiálů elektricky vodivých. Všechna indukční zařízení se sestávají vždy z cívky, která je protékána střídavým proudem, ze zdroje energie a ze vsázky, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou. V podstatě je to vzduchový transformátor. Cívka je stranou primární a vsázka je stranou sekundární, která je spojena nakrátko. Průchodem proudu rovinným zářičem vzniká v okolí tohoto zářiče rovinné elektromagnetické vlnění. Při průchodu proudu válcovým zářičem vzniká v jeho okolí válcové elektromagnetické vlnění. Prochází-li pak střídavý proud válcovou cívkou, ta následně vyzářuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění.

[1, 2]

Teplo je dopravováno střídavým magnetickým polem a vzniká přímo ve vsázce. Vsázka je tedy nejteplejší částí celé soustavy – vše ostatní může být studené. Vznik tepla přímo ve vsázce patří k největším výhodám indukčního ohřevu. Indukční ohřev umožňuje nezvykle vysoké měrné příkony do vsázky. Volbou kmitočtu proudu, který napájí ohřívací vinutí a v jehož magnetickém poli je vsázka, můžeme vhodně ovlivňovat i rozložení tepla vznikajícího ve vsázce. Díky těmto i mnoha dalším výhodám získává indukční ohřev například v metalurgii a ve strojírenství stále širší uplatnění. [2]

Teorie indukčního ohřevu je založena na elektrodynamice, vyplývající z Maxwellových rovnic:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.1.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.1.2)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (1.1.3)$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (1.1.4)$$

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

$\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

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

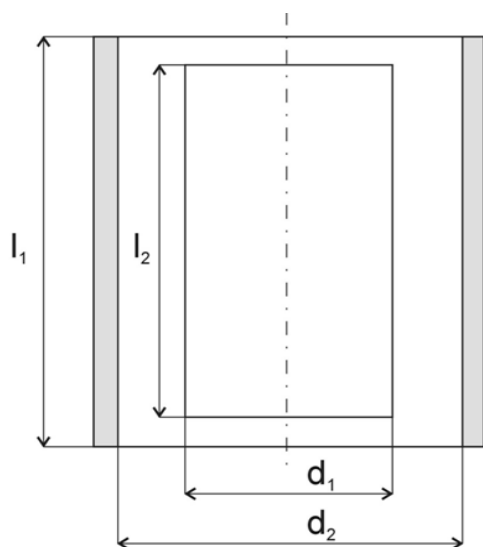
\mathbf{E} vektor intenzity elektrického pole [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]

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

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

Tyto rovnice ustanovují vlnový charakter elektromagnetického pole. Základem vlnových jevů je konečná rychlost šíření těchto jevů. Pokud by se daný jev šířil rychlostí nekonečně velkou, nebylo by pak jeho šíření postupné. Jev by byl okamžitě v celém prostoru, a tak by neexistovalo ani vlnění. [2]

1.2 Elektrické schéma indukčních zařízení



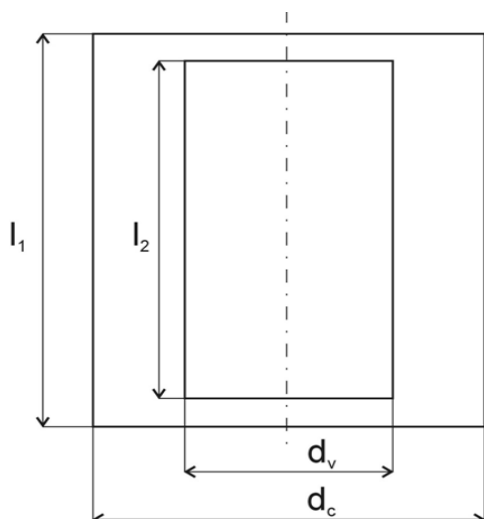
Obr. 1.2.1 Dva sousední elektrické obvody [1]

Uvažujeme dva elektrické obvody podle obr. 1.2.1, cívku a vsázku. Vnitřní průměr cívky označíme d_1 , průměr vsázky bude d_2 . Délky jsou označeny l_1, l_2 a hloubky vniku jsou a_1, a_2 . Budeme uvažovat prostorové rozložení proudu a náhradní nulové tloušťky. Je-li hloubka vniku značně menší než příslušný poloměr, jsou náhradní průměry dány výrazy:

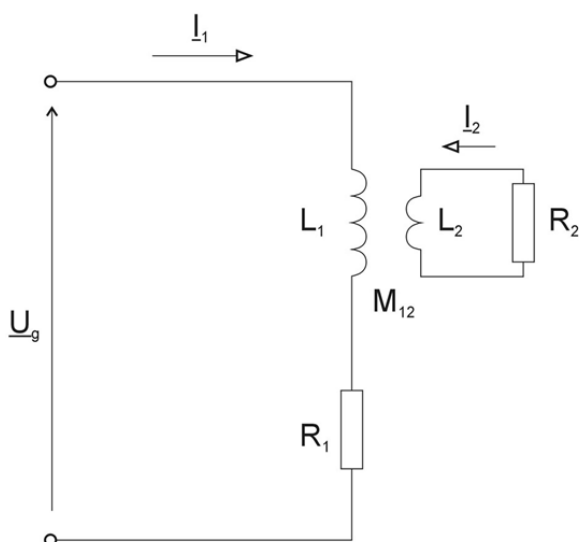
$$d_c = d_1 + a_1 \quad \text{pro cívku} \quad (1.2.1)$$

$$d_v = d_2 - a_2 \quad \text{pro vsázku} \quad (1.2.2)$$

Délky l_1, l_2 zůstanou beze změny. Místo obr. 1.2.1 budeme pro výpočet uvažovat náhradní uspořádání podle obr. 1.2.2. Jeho elektrické schéma je zobrazeno na obr. 1.2.3. [1]



Obr. 1.2.2 Dva sousé elektrické obvody – náhradní uspořádání [1]



Obr. 1.2.3 Dva sousé elektrické obvody – elektrické schéma [1]

Kde L_1 , L_2 [H] jsou vlastní indukčnosti a R_1 , R_2 [Ω] odpory cívky a vsázky. M_{12} [H] je vzájemná indukčnost obou obvodů. $M_{12} = k_{12}(L_1 \cdot L_2)^{\frac{1}{2}}$ (1.2.3)

Proudy v těchto obvodech označíme I_1 a I_2 . Na svorky pecní cívky přivedeme ze zdroje střídavý proud o kmitočtu f [Hz] a napětí U_g [V]. Pak lze odvodit působení druhého obvodu na obvod první. Vyjdeme ze dvou základních rovnic těchto obvodů, z nichž každá značí, že přiváděné napětí se rovná součtu úbytků napětí (2. Kirchhoffův zákon).

$$U_g = (R_1 + j\omega L_1) \cdot I_1 + j\omega M_{12} \cdot I_2 \quad (1.2.4)$$

$$0 = (R_2 + j\omega L_2) \cdot I_2 + j\omega M_{12} \cdot I_1 \quad (1.2.5)$$

Ze druhé rovnice vyjádříme proud I_2 a dosadíme ho do rovnice první:

$$U_g = [(R_1 + p_{12}^2 R_2) + j\omega(L_1 - p_{12}^2 L_2)] \cdot I_1 = (R_1 + j\omega L_1) \cdot I_1 \quad (1.2.6)$$

Matematická úprava značí, že jsme převedli hodnoty vsázky, tedy impedanci $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ (1.2.7), do prvního obvodu. Výsledný odpor v prvním obvodu R_1 je roven součtu vlastního odporu cívky a převedeného odporu vsázky. Výsledná indukčnost L_1 je pak dána rozdílem vlastní indukčnosti cívky a převedené indukčnosti vsázky:

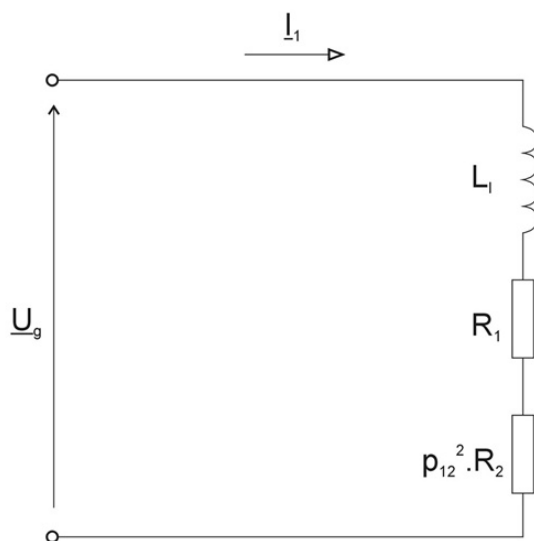
$$R_1 = R_1 + p_{12}^2 R_2 \quad (1.2.8)$$

$$L_1 = L_1 - p_{12}^2 L_2 \quad (1.2.9)$$

$$p_{12}^2 = \frac{\omega^2 \cdot M_{12}^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \quad (1.2.10)$$

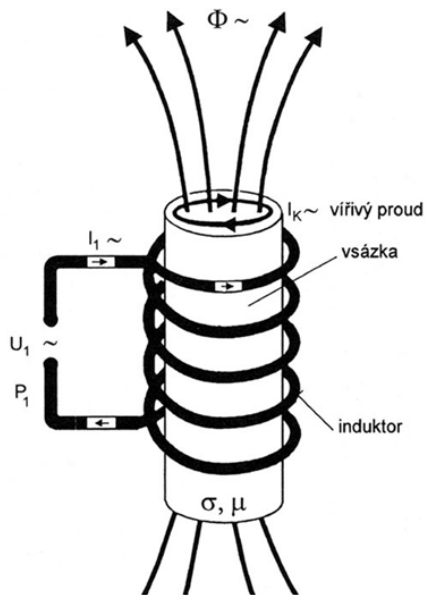
Elektrické schéma podle obr. 5.6 má po převedení sekundární strany tvar podle obr. 1.2.4.

[1]



Obr. 1.2.4 Upravené elektrické schéma [1]

1.3 Hloubka vniku elektromagnetického vlnění



Obr. 1.3.1. Indukční zařízení [1]

Umístíme-li do osy cívky válcovou, elektricky vodivou vsázku, pak dopadající elektromagnetické vlnění, které vstupuje do vsázky jejím povrchem, vyvolává indukované proudy. Vlivem těchto proudů se vsázka zahřívá. Elektromagnetické vlnění, jenž proniká do vsázky, se postupně utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. Hloubka vniku elektromagnetického vlnění závisí na kmitočtu a fyzikálních vlastnostech prostředí.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot \mu \cdot f \cdot \gamma}} \quad [m] \quad (1.3.1)$$

kde:

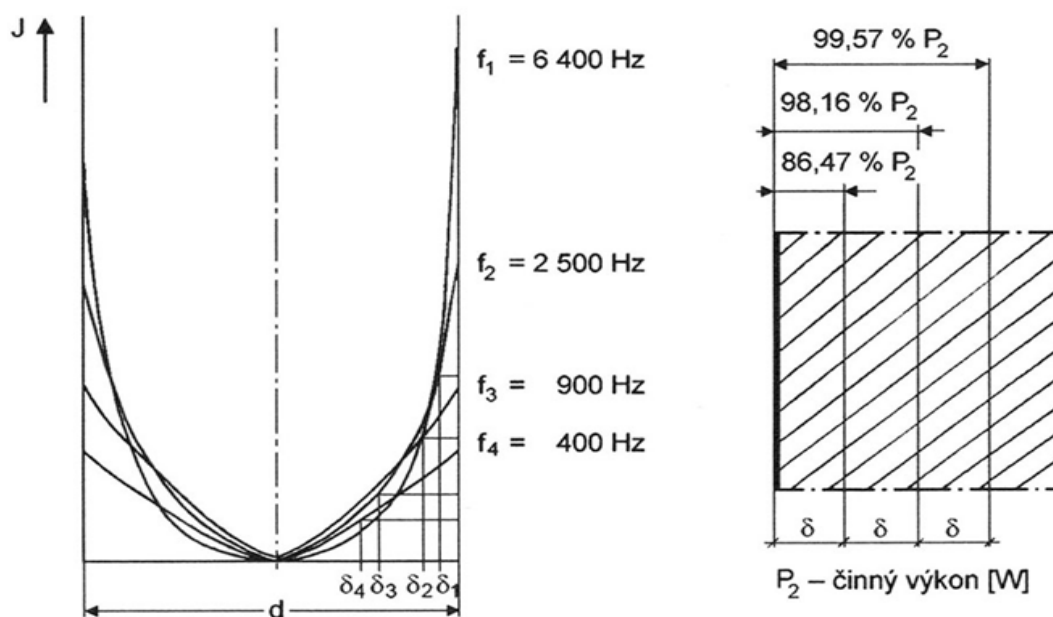
f je kmitočet [Hz]

μ je permeabilita [H/m]

γ je konduktivita [S/m]

Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na frekvenci je znázorněna na obr. 1.3.2 [1]

Frekvence [Hz]	Hloubka vniku [mm]					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1 100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8,0	71,2
1 000	2,1	7,1	2,7	7,0	1,8	15,9
10 000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5,0
1 000 000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5



Obr. 1.3.2 Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu [1]

Elektrická účinnost indukčního ohřevu závisí na poměru $d : a$. Tedy na poměru velikosti průměru tloušťky vsázky ke hloubce vniku. Výslednou účinnost indukčního ohřevu ovlivňuje také materiál ohřívajícího předmětu a jeho teplota. [1]

1.4 Teoretické vzdutí taveniny

Teoretické vzdutí má být menší než je tloušťka vrstvy strusky, aby nedocházelo k obnažení lázně a její oxidaci. Ve výpočtu je rezerva v tom, že skutečné vzdutí vsázky je vlivem rozlévání menší než teoretické. Podle následujícího vzorce (1.4.1) je vzdutí hladiny lázně přímo úměrné měrnému příkonu a odmocnině z permeability, zpravidla rovné 1, a nepřímo úměrné hmotnosti a odmocnině z kmitočtu a měrného odporu. Vzdutí hladiny roztavené vsázky nemá být u tavicích pecí větší než je tloušťka vrstvy strusky na povrchu

taveniny. Tato vrstva je vysoká asi 6 až 8 cm. Tuto skutečnost je třeba respektovat zejména při návrhu pecí na síťový kmitočet 50 Hz, kde je třeba přiměřeně snížit měrný příkon. [14]

Teoretická výška vzduší h_o [m] se vypočítá dle vztahu:

$$h_o = \frac{1}{9,81 \cdot s} \cdot P_{os} = \frac{q}{s} \sqrt{\left[\frac{\mu_r}{f \rho} \right]} \cdot 10^{-4} \quad (1.4.1)$$

kde:

P_{os} je elektrodynamický tlak [Pa]

q je měrný příkon [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

s je měrná hmotnost taveného kovu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

μ_r je permeabilita [VS/Am]

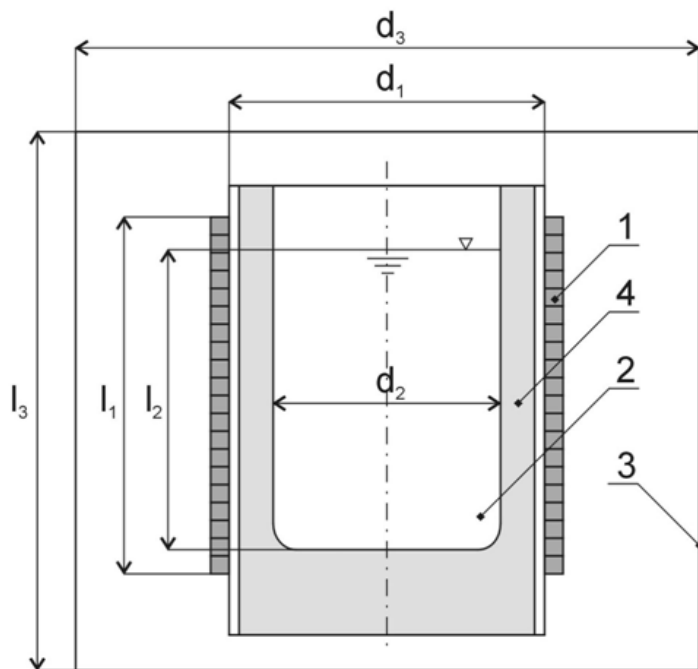
f je kmitočet [Hz]

ρ je měrný odpor [$\Omega \cdot \text{m}$]. [14]

2 Indukční kelímkové pece

2.1 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

V cívce je umístěn kelímek pěchovaný z keramické hmoty. Pec může mít buď stínící plášť z mědi, nebo ocelový plášť. Tento stínící plášť na vnitřní straně nese svazky transformátorových plechů.

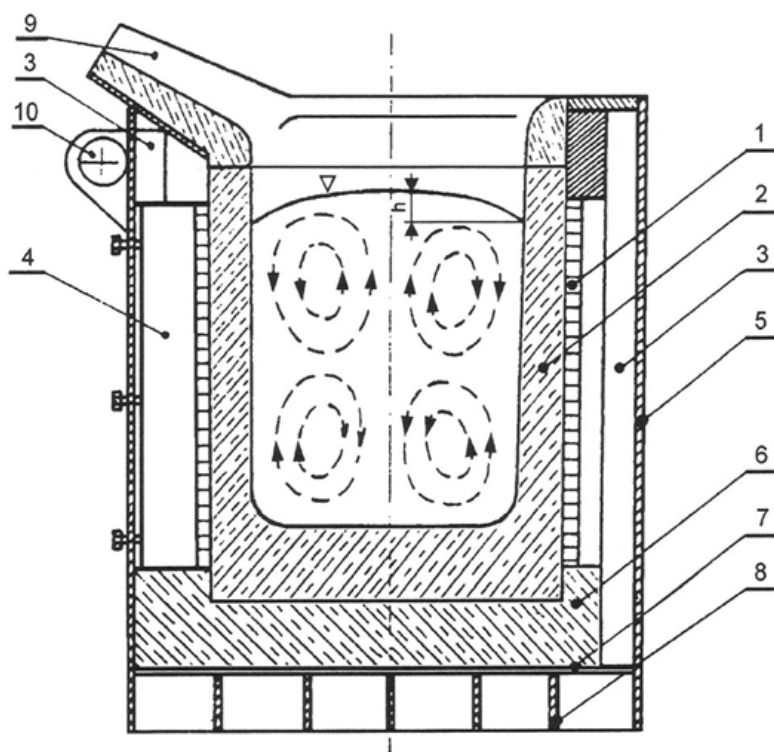


Obr. 2.1.1 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm [1]

1. Cívka
2. Vsázka
3. Stínící plášť
4. Keramický kelímek

Keramický kelímek je válcového tvaru a je elektricky nevodivý. Kelímek, který obsahuje vsázku, je ovinut cívkou. Cívku vineme většinou z měděné trubky obdélníkového průřezu. Cívkou prochází proud se zvýšeným kmitočtem (500 až 10000 Hz), případně proud síťového kmitočtu 50 Hz. Vnitřní povrch cívky vyzařuje do svého středu elektromagnetické vlnění, které dopadá kolmo na povrch vsázky. Elektromagnetické vlnění je vsázkou pohlcováno a energie elektromagnetická se mění v tepelnou. Dutinou cívky prochází magnetický tok, který se uzavírá vně cívky. [1]

Je zde potřeba učinit vhodné opatření, aby intenzita magnetického pole vně pece byla co nejnižší, aby nedocházelo k přehřívání nosných konstrukcí pece. Toho lze dosáhnout buď tak, že pec opatříme stínícím pláštěm z dobře vodivého materiálu s vhodným průměrem, nebo umístíme z vnější strany cívky svazky transformátorových plechů, kterým se magnetický tok uzavírá. Indukční kelímkové pece musí mít vždy stínění, a to buď jako vodivý stínící plášť, nebo jako svazky z transformátorových plechů na vnější straně cívky. Počítáme-li však s menšími rozměry pece, můžeme zanedbat vliv stínění a malé pece počítáme, jakoby stínění neměly. Při výpočtech uvažujeme pouze cívku a vsázku, tedy pouze dva na sebe působící elektrické obvody. Díky tomu se výpočet zjednoduší a zkrátí. [1]



Obr. 2.1.2 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm [1]

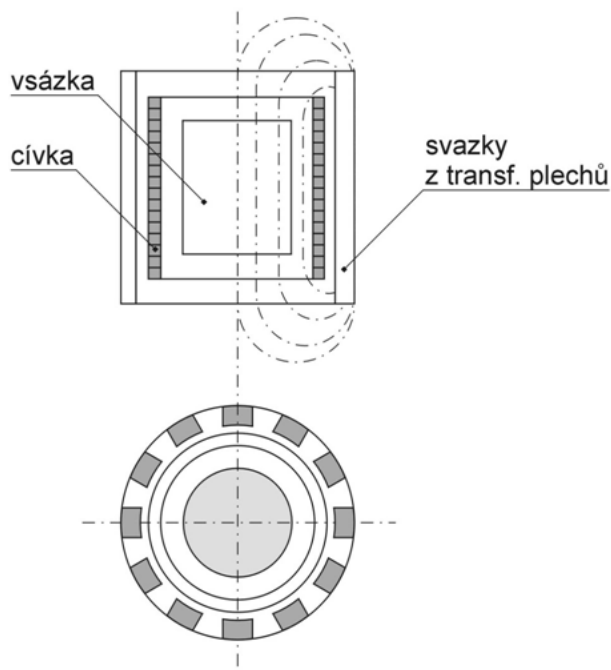
Popis indukční kelímkové pece - obr. 2.1.2:

1. Válcová ohřívací cívka - je jednovrstvová, nejčastěji je navinuta dutým měděným vodičem čtyřhranného průřezu. Dutinou vodiče protéká chladicí voda.
2. Keramický zadusáný kelímk pece - nejčastěji je vyroben z SiO_2 a Al_2O_3
3. Svazky transformátorových plechů - jsou svisle seřazeny po celém vnitřním obvodu pláště pece. Tyto svazky svádějí magnetický tok z vnější strany cívky, aby nezasahoval do

pláště i do jiných konstrukčních částí pece a nezpůsobil tak ztráty.

4. Střední trámce ze žárobetonu pro cívku
5. Ocelový plášť pece
6. Cihlová keramická vyzdívka na dně pece
7. Stínící měděný plech zabraňující vniknutí magnetického toku cívky do mřížového dna pece
8. Mřížové dno pece
9. Hubice pece pro odlévání
10. Osa, kolem které se pec otáčí při vyklápění, odpichu - pec je vyklápěna většinou pomocí hydraulických válců. [1]

2.2 Indukční kelímková pec se svazky z transformátorových plechů



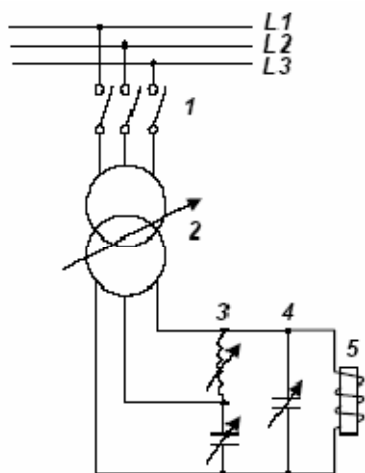
Obr. 2.2.1 indukční kelímková pec se svazky z transformátorových plechů vně cívky[1]

Pokud je indukční kelímková pec opatřena vodivým stínícím pláštěm, velmi výrazně poklesne intenzita magnetického pole vně pláště. Podobného účinku lze dosáhnout také tak, že se vně cívky, místo stínícího vodivého pláště použijí svazky transformátorových plechů, jak je znázorněno na obr. 2.2.1. Větší část magnetického toku buzeného cívkou se bude uzavírat vně cívky magneticky dobře vodivou cestou, která je tvořena svazky transformátorových plechů, uchycených na vnitřní straně pecního pláště. Díky tomu se zmenší magnetický odpor pro magnetický tok buzený cívkou, proto

magnetický tok částečně vzroste. Zvětší se tak vlastní indukčnost pecní cívky, tedy i magnetický tok pro jednotkový proud. Taktéž se zvýší vlastní indukčnost a vzájemná indukčnost M_{12} a zlepší se účinnost pece. [1]

Pro pec se stínícím pláštěm se obvykle používá cívka s vyšším počtem závitů a větší kondenzátorová baterie než je tomu u pece se svazky z transformátorových plechů. Užitečný výkon je pak nižší a ztráty v cívce jsou zase vyšší u pece s pláštěm než u pece se svazky z transformátorových plechů. U pece s pláštěm je elektrická účinnost nižší než u pece se svazky transformátorových plechů. Nejdůležitějším výsledkem porovnávání je zjištění, že účinnost pece se svazky z transformátorových plechů je téměř o 5 % vyšší než u pece se stínícím pláštěm. To přináší v provozu významné úspory elektrické energie, především u velkých pecí s nepřetržitým provozem. Provedení indukční kelímkové pece se svazky transformátorových plechů je z tohoto důvodu technicky dokonalejším řešením. Výrobně je však tato pec dražší. Pokud dojde při provozu k protavení kelímku, je poškození této pece zpravidla podstatně horší, může také dojít k úplnému zničení pece. [1]

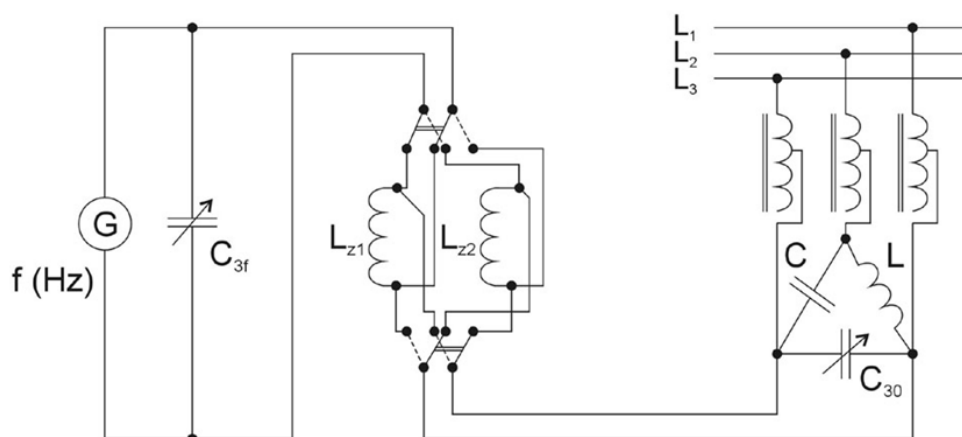
2.3 Indukční kelímková pec pro síťový kmitočet



Obr. 2.3.1 Principiální elektrické schéma [2]

Principiální schéma je na obr. 4.3.1, kde 1 je výkonový spínač, 2 je regulační transformátor, 3 je symetrikační obvod převádějící jednofázovou zátěž na zátěž trojfázovou (symetrickou), 4 je regulační kondenzátorová baterie kompenzující jalový výkon ohřívací cívky a 5 je indukční pec (ohřev). [2]

V posledních letech se i u nás poměrně velmi rozšířilo používání indukčních kelímkových pecí, které se přes autotransfornátor připojují na trojfázovou síť 3 x 400 V, 50 Hz. V jejich elektricky nevodivém kelímku nastává intenzivní víření roztavené vsázky, a proto se mohou používat i pro výrobu legovaných ocelí. V takovémto případě je lze plnit již roztavenou vsázkou z pece obloukové nebo martinské („duplex proces“). Tyto pece se zavádějí z důvodu nižších investičních nákladů, jejichž cena je asi 40 % z pořizovacích nákladů pro celé pecní zařízení středofrekvenční. Tento rozdíl v pořizovacích nákladech se zčásti zmenší tím, že pec pro 50 Hz má větší, a tudíž dražší kondenzátorovou baterii. Obsluha pece přímo připojené k síti je pak o dost jednodušší. Podstatnou roli hraje i elektrická účinnost celého zařízení. Například elektrická účinnost samotné kelímkové pece na 1000 kg oceli při 50 Hz je přibližně 74,5 %, při 1000 Hz je pak asi 81,5 %. Při vyšším kmitočtu však musíme brát v úvahu elektrickou účinnost měniče kmitočtu, která bývá u větších zařízení kolem 85 %. V posledních letech se používají také indukční kelímkové pece připojené na síťový kmitočet, pro udržování roztaveného kovu na požadované teplotě (tzv. pece udržovací). Pecní zařízení má v tomto případě obvykle tři shodné vlastní pece, kelímky s cívkou, jeden společný napájecí generátor a jednu kondenzátorovou baterii pro 50 Hz. V provozu se používají vždy dvě pece, třetí je pak pouze jako rezerva. Elektrické schéma těchto pecí je uvedeno na obr. 2.3.2 [1]



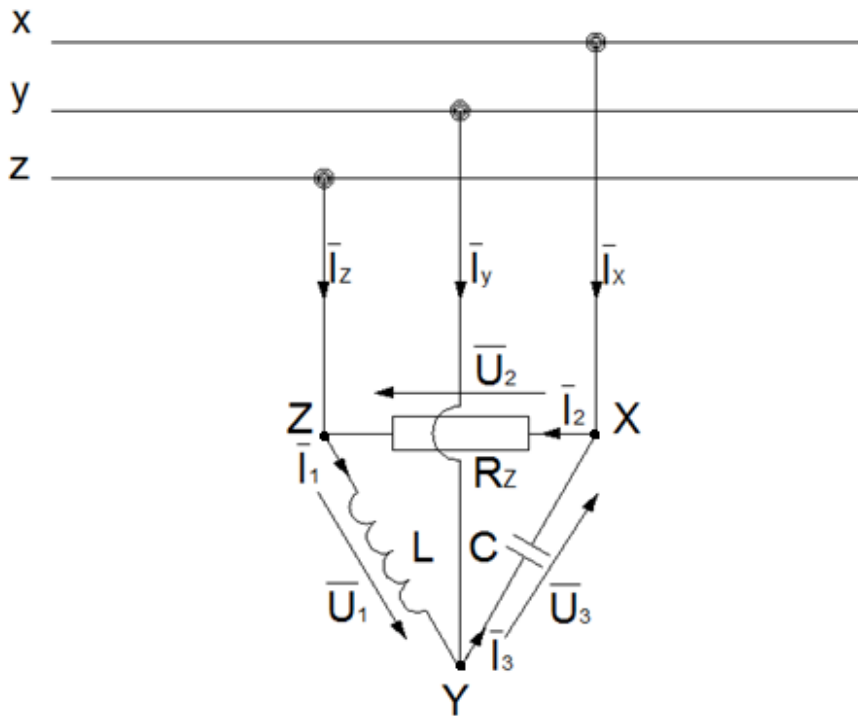
Obr. 2.3.2 Elektrické schéma [1]

Provedení kelímkových pecí na síťový kmitočet je takřka shodné, jako u pecí na zvýšené kmitočty. Přiváděný výkon bývá zpravidla menší než u středofrekvenční pece o stejném obsahu kelímku, takže případné tavení trvá o něco déle. Kvůli tomu se tyto pece (tavící i udržovací) opatřují keramickým víkem, které zmenšuje ztráty sáláním z povrchu vsázky. Víření roztavené vsázky je tím intenzivnější, čím je frekvence nižší. Protože

přespříliš vysoké vzdutí by mělo za následek obnažení povrchu lázně a následně její oxidaci, je důležité snížit víření zmenšením příkonu. V některých případech se také snižuje cívka, tak aby její horní okraj nepřesahoval hladinu lázně, jako je běžné u pecí středofrekvenčních. U pecí na síťový kmitočet je možné nechat přesahovat hladinu lázně nad okraj cívky. Tímto se vytvoří na povrchu lázně tlumící polštář, který zabrání obnažování a nadměrnému zahřátí hladiny lázně. Výpočet kelímkové pece pro tavení oceli nebo litiny na síťový kmitočet je identický jako u pece středofrekvenční. Částečně odlišný je výpočet u pece udržovací. Cívka, tedy počet jejích závitů, se vypočítá podle napětí, výkonu a kmitočtu středofrekvenčního zdroje. Po roztavení vsázky je možné tuto pecní cívku přepnout na síť s kmitočtem 50 Hz. Pec musí být i v tomto případě vyladěna připojením přiměřené kondenzátorové baterie pro 50 Hz. Pro tuto frekvenci určíme výpočtem výslednou indukčnost L_I , výsledný odpor R_I a potřebnou kapacitu C . Z tohoto pak získáme hodnotu zatěžovacího odporu R_Z , který vůči zdroji 50 Hz nahrazuje vyladěnou pec. [1]

Symetrizační zařízení:

V praxi se na síť připojují zátěže různých typů. Jedním spotřebičem, který se k síti připojuje, je indukční kelímková pec. Tato pec musí být vyladěna, aby zatěžovala síť pouze jako ohmický odpor. Protože se jedná o jednofázovou zátěž se značným příkonem, je nutno připojit k peci další zařízení, které zajistí symetrické zatížení trojfázové napájecí sítě. Jedná se o symetrizační indukčnost L_s a kapacitu C_s , které se spolu s pecí zapojují na trojfázovou síť buď do trojúhelníka, nebo do hvězdy. Při rovnoměrném zatížení sítě je důležité, aby proudy v jednotlivých fázích byly stejné a současně souběžné s příslušnými fázovými napětími. Při obou zapojeních je třeba dodržet správný sled fází, protože velikost proudů případně napětí je na tomto sledu závislá. [15]

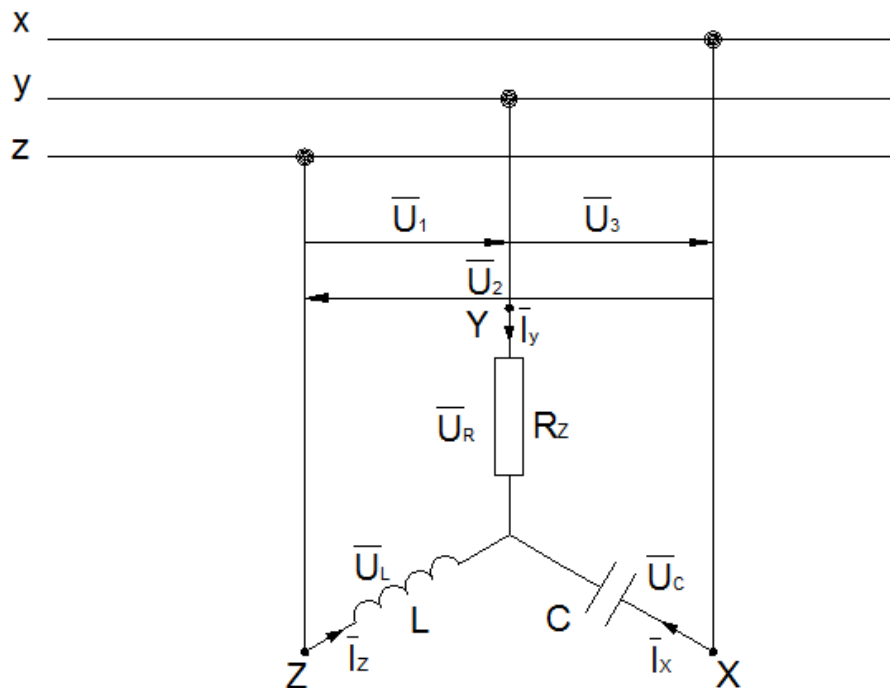


Obr. 2.3.3 Elektrické schéma – zapojení do trojúhelníka [14, 15]

Při zapojení trojfázové zátěže do trojúhelníka se indukčnost a kapacita určí podle těchto vztahů:

$$L_s = \frac{\sqrt{3} \cdot R_z}{2\pi f} [H] \quad (2.3.1)$$

$$C_s = \frac{1}{2\pi f \cdot \sqrt{3} \cdot R_z} [F] \quad (2.3.2) [14, 15]$$



Obr. 2.3.4 Elektrické schéma – zapojení do hvězdy [14, 15]

Při zapojení trojfázové zátěže do hvězdy se indukčnost a kapacita určí podle následujících vztahů:

$$L_s = \frac{R_z}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f} [H] \quad (2.3.3)$$

$$C_s = \frac{\sqrt{3}}{2\pi f \cdot R_z} [F] \quad (2.3.4) [14, 15]$$

3 Ztráty v indukčních kelímkových pecích

Teplu se šíří z míst o vyšší teplotě z míst o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou. Při tomto přestupu vznikají ztráty, které jsou u indukčního ohřevu v kelímkové peci nežádoucí. Vsázka je nejteplejší místo v peci, roztavená vsázka má teplotu přibližně 1650 °C. Z vsázky se nejvíce tepla ztrácí stěnou kelímku do chladící vody v cívce, dnem pece a sáláním z povrchu vsázky přes nashromážděnou vrstvu strusky do okolí.

Tyto ztráty nazýváme:

- Ztráty vedením tepla stěnou kelímku
- Ztráty vedením tepla dnem pece
- Ztráty tepla vyzařováním z povrchu vsázky

Dále rozeznáváme elektrické ztráty:

- Ztráty v cívce
- Ztráty na pásovém vedení [6]

3.1 Ztráty vedením tepla stěnou kelímku

Ztráty stěnou kelímku jsou úměrné tloušťce stěny kelímku, z důvodu malé tloušťky stěny bývají tyto ztráty poměrně velké. Zesílení stěny kelímku vede ke snížení ztrát vedením stěnou a zároveň se sníží i součinitel vazby mezi cívkou a vsázkou. Pak by se také zhoršila elektrická účinnost. Tyto ztráty se určují množstvím tepla, které projde za 1 sekundu válcovou stěnou kelímku, ztráty jsou počítány v kW.

$$Q_1 = \frac{\pi(\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot l_2}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d'}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d'} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}} \quad (3.1.1)$$

kde:

ϑ_1 [°C] - teplota chladící vody v cívce

ϑ_2 [°C] - teplota roztavené vsázky

l_2 [m] - délka vsázky

d' , d_1 [m] - vnitřní a vnější průměr vrstvy z tepelně izolační lepenky mezi kelímkem a cívkou

d_2 , d' [m] - vnitřní a vnější průměr kelímku

α_1 [W/m² °C] - součinitel přestupu tepla mezi měděnou stěnou cívky a tekoucí chladicí vodou

α_2 [W/m² °C] - součinitel přestupu tepla mezi vsázkou a vnitřním povrchem kelímku

λ_1 [W/m °C] - tepelná vodivost materiálu kelímku

λ_2 [W/m °C] - tepelná vodivost tepelné izolační vrstvy [6]

3.2 Ztráty vedením tepla dnem pece

Tyto ztráty mají podobný charakter jako výše zmíněné ztráty vedením tepla stěnou kelímku, pouze se počítají s jinými proměnnými. Ztráty je možné snížit zvětšením tloušťky dna kelímku a podezdívky, která je tvořena křemelínovými cihlami. Velikost těchto ztrát není tak vysoká jako velikost ztráty vedení stěnou kelímku a vyzařováním tepla z povrchu vsázky, proto je možné tyto ztráty zanedbat.

$$Q_2 = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_3}{\frac{1}{\alpha_3 \cdot F_2} + \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_I} + \frac{S_3}{\lambda_3 \cdot F_{II}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot F_3}} \quad (3.2.1)$$

$$F_I = \sqrt{F_1 \cdot F_2} \quad (3.2.2)$$

$$F_{II} = \sqrt{F_1 \cdot F_3} \quad (3.2.3)$$

kde:

ϑ_2 [°C] - teplota roztavené vsázky

ϑ_3 [°C] - teplota vzduchu pod dnem pece

α_3 [W/m² °C] - součinitel přestupu tepla mezi vsázkou a dnem kelímku

α_4 [W/m² °C] - součinitel přestupu tepla na vnější straně dna

S_2, S_3 [m] - tloušťka dna pece a podezdívky

F_1 [m²] - vnější plocha dna kelímku

F_2 [m²] - vnitřní plocha dna kelímku

F_3 [m²] - plocha dna podezdívky

F_I, F_{II} [m²] - střední plochy pro výpočet [6]

3.3 Ztráty vyzařováním z povrchu vsázky

Teplota vsázky dosahuje až 1650 °C a vsázka je souvisle pokryta struskou, která má

teplotu okolo 1400 °C. Ztráty vyzařováním tepla z povrchu vsázky jsou poměrně vysoké.

Pro

udržovací pece se používá víko s keramickou vyzdívkou, tyto pece udržují vsázku roztavenou

delší dobu a díky tomuto víku neuniká tolik tepla z povrchu. Vlivem tohoto víka jsou tyto ztráty značně sníženy. U tavicích pecí se však toto víko nepoužívá, protože při tavbě by jeho časté otevírání a zavírání prodlužovalo dobu tavby.

$$Q_3 = \varepsilon \cdot \sigma_{\varepsilon} \cdot F_2 \cdot \left(\frac{\Theta}{100}\right)^4 \quad (3.3.1)$$

kde:

ε [-] - stupeň černosti vyzařujícího povrchu

σ_{ε} [W/m²K⁴] - Stefan-Boltzmannova konstanta; $\sigma_{\varepsilon} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

Θ [K] - absolutní teplota vyzařujícího povrchu

F_2 [m²] - vnitřní plocha dna kelímku [6]

3.4 Ztráty v cívce

Průchodem proudu cívkou vzniká teplo, které zahřívá cívku a ovlivňuje tavbu. Po rozepsání odporu R_{11} a zavedením proudu I_{11} , který je roven součinu počtu závitů cívky N_{11} a proudu I_1 , dostaneme vzorec kde, je patrné, že nezáleží na počtu závitů N_{11} .

$$P_{11} = \frac{1}{2} R_{11} \cdot I_1^2 \quad (3.4.1)$$

Pro minimalizaci těchto ztrát je důležité, aby cívka byla vyrobena z materiálu s co největší elektrickou vodivostí. Nejčastěji se pro výrobu cívek indukčních pecí používá měď. Pak je tato cívka také dutá a je protékána chladicí vodou, kde rychlost a množství chladicí vody je voleno tak, aby se cívka nepřehřívala a teplo bylo rovnoměrně odváděno.

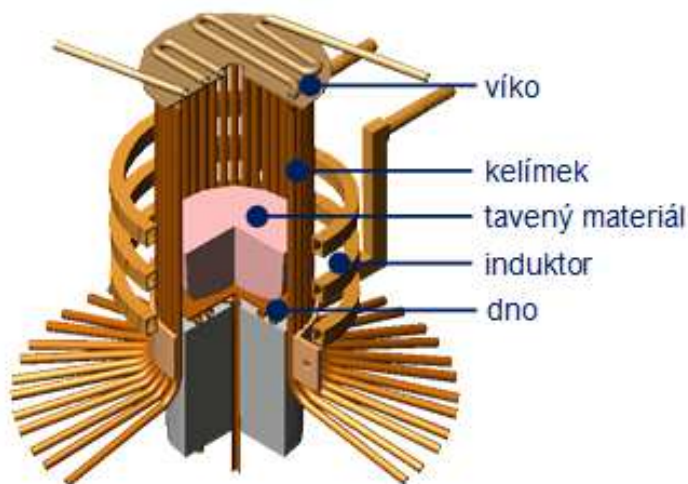
[6]

3.5 Ztráty na pásovém vedení

Toto vedení slouží ke spojení tavící pece s kondenzátorovou baterií. Jde o tenké měděné pásy. Tloušťka těchto pásů by měla být co nejmenší. U vedení je důležité, aby jeho odpor a reaktance byly co nejnižší. Reaktanci dělíme na dvě části: reaktanci vzduchové mezery a reaktanci vlastních pásů. Reaktance vzduchové mezery je až patnáctkrát větší než reaktance vlastních pásů, proto se vedení volí tak, aby vzduchová mezera byla co nejmenší a jeho výška byla co největší. [6]

4 Princip tavení ve studeném kelímku

Jedná se o velmi progresivní technologii, která se zatím uplatňuje především v menších měřítkách (v současnosti kilogramy a až desítky kilogramů taveniny) a jen pro speciální aplikace. Tavení ve studeném kelímku se používá většinou při přípravě superčistých kovů a slitin obsahujících např. titan, hliník, zirkon a několik kovů vzácných zemin pro letecké, kosmické a lékařské účely. [4]



Obr. 4.1 Indukční kelímková pec se studeným kelímkem [5]

Indukční kelímková pec se studeným kelímkem je zařízení pro vysokofrekvenční indukční ohřev. Toto zařízení je zaměřené na tavení různých materiálů. Kelímek sestává z dutých trubkovitých lamel většinou měděných, kolem kterých jsou umístěny závitky induktoru generující elektromagnetické pole. Vířivé proudy vyvolané elektromagnetickým polem ohřívají materiál umístěný uvnitř kelímku. Princip kelímku je založen na tom, že zdroj tepla je soustředěn přímo v ohřívaném materiálu a vlastní tavicí nádoba (studený kelímek) je vnitřně chlazená vodou. Z toho je odvozen i název zařízení. Studený kelímek si na všech svých částech udržuje stálou pracovní teplotu přibližně 50 °C, ačkoli roztavený materiál uvnitř kelímku dosahuje teploty až 3000 °C. [5]



Obr. 4.2 Corium ve studeném kelímku [5]

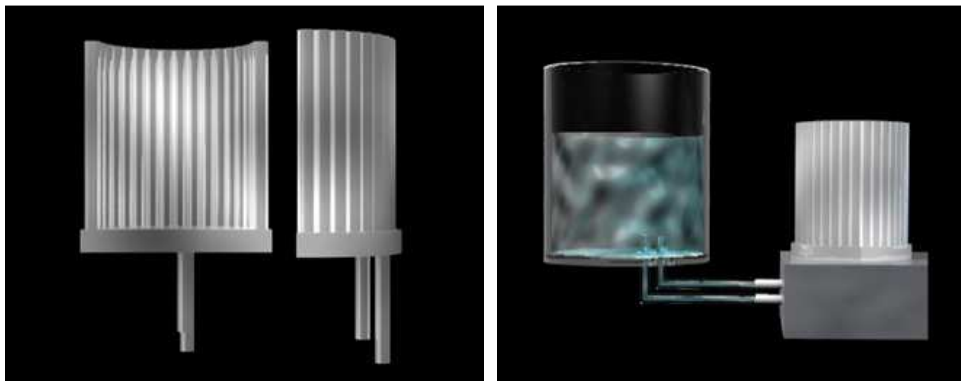
Indukční ohřev má oproti běžnému ohřevu několik nesporných výhod. Například teplo nevstupuje do ohřívaného materiálu jeho povrchem, ale vzniká přímo v materiálu, proto je samotný proces ohřevu velmi rychlý. Mezi další výhody patří, že vhodnou volbou kmitočtu zdroje můžeme volit rozložení tepla v ohřívaném materiálu – vsázce. Výhodou studeného kelímku je také jeho bezvyzdívková konstrukce, což znamená, že roztavený materiál se přímo nedotýká stěn kelímku ani jiného materiálu, který by se vlivem extrémní teploty mísil s taveninou. Díky tomu dosahuje tavenina velmi vysoké čistoty ve všech fázích tavby. Na rozhraní roztaveného materiálu a kelímku se vlivem působení intenzivního ochlazování vytvoří slabá, asi milimetrová vrstva (skull) z vlastního taveného materiálu, která prakticky nahrazuje nádobu pro roztavený materiál. [5]

4.1 Tavení ZrO_2

Postup tavení ve studeném kelímku byl navržen v Lebeděvově fyzikálním institutu v Moskvě pro výrobu umělého kubického zirkonu. Protože bod tání zirkonového prášku je mnohem vyšší než $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, nelze jej tavit v žádném z obvyklých žáruvzdorných kelímků. Výsledným produktem je zirkon, syntetický diamant, který vzniká postupem zónové krystalizace při $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ve šperkařském průmyslu slouží zirkon jako náhražka pravých diamantů. [9, 10]

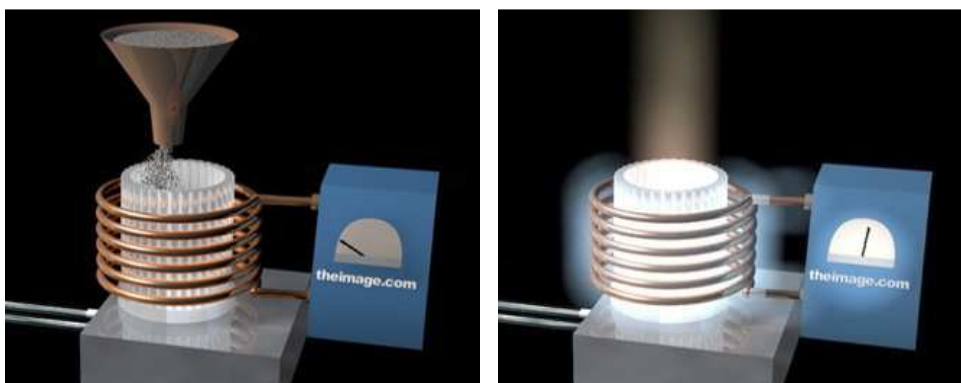
Oxid zirkoničitý má bod tání při $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Studený kelímek byl navržen tak, aby vydržel tuto teplotu. Oxid zirkoničitý musí být stabilizován pomocí malého procenta CaO (oxid vápenatý) nebo YO (oxid yttria). Tato směs je umístěna do studeného kelímku. Kelímek je složen z řady kovových trubek, které jsou protékány chladicí kapalinou.

Chladicí kapalina udržuje vnější vrstvu materiálu studenou, tak aby nemohlo dojít k jejímu roztavení. Na krajích se vytvoří tenká vrstva (skull) pevného oxidu zirkonu, která drží roztavenou směs. [9]



Obr. 4.1.1 Tavení ZrO_2 ve studeném kelímku [9]

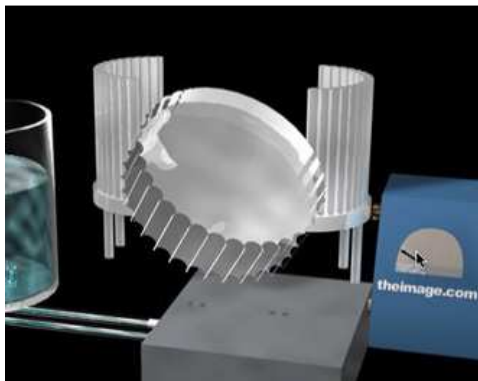
Okolo kelímku je navinuta měděná cívka, která zajišťuje potřebnou energii. Tavení probíhá s frekvencí přibližně 4 MHz při 100 kW výkonu. Protože oxid zirkoničitý v tuhém stavu nevede elektrickou energii, je nutné na začátku procesu přidat do vsázky malé množství kovového zirkonu. Když se kovový zirkon roztaví, reaguje s kyslíkem ve vzduchu (oxiduje) a smísí se s oxidem zirkoničitým. Díky tomu se vsázka stane elektricky vodivým materiálem a může dojít k jejímu ohřevu pomocí elektromagnetické indukce. [9]



Obr. 4.1.2 Tavení ZrO_2 ve studeném kelímku [9]

Když je vsázka dostatečně roztavena, ale tak aby zůstal její povrch neroztavený, sníží se amplituda proudu v induktoru. Několik hodin se roztavená vsázka pomalu ochlazuje a krystalizuje. Krystalizace ale způsobuje smrštění a materiál je proto složen z mnoha dílčích krystalů. Není to tedy jeden velký krystal. Za obvyklých podmínek krystalizuje oxid zirkoničitý v jednoklonné soustavě. Pro dosažení krychlové

krystalografické struktury je nutné přidat do vsázky stabilizační činidla. Je také možné docílit mnoha barevných variant, díky barvicím složkám. Krystaly se nakonec žíhají po dobu několika hodin, aby se odstranily nežádoucí příměsi. [9]



Obr. 4.1.3 Tavení ZrO_2 ve studeném kelímku [9]

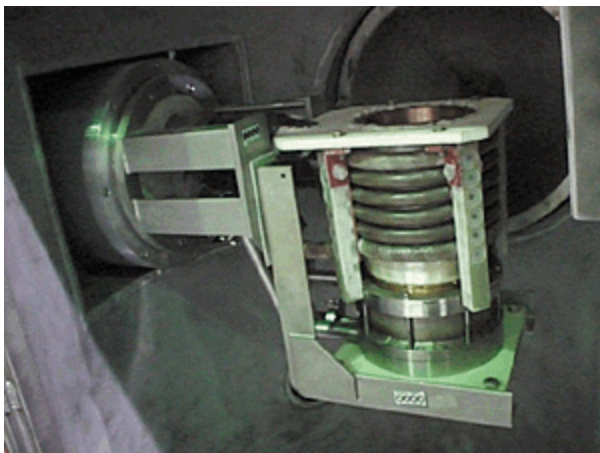
4.2 Tavení titanu

Titan má jedinečné vlastnosti, které umožňují jeho použití v některých aplikacích, kde ostatní kovy již nemohou být použity. Slitiny titanu jsou často využívány v leteckém průmyslu díky jejich vysokému poměru pevnosti k hmotnosti. Průmysl chemických procesů také využívá výhod titanu. Titanové slitiny jsou často používány v některých agresivních prostředích, kde jiný kov nebude použitelný s ohledem na korozi. Titan rychle vytváří stabilní vrstvu oxidu v oxidačních a neutrálních vodních roztocích. Díky tomu je téměř imunní proti korozi v kyselině dusičné, odbarvovačích a oxidačních halogenidových solí. [8]

Aplikace titanu jsou bohužel omezené relativně vysokými náklady. Například odlitky titanu stojí několikrát více, než výrobky z nerezových ocelí. Cenu titanu ovlivňuje několik faktorů:

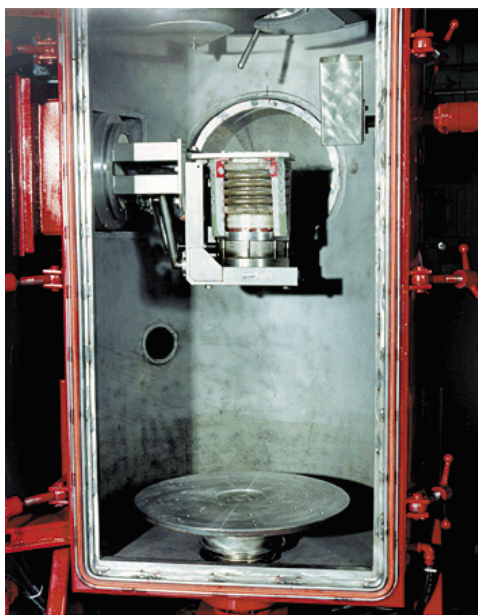
- Snadno reaguje s kyslíkem a dusíkem a jeho tavení, lití i chlazení musí probíhat ve vakuu nebo inertní atmosféře.
- Je nutné ho odlévat do drahých nereaktivních forem, které se vyrábějí ze sloučenin zirkonia, thoria a yttria.
- Využitelnost je často velmi nízká vzhledem k jeho obtížné recyklaci.
- Odlévání je velmi obtížné, často vyžaduje velké úpravy a zlepšování odlitků. [8]

Tavení titanu probíhá ve vakuu nebo inertní atmosféře a provádí se metodou tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Díky tomu se minimalizují nedostatky. Proces nabízí několik výhod při lití titanu metodou vytavitelného modelu, například jako zkrácení doby cyklu v porovnání s klasickým indukčním tavením ve vakuu. Proces používá vodou chlazený měděný kelímek, čímž se eliminuje kontaminace spojená s typickým vakuovým indukčním tavením v keramickém kelímku. Metoda je bezkonkurenční ve své schopnosti používat a recyklovat kovový šrot. Tento způsob tavení je atraktivní technologií pro výrobu široké škály titanových odlitků vysoké kvality s nízkými náklady. [8]



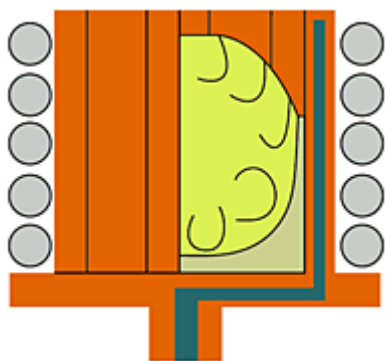
Obr. 4.2.1 kelímek a cívky pro tavení bez použití žáruvzdorných materiálů [8]

Výroba forem používaných pro odlévání titanu je podobná výrobě forem pro lití slitin železa s výjimkou některých velmi důležitých rozdílů. Hlavní rozdíl je ve složení. Pro železné odlitky se používají formy složené ze zirkonu, oxidů křemíku a hliníku. Vzhledem k silné afinitě titanu ke kyslíku, nelze tyto formy použít pro odlévání titanu. Použití těchto materiálů by vedlo ke zhoršení stavu povrchu odlitků a jejich vysoké porozitě. Odlitky by pak také byly křehké a vedlo by to k potížím při obrábění vzhledem k vysoké tvrdosti povrchové vrstvy. Tato vrstva také může způsobit vznik trhlin ve vysoce pevných slitinách, jako je například Ti-6AL-4V. Aby se předešlo těmto problémům, musí být formy používané pro odlévání titanu vyrobeny ze speciálních vysoce stabilních žáruvzdorných materiálů, jako jsou zirkon, thorium a oxid yttria. [8]



Obr. 4.2.2 Jednokomorová pec s odstředivou licí deskou pro 10 kg vsázky [8]

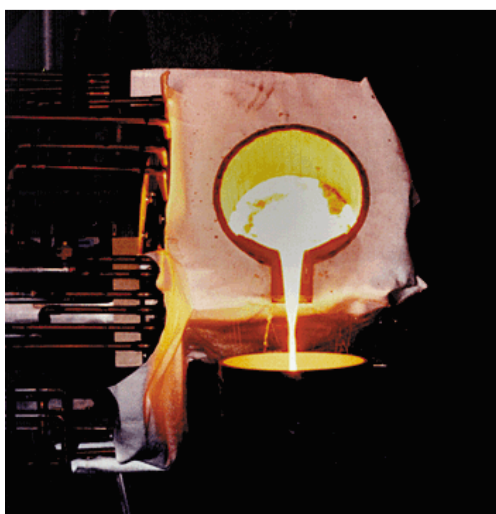
Proces používá vodou chlazený segmentový měděný kelímek, aby se zabránilo kontaminaci reaktivních slitin. Segmenty v kelímku umožňují použít jako zdroj energie indukční elektromagnetické pole. Bez segmentů by indukční cívka sloužila pouze k roztavení měděného kelímku. Při použití kelímku se segmenty, magnetické pole dodávané indukční cívkou prochází segmenty kelímku a vsázkou uvnitř kelímku. Vsázka se uprostřed roztaví a zůstane pevná tenká vrstva (skull) podél základny a stěn kelímku. Kov se v podstatě taví ve vlastním kelímku. [8]



Obr. 4.2.3 Tavení vsázky ve studeném kelímku [8]

Existuje několik jedinečných výhod tavení titanu ve studeném kelímku. Tavit metodou studeného kelímku v podstatě můžeme cokoliv, co se fyzicky vejde do kelímku, včetně ingotů, plechů, trubek, valounů a prášku. Ideálně se však taví rozsekané tlusté

plechy získané za nízké ceny ze šrotu. Pevnost odlitků je ovlivněna obsahem kyslíku. Čím je vyšší obsah kyslíku, tím je vyšší i pevnost titanu. Z tohoto důvodu je obsah kyslíku v surovém titanu pečlivě kontrolován, aby jeho množství bylo optimální. Také je možné v případě potřeby snadno přidat oxid titaničitý do taveniny a zvýšit tak obsah kyslíku. Proces tavení ve studeném kelímku také umožňuje snadnější dávkování přísad. Například, může být přísadový materiál přidán přímo do taveniny, tím je umožněno použít maximální hmotnost vsázky. Snadno lze řídit i dávkování příměsí s vysokým tlakem par, jako je například mangan. Kov je možné udržovat roztavený po delší dobu, dokud nedojde k úplnému roztavení příměsí, jako jsou tantal a wolfram. [8]

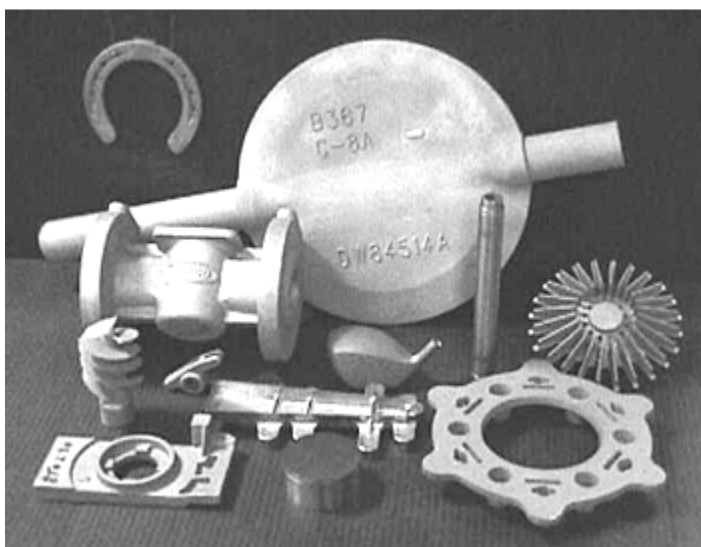


Obr. 4.2.4 Lití roztavené vsázky do formy [8]

Poté, co se roztavený kov se nalije do formy, zůstává v kelímku tenká skořápka. Tuto skořápku je možné rychle odstranit, díky tomu je umožněna rychlá příprava k roztavení jiné slitiny. Například, mohou po 40ti kilové vsázce průmyslově čistého titanu následovat 40ti kilová vsázka Ti-6AL-4V a pak 40ti kilová vsázka zirkonu pouze s malým zpožděním. Vše bez rizika vzájemné kontaminace. Díky tomu metoda tavení ve studeném kelímku velmi šetří čas. Proces také umožňuje bezkonkurenční flexibilitu v legování.

Přínosem indukčního tavení ve studeném kelímku je možnost výroby vysoce kvalitních odlitků za krátký čas a nižší cenu. Nízké náklady spojené s tavením ve studeném kelímku jsou založeny na odstranění tavných elektrod, jejichž výroba je nejen pracná, ale i drahá. Také je možné používat levnější, ale stále certifikovaný materiál. Proces tavení ve studeném kelímku je výhodnější než obvyklý proces pro vysoko objemové produkce. Je

také vhodný pro výrobu kritických součástí používaných v letectví a pro prototypové odlitky. [8]



Obr. 4.2.5 Typické titanové odlitky vyráběné pomocí indukčního tavení ve studeném kelímku [8]

5 Elektrické a geometrické parametry

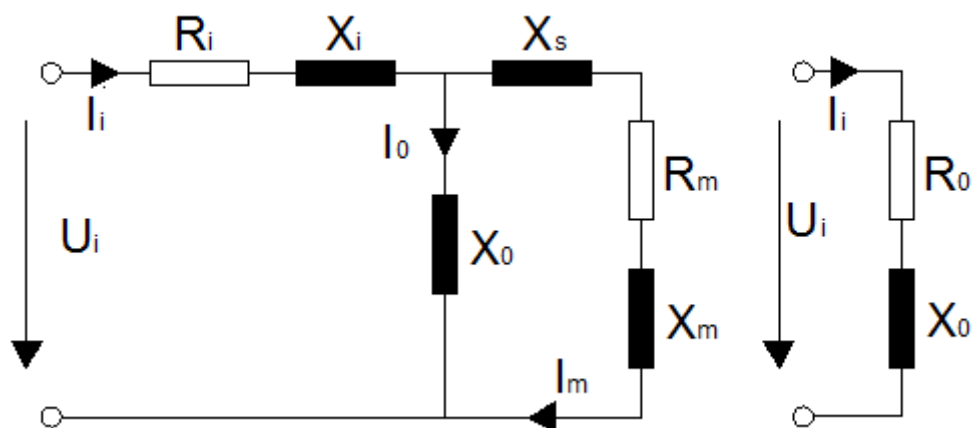
Tab. 5.1 Parametry a vlastnosti studeného kelímku [22]

Parametr	jednotka	kovy	oxidy
Teplota tání	°C	do 3400	do 3880
Konduktivita	1/Ωm	(1 - 5).10 ⁶	(0,4 - 5).10 ⁶
Kmitočet	kHz	0,05 - 10	440 - 5280
Měrná spotřeba energie	kWh/Kg	0,6 - 10	1,2 - 11,8
Tepelné ztráty stěnou kelímku	kW/m ²	900 - 5000	100 - 1000
Neroztavená vrstva (skull)	mm	velmi malá	2 - 20
Elektrická účinnost	%	5 - 7	85 - 98
Atmosféra		vakuum, inertní atmosféra	vzduch
Startovací materiál		ne	ano
Magneticko-hydrodynamický efekt		silný	velmi malý

5.1 Studený kelímek pro tavení ZrO₂

Při výpočtu indukčních tavicích zařízení je aplikace vztahů v nekonečně dlouhém systému velmi složitá. Konečným reálným hodnotám se však více blíží hodnoty vypočítané pomocí krátkého systému. Při návrhu se tedy počítá s pomocí náhradního schéma pro krátký systém induktoru s jedním závitem ($n = 1$), při kmitočtech nad 1MHz, a díky němuž lze podle vzorců spočítat hodnoty pro optimální tavení. V obvodu je zanedbána impedance studeného kelímku a uvažujeme siločáry magnetického pole rovnoběžné s osou kelímku.

[11]



Obr. 5.1.1 Náhradní schéma pro krátký systém vsázky a induktoru [11]

V tomto náhradním schéma (obr. 5.1.1) představuje:

U_i – napětí induktoru

I_i – proud induktoru

R_i – odpor induktoru

X_i – reaktanci induktoru

X_0 – rozptylovou reaktanci

I_0 – rozptylový proud

X_s – rozptylovou reaktanci vsázky

R_m – odpor vsázky

X_m – reaktanci vsázky

I_m – proud ve vsázce

R_e – ekvivalentní odpor

X_e – ekvivalentní reaktanci. [11]

Pro délky induktoru platí vztah $h_i > h_m$, za podmínky že je vsázka ve formě taveniny přehřátá, proto byly do náhradního schéma doplněny další prvky. Magnetické pole mimo induktor nemůže být nulové. Siločáry magnetického pole se uzavírají vně induktoru. Když jsou určeny všechny prvky náhradního elektrického obvodu, může se určit i náhradní impedance a následně se dají dopočítat všechny elektrické parametry. [11]

Pro provedení výpočtů je nejdříve nutné stanovit základní rozměry. Při návrhu jsem se inspirovala pecí provozované na univerzitě v Hannoveru. Parametry studeného kelímku, se kterými se bude následně počítat, jsou uvedeny v tab. 5.1.1. [11, 12]

Tab. 5.1.1 Parametry studeného kelímku pro tavení ZrO₂ [12, 13]

Rozměr	Induktor	Vsázka	Masivní Cu dno
Průměr [cm]	22	7,5	7,5
Výška [cm]	11	4	8

Hodnoty pro materiál vsázky – nevodivý ZrO₂ jsou uvedeny v tab. 5.1.2 Tyto hodnoty vlastností daného materiálu jsou prověřeny měřením, provedeném v Institutu elektrotepelných procesů v Petrohradu. [10]

Tab. 5.1.2 Hodnoty pro materiál vsázky - ZrO₂ [10]

Veličina	q_w [W/cm ²]	q_{rad} [W/cm ²]	ϵ_0 [-]	T [°C]	ρ [Ω·cm]
Popis	Měrné tepelné ztráty do stěn	Měrné tepelné ztráty z povrchu taveniny	Součinitel emisivity	Teplota v ustáleném stavu	Měrný odpor při dané teplotě
ZrO ₂	90	73	0,8	2750	0,01

Optimální kmitočet:

$$f = 3,6 \cdot 10^8 \left(\frac{\rho}{\mu \cdot d_{kel}^2} \right) \quad (5.1.1)$$

$$f = 3,6 \cdot 10^8 \left(\frac{0,01}{1 \cdot 7,5^2} \right) = 64 \text{ kHz}$$

Hloubka vniku elektromagnetického vlnění:

$$a = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (5.1.2)$$

$$a = 5030 \sqrt{\frac{0,01}{1 \cdot 64000}} = 1,988 \text{ cm}$$

Argument cylindrické funkce:

$$x_2 = \frac{r_2 \sqrt{2}}{a} \quad (5.1.3)$$

$$x_2 = \frac{3,75 \sqrt{2}}{1,988} = 2,668$$

Množství startovacího materiálu:

$$V_{st} = (0,08 \div 0,04) \cdot d_{kel}^3 \quad (5.1.4)$$

$$V_{st} = (0,08 \div 0,04) \cdot 7,5^3_{kel} = 33,75 \div 16,875 \text{ cm}^3$$

Optimální množství materiálu k tavení:

$$m_{me} = 0,5463 \cdot V_{st} \quad (5.1.5)$$

$$m_{me} = 0,5463 \cdot (33,75 \div 16,875) = 18,438 \div 9,219 \text{ g}$$

Výkon do taveniny:

$$P_2 = P_L = P_w + P_b + P_{rad} \quad (5.1.6)$$

kde P_2 je přenášený výkon do taveniny

P_L jsou celkové ztráty

P_w jsou ztráty do stěn kelímku

P_b jsou ztráty dnem

P_{rad} jsou ztráty sáláním

$$P_w = \pi \cdot d_{kel} \cdot h_{kel} \cdot q_w \quad (5.1.7)$$

$$P_w = 3,14 \cdot 7,5 \cdot 4 \cdot 90 = 8,482 \text{ kW}$$

$$P_{rad} = \pi \cdot r_{kel}^2 \cdot q_{rad} \quad (5.1.8)$$

$$P_{rad} = 3,14 \cdot 3,75^2 \cdot 73 = 3,225 \text{ kW}$$

$$P_2 = P_L = 8,482 + 3,225 = 11,707 \text{ kW}$$

Korekční součinitel induktoru:

$$k_1 = \frac{1}{1 + \frac{d_{ind}}{h_{ind}} \left[0,515 + 0,218 \left(\frac{S_{ind}}{d_{ind}} \right)^{0,406} \right]} \quad (5.1.8)$$

$$k_1 = \frac{1}{1 + \frac{0,22}{0,11} \left[0,515 + 0,218 \left(\frac{0,003}{0,22} \right)^{0,406} \right]} = 0,475$$

Reaktance prázdné cívky:

$$X_{10} = \omega \mu_0 \frac{\pi d_{ind}^2}{4 h_{ind}} \quad (5.1.9)$$

$$X_{10} = 402124 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\pi \cdot 0,22^2}{0,44} = 0,175 \Omega$$

Rozptylová reaktance:

$$X_0 = X_{10} \frac{k_1 h_{ind}}{h_{ind} - k_1 h_{kel}} \quad (5.1.10)$$

$$X_0 = 0,175 \frac{0,475 \cdot 0,11}{0,11 - 0,475 \cdot 0,04} = 0,1 \Omega$$

Plocha ve vzduchové mezeře:

$$S_m = \frac{\pi}{4} [d_{ind}^2 - (d_{kel} + 2s_{kel})^2] \quad (5.1.11)$$

$$S_m = \frac{\pi}{4} [0,22^2 - (0,075 + 2 \cdot 0,005)^2] = 0,0323 \text{ m}^2$$

Rozptylová reaktance vsázky:

$$X_s = \omega \mu_0 \frac{S_m}{h_{ind}} \quad (5.1.12)$$

$$X_s = 402124 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{0,0323}{0,11} = 0,149 \Omega$$

Odpory a reaktance induktoru:

$$R_i \approx X_i \approx \frac{n^2 \pi d_{ind}}{g h_{ind} a_i \gamma_i} \quad (5.1.13)$$

$$R_i \approx X_i \approx \frac{1^2 \cdot 3,14 \cdot 0,22}{1 \cdot 0,11 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 5,6 \cdot 10^7} = 1,12 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$m_m = \frac{d_{kel}}{\sqrt{2}a} \quad (5.1.14)$$

$$m_m = \frac{0,075}{\sqrt{2} \cdot 0,01988} = 2,668$$

$$a_{(m_m)} = \frac{2}{m_m} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2m_m} \right) \quad (5.1.15)$$

$$a_{(m_m)} = \frac{2}{2,668} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2 \cdot 2,668} \right) = 0,39$$

$$b_{(m_m)} = \frac{\sqrt{2}}{m_m} \quad (5.1.16)$$

$$b_{(m_m)} = \frac{\sqrt{2}}{2,668} = 0,53$$

$$R_m = \frac{n^2 \pi m_m^2}{\gamma h_{kel}} a_{(m_m)} \quad (5.1.17)$$

$$R_m = \frac{1^2 \pi 2,668^2}{400} 0,39 = 0,022 \Omega$$

$$X_m = \frac{n^2 \pi m_m^2}{\gamma h_{kel}} b_{(m_m)} \quad (5.1.18)$$

$$X_m = \frac{1^2 \pi 2,668^2}{400} 0,53 = 0,03 \Omega$$

Transformační poměr mezi dvěma indukčně svázanými obvody:

$$p_k^2 = \frac{X_0^2}{R_m^2 + (X_s + X_m + X_0)^2} \quad (5.1.19)$$

$$p_k^2 = \frac{0,1^2}{0,022^2 + (0,149 + 0,03 + 0,1)^2} = 0,128$$

$$p_k = 0,358$$

Ekvivalentní odpor:

$$R_e = R_i + p_k^2 \cdot R_m \quad (5.1.20)$$

$$R_e = 1,12 \cdot 10^{-4} + 0,128 \cdot 0,022 = 2,928 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Ekvivalentní reaktance:

$$X_e = X_i + p_k^2 \left[X_s + X_m + \frac{R_m^2 + (X_m + X_s)^2}{X_0} \right] \quad (5.1.21)$$

$$X_e = 1,12 \cdot 10^{-4} + 0,128 \left[0,149 + 0,03 + \frac{0,022^2 + (0,03 + 0,149)^2}{0,1} \right] = 0,0652 \Omega$$

Ekvivalentní impedance:

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} \quad (5.1.22)$$

$$Z_e = \sqrt{(2,928 \cdot 10^{-3})^2 + 0,0651^2} = 0,0652 \Omega$$

Účinník induktoru:

$$\cos \varphi_i = \frac{R_e}{Z_e} \quad (5.1.23)$$

$$\cos \varphi_i = \frac{2,928 \cdot 10^{-3}}{0,0652} = 0,045$$

Účinnost induktoru:

$$\eta_i = \frac{p_k^2 \cdot R_m}{R_e} \quad (5.1.24)$$

$$\eta_i = \frac{0,128 \cdot 0,022}{2,928 \cdot 10^{-3}} = 0,9617$$

Proud induktoru:

$$I_i = \sqrt{\frac{P_m}{p_k^2 \cdot R_m}} \quad (5.1.25)$$

$$I_i = \sqrt{\frac{11707}{0,128 \cdot 0,022}} = 2038,95 \text{ A}$$

Napětí induktoru:

$$U_i = Z_e \cdot I_i \quad (5.1.26)$$

$$U_i = 0,0652 \cdot 2038,95 = 133 \text{ V}$$

Příkon induktoru:

$$P_i = \frac{P_m}{\eta_i} \quad (5.1.27)$$

$$P_i = \frac{11707}{0,9617} = 12,17 \text{ kW}$$

Zdánlivý výkon induktoru:

$$S_i = U_i \cdot I_i \quad (5.1.28)$$

$$S_i = 133 \cdot 2038,95 = 271,2 \text{ kVA}$$

[11]

5.2 Studený kelímek pro tavení titanu**Tab. 5.2.1 Parametry studeného kelímku pro tavení Ti [12, 13]**

Rozměr	Induktor	Vsázka	Masivní Cu dno
Průměr [cm]	22	7,5	7,5
Výška [cm]	11	4	8

Objem vsázky:

$$V = \pi r_{kel}^2 \cdot h_{kel} \quad (5.2.1)$$

$$V = \pi 3,75^2 \cdot 4 = 177 \text{ cm}^3$$

Hmotnost vsázky:

$$m = \rho \cdot V \quad (5.2.2)$$

$$m = 4,5 \cdot 177 = 796,5 \text{ g}$$

Teplo potřebné k roztavení vsázky:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (5.2.3)$$

$$Q = 0,52 \cdot 0,7965 \cdot (1668 - 20) = 682,569 \text{ kJ}$$

$$Q = 682,569 \cdot 0,0002778 = 0,19 \text{ kWh}$$

Výkon do taveniny:

$$P = \frac{Q}{t} \quad (5.2.4)$$

$$P = \frac{682569}{120} = 5,688 \text{ kW}$$

Optimální kmitočet:

$$f = 3,6 \cdot 10^8 \left(\frac{\rho}{\mu \cdot d_{kel}^2} \right) \quad (5.2.5)$$

$$f = 3,6 \cdot 10^8 \left(\frac{42 \cdot 10^{-6}}{1,75^2} \right) = 269 \text{ Hz}$$

Hloubka vniku:

$$a = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (5.2.6)$$

$$a = 5030 \sqrt{\frac{42 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 269}} = 1,988 \text{ cm}$$

Argument cylindrické funkce:

$$x_2 = \frac{r_2 \sqrt{2}}{a} \quad (5.2.7)$$

$$x_2 = \frac{3,75 \sqrt{2}}{1,988} = 2,668$$

Korekční součinitel induktoru:

$$k_1 = \frac{1}{1 + \frac{d_{ind}}{h_{ind}} \left[0,515 + 0,218 \left(\frac{s_{ind}}{d_{ind}} \right)^{0,406} \right]} \quad (5.2.8)$$

$$k_1 = \frac{1}{1 + \frac{0,22}{0,11} \left[0,515 + 0,218 \left(\frac{0,003}{0,22} \right)^{0,406} \right]} = 0,475$$

Reaktance prázdné cívky:

$$X_{10} = \omega \mu_0 \frac{\pi d_{ind}^2}{4 h_{ind}} \quad (5.2.9)$$

$$X_{10} = 1690 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\pi \cdot 0,22^2}{0,44} = 7,341 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Rozptylová reaktance:

$$X_0 = X_{10} \frac{k_1 h_{ind}}{h_{ind} - k_1 h_{kel}} \quad (5.2.10)$$

$$X_0 = 7,341 \cdot 10^{-4} \frac{0,475 \cdot 0,11}{0,11 - 0,475 \cdot 0,04} = 4,215 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Plocha ve vzduchové mezeře:

$$S_m = \frac{\pi}{4} [d_{ind}^2 - (d_{kel} + 2s_{kel})^2] \quad (5.2.11)$$

$$S_m = \frac{\pi}{4} [0,22^2 - (0,075 + 2 \cdot 0,005)^2] = 0,0323 \text{ m}^2$$

Rozptylová reaktance vsázky:

$$X_s = \omega \mu_0 \frac{S_m}{h_{ind}} \quad (5.2.12)$$

$$X_s = 1690 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{0,0323}{0,11} = 6,238 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Odpory a reaktance induktoru:

$$R_i \approx X_i \approx \frac{n^2 \pi d_{ind}}{g h_{ind} a_i \gamma_i} \quad (5.2.13)$$

$$R_i \approx X_i \approx \frac{1^2 \cdot 3,14 \cdot 0,22}{1 \cdot 0,11 \cdot 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot 5,6 \cdot 10^7} = 0,024 \Omega$$

$$m_m = \frac{d_{kel}}{\sqrt{2}a} \quad (5.2.14)$$

$$m_m = \frac{0,075}{\sqrt{2} \cdot 0,01988} = 2,668$$

$$a_{(m_m)} = \frac{2}{m_m} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2m_m} \right) \quad (5.2.15)$$

$$a_{(m_m)} = \frac{2}{2,668} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2 \cdot 2,668} \right) = 0,39$$

$$b_{(m_m)} = \frac{\sqrt{2}}{m_m} \quad (5.2.16)$$

$$b_{(m_m)} = \frac{\sqrt{2}}{2,668} = 0,53$$

$$R_m = \frac{n^2 \pi m_m^2}{\gamma h_{kel}} a_{(m_m)} \quad (5.2.17)$$

$$R_m = \frac{1^2 \pi 2,668^2}{2,6 \cdot 10^6 \cdot 0,04} 0,39 = 8,386 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$X_m = \frac{n^2 \pi m_m^2}{\gamma h_{kel}} b_{(m_m)} \quad (5.2.18)$$

$$X_m = \frac{1^2 \pi 2,668^2}{2,6 \cdot 10^6 \cdot 0,04} 0,53 = 1,14 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Transformační poměr mezi dvěma indukčně svázanými obvody:

$$p_k^2 = \frac{X_0^2}{R_m^2 + (X_s + X_m + X_0)^2} \quad (5.2.19)$$

$$p_k^2 = \frac{4,215 \cdot 10^{-4}}{(8,386 \cdot 10^{-5})^2 + (6,238 \cdot 10^{-4} + 1,14 \cdot 10^{-4} + 4,215 \cdot 10^{-4})^2} = 312$$

$$p_k = 17,66$$

Ekvivalentní odpor:

$$R_e = R_i + p_k^2 \cdot R_m \quad (5.2.20)$$

$$R_e = 0,024 + 312 \cdot 8,386 \cdot 10^{-5} = 0,05 \Omega$$

Ekvivalentní reaktance:

$$X_e = X_i + p_k^2 \left[X_s + X_m + \frac{R_m^2 + (X_m + X_s)^2}{X_0} \right] \quad (5.2.21)$$

$$X_e = 0,024 + 312 \left[X_s + X_m + \frac{R_m^2 + (X_m + X_s)^2}{X_0} \right]$$

$$X_e = X_i + p_k^2 \left[6,238 \cdot 10^{-4} + 1,14 \cdot 10^{-4} + \frac{(8,383 \cdot 10^{-5})^2 + (1,14 \cdot 10^{-4} + 6,238 \cdot 10^{-4})^2}{4,215 \cdot 10^{-4}} \right]$$

$$X_e = 0,688 \Omega$$

Ekvivalentní impedance:

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} \quad (5.2.22)$$

$$Z_e = \sqrt{(0,05)^2 + (0,688)^2} = 0,69 \Omega$$

Účinitk induktoru:

$$\cos \varphi_i = \frac{R_e}{Z_e} \quad (5.2.23)$$

$$\cos \varphi_i = \frac{0,05}{0,69} = 0,72$$

Účinnost induktoru:

$$\eta_i = \frac{p_k^2 \cdot R_m}{R_e} \quad (5.2.24)$$

$$\eta_i = \frac{312 \cdot 8,386 \cdot 10^{-5}}{0,05} = 0,5233$$

Proud induktoru:

$$I_i = \sqrt{\frac{P_m}{p_k^2 \cdot R_m}} \quad (5.2.25)$$

$$I_i = \sqrt{\frac{5688}{312 \cdot 8,386 \cdot 10^{-5}}} = 466 A$$

Napětí induktoru:

$$U_i = Z_e \cdot I_i \quad (5.2.26)$$

$$U_i = 0,69 \cdot 466 = 321,54 V$$

Příkon induktoru:

$$P_i = \frac{P_m}{\eta_i} \quad (5.2.27)$$

$$P_i = \frac{5688}{0,5233} = 10,94 kW$$

Zdánlivý výkon induktoru:

$$S_i = U_i \cdot I_i \quad (5.2.28)$$

$$S_i = 321,54 \cdot 466 = 150 \text{ kVA}$$

[11]

5.3 Studený kelímek pro tavení Al₂O₃

Postup návrhu geometrických a elektrických parametrů studeného kelímku pro tavení Al₂O₃ je totožný jako postup pro ZrO₂. Pro větší přehlednost jsou výsledky zaneseny do následující tabulky.

Tab. 5.3.1 Parametry studeného kelímku pro tavení Al₂O₃, ZrO₂ a Ti

Veličina	Al₂O₃	ZrO₂	Ti
T _{mel.} [°C]	2300	2750	1668
γ [S · m ⁻¹]	50	10000	2,6 · 10 ⁶
ρ [Ω.cm]	2	0,01	42 · 10 ⁻⁶
f [Hz]	12,8M	64k	269
a [cm]	1,988	1,988	1,988
P ₂ [kW]	16,388	11,707	5,688
cos φ [-]	0,043	0,045	0,72
η [%]	99,84	96,17	52,33
I _i [kA]	0,171	2,039	0,466
U _i [V]	2194	133	322
P _i [kW]	16,41	12,17	10,94
S _i [kVA]	375,96	271,2	150

Z vypočítaných hodnot vyplývá, že optimální kmitočet klesá s klesajícím měrným odporem. S rostoucím měrným odporem roste i velikost účinnosti.

6 Zhodnocení procesu tavení vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku

V této kapitole jsou v jednotlivých bodech popsány výhody a nevýhody indukčního tavení materiálů ve studeném kelímku z dostupné literatury [4, 7, 8, 9, 10, 11, 12,17].

6.1 Výhody:

- Základní výhodou tohoto způsobu tavení je možnost dosahovat procesních teplot nad 3000°C bez zásadních omezení. Tavit lze tedy materiály s vysokým bodem tání například oxidy, keramiky, skla.
- Je zaručena vysoká čistota procesu, protože vlivem intenzivního chlazení vsázka nepříjde do styku s materiálem kelímku. Na stěnách kelímku se vytváří tenká tuhá vrstva (skull) z vlastního taveného materiálu, která zabrání kontaminaci samotné taveniny.
- Tavení může probíhat v různých atmosférách, které kladně působí na průběh procesu. Nejčastějším případem je tavení ve vakuu nebo inertní atmosféře, kdy ve vsázce nedochází ke zvyšování objemu kyslíku. Zároveň odpadá i použití některých nebezpečných plynů.
- Vsázka se taví vlivem elektromagnetického pole, čímž je eliminováno použití elektrod. Na rozdíl od obloukového tavení ve vakuu, jenž vyžaduje použití elektrod, lze při tavení ve studeném kelímku využít odřezky, desky, třísky i další formy vsázky. Toto značně snižuje cenu vstupních surovin.
- Vlivem elektrodynamických sil dochází v taveném materiálu k pohybu částic. Díky tomu je vsázka intenzivně promíchávána v celém svém objemu. Nečistoty přirozeně vyplouvají k povrchu taveniny, kde se odpaří nebo se připojí k neroztavené části vsázky. Touto metodou je zajištěna možnost dosáhnout superčistých homogenních slitin.
- Tavení vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku je optimální metodou pro tavení elektricky nevodivých materiálů z hlediska elektrické účinnosti, která u nich dosahuje až 95 %.

- Při návrhu nového nebo při optimalizaci již existujícího zařízení je možné použít řadu softwarových nástrojů založených například na metodě konečných prvků (ANSYS, RILLFEM, MSC MARC, apod.). Simulovat lze prakticky všechny fáze procesu tavení, díky tomu lze docílit významných úspor.
- Vhodnou volbou frekvence a amplitudy budícího proudu lze výrazným způsobem zefektivnit proces tavení.
- Tato metoda se využívá i pro řízenou krystalizaci materiálů. Proces tavení a krystalizace je nepřetržitý, není tedy zapotřebí žádné obsluhy. Při srovnání s jinými technologiemi je tímto postupem možné vytvářet mnohem větší krystaly. Při směrové krystalizaci při teplotě 2800°C lze produkovat křišťálově čistý krystal, který představuje náhradu skutečného diamantu. Je znám pod obchodním názvem Zirkon a oproti přírodnímu je cena mnohokrát nižší. Zirkon je k dostání téměř v jakékoliv barvě a používá se především při výrobě šperků.
- Proces kromě toho umožňuje snadnější dávkování přísadových materiálů a legování. Například lze přidávat přísadový materiál přímo do taveniny, a to i při velkých objemech.
- Díky této metodě lze také zpracovávat radioaktivní odpady. Ukládají se do keramických nebo skelných matric, ve kterých můžou být tyto nebezpečné odpady skladovány v hlubinných úložištích až několik tisíc let.
- Pokud je proces indukčního tavení prováděn ve vakuu, dochází k samovolnému odplynění kovové vsázky a vypaření nečistot s nízkým tlakem par. Výsledkem jsou pak velmi kvalitní odlitky bez bublin.
- Intenzivní míchání vyvolané elektromagnetickým polem napomáhá tavení složek s vysokým bodem tání a také homogenizaci taveniny. Výsledkem je rychlejší doba tavení, lepší zatékavost při lití do formy a tím i vyšší kvalita výrobků.
- Díky tomu, že se nemusí používat keramický kelímek, se snižuje množství odstávek z důvodu výměny kelímku kvůli jeho čištění, čímž se výrazně zvyšuje produktivita pece.
- Při tavení slitin, jejichž složky mají vysoký tlak par, je možné tavení provádět v inertní atmosféře při tlaku, který zcela eliminuje nebo snižuje materiálové ztráty.
- Touto metodou je možné zkoumat vlastnosti tavených materiálů na bázi oxidu

uranu, zirkonu a železa, které by vznikly při haváriích v aktivních zónách atomových elektráren.

- Metoda tavení vsázky elektromagnetickou indukcí se osvědčila při hromadné výrobě titanových odlitků. Vodou chlazený kelímek snese často více než 10000 licích cyklů. Byla potvrzena i životnost kelímku více než 100000 cyklů.
- Při porovnání s jinými technologiemi bylo zjištěno, že nedochází k tak velkým emisím hluku do okolí.
- Je možné odlévat i velmi malé objemy taveniny, tenkostěnné (s tloušťkou stěny jen 0.5 mm) a tvarově složité odlitky.
- I při značně vysokých teplotách lze zkoumat chemické reakce v taveném materiálu.

6.2 Nevýhody:

- Kelímek není vhodné používat pro tavení materiálů s nízkým měrným odporem jako je měď nebo hliník, protože účinnost přenosu energie klesá s rostoucí konduktivitou materiálu.
- Při tavení elektricky nevodivých materiálů je nutné použít startovací metodu např. přímým ohřevem povrchu taveniny pomocí hořáků. Vytvořená krusta sice snižuje ztráty sáláním, ale technologie je poměrně časově náročná. Vzniká také nebezpečí zatuhnutí taveniny nebo předčasná krystalizace. Proces je potřeba velice pečlivě kontrolovat. Z ekologického hlediska může dojít k chemické reakci mezi vsázkou a plamenem.
- Z hlediska energetického dochází k teplotním změnám během tavení vsázky. Je zapotřebí kompenzovat tepelné ztráty v kelímku a segmentech, aby vsázka nezatuhla. Dle zahraničních měření není nutné brát ohled na ztráty v kelímku, důležité jsou především ztráty z povrchu taveniny sáláním. Dle velikosti kelímku se odvíjí tepelné ztráty, ale v porovnání s klasickým indukčním tavením nevodivých materiálů, dosahují menších hodnot, obecně do 40%.

- V porovnání tavení s keramickým kelímkem jsou pece se studeným kelímkem velmi energeticky náročné. Je zapotřebí zhruba 2x více elektrické energie pro roztavení stejného množství materiálu.
- Jsou zde vysoké pořizovací náklady na tavící pece, napájecí zdroje, zavedení technologie a údržbu během procesu.
- Z technologického hlediska je komplikovanější výroba segmentů ve tvaru zaoblených lichoběžníků než výroba studeného kelímku skládaného z trubek. Nejnáročnější je však výroba kelímku s integrovaným induktorem.
- Pro zvýšení účinnosti se nanášejí izolační vrstvy pomocí Al_2O_3 nebo ZrO_2 na každý segment zvlášť.
- Pokud se tato metoda používá pro tavení reaktivních materiálů, je nezbytně nutné zvážit např. zavedení ochranné atmosféry nebo vhodné formy na lití.
- Při nekontrolovaném přívodu výkonu do vsázky hrozí proražení krusty. Může dojít i k explozi a při poškození kelímku také k úniku roztaveného materiálu do okolního prostředí. K tomuto jevu může dojít při tavení elektricky nevodivých i elektricky vodivých materiálů. Příkladem je tavení TiAl, kde by zvýšené množství Al způsobilo při roztavování vysoký tlak s možností exploze.
- Je nezbytné velmi intenzivně chladit kelímek, což vede k velké spotřebě chladicího média.
- Vzhledem ke komplexnosti dějů uplatňujících se při této technologii, jsou numerické simulace náročné nejen z hlediska přípravy samotného modelu zařízení, ale i z hlediska vysokých nároků na výpočetní výkon. V extrémních případech se využívají počítačové clustery sloužící k paralelním výpočtům na více počítačích.

7 Energetické hodnocení

Indukční ohřev elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku je proces obvykle velmi energeticky náročný, proto je důležité celý systém navrhnout tak, aby při zadaných parametrech byla jeho efektivnost co nejvyšší. Cílem je navržení topného systému, který potřebuje co nejméně energie a umí ji co nejlépe využít. Proto se indukční pece se studeným kelímkem navrhuje tak aby měly co nejnižší ztráty. Ztráty je možné snížit například optimální konstrukcí kelímku, nebo použitím vhodných materiálů. Návrh těchto zařízení se neobejde bez matematického modelu a optimalizace celého procesu. Energetické požadavky na indukční pece jsou: elektrická účinnost, tepelná účinnost a energetická bilance.

7.1 Elektrická účinnost

Elektrická účinnost je určena poměrem výkonu k celkovému příkonu. Lze ji spočítat dle vztahu:

$$\eta_E = \frac{1}{1 + \frac{d_{ind}^2}{d_v^2} \left(1 + 6,25 \frac{a^2}{d_v^2}\right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}} \quad (7.1.1)$$

kde

d_{ind} je průměr induktoru [m]

d_v je průměr válcové vsázky [m]

a je hloubka vniku [m]

ρ_1 je měrný odpor materiálu induktoru [$\Omega \cdot m$]

ρ_2 je měrný odpor materiálu vsázky [$\Omega \cdot m$]

μ je poměrná permeabilita [H/m]. [20]

U nevodivých materiálů může být elektrická účinnost až 95 %. Důvodem je velký rozdíl mezi elektrickou vodivostí měděného induktoru a nevodivé vsázky. U kovů je elektrická účinnost podstatně menší a dosahuje přibližně 50 %. Proto se metoda indukčního tavení ve studeném kelímku nepoužívá pro tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď a její slitiny a hliník.

7.2 Tepelná účinnost

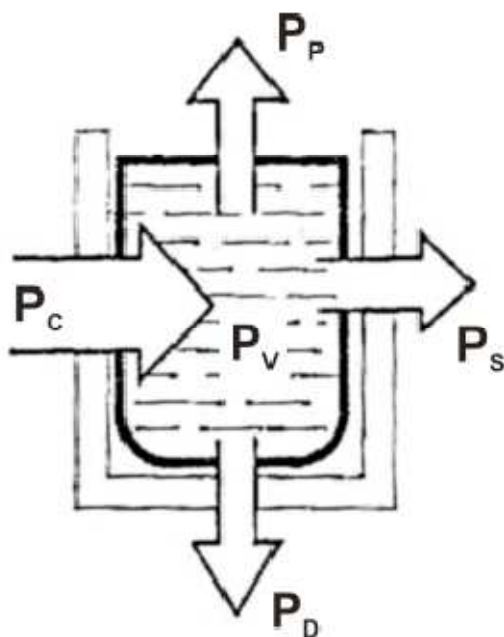
Tepelná účinnost indukčního tavení ve studeném kelímku je dána poměrem tepelného výkonu absorbovaného vsázkou a celkového tepelného výkonu dodávaného zdrojem.

$$\eta_T = \frac{P_V}{P_C} \quad (7.2.1)$$

Vzhledem k vysokým tepelným ztrátám především ve stěnách kelímku se tato účinnost pohybuje nejvýše okolo 30 %. [18]

Celková účinnost je pak dána součtem účinnosti elektrické a tepelné. Protože mají pece se studeným kelímkem vysoké tepelné ztráty je účinnost indukčních pecí s keramickým kelímkem přibližně dvakrát větší. Z tohoto důvodu se metoda indukčního tavení ve studeném kelímku používá především pro speciální aplikace, kde je zapotřebí vysoké čistoty materiálu. [21]

7.3 Energetická bilance



Obr. 7.3.1 Energetická bilance indukčního tavení ve studeném kelímku [21]

Na tomto obrázku (obr. 7.3.1) je:

P_C – celkový dodávaný výkon

P_p – ztrátový výkon povrchem vsázky

P_D – ztrátový výkon dnem kelímku

P_S – ztrátový výkon stěnami kelímku

P_V – výkon potřebný pro roztavení vsázky [21]

Teplotní podmínky pro indukční tavení ve studeném kelímku závisí na návrhu kelímku a na vlastnostech taveného materiálu. Teplo se však vždy šíří z míst o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou. Ve studeném kelímku má nejvyšší teplotu vsázka, která dosahuje teploty až 3000 °C. Dochází proto k přestupu tepla ze vsázky do okolí. To, jak je výkon generovaný zdrojem vysokofrekvenčního proudu ve studeném kelímku spotřebováván znázorňuje energetická bilance:

$$P_C = P_z + P_V \quad (7.3.1)$$

kde

P_C je celkový dodávaný výkon [W]

P_z je celkový ztrátový výkon [W]

P_V je výkon potřebný pro roztavení vsázky [W]. [21]

Ztrátový výkon P_z je dán součtem ztrát vzniklých vedením a sáláním. Tyto ztráty v indukčních kelímkových pecích jsou podrobně popsány ve třetí kapitole.

Závěr

V současnosti probíhá intenzivní výzkum technologie tavení vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Tento výzkum, kterým se zabývá řada renomovaných pracovišť po celém světě, je často založený na experimentálním přístupu.

Tavení vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku je nevhodnější metoda tavení vysoce reaktivních a žárovevných materiálů s minimálním obsahem nečistot. Tato technologie se používá především pro tavení elektricky nevodivých materiálů, jako jsou oxidy, keramiky a skla, kdy se elektrická účinnost pohybuje okolo 95%. Díky této metodě vznikají superčisté materiály, toho se využívá například při výrobě polykrystalického křemíku pro fotovoltaické články. Vznikají tak ingoty mono či polykrystalického křemíku. V současnosti se u fotovoltaických panelů využívá spíše polykrystalických ingotů, i když mají nižší účinnost (přibližně 14 % proti účinnosti 18 % při použití monokrystalu), ale jsou levnější. Monokrystalický křemík je využíván pro solární panely pracující na vesmírných stanicích, případně na malé zdroje u drobných elektronických zařízení (kalkulačky, hodinky apod.), kde jsou zužitkovány zbytky z monokrystalických ingotů.

Studený kelímek se také používá při výrobě titanových slitin pro lékařské, letecké a další účely. Proces tavení touto metodou vyloučí možnou kontaminaci vsázky materiálem kelímku a navíc je možné proces provádět v ochranné atmosféře. Díky této metodě tavení a odstředivému lití tak mohou vznikat výrobky o hmotnostech od několika gramů do jednotek kilogramu s tloušťkou stěny 0.5 mm.

Výhod tavení ve studeném kelímku využívají také různé firmy vyrábějící šperky. Tavením ZrO_2 vznikají krystaly svým vzhledem jen velice málo odlišné od přírodního diamantu. Díky malému množství příměsí, například vzácných zemin, mohou vznikat různě barevné kameny s optickými vlastnostmi lepšími, než mají diamanty. Bohužel ale mají nižší tvrdost, a proto snadněji podléhající opotřebení při leštění a údržbě.

Mezi další uplatnění studeného kelímku patří také vitrifikace jaderného odpadu. Tímto problémem se v současné době zabývá několik zemí, mezi nimiž je i Česká republika. Vyhořelé palivo bohužel ještě obsahuje přibližně 98 % původního štěpného materiálu. Po recyklaci je však možné palivo znovu použít v jaderných reaktorech. Vznikne ale malé procento (asi 4%) vysoce radioaktivního odpadu, který je vitrifikací převeden do formy skla a takto je následně uložen v hlubinných úložištích jaderného odpadu.

Při tavení elektricky nevodivých materiálu je nutné zvýšit jejich teplotu tak, aby klesl jejich měrný odpor. To se provádí pomocí externích zdrojů tepla, jako jsou plynové hořáky nebo pomocí elektrického oblouku. Tyto metody však znečišťují vsázku, což je velmi nevhodné pro výrobu superčistých tavenin. Proto se v praxi nejčastěji využívá nastartování tavby přidáním startovacího materiálu. Ten se volí podle potřeby tak, aby neznečistil výsledný produkt. Těmito materiály bývají obvykle kovy tavených oxidů. Například při tavení oxidu zirkoničitého je používán metalický zirkon, nebo při tavení Al_2O_3 se používá hliník. Existují ovšem případy, kdy použití kovů z tavených oxidů není možné. Tehdy se musí využít jiná metoda startu tavení, nebo použít jiný přídatný materiál. Tím je například grafitový kroužek, který se po určité době musí z taveniny odstranit. Výhodou startu tavby pomocí jiného materiálu je možnost použití jednoho indukčního systému jak na startovací fázi, tak na samotný proces tavení. U startu tavby elektrickým obloukem musíme počítat s dalším zařízením. Další možností by bylo použití druhého induktoru, který by se umístil shora nad startovací materiál. Díky potřebě menší frekvence a výkonu by se ušetřilo na finančních prostředcích za elektrickou energii. Byl by tu ale problém s odstraněním induktoru po započatí tavení při použití ochranné atmosféry.

Mezi nejdůležitější výhody studeného kelímku patří zejména možnost tavení materiálů s teplotou tání až do 3000 °C. Dále pak možnost využití této technologie pro mnoho různých aplikací. Tato metoda je vhodná pro zpracování široké škály materiálů. Je zde zaručena vysoká čistota procesu, protože vlivem intenzivního chlazení vsázka nepřijde do styku s materiálem kelímku. Na stěnách kelímku se vytváří tenká tuhá vrstva (skull) z vlastního taveného materiálu, která zabrání kontaminaci samotné taveniny.

Nevýhodou tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku jsou vysoké pořizovací náklady na tavicí pece, napájecí zdroje, zavedení technologie a údržbu během procesu. Energetické náklady jsou sice několikanásobně větší, než jsou u běžných technologií, ale čistota výchozího materiálu je mnohonásobně vyšší. Proto se studený kelímek používá především při zpracování velmi čistých a drahých materiálů, kde náklady na energii tvoří jen malou část ceny vstupních surovin.

Průmyslové využití především oxidů každým rokem narůstá, proto je možné předpokládat další vývoj indukčního tavení vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Cílem je uplatnit tuto technologii i na další materiály a současně zvýšit celkovou účinnost procesu.

Použitá literatura

- [1] HRADÍLEK, Z.: Přednášky z předmětu - *Elektrotepelná technika*
- [2] RADA, J. a kol.: *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL, 1985
- [3] LIST, V. a kol.: *Elektrotechnika V. Elektrické teplo*. Praha: SNTL, 1958
- [4] Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem [cit. 2013-3-5]. Dostupný z WWW:
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25605
- [5] Laboratoř studených kelímků [cit. 2013-3-5]. Dostupný z WWW:
<http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/program-jpc/laborator-studenych-kelimku/>
- [6] ABRAHAM, M.: Diplomová práce - *Měrná spotřeba elektrické energie indukční kelímkové pece*, ZČU-FEL, 2011
- [7] Cold Crucible Induction Melting Background and State of the Art [cit. 2013-3-12]. Dostupný z WWW:
<http://www.fissoreagency.com/pages/wp-content/uploads/2009/09/CCIM.pdf>
- [8] Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits [cit. 2013-3-12]. Dostupný z WWW:
http://www.industrialheating.com/Articles/Feature_Article/a8f55bf8fbbb7010VgnVCM100000f932a8c0
- [9] Skull Melting Process [cit. 2013-3-12]. Dostupný z WWW:
<http://www.theimage.com/newgems/synthetic/syntheticanimate3.html>
- [10] ZAJACOVÁ, N.: Diplomová práce – *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*, ZČU-FEL, 2012
- [11] BEHRENS, T.: Doktorská práce - *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters*, G.W.Leibniz Universität Hannover, 2007
- [12] ROT, D. a KOŽENÝ, J.: *Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Electroscopie, 2010 [cit. 2013-3-29]. Dostupný z WWW:
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/592/1/r4c4c1.pdf>
- [13] DOLEJŠ, R.: Diplomová práce – *Proces spuštění tavby ve studeném kelímku*, ZČU-FEL, 2011
- [14] LANGER, E. a KOŽENÝ, J.: *Elektrotepelná zařízení indukční*. VŠSE v Plzni, 1982
- [15] VARGA, J.: *Symetrizační zařízení*. [cit. 2013-4-7]. Dostupný z WWW:
<http://home.zcu.cz/~jvarga/ZETP/symetr.pdf>

- [16] Periodická tabulka – Titan [cit. 2013-4-9]. Dostupný z WWW:
<http://www.prvky.com/22.html>
- [17] GINTEROVÁ, M.: *Podivuhodný kelímek* [cit. 2013-4-9]. Dostupný z WWW:
<http://3pol.cz/232-podivuhodny-kelimek>
- [18] Elektrotepelná technika [cit. 2012-12-8]. Dostupný z WWW:
http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/ing/Elektrotepelna_tehnika_S.pdf
- [19] Indukční ohřev + Relativně tlustá stěna [cit. 2013-4-10]. Dostupný z WWW:
http://puma.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev
- [20] ČERNÝ, V.: *Indukční ohřev (2)* [cit. 2013-4-10]. Dostupný z WWW:
<http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110255.pdf>
- [21] PREJZA, R.: Diplomová práce – *Teorie a aplikace tavení materiálů metodou studeného kelímku*, ZČU-FEL, 2011
- [22] KRAMER, C.; MÜHLBAUER, A.; STARCK, A.: *Handbook of thermoprocessing technologies*. Vulkan-Verlag GmbH, 2005