

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Analýza systémů tavení materiálů elektromagnetickou  
indukcí

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr JURÁŠ**  
Osobní číslo: **E12B0041K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Analýza systémů tavení materiálů elektromagnetickou indukcí**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte stručně teorii ohřevu materiálů elektromagnetickou indukcí.
2. Popište možnosti tavení elektricky vodivých materiálů elektromagnetickou indukcí.
3. Popište možnosti tavení elektricky nevodivých materiálů elektromagnetickou indukcí.
4. Uveďte blíže možnosti tavení materiálů obou druhů ve studeném kelímku.
5. Provedte analýzu uvažovaných systémů z pohledu energetické náročnosti a stanovte závěry pro praktické aplikace.

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na analýzu systémů tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů elektromagnetickou indukcí. Blíže uvádí možnosti tavení materiálů obou druhů ve studeném kelímku. Na závěr provádí analýzu uvažovaných systémů z pohledu energetické náročnosti.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetická indukce, hloubka vniku, indukční pec, studený kelímek, startovací fáze, energetická náročnost.

## **Abstract**

The submitted Bachelor thesis focused on analysis of the systems for melting electrically conductive and non-conductive materials by electromagnetic induction. It describes the possibilities of the potential melting of both types of materials in the cold crucible. In conclusion the thesis analyses the considered systems in terms of energy performance.

## **Key words**

Electromagnetic induction, penetration depth, induction furnace, cold crucible, start phase, energy consumption.

## **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 Blovicích, dne 16. 3. 2015

Petr Juráš

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení mé bakalářské práce.

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

# OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ .....	8
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 TEORIE OHŘEVU MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ .....</b>	<b>10</b>
1.1 PRINCIP ELEKTROMAGNETICKÉ INDUKCE .....	10
1.2 HLOUBKA VNIKU ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ DO OHŘÍVANÉHO TĚLESA .....	11
1.3 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR.....	13
<b>2 MOŽNOSTI TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ .....</b>	<b>15</b>
2.1 INDUKČNÍ ZAŘÍZENÍ PRO TAVENÍ.....	15
2.1.1 Indukční kelímkové pece.....	15
2.1.2 Indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem .....	18
2.1.3 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem .....	19
2.1.4 Indukční prohřívací zařízení .....	21
2.1.5 Indukční zařízení pro povrchový ohřev .....	21
2.1.6 Indukční kanálkové pece.....	22
<b>3 MOŽNOSTI TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ.....</b>	<b>24</b>
3.1 INDUKČNÍ PEC SE STUDENÝM KELÍMKEM .....	25
<b>4 MOŽNOSTI TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH A NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU .....</b>	<b>27</b>
4.1 TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU .....	27
4.1.1 Tavení $ZrO_2$ .....	27
4.1.2 Výroba syntetických diamantů .....	28
4.1.3 Vitřifikace .....	29
4.2 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU .....	29
4.2.1 Tavení titanových slitin.....	29
<b>5 ENERGETICKÁ NÁROČNOST A ZÁVĚRY PRO PRAKTICKÉ POUŽITÍ.....</b>	<b>33</b>
5.1 ENERGETICKÁ NÁROČNOST .....	33
5.2 PRAKTICKÉ POUŽITÍ .....	35
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>37</b>
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	38

## Seznam symbolů

Značka	Celý název	Jednotky
$a$	Hloubka vniku	[m]
$C$	Teplota	[°]
$\bar{E}$	Fázor elektrického pole	[V·m <sup>-1</sup> ]
$\mathbf{E}$	Vektor intenzity elektrického pole	[V·m <sup>-1</sup> ]
$f$	Frekvence	[Hz]
$\bar{H}$	Fázor magnetického pole	[A·m <sup>-1</sup> ]
$\mathbf{H}$	Vektor intenzity magnetického pole	[A·m <sup>-1</sup> ]
$Q$	Množství tepla	[J]
$r$	Poloměr	[m]
$\bar{S}$	Fázor Poyntingova zářivého vektoru	[W·m <sup>-2</sup> ]
$\mathbf{S}$	Vektor Poyntingova zářivého vektoru	[W·m <sup>-2</sup> ]
$\gamma$	Měrná elektrická vodivost	[S·m <sup>-1</sup> ]
$\mu$	Permeabilita	[H·m <sup>-1</sup> ]
$\mu_0$	Permeabilita vakua	[4 $\pi$ · 10 <sup>-7</sup> H·m <sup>-1</sup> ]
$\mu_c$	Celková elektrická účinnost	[-]
$\mu_i$	Elektrická účinnost induktoru	[-]
$\mu_r$	Relativní permeabilita	[-]
$\rho$	Rezistivita	[ $\Omega$ ·m]

Charakter veličin je vyznačen typem písma takto:

Vektory jsou psány tučně ( $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ )

Fázory jsou označeny pruhem nad veličinou ( $\bar{S}$ )



# ÚVOD

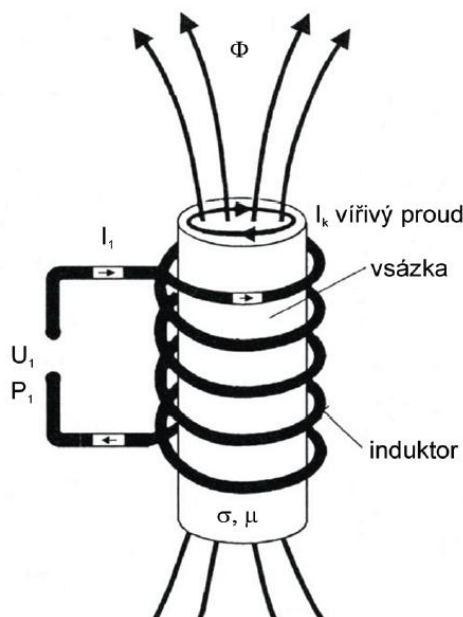
Tato bakalářská práce se zabývá rozbořem systémů tavení materiálů elektromagnetickou indukcí. Historie vzniku tohoto typu tavení sahá až do druhé poloviny 19. století, ale praktické a široké uplatnění se našlo až na počátku století dvacátého. Základem teorie jsou Maxwellovy rovnice. V dnešní době mají výsledné produkty tavení široké uplatnění, například ve sklářském průmyslu, automobilovém průmyslu, jaderné energetice či při tavení kovových materiálů. Dnes se hledí i na ekonomické výhody. Přínosem je nízká finanční náročnost této metody. Z ekologického pohledu není tato metoda tavení materiálů příliš zatěžující pro životní prostředí, jako tomu bylo při využívání tavicích pecí na fosilní paliva, což je velkou výhodou.

V první části práce se věnuji samotné teorii ohřevu materiálů a uvádím základní a obecné poznatky o indukčním ohřevu. Následují kapitoly věnované možnostem tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů. Samostatnou část práce tvoří i kapitola o tavení materiálů obou druhů ve studeném kelímku, kde popisují jeho základní konstrukci a proces tavení. V závěru bakalářské práce předkládám analýzu uvažovaných systémů z pohledu energetické náročnosti a závěry pro praktické aplikace.

# 1 TEORIE OHŘEVU MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKCÍ

## 1.1 Princip elektromagnetické indukce

Ohřev elektromagnetickou indukcí se dá použít pouze u materiálů elektricky vodivých. Každé indukční zařízení se sestává vždy z cívky, kterou prochází střídavý proud, ze zdroje a z vodivého předmětu (vsázky), která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou. Do vsázky se naindukují vířivé proudy, které v ní cirkulují, díky její vodivosti. Vířivými proudy se vsázka zahřívá a tím vzniká teplo přímo ve vsázce.<sup>1</sup>



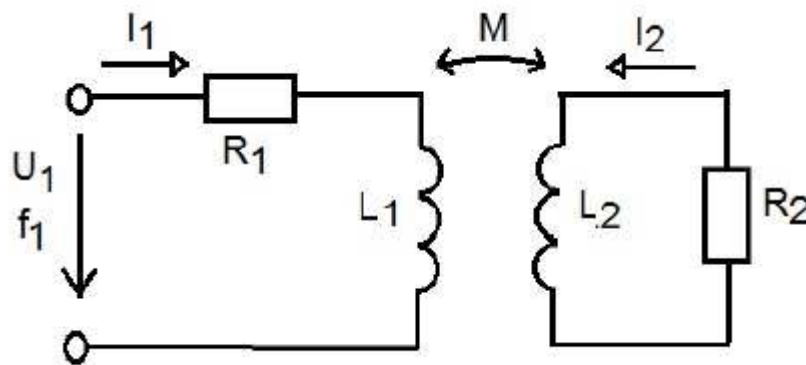
Obr. 1.1: Princip indukčního zařízení<sup>2</sup>

Indukční ohřev je v podstatě vzduchový transformátor, kde cívka je stranou primární a vsázka stranou sekundární, spojenou nakrátko.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.

<sup>2</sup> LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: NČSAV, 1964.

<sup>3</sup> LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.

Obr. 1.2: Náhradní schéma indukčního ohřevu<sup>4</sup>

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

## 1.2 Hloubka vniku elektromagnetického vlnění do ohřivaného tělesa

Hloubka vniku elektromagnetického vlnění do ohřivaného tělesa  $a$  je taková vzdálenost od povrchu materiálu, kam prostoupí a utlumí se elektromagnetické vlnění na hodnotu 36,8% své hodnoty na povrchu. Vhodnou volbou frekvence napájecího proudu můžeme měnit hloubku vniku elektromagnetického vlnění do ohřivaného tělesa. Při vyšších frekvencích lze tedy dosáhnout toho, že se ohřeje pouze tenká povrchová vrstva. Při nízkých frekvencích se naopak rovnoměrně prohřeje celá vsázka.<sup>5</sup>

Hloubku vniku  $a$  lze vypočítat ze vztahu:

<sup>4</sup> LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.

<sup>5</sup> Tamtéž.

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

kde:

$f$  je kmitočet [Hz]

$\mu$  je permeabilita [ $H \cdot m^{-1}$ ]

$\gamma$  je elektrická vodivost [ $S \cdot m^{-1}$ ]

Permeabilita se vypočítá:

$$\mu = \mu_0 + \mu_r \quad [H \cdot m^{-1}]$$

kde:

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

$\mu_r$  je relativní permeabilita [-]

Materiály používané pro indukční ohřev mají své materiálové vlastnosti. Těmi jsou elektrická vodivost  $\gamma$  a relativní permeabilita  $\mu_r$ , kterými nelze v průběhu indukčního ohřevu regulovat.<sup>6</sup>

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: Závislost hloubky vniku na kmitočtu<sup>7</sup>

Elektrická účinnost indukčního ohřevu závisí na poměru  $r / a$ . Tedy na poměru velikosti poloměru válcové vsázky ku hloubce vniku.

<sup>6</sup> LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.

<sup>7</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

Vztah mezi poloměrem  $r$  a hloubkou vniku elektromagnetického vlnění  $a$ :

$$r = (2,5 \text{ až } 3,0) \cdot a \text{ [m]}$$

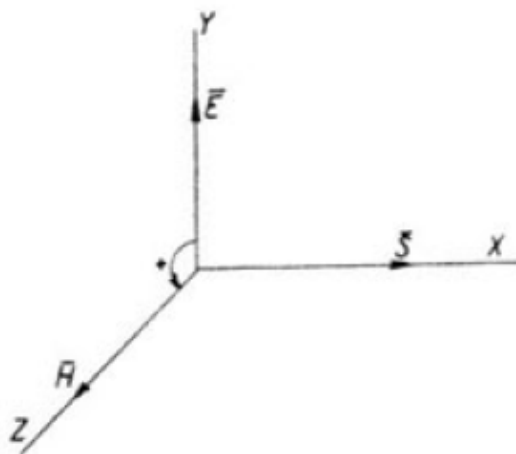
Zvolený kmitočet, který odpovídá tomuto vztahu, lze označit za optimální. Výslednou účinnost indukčního ohřevu ovlivňuje také materiál ohřívaného předmětu a jeho teplota.<sup>8</sup>

### 1.3 Poyntingův zářivý vektor

Pro zjednodušení výpočtů elektromagnetického pole u indukčního ohřevu se zavedl Poyntingův zářivý vektor  $\mathbf{S}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Jednotka Poyntingova vektoru znázorňuje míru přenosu energie na jednotku plochy. Poyntingův zářivý vektor je vektorový součin vektorů intenzity elektrického  $\mathbf{E}$  ( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ) a magnetického pole  $\mathbf{H}$  ( $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ ).<sup>9</sup>

Základní rovnice pro Poyntingův vektor ve vektorovém tvaru je:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$



Obr. 1.3: Vzájemná orientace vektorů<sup>10</sup>

<sup>8</sup> LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.

<sup>9</sup> LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: NČSAV, 1964.

<sup>10</sup> Tamtéž.

Poyntingův vektor  $\mathbf{S}$  je kolmý na rovinu, kde leží vektor intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  a elektrického pole  $\mathbf{E}$ , které jsou také navzájem kolmé. Poyntingův zářivý vektor udává směr a hustotu toku elektromagnetické energie v prostoru za jednotku času.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: NČSAV, 1964.

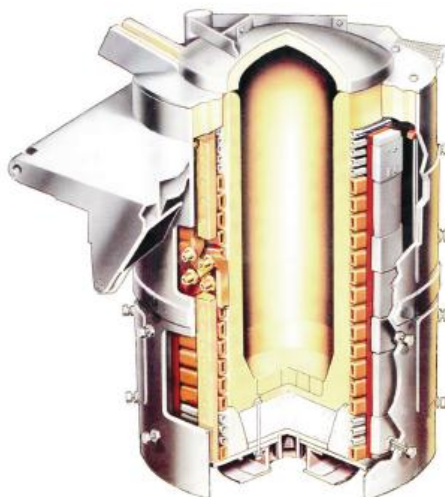
## 2 MOŽNOSTI TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ

### 2.1 Indukční zařízení pro tavení

Pro tavení elektricky vodivých materiálů se používají indukční pece kelímkové nebo kanálkové.

#### 2.1.1 Indukční kelímkové pece

Indukční tavící pece se používají ve slévárnách k tavení nejrůznějších kovů a vyrábějí se v nich vysoce kvalitní oceli. Napájejí se proudem buď středofrekvenčním (velké pece 500 Hz, menší až 4 kHz) nebo nízkofrekvenčním zařízením s frekvencí 50 Hz respektive 150 Hz. Jsou dimenzovány od obsahu 10 kg až 100 t oceli.<sup>12</sup>

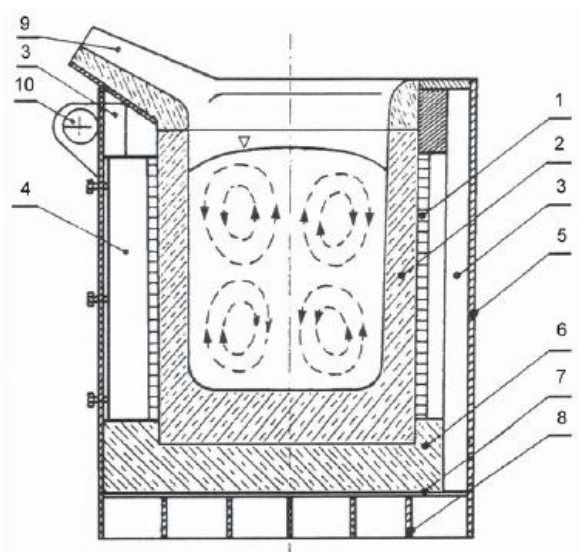


Obr. 2.1: Indukční tavící pec<sup>13</sup>

<sup>12</sup> RADA, Josef. KOLEKTIV. *Elektrotepelná technika 1*. 1. Praha: SNTL, 1985.

<sup>13</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

Kelímková pec je zobrazena na Obr. 2.2. Číslo (1) je kruhová ohřívací cívka. Cívka je navinuta jako jednovrstvá, nejčastěji dutým měděným vodičem čtyřhranného průřezu. Dutinou vodiče protéká chladicí voda. Číslo (2) je keramický zadusný kelímkový pec, nejčastěji z křemičitého písku ( $\text{SiO}_2$ ). Číslo (3) jsou svazky transformátorových plechů. Ty jsou svisle uspořádány po celém vnitřím obvodu pláště pece (5). Tyto svazky svádějí magnetický tok vně cívky, aby nezabíhal do pláště pece (5) a do dalších konstrukčních částí pece. Číslo (4) jsou střední žárobetonové trámce pro cívku (1), (5) je ocelový plášť pece, (6) je cihlová keramická vyzdívka na dně pece, (7) je stínící měděný plech zabraňující vniknutí magnetického toku cívky do mřížového dna pece, (8) je mřížové dno pece, (9) je hubice pece pro odlévání a (10) je osa, kolem které se pec otáčí při vyklápění, odpichu. Pec je vyklápěna většinou hydraulickými válci. Proud do cívky (několik tisíců ampér) je přiváděn měděnými lany a pásovými vodiči. Chladicí voda do cívky je přiváděna izolačními hadicemi.<sup>14</sup>



Obr. 2.2: Schéma indukční kelímkové pece<sup>15</sup>

Výhodou těchto pecí je silné víření taveniny vlivem elektrodynamických sil, které je čárkovaně naznačeno na Obr. 2.2. Vlivem tlaku magnetických sil na vsázku vzniká u stěny

<sup>14</sup> RADA, Josef. KOLEKTIV. *Elektrotepelná technika 1*. 1. Praha: SNTL, 1985.

<sup>15</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.



kelímku v tavenině podtlak a v ose taveniny přetlak. Tavenina tedy vtéká ke stěně vlivem hydrostatických sil a vzdouvá se v ose kelímku.

Víření limituje příkon především u pecí pro 50 Hz a u lehkých kovů (Al). Přiměřené víření je metalurgicky velmi vítané, neboť zajišťuje naprostou homogenitu kovu, pokud jde o složení i teplotu.<sup>16</sup>

Aby nedocházelo k zahřívání nosných konstrukcí u indukčních kelímkových pecí, opatřují se pece vždy stíněním.

Rozlišujeme dva základní druhy stínění:

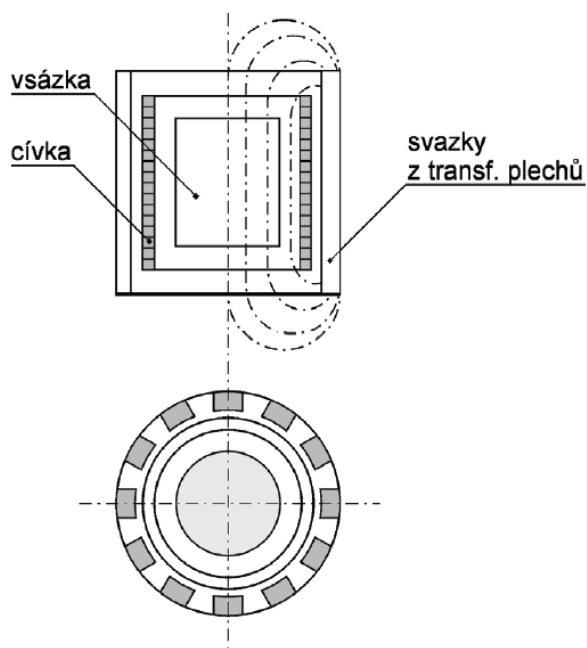
- a) Stínění elektricky vodivým pláštěm (aktivní)
- b) Stínění svazky trafoplechů

Stínění provedené pomocí stínícího pláště (z mědi, hliníku, duralu) pracuje na principu elektromagnetické indukce, kdy vzniklé naindukované pole v plášti působí proti původnímu poli, a tudíž vně použitého stínění je výsledné pole (jedná se tedy o součet pole rozptylového od induktoru a pole od stínění) téměř bez účinků na konstrukci. Stínění pláštěm je zobrazeno na Obr. 2.4. Další typ stínění, který je technicky dokonalejší, představuje stínění svazky dobře magneticky vodivých transformátorových plechů. Tento druh stínění pracuje na principu vysoké magnetické vodivosti těchto trafoplechů, kterými se rozptylové elektromagnetické pole uzavírá a jeho působení na konstrukci je takřka zanedbatelné.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> RADA, Josef. KOLEKTIV. *Elektrotepelná technika 1. 1*. Praha: SNTL, 1985.

<sup>17</sup> KROUPA, Oldřich. *Autoreferát*. Plzeň, 2013. Disertační práce. ZČU v Plzni.



Obr. 2.3: Schéma indukční kelímkové pece se železným jádrem vně cívky<sup>18</sup>

Účinnost pece se železným jádrem je téměř o 5% vyšší, než u pece se stínícím pláštěm. To přináší v provozu značné úspory elektrické energie, zejména u velkých pecí s nepřetržitým chodem. Výrobně je však tato pec dražší a dojde-li při provozu k protavení kelímku, je poškození této pece zpravidla horší, případně dojde k úplnému zničení pece.<sup>19</sup>

### 2.1.2 Indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem

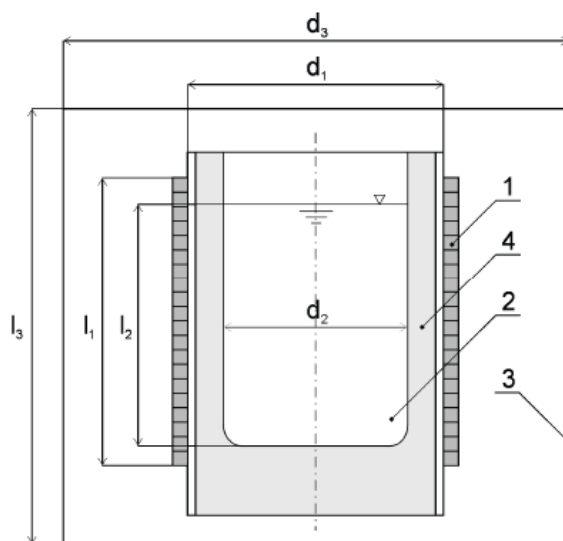
Indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem je zobrazena na Obr. 2.4. Elektricky nevodivý kelímek válcového tvaru (4), který se zpravidla pěchuje z keramické hmoty, obsahuje vsázku (2) a je ovinut cívkou (1). Vsázkou prochází magnetický tok buzený induktorem (cívkou), který se uzavírá vně cívky, a proto je pec opatřena vodivým stínícím pláštěm (3).

Elektricky nevodivý kelímek se zpravidla plní šrotem. Jsou to kusy ze stejného druhu oceli, ale různých tvarů a velikostí. Pec musí být schopna šrot s dobrou účinností roztavit.

<sup>18</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

<sup>19</sup> LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.

Pec má buď stínicí plášť z mědi nebo ocelový plášť, který na vnitřní straně nese svazky transformátorových plechů.<sup>20</sup>



Obr. 2.4: Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm<sup>21</sup>

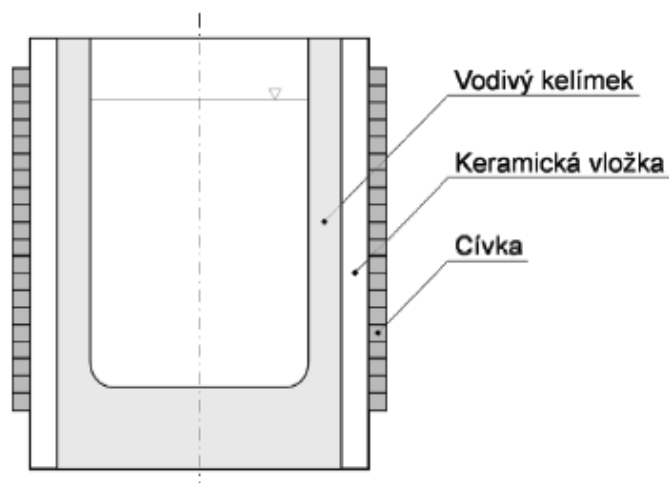
### 2.1.3 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Při tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď nebo hliník a jejich slitiny a další, má indukční pec s nevodivým kelímkem nízkou elektrickou účinnost. Pokud opatříme pec vodivým kelímkem, podle Obr. 2.5, elektrická účinnost se podstatně zlepší.<sup>22</sup>

<sup>20</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

<sup>21</sup> Tamtéž.

<sup>22</sup> LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.



Obr. 2.5: Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem<sup>23</sup>

Při tavení hliníku a jeho slitin se jedná o nižší teploty, a proto se kelímek vyrábí z ocelolitiny. Pokud je zapotřebí vyšších teplot, používají se tzv. grafitové kelímky. Ty se zhotovují se směsí šamotu a grafitu. Kelímek je vodivější, čím více obsahuje grafitu. Velká vodivost však není žádoucí. Keramická vložka umístěná mezi kelímkem a cívkou se chová jako izolační vrstva pro snížení ztrát tepelného toku ze žhavého kelímku do vodou chlazené cívky.

Po přivedení proudu do cívky začne elektromagnetické vlnění vyzářené vnitřním povrchem cívky dopadat na vnější povrch vodivého kelímku. Elektromagnetické vlnění začne vstupovat do stěny kelímku, kde vyvolá naindukovaný proud, který zahřívá kelímek. Ten potom předává teplo vsázce, která je vložena v jeho dutině. Rozhodující je vzájemný poměr mezi tloušťkou stěny a hloubkou vniku. Problém vznikne, je-li hloubka vniku elektromagnetického vlnění malá oproti tloušťce stěny. V tomto případě se všechna elektromagnetická energie ve stěně kelímku pohltí.<sup>24</sup>

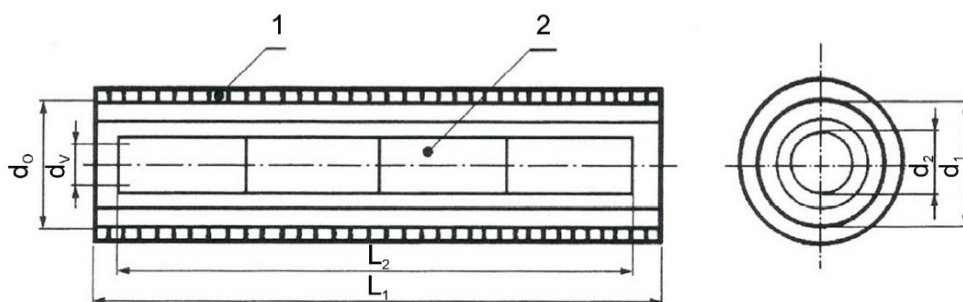
<sup>23</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

<sup>24</sup> Tamtéž.

### 2.1.4 Indukční prohřívací zařízení

Princip elektromagnetické indukce se dá použít i pro jiné účely než je tavení. Další možností, jak využít tohoto principu je rovnoměrné prohřátí materiálů, které je potřeba v podnicích, kde se vyrábějí součásti kování nebo kalením za tepla. Nejčastěji jsou to ocelové kovové vývalky čtyřhranného nebo válcového tvaru. Dříve se používaly pece palivové, vytápěné uhlím, naftou nebo plynem. V těchto pecích trvalo prohřátí příliš dlouhou dobu a na povrchu materiálu docházelo k oxidaci. Vzniklé okuje způsobovaly úbytek materiálu. Tyto problémy se odstranily zavedením indukčních pecí do nově vzniklých továren. V indukční peci trvá prohřátí kovového vývalku velmi krátkou dobu a na povrchu materiálu nenastává žádná oxidace.

Hlavní částí indukční ohříváčky je cívka (1) o délce obvykle 1 m. Průměr cívky se volí podle průměru vývalků (2), kterých může být v induktoru větší počet (4 až 7).<sup>25</sup>



Obr. 2.6: Schéma indukčního prohřívání<sup>26</sup>

### 2.1.5 Indukční zařízení pro povrchový ohřev

Další možností využití elektromagnetické indukce je prohřívání předmětů řádově do hloubky 10 mm s využitím vysoké frekvence. V průmyslu lze potkat povrchový ohřev u těchto technologií:

kalení, pájení, svařování trubek, rafinační přetavování

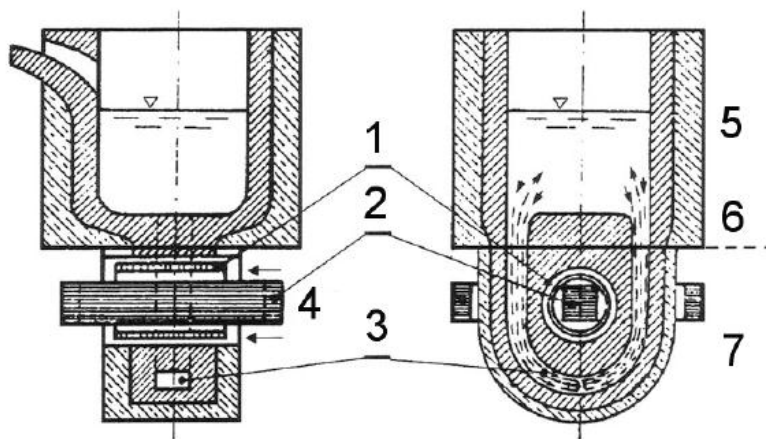
<sup>25</sup> LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. Plzeň: VŠSE, 1982.

<sup>26</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

## 2.1.6 Indukční kanálkové pece

Velké indukční kanálkové pece se používají především na tavení hliníku a barevných kovů, zejména mědi. Velkou výhodou je jejich účinnost (kolem 85%) a malé ztráty propalem (pod 1%). Pro chlazení pece není potřeba vody. Plně dostačuje proudící vzduch z ventilátoru. Tyto pece se nehodí pro přerušovaný provoz a časté střídání složení kovu.<sup>27</sup>

Indukční kanálková pec je v podstatě transformátor s uzavřeným železným jádrem. Primární cívka je připojena ke zdroji střídavého proudu. Sekundární stranou je roztavený kov v keramickém kanálku. Je to vlastně závit spojený nakrátko.<sup>28</sup>



Obr. 2.7: Schéma kanálkové indukční pece<sup>29</sup>

Na Obr. 2.7 s číslem (1) je ohřívací cívka chlazená vzduchem (vyznačeno šipkami), (2) je jádro z transformátorových plechů plášťového typu, na jehož středním sloupku je ohřívací cívka, (3) představuje kanálek, který obepíná ohřívací cívku jako závit nakrátko, dále představují (4) chladící vzduch, (5) vanu pece, (6) dělící spáru, (7) induktor

<sup>27</sup> *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2002, sv. ISBN 1210-0889. ISSN 1210-0889. [cit. 6. 5. 2015].

<sup>28</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

<sup>29</sup> Tamtéž.

V pecích s odkrytým kanálkem docházelo ve vsázce k nežádoucímu jevu tzv. uskřípovacímu. Aby se tomuto jevu zabránilo, vznikla pec se zakrytým kanálkem zapuštěným do dna pece. Při odlévání se třetina vsázky ponechá v peci, aby se po zapnutí transformátoru v uzavřeném závitu mohlo vyvíjet teplo.<sup>30</sup>

---

<sup>30</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

### 3 MOŽNOSTI TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKCÍ

Elektricky nevodivé materiály jsou takové materiály, které za studena nevedou elektrický proud. Je zde důležitá závislost elektrické vodivosti na teplotě, a proto se musí ohřívat na takovou teplotu, která způsobí elektrickou vodivost materiálu. Teploty jsou různé. Běžné sklo se stává elektricky vodivým při teplotě 500 °C. Jiné teploty má keramika nebo oxidy. K tavení elektricky nevodivých materiálů se používá startovací fáze, kde je zapotřebí pomocného zdroje tepla, nebo se vloží do tavené vsázky elektricky vodivého tělesa. Tímto se zvýší elektrická vodivost materiálu.<sup>31</sup>

Jako pomocného zdroje tepla se používá teplo plynového hořáku, který zahřívá povrch vsázky a tím dochází k procesu tavení. Hořák však produkuje spaliny a může ovlivnit kvalitu nebo čistotu výsledného produktu.

Dalším způsobem, jak provádět startovací fázi je umístění elektricky vodivého kroužku na povrch nebo do vsázky. Vodivý kroužek se vyrábí nejčastěji z grafitu, karbidu křemíku nebo iridia. Jde o nejrozšířenější způsob startovací fáze. Vířivé proudy se uzavírají ve vodivém kroužku a tím jej zahřívají. Hned, jak dojde k dosažení cílové teploty je startovací materiál vyjmut a tavení už probíhá bez kroužku. Teplota tavení startovacího materiálu musí být vždy vyšší než teplota tavení vsázky. Je ovšem zapotřebí dát pozor na kontaminaci od startovacího kroužku.

Pro tavbu oxidů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) se využívá dalšího rozšířeného způsobu, vkládání kovu ve formě prášku, třísek nebo malých kousků. Vložený kov je zahříván vířivými proudy a následně dochází k jeho oxidaci a jeho mísení s taveninou.<sup>32</sup>

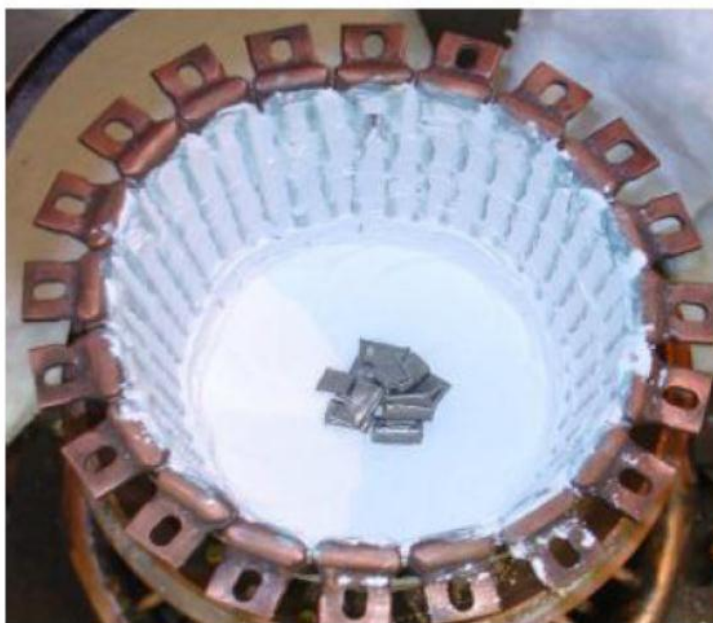
---

<sup>31</sup> HEINDL, Michal. *Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

<sup>32</sup> JIŘINEC, S. Tavení elektricky nevodivých materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 3., Elektroenergetika*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013. s. 5-8. ISBN: 978-80-261-0234-2.



Po odpojení napájení dochází k pomalému tuhnutí taveniny. Následkem toho tavenina krystalizuje a vznikají tak polykrystalické ingoty nebo skleněná hmota. Dalším jevem pomalého tuhnutí jsou čistící účinky. Při krystalizaci tavenina vytlačuje nečistoty do horní oblasti taveniny, kde se pak jednoduše oddělí. Tyto nečistoty jsou obsaženy v základním materiálu.<sup>33</sup>



Obr. 3.1: Startovací metoda s elektricky vodivým materiálem<sup>34</sup>

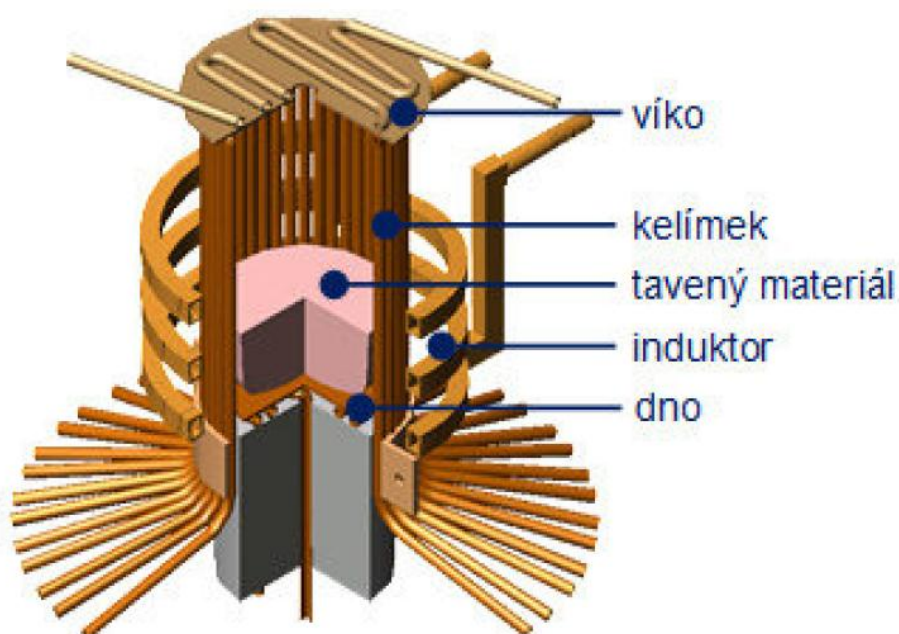
### 3.1 Indukční pec se studeným kelímkem

Indukční pec se studeným kelímkem je zaměřena na tavení elektricky nevodivých i vodivých materiálů. Využívá se vysokofrekvenčního ohřevu. Pec je složena z induktoru a studeného kelímku. Kelímek se sestává z dutých trubek nebo ze segmentů, které jsou nejčastěji válcového nebo obdélníkového tvaru. Zpravidla se k výrobě používá měď. Aby nedošlo k poškození pece protavením materiálu samotným kelímkem je zapotřebí dobrého chlazení proudící vodou.

<sup>33</sup> HEINDL, Michal. *Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

<sup>34</sup> Tamtéž.

Uvnitř studeného kelímku se uzavírají naindukované vířivé proudy vytvářené elektromagnetickým polem z induktoru, kterým prochází střídavý elektrický proud. To má za následek, že teplo je vytvářeno přímo uvnitř ohřívaného materiálu. Tavený materiál může dosahovat teplot kolem  $3000^{\circ}\text{C}$ . Proto není možné používat klasické indukční kelímkové pece, neboť výroba by byla příliš finančně náročná. Často ani nelze tuto výrobu uskutečnit. Okolo tavené vsázky vznikne tenká krusta, nazývaná “skull”, o teplotě kolem  $100^{\circ}\text{C}$ , která zabraňuje protavení kelímku. Uvnitř krusty probíhá vlastní tavení materiálu. Celý proces ohřevu se tak výrazně urychlí oproti jiným konvenčním pecím.<sup>35</sup> Schéma studeného kelímku je zobrazeno na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schéma studeného kelímku<sup>36</sup>

<sup>35</sup> VOTAVA, P. Úvod do problematiky indukčního tavení ve studeném kelímku. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 2., Elektronika*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013. s. 97-100. ISBN: 978-80-261-0232-8.

<sup>36</sup> [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkum/vhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku>.

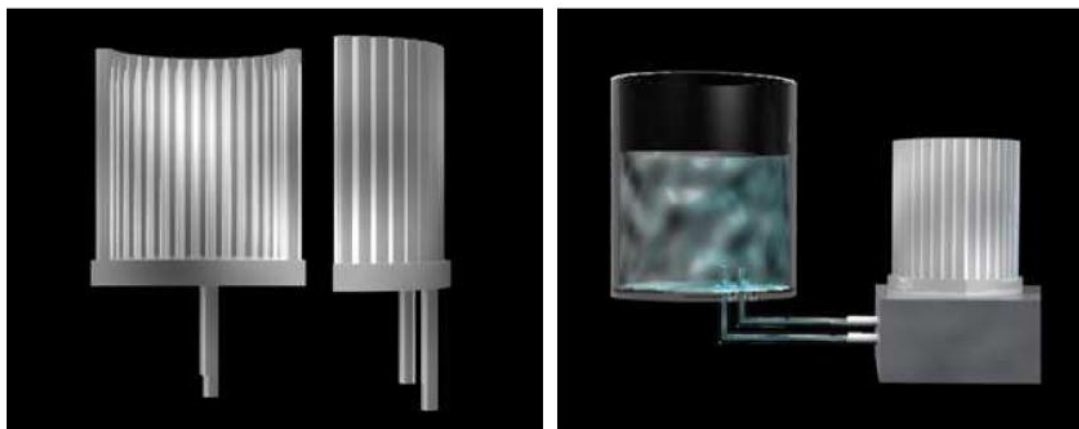
## 4 MOŽNOSTI TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH A NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU

### 4.1 Tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku

#### 4.1.1 Tavení $ZrO_2$

Další využití studeného kelímku je pro tavení  $ZrO_2$  (oxid zirkoničitý), jehož bod tání je při  $2750^\circ C$ . Aby se dal oxid zirkoničitý tavit, musí se stabilizovat. Do kelímku se vloží malé procento oxidu vápenatého nebo oxidu yttria.

Pro samotné tavení se používá studený kelímek se separovaným induktorem. Ten je sestaven z měděných trubek válcového tvaru, kterými protéká chladicí kapalina. Ta udržuje vnější vrstvu materiálu studenou.<sup>37</sup>

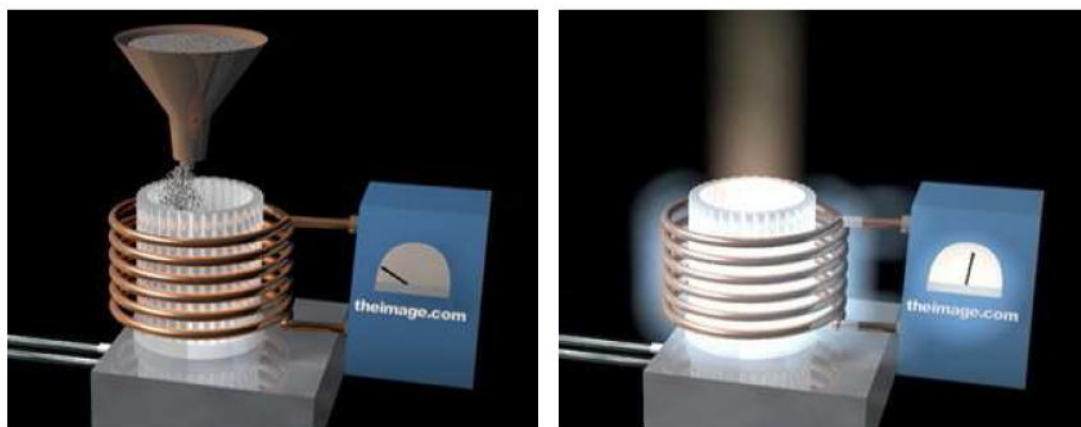


Obr. 4.1: Tavení  $ZrO_2$  ve studeném kelímku<sup>38</sup>

<sup>37</sup> [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.theimage.com/newgems/synthetic/syntheticanimate3.html>.

<sup>38</sup> Tamtéž.

Induktor je umístěn kolem kelímku, který je napájen zdrojem střídavého proudu. Tavení probíhá s frekvencí přibližně 4 MHz při výkonu až 100 kW. Oxid zirkoničitý je nevodivý v tuhém stavu. Je proto nutné použít na začátku procesu startovací fázi přidáním malých kousků kovového zirkonu. Ten se roztaví, reaguje s kyslíkem ve vzduchu (oxiduje) a smísí se s oxidem zirkoničitým. Vsázka se stane elektricky vodivým materiálem a tím dojde k ohřevu pomocí elektromagnetické indukce. Uvnitř kelímku se vytvoří tenká vrstva (skull), ve které probíhá samotné tavení materiálu.<sup>39</sup>



Obr. 4.2: Tavení  $ZrO_2$  ve studeném kelímku<sup>40</sup>

Po skončení tavicího procesu dochází k pomalému ochlazení a krystalizaci. Krystalizace má smršťující následek, a proto je materiál složen z mnoha dílčích krystalů. Pro odstranění nežádoucích příměsí se krystaly žíhají.<sup>41</sup>

#### 4.1.2 Výroba syntetických diamantů

Bod tání zirkonového prášku je mnohem vyšší než  $2000^\circ\text{C}$ , a proto jej nelze tavit v žádném z obvyklých žárupevných kelímků. Studený kelímek je přizpůsoben k tavení materiálu s vysokým bodem tání. V kelímku je tedy možné pěstovat monokrystaly  $ZrO_2$  (Kubický  $ZrO_2$ ). Tyto monokrystaly se používají ve šperkařském průmyslu jako náhrada

<sup>39</sup> [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.theimage.com/newgems/synthetic/syntheticanimate3.html>.

<sup>40</sup> Tamtéž.

<sup>41</sup> Tamtéž.

pravých diamantů. Mají podobný index lomu a jsou jen o něco málo tvrdší než diamanty přírodní. Jejich výhodou je mnohonásobně nižší cena a výroba v jakémkoliv barevném odstínu. Pro jejich jedinečné vlastnosti se využívají krystaly také v optice a elektrotechnice, a to i při vysokých provozních teplotách.<sup>42</sup>

### 4.1.3 Vitřifikace

Vitřifikace se používá pro zpracování radioaktivního odpadu. Ten je po tavení přeměněn do skelných nebo keramických matric, které jsou bezpečné pro skladování v hlubinných uložistích tisíce let. Vitřifikace je velice náročná na proces regulace tavení ve studeném kelímku. Teplota směsi se musí držet v přísně ohraničeném pásmu. Při překročení směrem nahoru se stává směs vysoce těkavou a směrem dolů pozbývá proces na účinnosti.<sup>43</sup>

Vitřifikace má řadu výhod. Životnost studeného kelímku je 10 krát větší než u jiných tavicích nádob, protože nedochází ke korozi při tavení. Vitřifikace se dá použít pro širší škálu produktů za účelem snížení objemu konečného odpadu díky struktuře studeného kelímku a využití vysoké teploty při tavení.<sup>44</sup>

## 4.2 Tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku

### 4.2.1 Tavení titanových slitin

Titan má jedinečné vlastnosti, které je možné uplatnit v některých aplikacích, kde řada jiných kovů nemůže být použita. Nejčastěji se slitiny titanu vyskytují v leteckém průmyslu převážně na výrobu lopatek v motorech. Další využití titanové slitiny nachází v chemickém průmyslu. Zvláště v korozivních prostředí, kde jiné kovy nelze použít. Na povrchu titanu se velice rychle vytváří vrstva oxidu v oxidačních a neutrálních vodních roztocích. Proto je velmi dobře imunní proti korozi v kyselině dusičné, odbarvovačích

---

<sup>42</sup> VOTAVA, P. Úvod do problematiky indukčního tavení ve studeném kelímku. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 2., Elektronika*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013. s. 97-100. ISBN: 978-80-261-0232-8.

<sup>43</sup> Tamtéž.

<sup>44</sup> HEINDL, Michal. *Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

a oxidačních halogenidových solí. Kvůli relativně vysokým nákladům jsou aplikace titanu omezené.

Cenu titanu ovlivňují některé faktory:

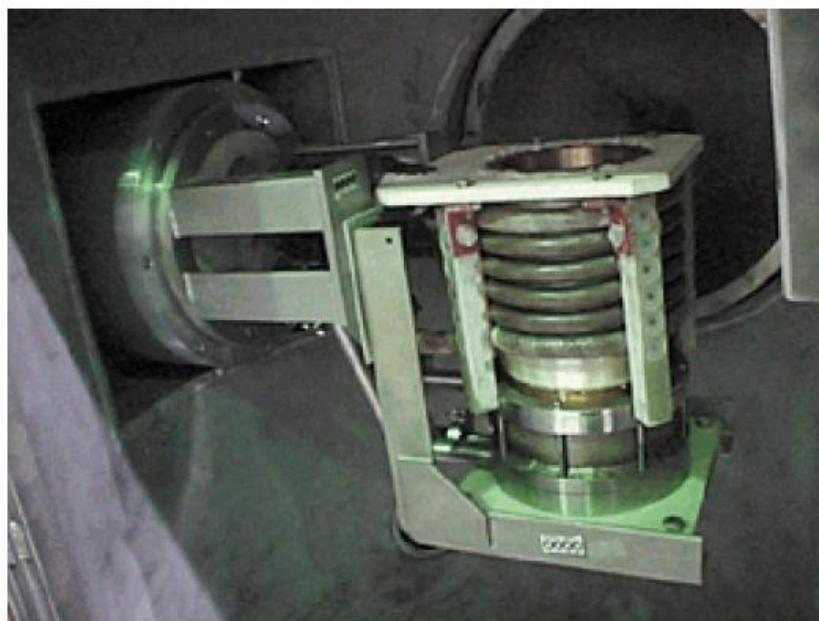
- Titan musí být taven, odléván a chlazen ve vakuu nebo inertní atmosféře z důvodu jeho reaktivity s kyslíkem a dusíkem.
- Nutnost odlévat titan do speciálních nereaktivních forem. Pro výrobu formy je použito sloučenin zirkonia, thoria a yttria.
- Obtížné odlévání odlitků, které často vyžadují konečné úpravy.
- Titan se těžko recykluje, proto je jeho využitelnost nižší.<sup>45</sup>

Pro tavení titanu se používá metody tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Vlastní tavba probíhá ve vakuu nebo inertní atmosféře. Tato metoda přináší řadu výhod. Zkrácení doby cyklu tavení oproti klasickému indukčnímu ohřevu. Eliminuje kontaminaci, která je spojená s vakuovým indukčním tavením v keramickém kelímku. Využívá bezkonkurenční schopnosti recyklovat šrot. Tento druh tavení je technologicky atraktivní pro nízké náklady a výrobu velkého množství titanových odlitků vysoké kvality.<sup>46</sup>

---

<sup>45</sup> MÍKOVÁ, Lucie. *Teorie ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

<sup>46</sup> Tamtéž.



Obr. 4.3: Kelímek a cívka pro tavení bez použití žárupevných materiálů<sup>47</sup>

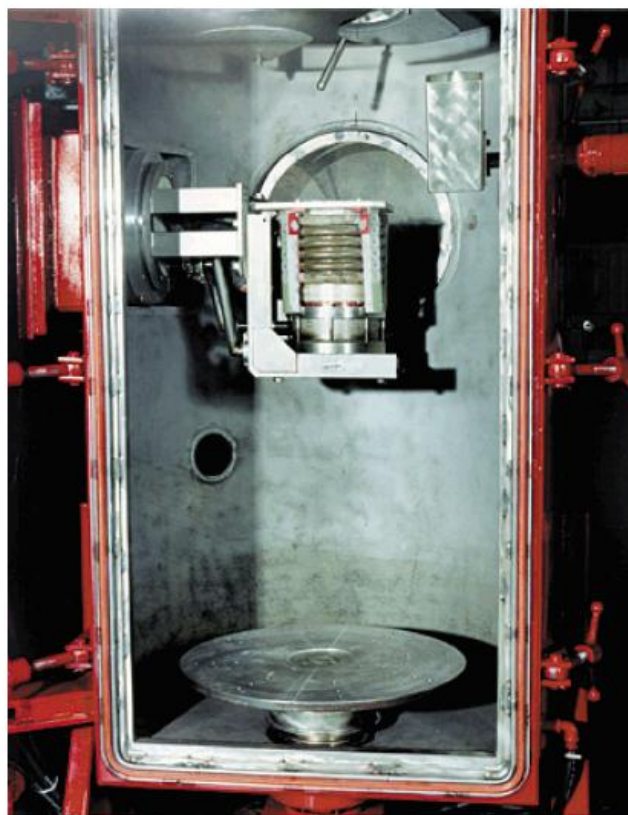
Pro samotné tavení se používá segmentový měděný kelímek. Důvodem je zabránění kontaminaci reaktivních slitin. Segmenty jsou chlazeny vodou. Indukční cívka vytváří magnetické pole, které prochází segmenty kelímku a vsázkou. Tím dochází k procesu tavení. Podél základny a stěn kelímku vznikne tenká pevná vrstva (skull). Tavení materiálu probíhá uvnitř této vrstvy. Měděný kelímek bez segmentů by se roztavil vlivem působení indukční cívky.

Tímto principem lze tavit různé vodivé materiály. Záleží pouze na obsahu kelímku. Ideální pro tavbu jsou rozsekané tlusté plechy za cenu šrotu. Při tavení je potřeba kontrolovat obsah kyslíku v materiálech, jelikož ovlivňuje pevnost odlitků. Zvláště u surového titanu musí být množství kyslíku optimální. Další výhodou je snadnější dávkování přísad. Lze přidávat materiál přímo do taveniny. Nespornou výhodou je rychlá příprava k tavbě jiné slitiny. Po skončení procesu tavení, zůstane v kelímku tenká

---

<sup>47</sup> MÍKOVÁ, Lucie. *Teorie ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

skořápka. Tu je možné rychle odstranit. Tímto se výrazně zrychlí čas mezi tavnými bez rizika vzájemné kontaminace.<sup>48</sup>



*Obr. 4.4: Jednokomorová pec s odstředivou lící deskou pro 10 kg vsázky<sup>49</sup>*

---

<sup>48</sup> MÍKOVÁ, Lucie. *Teorie ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

<sup>49</sup> Tamtéž.



## 5 ENERGETICKÁ NÁROČNOST A ZÁVĚRY PRO PRAKTICKÉ POUŽITÍ

### 5.1 Energetická náročnost

Z hlediska energetické náročnosti při tavení materiálů elektromagnetickou indukcí jsou důležité správný výběr materiálu a elektrická účinnost indukční pece ( $\eta$ ).

Pro elektrickou účinnost induktoru indukční pece platí:

$$\eta_i = \frac{P_2}{P_1 + P_2}$$

kde:

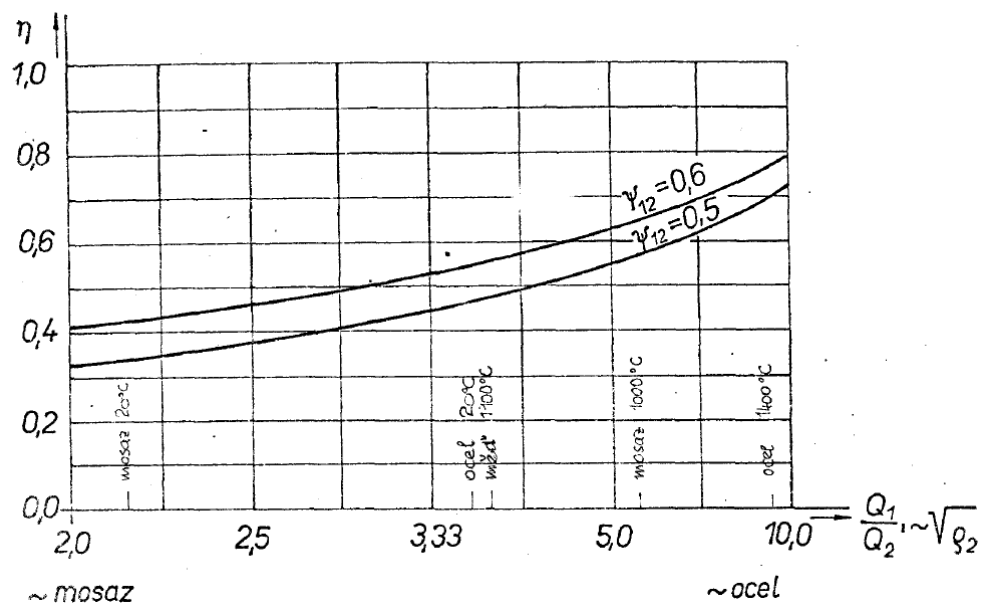
- $\eta_i$  je elektrická účinnost induktoru
- $P_1$  značí vlastní ztráty v cívce
- $P_2$  je užitečný výkon zavedený do vsázky

Pro výpočet celkové účinnosti indukční pece musíme zohlednit také vliv ztrát v kondenzátorové baterii, v přívodech a ve stínění. Výsledná celková elektrická účinnost indukční pece je potom:

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1 + P_2 + P_3}$$

kde:

- $\eta_c$  je celková účinnost
- $P_1$  značí vlastní ztráty v cívce
- $P_2$  je užitečný výkon zavedený do vsázky
- $P_3$  značí ztráty v kondenzátorové baterii, v přívodech a ve stínění



Obr. 5.1: Závislost elektrické účinnosti na vsázce<sup>50</sup>

Z diagramu na Obr. 5.1 je vidět, že poměr  $Q_1 / Q_2$  je úměrný odmocnině z měrného odporu  $\rho_2$  vsázky. Dále je vidět, že materiály s velkým měrným odporem  $\rho_2$  v našem případě ocel se indukčně zahřívají s vyšší účinností. Naopak materiály s malým měrným odporem  $\rho_2$  (měď, hliník), v tomto případě mosaz, se indukčně zahřívají s nižší účinností.

Výsledkem je skutečnost, že indukční pece s nevodivým kelímkem se lépe hodí pro tavení materiálů s velkým měrným odporem, většinou různé druhy ocelí. Materiály s malým měrným odporem jako jsou měď, hliník a jejich slitiny je vhodné tavit v indukčních pecích kanálkových, eventuálně v pecích indukčních s vodivým kelímkem (grafit se šamotem, ocelolitina)<sup>51</sup>

Při tavení materiálů v indukčních pecích se musí volit vhodný kmitočet pro daný proces. Pokud bude zvolen velmi nízký kmitočet, materiál se bude ohřívat s malou účinností. Nastane tak elektromagnetická průžařnost kusové vsázky. Naopak při vysokém

<sup>50</sup> LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. Plzeň: VŠSE, 1982.

<sup>51</sup> Tamtéž.

kmítočtu bude hloubka vniku velmi malá a materiál se bude ohřívat pouze na okraji. Střed materiálu by se ohříval pouze vedením tepla.<sup>52</sup>

## 5.2 Praktické použití

Elektrické indukční pece se využívají ve slévárenství pro tavení ocelí, litin, mědi a jiných neželezných kovů. Mají řadu výhod oproti pecím na fosilní paliva. Tavba probíhá relativně v krátkém čase, nenarušují ekologickou rovnováhu, celkový provoz je méně nákladný, lépe se reguluje ohřev a rozložení teplot. U těchto pecí je možné tavit pouze elektricky vodivé materiály.<sup>53</sup>

Pro tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů se nabízí metoda tavení ve studeném kelímku. U této metody teplota tavení dosahuje až 3000 °C a tím je dosažena vysoká čistota vytaveného materiálu. Tavený materiál se nedotýká povrchu kelímku, protože je taven „sám v sobě“. Nedochází tak ke znečištění taveniny materiálem kelímku jako u klasické indukční kelímkové pece.

V současné době má studený kelímek řadu využití, ale přesto probíhají výzkumy jak více ještě využít této technologie. V dnešní době se studený kelímek používá pro tavení speciálních titanových slitin pro letecký průmysl nebo zdravotnictví. V kelímku je možné pěstovat monokrystaly, které se používají ve šperkařském průmyslu jako náhrada pravých diamantů. Krystaly lze použít také v optice a elektrotechnice. V souvislosti s jadernými elektrárnami je dalším využitím studeného kelímku vitrifikace jaderného odpadu.<sup>54</sup>

---

<sup>52</sup> LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. Plzeň: VŠSE, 1982.

<sup>53</sup> HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

<sup>54</sup> VOTAVA, P. Úvod do problematiky indukčního tavení ve studeném kelímku. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 2., Elektronika*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013. s. 97-100. ISBN: 978-80-261-0232-8.



*Obr. 5.1: Ukázka tavení ve studeném kelímku<sup>55</sup>*

---

<sup>55</sup> HEINDL, Michal. *Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

## ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo popsat stručně teorii ohřevu materiálů elektromagnetickou indukcí. V práci jsem se věnoval tavení materiálů jak elektricky vodivých tak i materiálů nevodivých. Popsána byla také možnost tavení materiálů obou druhů ve studeném kelímku.

Téma této bakalářské práce jsem si vybral záměrně, neboť ohřev elektromagnetickou indukcí je velice zajímavý obor. Práce splnila má očekávání, ale zároveň jsem si vědom, že je ještě mnoho informací, které by stály za studium.

Indukční pece jsou v dnešní době hodně využívány. Nahradily se jimi původně používané pece na fosilní paliva, které produkovaly do ovzduší mnoho spalin, a tím byla narušena ekologická rovnováha v oblastech s hutní výrobou. Dnes, kdy se obracíme na stále efektivnější, levnější a ekologicky nenáročné způsoby zisku či výroby surovin, je metoda indukčních pecí výhodnou variantou. Indukční ohřev se využívá především pro tavení, prohřívání, kalení, svařování či pájení. Studený kelímek je modernější technologií, která jistě v budoucnu nalezne široké uplatnění v průmyslu. V současnosti je stále limitována malými rozměry kelímku. Studený kelímek umožňuje výrobu speciálních slitin pro letecký průmysl, lékařství, výrobu syntetických diamantů a dalších produktů.

## Seznam použité literatury

- [1] LANGER, Emil. *Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1973.
- [2] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1964.
- [3] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [4] RADA, Josef. KOLEKTIV. *Elektrotepelná technika 1*. 1. Praha: SNTL, 1985.
- [5] KROUPA, Oldřich. *Autoreferát*. Plzeň, 2013. Disertační práce. ZČU.
- [6] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. Plzeň: VŠSE, 1982.
- [7] *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2002, sv. ISBN 1210-0889. ISSN 1210-0889. [cit. 6.5.2015].  
Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25267](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267)
- [8] VOTAVA, P. Úvod do problematiky indukčního tavení ve studeném kelímku. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. s. 97-100. ISBN: 978-80-261-0232-8.
- [9] [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkum/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku>
- [10] JIŘINEC, S. Tavení elektricky nevodivých materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 3., Elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 5-8. ISBN: 978-80-261-0234-2.
- [11] HEINDL, Michal. *Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [12] [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.theimage.com/newgems/synthetic/syntheticanimate3.html>

- [13] MÍKOVÁ, Lucie. Teorie ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.