

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V  
PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

**Diplomová práce**

Průběžné tavení oxidu hliníku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pomocí  
elektromagnetické indukce

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan BRANDTLÍK**  
Osobní číslo: **E15N0008P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Průběžné tavení oxidu hliníku ( $Al_2O_3$ ) elektromagnetickou indukcí**  
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 :**

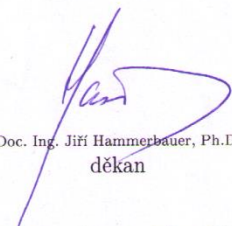
1. Uveďte fyzikální vlastnosti oxidu hliníku ( $Al_2O_3$ ) a možnosti jeho tavení .
2. Popište proces průběžného tavení  $Al_2O_3$  metodou tavení ve studeném kelímku a stanovte základní el. parametry pro tavení .
3. Proveďte analýzu elektrických a tepelných ztrát při průběžném tavení  $Al_2O_3$  ve studeném kelímku .
4. Stanovte podmínky k dosažení max. účinnosti tavicího procesu a vyslovte závěry pro praxi .

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

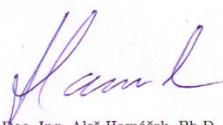
**1. Literaturu určí vedoucí DP při předběžné informaci**

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**  
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

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



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá průběžným tavením  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pomocí elektromagnetické indukce. V práci je popsána teorie vlnových rovnic, zářivého vektoru, skin efektu a sdílení tepla. Dále jsou v práci popsány vlastnosti  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a dalších oxidových materiálů s možnostmi jejich uplatnění. V závěrečných kapitolách byly popsány možnosti tavení ve studeném kelímku a energetická bilance samotného tavení.

## **Klíčová slova**

Indukční ohřev, teplo, studený kelímek, oxid hlinitý, tepelné ztráty, elektrické ztráty, účinnost, energetická bilance

## **Abstract**

This master's thesis aims to describe continuous melting of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  by electromagnetic induction. The thesis describes the theory of wave equations, radiant vector, skin effect and heat sharing. Further, the properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and other oxide materials and the possibilities of their application in practice are described. The final chapters describe the possibilities of melting in the cold crucible and the energy balance of the melted itself.

## **Key words**

Induction heating, heat, cold crucible, alumina, heat losses, electrical losses, efficiently, energy balance

## **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.

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce, prof. Koženému za cenné profesionální rady a připomínky.

V Plzni dne: 18.05.2017

.....

**Jan Brandtlík**

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 VLNOVÉ ROVNICE.....</b>	<b>11</b>
1.1 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR .....	13
1.2 SKINEFEKT.....	14
<b>2 INDUKČNÍ OHŘEV .....</b>	<b>16</b>
2.1 ELEKTRICKÉ INDUKČNÍ PECE.....	17
2.1.1 <i>Kelímkové pece.....</i>	<i>17</i>
2.1.2 <i>Kanálkové pece .....</i>	<i>17</i>
<b>3 TEPLLO .....</b>	<b>19</b>
3.1 SDÍLENÍ TEPLA .....	19
3.1.1 <i>Sdílení tepla vedením .....</i>	<i>20</i>
3.1.2 <i>Sdílení tepla prouděním .....</i>	<i>21</i>
3.1.3 <i>Sdílení tepla sáláním .....</i>	<i>22</i>
3.2 TEPLOTNÍ POLE .....	22
3.3 PODMÍNKY JEDNOZNAČNOSTI VEDENÍ TEPLA .....	23
<b>3 VLASTNOSTI OXIDU HLINITÉHO .....</b>	<b>25</b>
3.1 HLINÍK.....	25
4.1.1 <i>Oxidování.....</i>	<i>25</i>
3.2 OXID HLINITÝ ( $Al_2O_3$ ) .....	26
4.2.1 <i>Geografický výskyt korundu (<math>Al_2O_3</math>).....</i>	<i>27</i>
4.2.2 <i>Krystalografická soustava .....</i>	<i>27</i>
4.3 VLASTNOSTI $Al_2O_3$ .....	28
4.3.1 <i>Klíčové vlastnosti.....</i>	<i>29</i>
4.3.2 <i>Užití oxidu hlinitého v praxi.....</i>	<i>30</i>
4.4 VLASTNOSTI DALŠÍCH KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ A SKEL.....	30
4.5 PRAVIDLA BEZPEČNOSTI PŘI PRÁCI S $Al_2O_3$ .....	33
<b>5 TECHNOLOGIE TAVENÍ <math>Al_2O_3</math> VE STUDENÉM KELÍMKU .....</b>	<b>34</b>
5.1 TVAROVÁNÍ MATERIÁLU VE STUDENÉM KELÍMKU.....	35
5.1.1 <i>Postupné dávkování.....</i>	<i>35</i>
5.1.2 <i>Nepřetržitě dávkování.....</i>	<i>35</i>
5.2 KONSTRUKCE STUDENÉHO KELÍMKU.....	36
5.2.1 <i>Induktorový kelímek.....</i>	<i>36</i>
5.2.2 <i>Segmentový studený kelímek.....</i>	<i>37</i>
5.3 PRINCIP CHLADICÍHO SYSTÉMU .....	39
5.4 STARTOVACÍ FÁZE .....	40
5.4.1 <i>Nastartování tavby oxidů.....</i>	<i>42</i>
5.5 FÁZE KRYSTALIZOVÁNÍ VE STUDENÉM KELÍMKU .....	44
5.6 OFF-GAS SYSTÉM .....	47
5.7 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ STUDENÉHO KELÍMKU .....	48
<b>6 ENERGETICKÁ BILANCE .....</b>	<b>49</b>
6.1 TEPelné ZTRÁTY VE STUDENÉM KELÍMKU.....	49
6.2 ELEKTRICKÉ ZTRÁTY .....	51
6.3 ELEKTRICKÉ PARAMETRY.....	52
6.4 PRODUKTIVITA TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU.....	52
6.5 ZÁVĚRY PRO PRAXI .....	54
6.5.1 <i>Přednosti tavení ve studeném kelímku .....</i>	<i>54</i>
6.5.2 <i>Nevýhody tavení ve studeném kelímku.....</i>	<i>55</i>

<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>57</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>58</b>
<b>SEZNAM ODBORNÉ LITERATURY .....</b>	<b>59</b>



# Seznam symbolů a zkratek

## Elektrické pole

značka	Název	jednotka
$I$	elektrický proud	A
$\delta$	hloubka vniku naindukovaných proudů	m
$\mu$	Permeabilita	H/m
$\mu_r$	Relativní permeabilita	-
$\gamma$	Konduktivita	S/m
$\epsilon$	Permitivita	F/m
$H$	Intenzita magnetického pole	A/m
$E$	intenzita elektrického pole	V/m
$D$	elektrická indukce	C/m <sup>2</sup>
$B$	magnetická indukce	T
$J$	proudová hustota	A/m <sup>2</sup>
$\sigma$	plošná hustota náboje	C/S <sup>2</sup>
$S$	Pointingův zářivý vektor	W/m <sup>2</sup>
$R$	elektrický odpor	$\Omega$

## Teplotní pole

značka	Název	Jednotka
$T$	termodynamická teplota	K
$T_0$	počáteční rozložení teploty	K
$\rho$	Hustota	kg/m <sup>3</sup>
$c$	tepelná kapacita	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\lambda$	tepelná vodivost	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\alpha$	součinitel přestupu tepla prouděním	W.m <sup>-2</sup> .k <sup>-1</sup>
$Q_0$	objemová hustota tepelné energie	W/m <sup>3</sup>
$v$	rychlost kontinua	m/s
$q$	plošná hustota energie	W/m <sup>2</sup>
$c$	Emisivita	-
$t$	Čas	S

## Konstanty pro elektrické a tepelné pole

značka	název	Konstanta
$\epsilon_0$	permitivita vakua	(8,85419±0,00002). 10 <sup>-12</sup> F/m
$\mu_0$	permeabilita vakua	4 x $\pi$ x 10 <sup>-7</sup> H/m
$\epsilon$	Stefan-Boltzmannova konstanta	5,6697.10 <sup>-8</sup> W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>

## Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na průběžné tavení oxidu hliníku ( $Al_2O_3$ ) pomocí elektromagnetické indukce. Diplomová práce je rozdělena do sedmi kapitol. V prvních kapitolách diplomové práce popsána zjednodušená teorie vlnových rovnic a tepla.

První kapitola je zaměřena na stanovení základních vlnových rovnic, které se objevují v teorii indukčního ohřevu. Jsou zde popsány rovnice jako pro vodivé, tak pro nevodivé prostředí. Kapitolo rovněž zahrnuje Poyntingův zářivý vektor spolu se skin efektem. Druhá kapitola se týká obecně indukčního ohřevu a stručného popisu indukčních pecí. Třetí kapitola se týká přenosu tepla a podmínek s přenosem tepla souvisejícími.

Čtvrtá kapitola se týká samotného oxidu hlinitého. V kapitole jsou popsány jeho základní chemické a elektrické vlastnosti. Dále je v kapitole uveden jeho geografický výskyt, těžba  $Al_2O_3$  probíhá převážně v Rusku a takého jeho výhody a nevýhody a možnosti uplatnění v praxi.

Pátá kapitola nese název technologie tavení  $Al_2O_3$  ve studeném kelímku a jsou zde popsány možnosti jeho průběžného tavení. Tavení materiálů ve studeném kelímku lze uskutečnit dvěma typy kelímků, a to jak induktorovým, tak segmentovým. U elektricky nevodivých materiálů je zapotřebí nastartování jeho tavby. K zahájení tavby oxidů lze využít: povrchového ohřevu, ohřevu energií exotermické oxidace, či vložením elektricky vodivého prstence na povrch vsázky.

V závěrečné kapitole je popsána energetická bilance procesu tavení ve studeném kelímku, teoreticky popsány tepelné a elektrické ztráty vznikající v průběhu tavení a celková tepelná a elektrická účinnost.

# 1 Vlnové rovnice

Vlnové rovnice elektromagnetické vlnění [1] lze popsat Maxwellovými rovnicemi, které popisují elektromagnetické pole v každém bodě. Z důvodu složitosti popisu Maxwellových rovnic v integrálním tvaru, použijeme jejich diferenciální tvar převedením za pomoci Stokesovy a Gauss-Ostrogranského věty.

Na I. a II. Maxwellovu rovnici využijeme Stokesovy věty, která popisuje integrál vektoru po uzavřené křivce, který je roven plošnému integrálu z rotace uvažovaného vektoru.

Na III. a IV Maxwellovu rovnici využijeme Gauss – Ostrogranského věty, která uvažuje s tím, že plošný integrál vektoru přes uzavřenou plochu je roven objemovému integrálu z divergence daného vektoru.

$$I.M.R. \quad \oint_C \mathbf{H} dl = I + \frac{d\psi}{dt} \equiv \text{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1)$$

$$II.M.R. \quad \oint_C \mathbf{E} dl = -\frac{d\phi}{dt} \equiv \text{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$III.M.R. \quad \oint_S \mathbf{D} ds = Q \equiv \text{div} \mathbf{D} = \text{div} \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

$$IV.M.R. \quad \oint_S \mathbf{B} ds = 0 \equiv \text{div} \mathbf{B} = \text{div} \mu \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$$

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r$$

Po aplikování matematických úprav na rovnice (1), (2), (3) a (4) dostaneme obecné rovnice pro magnetickou a elektrickou složku elektromagnetického vlnění.

$$\text{Magnetická složka:} \quad \nabla^2 \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} + \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\text{Elektrická složka:} \quad \nabla^2 \mathbf{E} = \mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \text{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (6)$$

Obecné rovnice elektromagnetického vlnění (5) a (6) dále lze upravit v závislosti na vodivosti prostředí.

- Ve vodivé prostředí lze zanedbat  $\varepsilon_r$ .
- V nevodivé prostředí lze zanedbat  $\gamma$ .

Pro vodivé prostředí přejdou obecné rovnice elektromagnetického vlnění (5), (6) do tvaru (7), (8) za předpokladu, že  $\varepsilon_r = 0$ ,  $\rho = 0$ :

$$\text{Magnetická složka:} \quad \nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\text{Elektrická složka:} \quad \nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (8)$$

Pro nevodivé prostředí přejdou obecné rovnice elektromagnetického vlnění (5), (6) do tvaru (9), (10) za předpokladu, že  $\gamma = 0$ :

$$\text{Magnetická složka:} \quad \nabla^2 \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (9)$$

$$\text{Elektrická složka:} \quad \nabla^2 \mathbf{E} = \mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (10)$$

Rovnice pro elektromagnetické vlnění v nevodivém prostředí (9), (10) nadále upravíme do tvaru:

$$\text{Magnetická složka:} \quad \frac{1}{\mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (11)$$

$$\text{Elektrická složka:} \quad \frac{1}{\mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0} \nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (12)$$

Z definice vlnové rovnice v trojrozměrném prostoru je součinitel  $\nabla^2 \mathbf{H}$  a  $\nabla^2 \mathbf{E}$  roven  $v^2$ .

Na základě této definice můžeme vztah pro rychlost šíření vlnění (13) v daném prostředí definovat jako:

$$\text{Rychlost šíření vlnění:} \quad v^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0 \mu_r \varepsilon_r} \quad (13)$$

## 1.1 Poyntingův zářivý vektor

Poyntingův zářivý vektor udává hustotu a směr toku elektromagnetické energie v prostoru za jednotku času. Vychází ze vztahu pro elektromagnetickou energii ve tvaru pro jednotkový objem prostoru a samotný Poyntingův vektor, pak lze odvodit z časového úbytku celkového množství elektromagnetické energie v objemu  $V$ . [1]

Elektrická a magnetická energie je dána výrazy:

$$\text{Energie elektrická:} \quad W_e = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{D} \mathbf{E} dV = \frac{1}{2} \varepsilon \int \mathbf{E}^2 dV \quad (14)$$

$$\text{Energie magnetická:} \quad W_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \mathbf{H} dV = \frac{1}{2} \mu \int \mathbf{H}^2 dV \quad (15)$$

Rychlost ubývání množství energie v uvažovaném objemu  $V$  za čas bude rovna záporné derivaci a rovnice (14), (15) přejdou do tvaru [1]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) \\ = - \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \varepsilon \mathbf{E}^2 + \frac{1}{2} \mu \mathbf{H}^2 \right) dV \end{aligned} \quad (16)$$

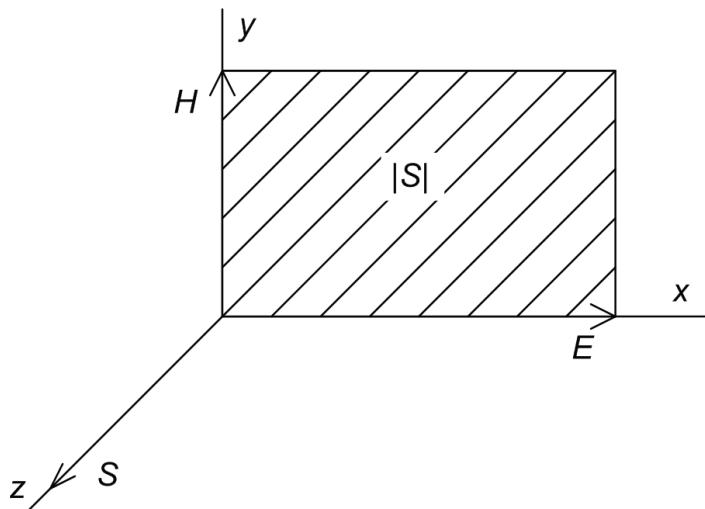
Po matematických úpravách přejde rovnice (16) do tvaru:

$$-\frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) = \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \oint_{S_{ploch}} S dS_{ploch} \quad (17)$$

Člen  $\int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV$  určuje velikost Joulových ztrát, člen  $\oint_{S_{ploch}} S dS_{ploch}$  určuje Poyntingův vektor.

*Poyntingův vektor* je tedy množství energie, která vystoupí z uvažovaného objemu přes plochu za jednu sekundu a je určen součinem  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$ . Velikost Poyntingova vektoru je

rovna ploše obdélníka (Obrázek 1) se stranami E a H a jeho směr je kolmý k ploše obdélníka. [1]



Obrázek 1: Poyntingův zářivý vektor [2]

Poyntingův vektor: 
$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (18)$$

## 1.2 Skinefekt

Při indukčním ohřevu dochází k situaci, že se teplo uvnitř vsázky nerozkládá rovnoměrně v celém jeho průřezu. Při ohřevu válcové vsázky dochází ke skutečnosti, že největší hustota proudu  $J$  bude na jeho povrchu a směrem ke středu bude jeho hodnota od  $J_0$  exponenciálně klesat. Skin efekt je dán vztahem (19): [1], [3]

Skinefekt: 
$$J = J_0 e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (19)$$
  
 $\delta = \text{hloubka vniku}$

Hloubka vniku je hloubka pod povrchem vodiče (pro případ “studeného kelímku” vodič = vsázka), kde proudová hustota klesne na hodnotu  $J_0/e$  a je dána vztahem (20) [1], [4]:

Hloubka vniku: 
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2 \times \pi \times f \times \mu \times \sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{2 \times \pi \times f \times \mu}} = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \times f}} \quad (20)$$

Ze vztahu (20) je patrné, že hloubka vniku elektromagnetického záření je závislá na permeabilitě vsázky, konduktivitě vsázky a kmitočtu zdroje, který mimo jiné také

ovlivňuje rozložení ohřevu tepla v sázce.

Účinnost indukčního ohřevu lze teoreticky spočítat ze vztahu (19).

$$\text{Účinnost:} \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left[ 1 + \left( 2,5 \frac{\delta}{d} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_v \mu_r}}} \quad (21)$$

$D$  = vnitřní průměr cívky induktoru [m]

$d$  = průměr vsázky (válcová) [m]

$\delta$  = hloubka vniku [m]

$\rho_i$  = odpor měrného materiálu induktoru [ $\Omega \cdot m$ ]

$\rho_v$  = odpor měrného materiálu vsázky [ $\Omega \cdot m$ ]

$\mu_r$  = permeabilita materiálu vsázky [H/m]

Z rovnice (21) pro účinnost indukčního ohřevu lze vyvodit, že se zvětšujícím se poměrem  $D/d$  bude klesat i jeho účinnost, a to v důsledku zmenšující se vazby elektromagnetického pole induktoru a vsázky. Na snižující účinnost má vliv i poměr mezi hloubkou vniku a průměrem vsázky. [3]

## 2 Indukční ohřev

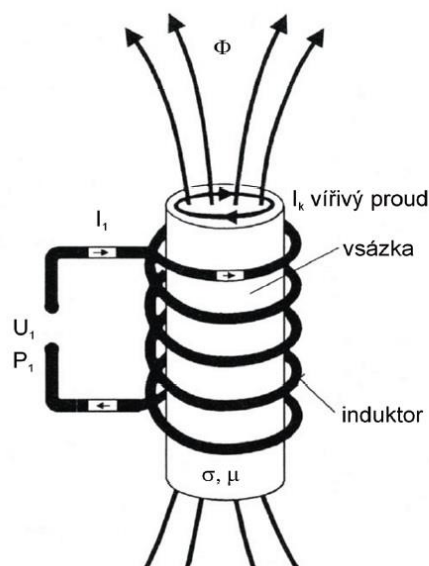
Principem indukčního ohřevu je průchod časově proměnného elektrického proudu vodičem. V důsledku čehož, vznikne časově proměnné harmonické elektromagnetické pole. Z teorie elektromagnetického pole víme, že se ve vodiči a v blízkosti jeho vodivých těles indukují vířivé proudy, působící proti smyslu proudu, kterým byly vyvolány. V implikaci indukovaných vířivých proudů vznikají v materiálu nerovnoměrně rozložené Joulovy ztráty, které vyvolávají následný ohřev materiálu. [4]

Jednoduché konstrukční řešení indukčních zařízení sestává z cívky, kterou prochází časově proměnný elektrický proud, vysokofrekvenčního napájecího zdroje a z vsázky, která slouží k pohlcování časově proměnného elektromagnetického vlnění vybuzeného cívkou.

Zařízení pro indukční ohřev si lze představit jako vzduchový transformátor. Cívka slouží jako primární vinutí, které indukuje proudy do vsázky na sekundární straně transformátoru. Při průchodu proudu mohou nastat základní druhy vlnění [1], [5]:

- *Válcové elektromagnetické vlnění* vznikne při průchodu proudu válcovým zářičem.
- *Rovinné elektromagnetické vlnění* vznikne při průchodu proudu rovinným zářičem.

Jednoduchý model indukčního ohřevu si lze představit podle obrázku 2. Je-li válcová elektricky, vodivá vsázka zasunuta do cívky, tak její elektromagnetické vlnění vstupuje do vsázky jejím povrchem a vyvolává indukované proudy, jejichž účinkem se vsázka zahřívá. Pronikající elektromagnetické vlnění se utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. [1]



Obrázek 2: Indukční model cívky [4]



## 2.1 Elektrické indukční pece

Elektrická indukční pec pracuje na principu ohřevu vsázky na základně naindukování vířivých proudů v taveném materiálu, které jsou generovány elektromagnetickou indukcí.

Elektrické indukční pece se dělí dle konstrukce na:

- *kelímkové pece* [6] – vysokofrekvenční, středofrekvenční, nízkofrekvenční, vakuové,
- *kanálkové pece* – s odkrytým kanálkem, se zakrytým kanálkem

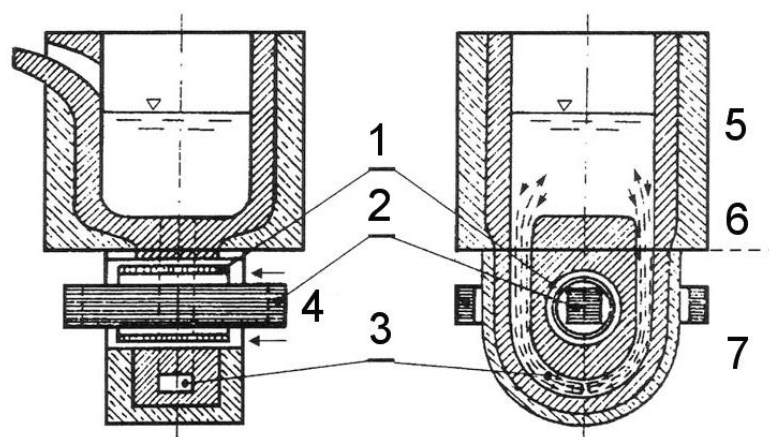
### 2.1.1 Kelímkové pece

- *Vysokofrekvenční* EIP pece se používá převážně pro laboratorní účely. Pro vsázku EIP pecí jsou nejvhodnější materiály s vysokým měrným odporem, jako jsou kovy oxidů a skla. Hmotnost vsázky se pohybuje od několika gramů po několik set gramů.
- *Středofrekvenční* se používají ve slévárnách ocelí k odlévání odlitků střední a malé hmotnosti na formovacích linkách. Hmotnost vsázky středofrekvenčních kelímkových pecí se pohybuje od desítek kilogramů po hmotnost 10 a více tun.
- *Nízkofrekvenční* pece se používají ve slévárnách litin, kde plní svoji funkci jako pece udržovací, tavící a ohřívací (ohřívání tekuté litiny se využívá v okamžiku, kdy byl pro její ohřev využit tavící zdroj). Konstrukční řešení nízkofrekvenčních pecí umožňuje tavit materiál o hmotnosti 1 t až do 70t.

### 2.1.2 Kanálkové pece

Indukční kanálkové pece si lze představit jako transformátor s uzavřeným železným jádrem, kde je primární cívka připojena k síti. Sekundární stranou pece je kanálek, který je vyplněný kovem. Kanálkové pece se používají na tavení barevných kovů jako je hliník, měď a jeho slitiny. U dřívějších kanálkových pecí s odkrytým kanálkem dochází při překročení určité hodnoty příkonu k tzv. „uskřipovacímu jevu“. Který znemožňuje řádný provoz pece. U kanálkových pecí se zakrytým kanálkem lze uskřipovacímu jevu do jisté míry zabránit. Kanálek u zakrytých pecí je zapuštěn do dna pece a následný hydrostatický tlak vyvíjený roztaveným kovem, tak zabraňuje vzniku nežádoucího uskřipovacího jevu.

[3]



Obrázek 3: Kanálová indukční pec; 1) ohřívací cívka, 2) jádro z transformátorových plechů, 3) kanálek, 4) chladicí vzduch, 5) vana pece, 6) dělicí spára, 7) induktor. [3]

### 3 Teplo

Teplo je termodynamická veličina, která vyjadřuje míru změny termodynamické energie tělesa. Termodynamická energie je veličina, která popisuje složení energií tělesa, které uvnitř jeho vznikají. [7], [8]

#### *Kondukcce tepla*

V teorii vedení tepla můžou nastat dva stavy *stacionární* a *nestacionární* a lze je definovat takto:

- Stacionární stav nastává v okamžiku, kdy je teplota po celou svoji dobu neměnná.
- Nestacionární stav nastává, pokud vlivem teplotního gradientu dochází k tomu, že se teplota v určitém místě mění s časem.

#### *Fourierův zákon*

Fourierův zákon patří mezi základní vztah, kterým lze definovat vedení tepla a lze ho zapsat ve tvaru:

$$\text{Hustota tepelného toku:} \quad v = -\lambda \times \frac{dt}{dx} [W/m^{-2}] \quad (22)$$

$v$  – hustota tepelného toku je množství tepla, které proteče za určitý čas jednotkou plochy, která je kolmá na směru proudění. Hustota tepelného toku je udávána v joulech. Teplo, které projde plochou za jednotku času je výkon. Z rovnice  $E_{(J)} = P_{(W)} \times t_{(s)}$  plyne konečný rozměr pro vyjádření teplotního toku  $[W/m^{-2}]$ . [8]

$\frac{dt}{dx}$  – teplotní gradient je mírou změny teploty v daném místě  $\gg$  poměr přírůstku teploty  $dt$  ke vzdálenosti  $dx$  mezi izotermními plochami ve směru normály.

$$\text{grad } t = \frac{dt}{dx} [K \times m^{-1}] \quad (23)$$

#### 3.1 Sdílení tepla

Sdílením tepla je rozuměn přenos tepla v implikaci s existencí teplotního gradientu. Existuje-li tedy v jakémkoliv prostředí rozdíl teplot, zákonitě musí docházet k přenosu

tepla. Tepelná energie proudí z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou za předpokladu neexistence vnějšího zdroje tepla [7], [8].

### 3.1.1 Sdílení tepla vedením

Přenos tepla vedením je způsoben přímým kontaktem částic v látce. Přenos energie je tak zprostředkován přímým tlakem molekul v tekutinách nebo pohybem volných elektronů v kovech. Tento druh přenosu tepla je nejběžnější u pevných materiálů, kde jsou molekuly seskupeny u sebe. U kapalin a plynů tomu však tak není, jelikož molekuly nedrží při sobě a šance na kolizi a předání tepelné energie je menší. Nejlepšími vodiči tepelné energie jsou kovy. Ty mají kovovou vazbu, ve které valenční elektrony atomů vytvoří tzv. elektronový plyn. Elektrony jsou sdíleny všemi atomy a mohou se v mřížce volně pohybovat. Tyto elektrony jsou schopny rychle přenést tepelnou energii z jednoho místa na druhé. Schopnost přenosu tepla lze určit tepelnou vodivostí  $\lambda$ . Ta je definována jako množství tepla  $Q$ , které lze přenést za jednotku času  $\Delta t$  přes stěnu jednotkové tloušťky  $\Delta l$  ve směru normály vyvolané jednotkovým teplotním gradientem  $\Delta T$ . Hustotu tepelného toku vedením lze vyjádřit jako: [8], [9]

$$q'_{cond} = -\lambda grad T \quad (24)$$

Teplotní gradient je dán vztahem:

$$G = -grad T \quad (25)$$

Vztah mezi rovnicemi (24) a (25) je tedy:

$$q = -grad T \quad (26)$$

Teplotní pole lze definovat jako zřídlové a nevírové a platí pro něj rovnice teplotního gradientu, které je definován vztahy:

$$rot G = 0 \quad (27)$$

$$\oint_c G dl = 0 \quad (28)$$

Pro stacionární případ lze rovnice kontinuity teplotního toku definovány jako:

$$div p = q \quad (29)$$

$$\oint_C q \, dS = P \quad (30)$$

### 3.1.2 Sdílení tepla prouděním

Při sdílení tepla prouděním dochází k přenosu tepla z jednoho místa do druhého prostřednictvím tekutiny nebo plynu. Takový způsob přenosu je v těchto skupenstvích dominantní. Přenos tepla prouděním je přenos tepelné energie mezi tuhými tělesy a proudícími tekutinami či plyny. S rychlostí pohybu tekutiny se také zvyšuje tepelný tok způsobený prouděním. Proudění lze rozdělit na: [7], [8]

- *Přirozené proudění* – Přítomnost tuhého tělesa v kapalině a rozdíl teplot povrchu tělesa a jeho okolí. Jedná se pouze o teplotní vyrovnání rozdílů hustot médií.
- *Nucené proudění* – Jedná se o nucený pohyb kapaliny v okolí tuhého tělesa. Pohyb média je závislý na vnějších vlivech.

Hustota proudícího tepelného toku je definována jako:

$$q' = \alpha(T - T_{ext}) \quad (31)$$

$\alpha$  je součinitel přestupu tepla rozhraním. Jeho velikost je ovlivněn celou řadou faktorů, které se odvíjejí od vlastností látek. Koeficient alfa není tedy konstantou.

### 3.1.3 Sdílení tepla sáláním

K sálání tepla dochází vyzařováním elektromagnetických vln. Vyzařovaná energie z tělesa je unášena těmito vlnami pryč. Teplo sálá z jakéhokoliv průsvitného materiálu, nebo v prostředí vakua. Sálání tepla je přímým důsledkem náhodných pohybů atomů a molekul v hmotě. Pohyb nabitých protonů a elektronů vede k vyzařování elektromagnetického záření. [7], [8]

Všechny materiály vyzařují tepelnou energii na základě své teploty. Čím teplejší je těleso, tím více vyzařuje. Zřejmým příkladem tepelného záření, které přenáší teplo přes celou sluneční soustavu, je slunce. Při běžné pokojové teplotě tělesa vyzařují v oblasti infračerveného vlnění. Teplota tělesa ovlivňuje vlnovou délku a kmitočet vyzařovaných vln. Se zvyšující se teplotou se zkracují vlnové délky v rámci spekter emitovaného záření a dochází k vyzařování kratších vlnových délek záření s vyšší frekvencí. Množství energie vyzářeného tělesem se tedy mění s frekvencí a její množství je popsáno Weinovým posunovacím zákonem: [7], [8]

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (32)$$

Emisivita povrchu tělesa je závislá na vlnové délce elektromagnetického záření vysílaného tělesem, a tedy i na teplotě povrchu. Z této definice lze vyvodit, že každé těleso s nenulovou termodynamickou teplotou září.

Hustotu tepelného toku emitovaného sáláním, lze zapsat:

$$q'_{rad} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{ext}^4) \quad (33)$$

## 3.2 Teplotní pole

Teplotní pole je dáno rovnicí:

$$Q_0 = -div \lambda gradT + pc_p \frac{dT}{dt} + \lambda t_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (34)$$

za podmínek:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} v \times gradT$$

$$\lambda t_r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

Při indukčním ohřevu lze využít vztahu  $Q_0 = W_j$ .

Pokud budeme respektovat definované podmínky z rovnice (34), lze Fourierovu rovnici pro indukční ohřev přepsat do tvaru:

$$W_j = -div \lambda grad T + pc_p \frac{dT}{dt} + pc_p v \times grad T \quad (35)$$

### 3.3 Podmínky jednoznačnosti vedení tepla

Při řešení úloh zabývající se problémem teplotního pole musí být respektovány okrajové podmínky. Okrajové podmínky vznikají na rozhraní dvou různých prostředí. Podmínky jednoznačnosti vedení tepla [9] lze rozdělit do čtyř skupin. Fyzikální, geometrické, počáteční a povrchové.

*Geometrické* – Geometrické podmínky jsou dány tvarem a rozměrem tělesa. Pro praktické účely výpočtu se tělesa modifikují na jednoduchá geometrická tělesa.

*Fyzikální* – Fyzikální podmínky jsou dány součinitelem tepelné roztažnosti, měrnou tepelnou kapacitou, hustotou a vydatností vnitřních objemových tepelných zdrojů.

*Počáteční* – Počáteční podmínka určuje rozložení teploty v tělese na počátku cyklu tepelné výměny tělesa. Počáteční podmínka se neuplatňuje u stacionárního procesu, jelikož se teplotní pole nemění v čase.

*Povrchové* – Povrchové počáteční podmínky jsou důsledkem rozdílu hustot povrchu tělesa a prostředí, kterému je vystaveno. Rozlišujeme čtyři základní povrchové podmínky [7].

$$\text{Dirichletova OP:} \quad T(\Gamma, t) = T_r(\Gamma, t) \quad (36)$$

Dirichletova okrajová podmínka se využívá tehdy, je-li známa teplota na hranici  $\Gamma$ .

$$\text{Neumanova OP:} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n}(\Gamma, t) = f_0(\Gamma, t) \quad (37)$$

Neumanova okrajová podmínka se využívá tehdy, známe-li velikost toku energie přes hranici  $\Gamma$ .

*Newtonova OP:*

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha \times (T_k - T) \quad (38)$$

Newtonova okrajová podmínka se bere v úvahu pouze v případě, jedná-li se o sdílení tepla prouděním. Je definována na rozhraní pevné fáze s kapalinou nebo plynem. Při indukčních ohřevech se podmínka uplatňuje pouze při teplotách do 500 °C.

*OP 4 druhu (Stefan – Boltzmannův zákon)*

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \epsilon c (T_{ext}^4 - T^4) \quad (39)$$

OP 4. Druhu se uplatňuje u teplot vyšších jak 500 °C a také musí být dodržen přestup tepla sáláním



### 3 Vlastnosti oxidu hlinitého

V kapitole fyzikální vlastnosti oxidu hlinitého a možnosti jeho tavení, budou charakterizovány vlastnosti oxidu hlinitého a další materiály oxidové keramiky a křemičitých skel. V kapitole budou popsány charakteristické vlastnosti jednotlivých materiálů, jako jsou fyzikální, chemická a elektrické. Následně budou popsány možnosti jeho tavení v indukčních zařízeních. Tavení oxidů kovů ve studeném kelímku je velmi komplikovaný proces, a to z důvodu, jejich elektrické nevodivost ve studeném stavu. Problematika bude popsána v následujících kapitolách. V závěru této kapitoly dojde k vzájemnému porovnání výše zmíněných vlastností.

#### 3.1 Hliník

Hliník (vlastnosti jsou popsány v Tabulce 1 [10], [11]) je lehký nepřechodný kov bělavě šedé barvy. Jeho chemická značka je Al, latinsky Aluminium. Nachází se ve 13. skupině, 3. periodě, bloku p periodické tabulce prvků. Čistý hliník slouží jako velmi dobrý elektrický vodič. Nicméně pro svoji křehkost (při několikanásobném ohybu se zlomí), zahříváním vlivem přechodového odporu, který je způsoben zvětšováním objemu při průchodu proudu, je nahrazován mědí. [11] To ale neznamená, že se nadále nepoužívá v dálkových rozvodech v *AlFe* lankách či průmyslových aplikacích.

##### 4.1.1 Oxidování

Oxidy jsou binární sloučeniny kyslíku s dalším prvkem. Oxid vzniká odtrhnutím dvou atomů vodíku z vody. Oxidační číslo všech oxidů je tedy  $II^-$ . Prvek vázaný na kyslík může nabývat hodnot oxidačního čísla  $I^+ - VIII^+$ .

Tabulka 1: Vlastnosti hliníku

Al, Hliník, Aluminium		
Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Hustota	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tvrдост	2,75	-
molární objem	1,00E-05	m <sup>3</sup> /mol
tepelná vodivost	237	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Teplota tání	660,32	°C
Teplota varu	2519	°C
Elektrická vodivost	3,76E+07	S/m
Měrný elektrický odpor	28,74	$\eta\Omega$ .m

### 3.2 Oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Oxid hlinitý je chemická sloučenina hliníku a kyslíku s chemickým vzorcem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Vzhledově ji lze charakterizovat jako bílý krystalický prášek. V přírodě se oxid hlinitý nejčastěji vyskytuje jako nerost minerálního původu s názvem korund. Pro oxid hlinitý platí, že se nejčastěji jedná o krystalickou polymorfní látku v modifikaci  $\beta$ . Korund má dále své odrůdy. V přírodě se nejobvykleji odrůdy korundu vyskytují ve formě zrnitého smirku, modrého safíru a červeného rubínu. [12]

Korund patří mezi nejtvrdší nerosty viz. Tabulka 2 [10]. V Mohsově stupnici je po diamantu korund nejtvrdším nerostem, a proto ho lze také, krom jiného využívat také jako abrazivum v technickém průmyslu. Jeho více zmíněné odrůdové formy modrý safír a červený rubín se využívají např. ve šperkařství jako drahé kameny.

Tabulka 2: Mohosova stupnice tvrdosti

Tvrдост	Látka	Chemický název	Chemický vzorec
1	mastek	kyselý metakřemičitan hořečnatý	$\text{H}_2\text{Mg}_3(\text{SiO}_3)_4$
2	sůl kamenná	chlorid sodný	NaCl
3	kalцит	uhličitan vápenatý	$\text{CaCO}_3$
4	fluorit	fluorit vápenatý	$\text{CaF}_2$
5	apatit	-	$\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$
6	živec	křemičitan hlinitodraselný	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$
7	křemen	oxid křemičitý	$\text{SiO}_2$
8	topaz	-	$\text{Al}_2\text{SiO}_4$
9	korund	oxid hlinitý	$\text{Al}_2\text{O}_3$
10	diamant	Uhlík	C

### 4.2.1 Geografický výskyt korundu ( $Al_2O_3$ )

Výskyt korundu není v přírodě nic neobvyklého. Jedná se o magmatické horniny typu pegmatity, syenity, dunity, které v sobě mají vysoký podíl hliníku. Korund se vyskytuje především v místech, která jsou bohatá na výskyt hliníku (hlinité sedimenty jako jsou terra rosy či bauxity), respektive na místech, která prošla tzv. tepelně – tlakovou metamorfózou. Těžba přírodního korundu probíhá převážně na území Ruska, kde je vytěženo tisíce tun ročně. V menším množství se také korund těží v Kašmíru (Indie), Corundum Hill ve Franklinu (USA), na Norském ostrově Seiland či v Rakwaně na Srí Lance. V České republice se můžeme setkat s těžbou např. v oblastech Pojkovic u Třebíče, kde se těží safír [14].

### 4.2.2 Krystalografická soustava

Krystalografická soustava je kombinací prvků bodové symetrie a translace uspořádané do krystalové mřížky v trojrozměrném prostoru. Každá elementární buňka je popsána velikostmi hran a úhly mezi sebou svírající. Existuje sedm základních krystalografických soustav. Jedná se o soustavy typu: triklinická, monoklinická, ortorombická, tetragonální, hexagonální, trigonální a kubická. [15]

Oxid hlinitý krystaluje v několika modifikacích. Nejběžnějšími modifikacemi jsou  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Jedná se vlastně o soustavy typu trigonální, hexagonální a kubická.

a) *Nejběžněji vyskytující se modifikace  $Al_2O_3$*

- **Modifikace  $\alpha$**  – Modifikace  $\alpha$  je triklinická. Její specifické vlastnosti jsou dány velikostmi hran  $a$ ,  $b$ ,  $c$  a úhly mezi nimi svírajícími  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Dané parametry jsou tedy charakterizovány:  $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ .
- **Modifikace  $\beta$**  – Modifikace  $\beta$  je hexagonální a její parametry jsou:  $a = b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .
- **Modifikace  $\gamma$**  – Modifikace  $\gamma$  je kubická a její parametry jsou:  $a = b = c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .

b) *Měně časté modifikace  $Al_2O_3$*

- **Modifikace  $\kappa$**  – Modifikace  $\kappa$  je ortorhombická a její parametry jsou:  $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- **Modifikace  $\theta$**  – Modifikace  $\theta$  je monoklinická a její parametry jsou:  $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$
- **Modifikace  $\delta$**  – Modifikace  $\delta$  je tetragonální a její parametry jsou:  $a = b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- **Modifikace  $v$**  – Modifikace  $v$  je trigonální a její parametry jsou:  $a = b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

### 4.3 Vlastnosti $Al_2O_3$

Jak již bylo výše zmíněno, oxid hlinitý je elektricky nevodivý. Je to způsobeno tenkou vrstvou oxidu na povrchu hliníku. Hliník je tedy pokryt tenkou oxidovou vrstvou, která má tloušťku  $0,01\mu m$  a slouží jako ochrana před korozí. Tato oxidová vrstva může vzniknout buď uměle eloxováním, nebo působením atmosférického kyslíku. V Tabulce 3 [12], [16], [17] jsou charakterizovány vlastnosti oxidu hlinitého.

Tabulka 3: Vlastnosti oxidu hlinitého

Mechanické vlastnosti		
Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Yongův (elastický) modul	340-400	GPa
Pevnost v tahu	350-580	MPa
Pevnost v tlaku	690-5500	MPa
Poissonovo číslo	0,23-0,30	-
Lomová houževnatost	3,3-4,8	Mpa.m <sup>1/2</sup>
Tvrдость	12-20	GPa
Fyzikální vlastnosti		
Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Hustota	3,8 - 4,022	g/cm <sup>3</sup>
Pórovitost	0	%
Absorpce vody	0	%
Teplota tavení	2000-2090	°C
Teplotní součinitel roztažnosti	7-8E-6	K <sup>-1</sup>
Max. provozní teplota	1750-1800	°C
Tepelná vodivost	26-39	W/m.K
Měrné teplo	880	J/kg.K
Elektrická pevnost	10-35	kV/mm
Měrný odpor	>10 <sup>14</sup>	Ω.cm
Relativní permitivita	12,6	-

#### 4.3.1 Klíčové vlastnosti

Níže charakterizované vlastnosti dle literatury [12], [16], [17] udávají hlavní důvody, proč se zabývat zpracováním oxidových kovů. V případě této diplomové práce konkrétně oxidu hlinitého.

a) Mezi hlavní přednost oxidové keramiky  $Al_2O_3$  patří:

- tvrdost a odolnost proti otěru,
- dobrá tepelná vodivost,
- vysoká pevnost a tuhost,
- vynikající rozměrová a tvarová kompatibilita,
- čistota provedení od 94 % - 99,8 % v závislosti na aplikaci použití,
- vynikající dielektrické vlastnosti,

- odolnost vůči kyselinám a zásadám při zvýšené teplotě.

b) Mezi výrazné nevýhody patří:

- vysoká křehkost,
- neodolnost vůči teplotnímu šoku.

#### 4.3.2 Užití oxidu hlinitého v praxi

Oxid hlinitý se v praxi dle literatury [16] používá buď v monokrystalické formě dopovaný chromem (mono), nebo v polykrystalické formě (poly).

- brusná média (poly),
- snímače měření teploty (poly),
- vysokonapěťové izolátory (poly),
- těsnící kroužky (poly),
- vysokoteplotní elektrické izolátory (poly),
- nosné destičky (poly),
- ochranné vesty (chránič páteře); (poly),
- elektrotechnické substráty (poly),
- trubice pro plynové lasery (mono),
- substrát integrovaných obvodů (mono),
- optický člen v laserech (mono).

#### 4.4 Vlastnosti dalších keramických materiálů a skel

Mezi další vhodné materiály technické keramiky a skel patří oxid hořečnatý ( $MgO$ ), oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ ), oxid chromitý ( $Cr_2O_3$ ), křemenné sklo ( $SiO_2$ ). Přehled vlastností je v tabulce 4 [18], [19], [20], [21].

Materiály na bázi  $ZrO_2$  lze charakterizovat výbornými znaky, jako jsou: vysoká pevnost, lomová houževnatost či chemická odolnost. Tyto charakteristické vlastnosti předurčují oxid zirkoničitý k práci v náročných podmínkách, jako jsou:

- řezné nástroje technicky náročných materiálů,

- keramická ložiska,
- biomechanika (implantáty kolenního kloubu, implantáty bederního kloubu),
- kyslíkové senzory,
- tepelně – izolační povlaky.

Materiály na bázi  $MgO$  mají vynikající elektrické a žárupevné (tepelné vlastnosti) a používají se jako:

- žárupevné materiály,
- vysokoteplotní kelímky,
- pouzdra na termočlánky.

*Oxid chromitý* je amorfni oxid, který se rozpouští v kyselinách a využívá se jako ochranný materiál pro: nerezavé oceli, legované oceli apod. Při depozici  $CrO_2$  na materiál se zvyšuje jeho tvrdost a odolnost proti korozi.

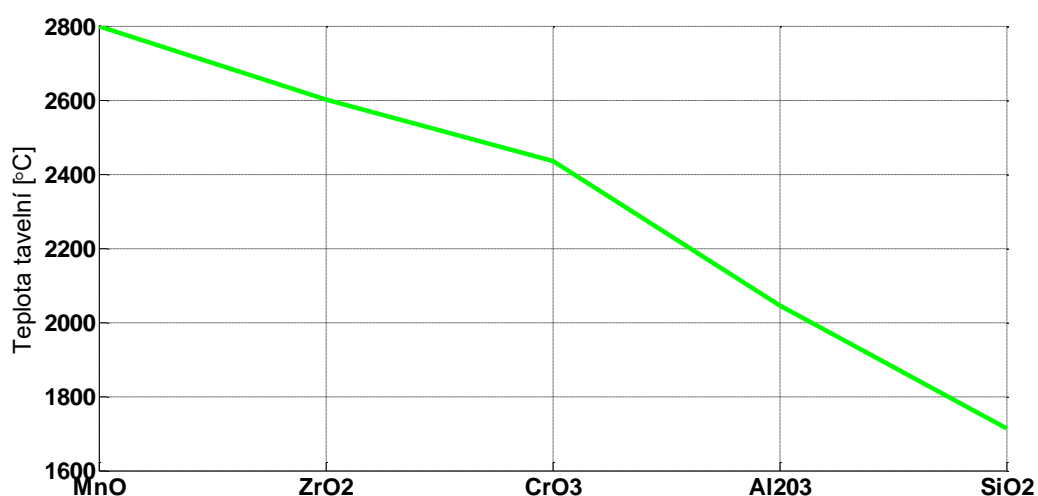
*Oxid křemičitý* nebo také křemenné sklo je specifické svými vlastnosti mezi které patří:

- chemická odolnost vůči vodě, kyselinám a vodným roztokům,
- nízká teplotní roztažnost, která přispívá k odolnosti vůči teplotním šokům

Oblasti použití křemenného skla je dána jeho vlastnostmi. Používá se v baňkách halogenových zářivek, optických přístrojích, v součástech ultrafialových světelných zdrojů, nebo pro svoji čirost jako optická vlákna.

Tabulka 4: Vlastnosti oxidové keramiky a skla

Mechanické vlastnosti						
Vlastnost při teplotě 20-25 °C	Materiál					Jednotka
	$Al_2O_3$	ZrO <sub>2</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
Yongův (elastický) modul	340-400	200 250	250	100-105	75	GPa
Pevnost v tahu	350-580	500-710	100-150	210-230	155	MPa
Pevnost v tlaku	690-5500	1900 - 2000	-	-	-	MPa
Poissonovo číslo	0,23-0,30	0,3-0,32	0,2-0,37	0,21-0,27	0,19	-
Lomová houževnatost	3,3-4,8	6 - 15	2,7-2,8	3,7-4,1	0,67	Mpa.m <sup>1/2</sup>
Tvrdość	12-20	12-13	5-7	27 30	9,5	GPa
Fyzikální vlastnosti						
Hustota	3,8-4,022	5,9-6,1	3,58	5,21	2,64	g/cm <sup>3</sup>
Pórovitost	0	-	-	-	-	%
Absorpce vody	0	-	-	-	-	%
Teplota tavení	2000-2090	2600	2800	2435	1713	°C
Teplotní součinitel roztažnosti	7-8E-6	10,5-11E-6	1,08E-05	7,8-8,1E-6	7,50E-07	K <sup>-1</sup>
Max. provozní teplota	1750-1800	1500	1980-2130	1400-1650	1397	°C
Tepelná vodivost	26-39	2-4,5	42	10-33	1,5	W/m.K
Měrné teplo	880	400-500	877	-	730	J/kg.K
Elektrická pevnost	10-35	11-13	-	-	40	kV/mm
Měrný odpor	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>8</sup>	>10 <sup>12-13</sup>	>10 <sup>8</sup>	>10 <sup>11</sup>	Ω.m
Relativní permitivita	12,6	12,5	8,2	12	3,7	-



Obrázek 4: Teplota tavení vybraných oxidů a skla



## 4.5 Pravidla bezpečnosti při práci s $Al_2O_3$

Z hlediska GHS (Globálně harmonizovaný systém klasifikace a označování chemikálií) se dle dostupného bezpečnostního listu [22] nejedná o nebezpečnou látku a ani nepředstavuje jakoukoliv jinou hrozbu.

Pokyny pro provádění první pomoci jsou standartní v rámci styku s jakýmkoliv jiným druhem chemikálie.

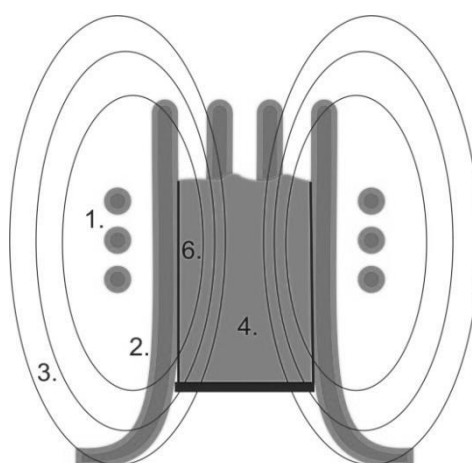
- Při vdechnutí dopravit postiženého na čerstvý vzduch.
- Při styku s kůží omýt mýdlem a vodou.
- Při styku s očima, oči vypláchnout.

V důsledku opožděných symptomů se mohou objevit dýchací potíže, kašel, gastrointestinální poruchy, bolest hrudníku atd.

## 5 Technologie tavení $Al_2O_3$ ve studeném kelímku

Studený kelímek je zařízení, které slouží k vysokofrekvenčnímu ohřevu vodivých i nevodivých materiálů pomocí elektromagnetické indukce. Moderní konstrukční řešení umožňují konstruovat kelímky pro teploty nad 3000 °C. Principem studeného kelímku je soustředění zdroje tepla uvnitř taveného materiálu. Aby nedocházelo k přilnutí taveného materiálu ke stěně kelímku, musí být kelímek intenzivně chlazen vodou. Toto ochlazování vytváří mezi stěnou kelímku a taveným materiálem tenkou, několika milimetrovou ochranou krustu. Krusta rovněž slouží jako taková ochrana proti prosakování taveniny mezi svislými segmenty intenzivního chlazení.

Jednoduchý princip ohřevu materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeného kelímku je znázorněn na obrázku 5. Elektromagnetické pole (3) vybuzené v závitěch cívky - induktoru (1) ohřívá materiál (4) uvnitř studeného kelímku (2).



Obrázek 5: Teoretický model studeného kelímku [23]

Vznik studeného kelímku „indukčního ohřevu“ má své opodstatnění. Pokud je pro ohřev použita elektromagnetická indukce, teplo vzniká přímo uvnitř ohřívaného materiálu, a ne přenosem tepla vedením jako u konvenčního ohřevu materiálů. Tímto způsobem je docíleno zrychlení celého tavícího procesu. Vhodnou volbou kmitočtu, který se pohybuje od 90 kHz do 5 MHz, lze také řídit rozložení tepla v samotné sázce.

## 5.1 Tvarování materiálu ve studeném kelímku

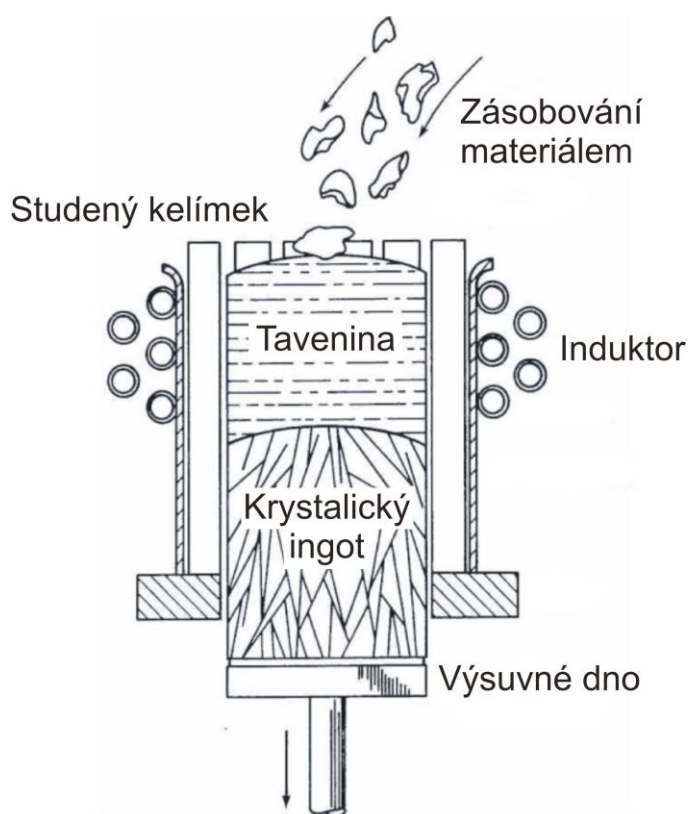
Ve studeném kelímku dochází k tvarování materiálu dvěma základními způsoby:

### 5.1.1 Postupné dávkování

Při postupném dávkování materiálu má kelímek N závitový induktor. Kelímek je vzhledem k induktoru pohyblivý. Surový materiál ve formě prášků eventuálně granulí je postupně přidáván do kelímku k následujícímu roztavení. Při následném přidávání materiálu do kelímku se kelímek pohybuje dolů ve směru tuhnutí. Velikost výsledného tuhého materiálu je dána objemem kelímku. [24], [25]

### 5.1.2 Nepřetržité dávkování

Při nepřetržitém dávkování materiálu je poloha kelímku a induktoru neměnná. Kelímek má pohyblivé dno, které umožňuje průběžné tavení a chladnutí ingotu. Kelímek se průběžně dávkuje, tak aby bylo v kelímku vždy určité množství taveniny, tak aby nedošlo k zastavení tavícího procesu. Rychlost sjíždění dna kelímku má vliv na jeho následnou krystalizaci viz kapitola 5.5. Velikost výsledného ingotu je dána konstrukčními parametry kelímku. [24], [25]



Obrázek 6: Model průběžného tavení ve studeném kelímku [26]

## 5.2 Konstrukce studeného kelímku

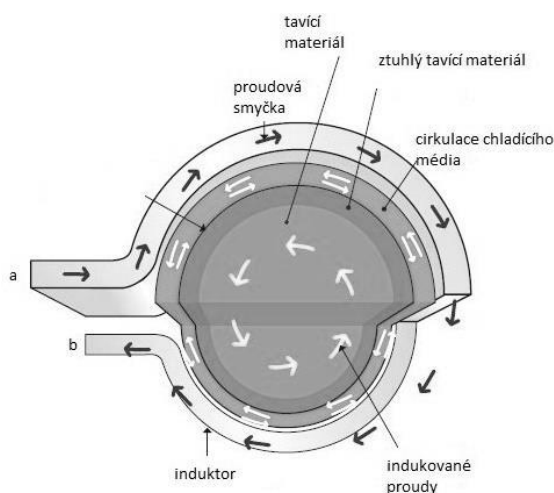
Z konstrukčního hlediska se v současné době vyrábějí dva typy studeného kelímku. Prvním typem studeného kelímku je kelímek s odděleným induktorem, který se ale příliš nehodí pro tavení oxidů kovů a je spíše vhodný k tavení skel. Druhým typem je kelímek, kde induktor tvoří samotnou stěnu kelímku tzv. segmentový kelímek.

### 5.2.1 Induktorový kelímek

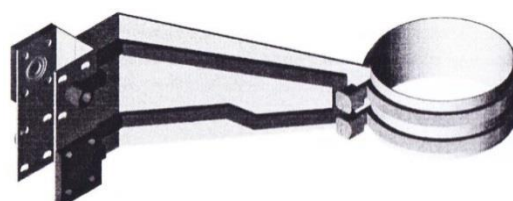
Induktorový kelímek, jak je vidět na obrázku 7, tvoří jednozávitový prstencový induktor. Induktor je vyráběn převážně z mědi. Mezi body a-b je připojen vysokofrekvenční měnič. Pro napájení slouží tranzistorové měniče. Prstencový induktor slouží zároveň jako kelímek pro tavení materiálu, tímto uspořádáním tak lze docílit: [8], [27]

- Tavení materiálů s vysokým bodem tavení viz tabulce 4 (v tabulce 4 jsou krom skla  $SiO_2$  i oxidové sloučeniny materiálů, které se ale příliš nehodí pro induktorový kelímek).
- Vyšší elektrická účinnosti vlivem minimálních ztrát, které by vznikly v dodatečném kelímku, tzn. v kelímku nevznikají ztráty, které by byly způsobeny vířivými proudy v kelímku se uzavírající. A také odpadají ztráty v mědi.

Aby nedocházelo k přímému kontaktu taveného materiálu se stěnou kelímku (induktoru) musí být kelímek (induktor), jak již bylo zmíněno neustále chlazen. Kelímek je chlazen chladícím médiem, obvykle vodou, která proudí v dutinách induktoru. Dno kelímku je rovněž chlazeno a vyrobeno z mědi. Tím, že je kelímek neustále chlazen, dochází mezi taveninou a stěnou kelímku k vytvoření ztuhlého tavícího materiálu „ztuhlý tavící materiál“, jak je vidět na obrázku 7. [8], [27]



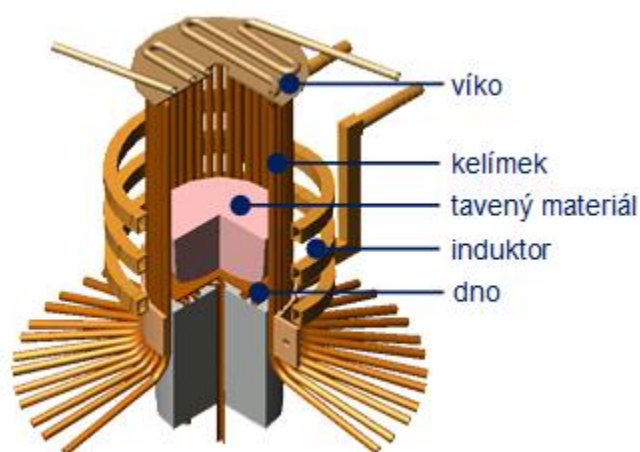
Obrázek 7: Model induktorového kelímku [28]



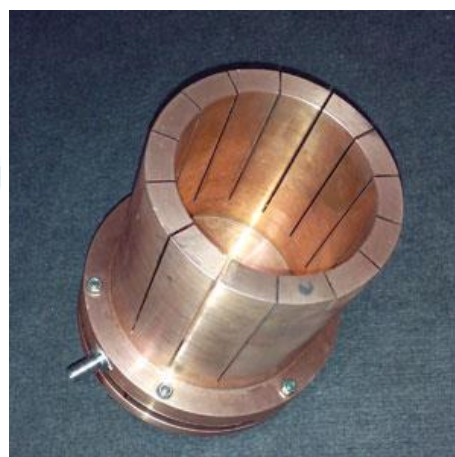
Obrázek 8: Reálný induktorový kelímek [24]

### 5.2.2 Segmentový studený kelímek

Segmentový studený kelímek je tvořen  $N$  závitovým induktorem a konstrukčními segmenty. Z konstruktérského hlediska je neoptimálnější vyrábět induktor pouze kruhového průřezu. Segmenty tvořící opláštění kelímku mohou mít jak kruhový, tak i obdélníkový tvar, nicméně i tady se upřednostňují kruhové profily. Materiálem pro výrobu segmentů je převážně měď z důvodu její vysoké elektrické vodivosti. Vnitřní teplota samotné vsázky může dosahovat až  $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , proto jsou segmenty připojeny na přívodní a odtokové kanálky, které slouží k cirkulaci chladicí vody. Induktor je spolu se dnem kelímku taktéž vyroben z mědi a intenzivně chlazen vodou. Teplota vody proudící cívkou má vliv na její účinnost a neměla by překročit hodnotu  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tak aby nedocházelo k jejímu odpařování. Návrh chladicí soustavy kelímku je velmi složitý proces, jelikož se musí zohlednit velké množství parametrů, mezi které například patří: rychlost proudící kapaliny, její schopnost odvádět teplo ze segmentů apod. [8], [27]



Obrázek 9: Model segmentového kelímku [29]



Obrázek 10: Reálný segmentový kelímek [30]

Tím, že je kelímek rozdělen na segmenty, dochází k zmenšení jeho vnitřních ztrát, které jsou důsledkem zmenšení plochy, přes kterou by se vířivé proudy uzavíraly. Mezera mezi jednotlivými segmenty musí být volena tak, aby byl možný přenos elektromagnetické energie do vsázky. Aby nedocházelo k prosakování vsázky z kelímku, musí být tato mezera co nejmenší. Aby bylo možné kelímek přes segmenty dostatečně uchladiť je nutno znát jejich počet. [8], [27]

Počet segmentů tvořící kelímek je dán vztahem:

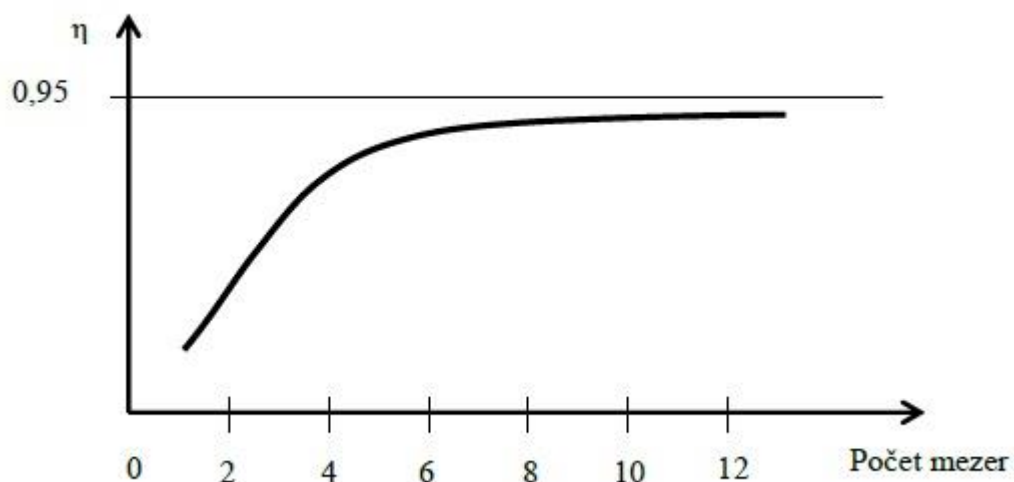
$$\text{Počet segmentů kelímku:} \quad n = \frac{\pi \times D_v}{b + 1} < \frac{\pi \times D_v}{b + 1} \quad (40)$$

$D_v$  je průměr vsázky v mm

$b$  je šířka segmentu v mm

1 je hodnota 1 mm pro minimální šířku mezery mezi segmenty

Nicméně z obrázku 11 je patrné, že od určitého počtu segmentů dochází k ustálení účinnosti na konstantní hodnotu. Můžeme tedy konstatovat, že počet segmentů má svůj význam pouze v závislosti na velikosti kelímku, respektive velikosti vsázky.

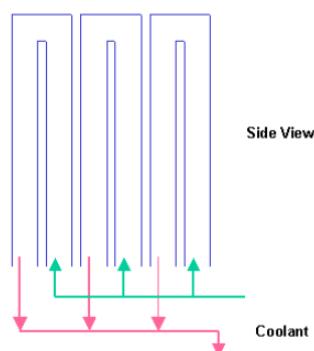


Obrázek 11: Účinnost studeného kelímku [28]

### 5.3 Princip chladicího systému

Systém chladicího okruhu slouží k intenzivnímu ochlazování studeného kelímku. Jedná-li se o induktorový kelímek je ochlazován jen induktor. U kelímku složeného ze segmentů jsou ochlazovány jak segmenty i samotný induktor. Aby nedocházelo k oxidování a zanášení vnitřních stěn chladicího systému, používá se jako chladicí médium speciálně upravená voda, která prošla chemickou úpravou deionizace a demineralizace.

Každý jednotlivý blok segmentového kelímku má dvě části. Přítokovou a odtokovou část. Samotný princip chladicího systému je poté navržen tak, že chladicí voda přitéká do přítokového kanálku, odkud putuje do vzduchového chladiče a po ochlazení zpět do přítokového kanálku. Je nutné mít na zřeteli, že cirkulace chladicího média je zajištěna pomocí náhradního chladicího systému. Při výpadku elektrické energie by tak v důsledku absence chladicího okruhu došlo k roztavení kelímku a ke kontaminaci vsázky vodou. Je tedy nutné navrhnout systém chladicího okruhu tak, aby k těmto výše zmíněným skutečnostem nedocházelo. [32]



Obrázek 12: Schéma chlazení segmentového kelímku [32]

## 5.4 Startovací fáze

Tavení oxidů kovů a skel ve studeném kelímku je oproti tavení kovů v kelímku procesně náročnější. Jak již bylo několikrát zmíněno, oxidy kovů a skel jsou elektricky nevodivé materiály. Při pokojové teplotě se hodnoty elektrické vodivosti pohybují v rozmezí  $10^{-12} - 10^{-2} [S/m]$ . Z důvodu takto nízkých hodnot musí dojít k nastartování tavby vsázky (předehřátí materiálu) jiným způsobem než pomocí elektromagnetické indukce. S ohledem na hodnoty konduktivity je nutné určit a hlídat některé charakteristické parametry, který by při nesprávném určení negativně ovlivnily samotný proces tavení.

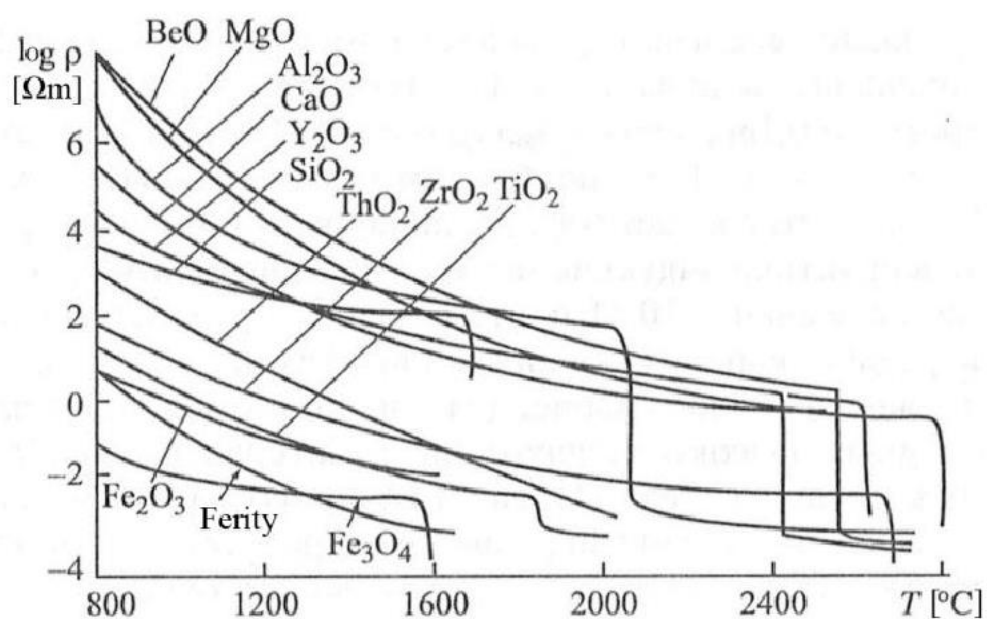
Jedním z nejdůležitějších parametrů je závislost měrného odporu na teplotě, který je znázorněn na obrázku 13. V tabulce 5 je poté znázorněna souvislost měrného elektrického odporu na hodnotě optimální frekvence pro zahájení tavby. Tato frekvence je dána vztahem:

$$\text{Optimální frekvence pro} \quad f_{min} \geq 3 \times 10^6 \times \frac{\rho}{D_v \times v^2} \quad (41)$$

tavbu:

V kapitole 5 bylo zmíněno, že frekvence pro indukční ohřev se pohybují od 90kHz do 5MHz (ojediněle se může vyskytnout kmitočet i 10MHz). Z tabulky 5 lze nicméně vyčíst, že vhodný kmitočet pro oxid hlinitý v pevné formě je 66GHz, což neodpovídá tavným frekvencím. Z tohoto důvodu musí být materiál předehřát, aby byla snížena hodnota elektrického odporu taveného materiálu.





Obrázek 13 Závislost měrného odporu na teplotě [33]

Tabulka 5: Hodnoty elektrického odporu a kmitočtu vybraných oxidů kovů

Materiál	Skupenství	Teplota [°C]	elektrický odpor [Ω.cm]	Kmitočet [kHz]
$Al_2O_3$	pevné	1875	$2,2 \times 10^4$	$6,6 \times 10^7$
$Al_2O_3$	tavenina	2200	$1 \times 10^{-1}$	300
$Y_2O_3$	pevné	1500	$3 \times 10^1$	$90 \times 10^3$
$Y_2O_3$	tavenina	2430	$5 \times 10^{-2}$	150
$ZrO_2$	pevné	2000	1	$3 \times 10^3$

### 5.4.1 Nastartování tavby oxidů

Pro nastartování tavné fáze (set-up, start-up) se používají různé metody. Každá metoda má svá pro a proti v závislosti na požadovaných vlastnostech materiálu. Nastartování tavby vsázky lze docílit pomocí povrchového ohřevu, energií exotermické oxidace, elektricky vodivého prstence.

- *Ohřevu elektrickým obloukem*

Využití elektrického oblouku pro nastartování počáteční tavby je ojedinělé. Principem ohřevu elektrickým obloukem je využití tepla oblouku, který se vytvoří buď na povrchu, nebo vně sázky.

- *Ohřevu plynovým hořákem*

Využívání plynového hořáku pro nastartování počáteční tavby je náročné, co do výsledných kvalit požadovaného materiálu. Při plynovém ohřevu vsázky dochází k vzájemnému působení spalin a tavného materiálu. Tímto způsobem počátečního ohřevu může dojít ke kontaminaci samotné vsázky.

- *Ohřevu plazmovým hořákem*

Principem plazmového hořáku je přeměna elektrické energie na energii tepelnou usměrněnou proudem plazmatu. Při plazmovém ohřevu vsázky je využíváno nízkoteplotního plazmatu s teplotou v rozmezí (10 000–14 000) °C, který je vytvořen v plazmovém hořáku.

Při tavení elektricky nevodivých materiálů se v tomto hořáku využívá elektrického oblouku koncentrovaného tryskou s aerodynamickým spoluúčinkem plazmového plynu a formování sloupce plazmatu induktorem. Jako plazmový plyn se nejčastěji používá argon, dusík či směs argonu s dusíkem.

- *Využitím energie exotermické oxidace kovu, jehož oxid podléhá tavení*

Při startování pomocí malého množství kovu se využívá kovů samotných oxidů, které podléhají oxidaci, a to z důvodu výrazně nižší elektrické vodivosti původního čistého kovu.

Toho způsobu předehřátí vsázky se využívá převážně u oxidů  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $Cr_2O_3$ . Vodivý kov (nejčastěji se využívá hliníku, zirkonia, chromu) je vložen do vsázky ve formě malých částic, jako jsou granule či prášek, také aby bylo zabráněno možnému vzplanutí

oxidu. Kov se zahříván pomocí elektromagnetické indukce, vyvolávající vířivé proudy, které se indukují v čistém kovu a tím dochází k jeho ohřevu.

Po nějaké době dojde k mísení kovu s taveným materiálem => dochází ke změně elektrické vodivosti vsázky a k jejímu roztavení. Při vyšších teplotách tavení je nutno brát v potaz chemické a fyzikální vlastnosti kovů tak, aby nedošlo ke vzplanutí vsázky. Vzplanutím by mohlo dojít ke kontaminaci vsázky s následnou změnou požadovaných vlastností, co do čistoty materiálu.

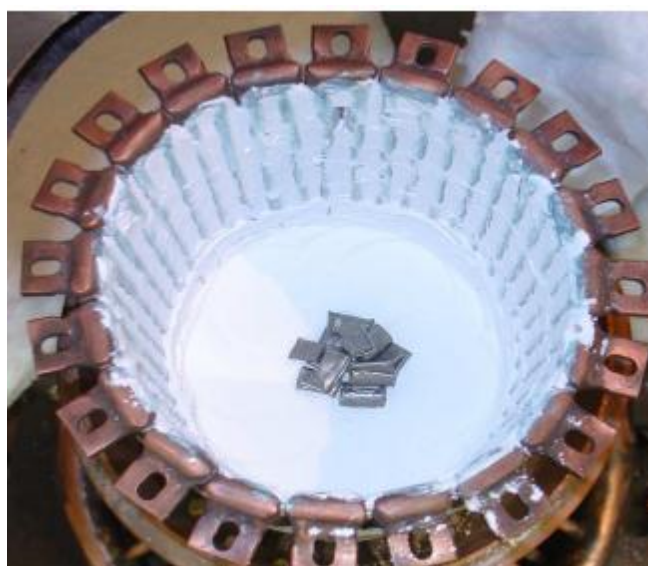
Množství kovu, které lze přidat do požadovaného objemu  $V_v$  je možné stanovit ze vztahu:

$$g = Z \times V_v \quad (42)$$

Množství kovu pro nastartování tavby:  $V_v$  – Objem vsázky

Tabulka 6: Měrná hmotnost kovů

Materiál	Hliník	Titan	Zirkon	Chrom	Berylium	Ytrium	Skandium
$Z [kg/m^3]$	480	550	1150	1220	420	985	515



Obrázek 14: Kov pro exotermickou oxidaci [34]

- Přenosu tepla z elektricky vodivého materiálu, který je umístěn v kelímku se vsázkou.

Tento způsob nastartování tavby se využívá u skel a YBCO. Na vsázkou je umístěn elektricky vodivý materiál ve tvaru např. kroužku, nejčastěji z iridia, uhlíku nebo grafitu. Princip ohřevu je stejný, jako u výše zmíněného způsobu ohřevu, tedy pomocí vířivých proudů. Rozdíl nastává až v závěrečné fázi, kdy je kruh po dostatečném zvýšení elektrické vodivosti vsázky odebrán a vířivé proudy již tento materiál taví.



Obrázek 15: Vodivý materiál ve tvaru kroužku [35]

## 5.5 Fáze krystalizování ve studeném kelímku

Jednou z klíčových vlastností při tavení materiálů a skel při použití metody indukčního ohřevu studeného kelímku je fáze, která se nazývá krystalizace. Růst krystalů a jejich následné tuhnutí v ingot, má rozhodující roly v praxi.

Krystaly žárupevných oxidů kovů představují v současné vědecké oblasti moderních materiálů a technologií důležitou roli. Krystaly se obecně uplatňují v NLO, aktivních laserech, dále také jako nezbytné součásti elektrotechnických zařízení a v dalších oblastech energetiky. Jak bylo již zmíněno v kapitole 4.3.2, tvar (růst) krystalů, v případě této práce krystalizace oxidu hlinitého, má zásadní vliv na možnostech jeho uplatnění v praxi. Jednou z nejdůležitějších, rolí při růstu krystalů je rychlost chladnutí vsázky. Hodnoty teplot tavených materiálu se pohybují od 1500 °C a výše viz Tabulka 6.

*Proces krystalizace lze spustit:*

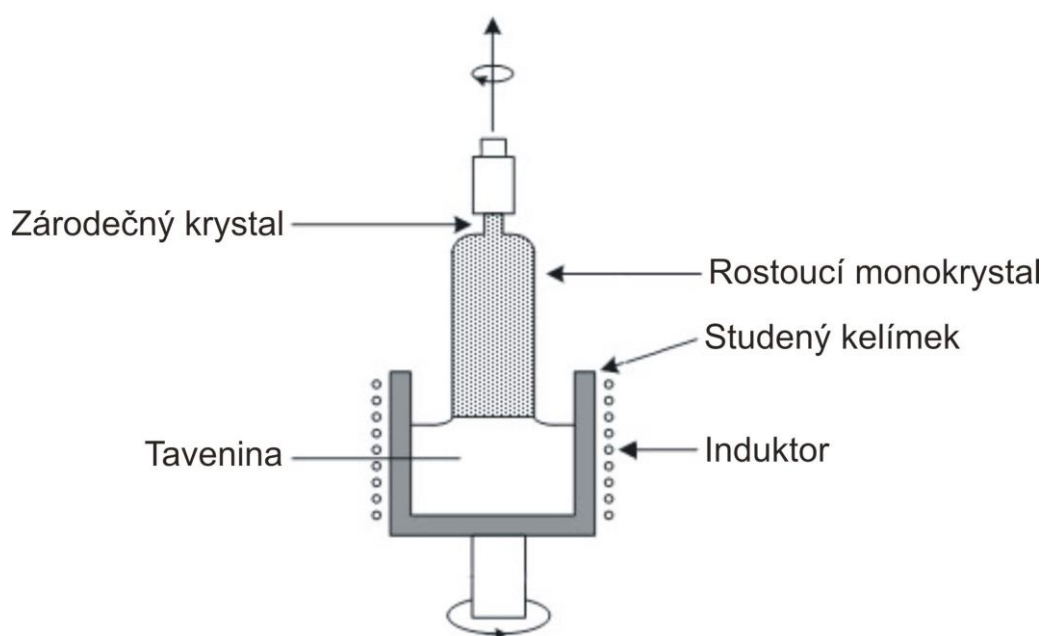
- vypnutím napájecího zdroje,
- litím vsázky do vody,
- ochlazováním vsázky pomocí proudu vzduchu,
- řízenou krystalizací ovládnutím teplotního pole uvnitř kelímku.

### Metody používané při krystalizaci

#### a) Czochralského metoda

Principem Czochralského metody je vytvoření syntetického monokrystalického zárodku. Tento zárodek rotuje v tavenině na tyči, proti směru otáčení kelímku a tím postupně dochází k jeho vytahování. Na rozhraní tuhé a kapalné fáze taveného materiálu dochází k samotnému procesu tuhnutí taveniny. Krystalická struktura monokrystalu je v tomto průběhu zachována. Výhodou této metody je čistota konečného ingotu, jelikož nečistoty zůstávají v kapalné fázi. [24], [31]

Velikost (rozměry) taženého ingotu jsou ovlivněny teplotou vsázky a rychlostí otáčení navíjejí tyče s ingotem.



Obrázek 16: Czochralského metoda krystalizace [36]

#### b) Přímá metoda

Při průběžném tavení materiálu ve studeném kelímku, dochází k tvorbě krystalů způsobem, který je znázorněn na obrázku 17.

V porovnání s ostatními metodami, vytvářející žárupevné odolné krystaly, má přímá krystalizace několik výhod a to především: [24], [31]

- Krystalizování lze uskutečnit bez vnější atmosféry.
- Díky otevřenému povrchu kelímku, lze do roztavené vsázky přidat legující prvky. Legující prvky se následně uplatňují jako čistící filtr zabráňující kontaminaci.
- Snižování nečistot vsázky. Snižování je způsobeno při velkoobjemovém konvexním míchání vsázky.

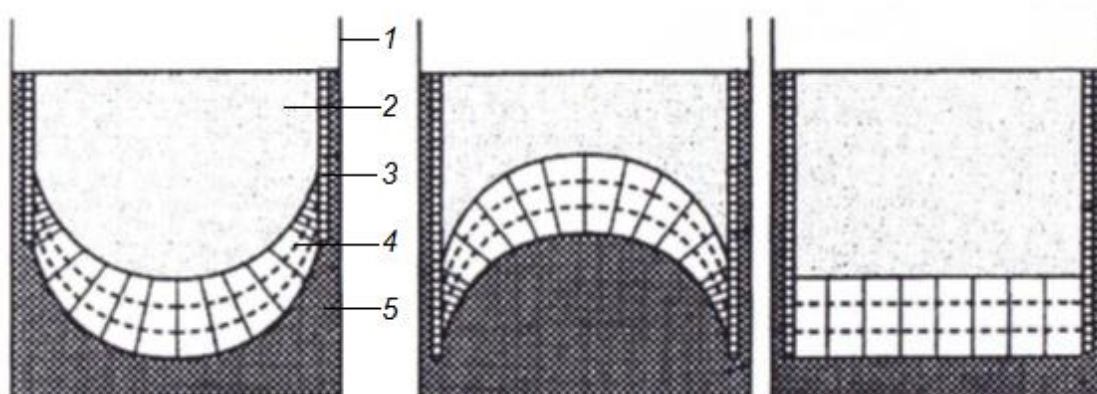
Velikost krystalu při přímé krystalizaci je ovlivněna několika faktory: [24], [31]

- objemem tavené vsázky,
- směrem krystalizace,
- pohybem studeného kelímku oproti zdroji energie vytvářející elektromagnetické pole,
- napájecím VF generátorem.

Tvarování krystalu při přímé krystalizaci je dáno těmito parametry: [24], [31]

- elektrickou vodivostí vsázky,
- teplotou tavení vsázky.

V závislosti více zmíněných parametrech může hladina vsázky studeného kelímku nabývat tří směrů a to: konkávního, konvexního a vodorovného. Viz obrázek 16.



Obrázek 17: Růst krystalu ve studeném kelímku a) konkávní, b) konvexní, 3) vodorovná krystalizace; 1) kelímek, 2) tavenina, 3) krystalizace podél stěny kelímku, 4) krystalizace podél dna kelímku, 5) skull vrstva [24]



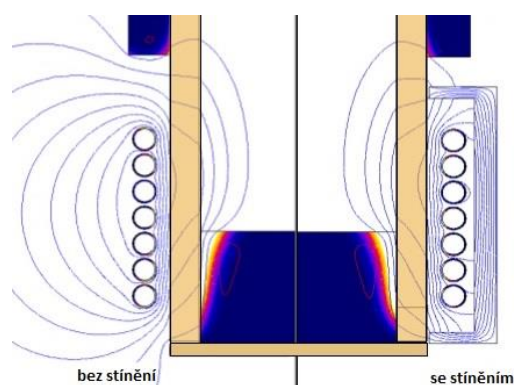
Obrázek 18: Jednorázový odlitek  $Al_2O_3$ ; červená) nejteplejší místo při tavbě, zelená) směr růstu krystalů, modrá) skull vrstva

## 5.6 Off-gas systém

Off-gas systém slouží k odstraňování nežádoucích plynů, které vznikají při procesu tavení ve studeném kelímku. Typ nežádoucích sloučenin, které se odpařují, z taveného materiálu se odvíjí od chemického složení tavené vsázky. Mezi tyto nežádoucí plyny patří např.: oxidy dusíku, síry, uhlíku atd., dále se mohou objevit zbytky radioaktivních prvků a těžkých kovů. Teplota nežádoucích plynů se pohybuje od 100 °C do 200 °C. Mimo to Off-gas systém udržuje požadovanou hodnotu tlaku vzduchu v systému a také obstarává atmosféru pro tavení. Inertní atmosférou se může stát i dusík, který zůstává s off-gas systémem, při odbourání kyslíku při tavení. [32]

## 5.7 Elektromagnetické stínění studeného kelímku

Obecně lze říci, že elektromagnetické stínění má za úkol vyloučit nežádoucí vyzařování elektromagnetického vlnění, se kterým může přijít do kontaktu personál obsluhující zařízení či objekty nacházející se v blízkosti jeho zdroje. Elektromagnetické vlnění lze nejčastěji omezit kovovým krytem (princip Faradayovy klece), pomocí transformátorových plechů, nebo dodržení vzdálenostních limitů. Elektromagnetické stínění se používá hlavně u velkých kelímkových systému. Odstínění malých kelímků je technologicky problematické, důvodem jsou rozměry samotného kelímku [32].



Obrázek 19: Stínění induktoru studeného kelímku [38]



## 6 Energetická bilance

Tavení materiálů ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce je po energetické stránce velmi náročný proces. Při navrhování tavicího zařízení je zapotřebí stanovit optimální konstrukční parametry celého systému. Hlavními prvky systému jsou: induktor, vsázka, segmenty kelímku, měnič.

Aby bylo možné dosáhnout co nejvyšší efektivity tavicího procesu ve studeném kelímku je nutná minimalizace elektrických a tepelných ztrát. Velikost ztrát je ovlivněna, respektive lze je snížit vhodnou konstrukcí kelímku, geometrií induktoru, materiálem kelímku a induktoru, rozměry a parametry vsázky atd.

### 6.1 Tepelné ztráty ve studeném kelímku

$$\text{Teplotní bilance:} \quad P_c = P_{suma} \times P_v [W] \quad (43)$$

$$\text{Ztrátový výkon:} \quad P_{suma} = P_d + P_s + P_p [W] \quad (44)$$

$$\text{Ztráty stěnou kelímku} \quad P_s = \pi \times d_{kel} \times h_{kel} \times q_w [W] \quad (45)$$

(ztráty vedením):

$$\text{Měrné tepelné ztráty do} \quad q_w = \frac{\Delta T}{\frac{\xi}{\lambda_s} + \frac{x_p}{\lambda_p} + \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha}} [W/m^2] \quad (46)$$

stěn kelímku: (pro  
rovnou stěnu)

$x$  = rozměrové parametry (m)

$\lambda$  = tepelná vodivost (W/mK)

$$\text{Ztráty sáláním:} \quad P_p = \frac{\pi}{4} d_{kel}^2 \times \varepsilon_0 \times \sigma (T^4 - T_{ext}^4) [W] \quad (47)$$

$P_v$  je výkon pro tavení vsázky

$P_d$  jsou ztráty do dna kelímku

$P_s$  jsou ztráty do stěn kelímku

$P_p$  jsou ztráty sáláním

$\Delta T$  je rozdíl mezi teplotou tání materiálu  $T_1$  a teplotou chladicí vody  $T_0$ . Vztah je dán

rovnici:

$$\Delta T = (T_1 - T_0) \quad (48)$$

$\alpha$  je součinitel přestupu tepla mezi stěnou kelímku a vodou [ $W/m^2K$ ],

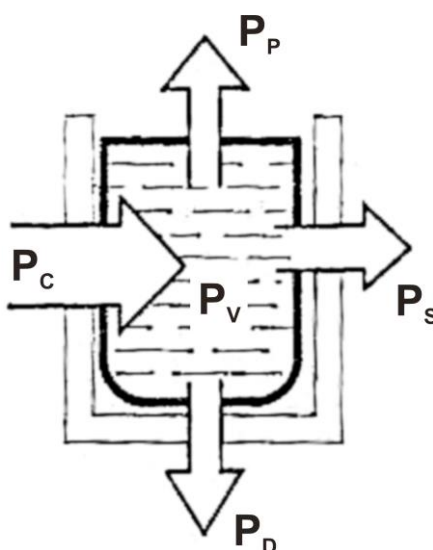
$\lambda_s$  je tepelná vodivost ztuhlé vrstvy [ $W/m^2K$ ],

$\lambda_p$  je tepelná vodivost mezery mezi kelímkem a ztuhlé vrstvy [ $W/m^2K$ ],

$x_p$  je vzdálenost mezi ztuhlou vrstvou a kelímkem [ $m$ ],

$\lambda_k$  je tepelná vodivost stěny kelímku [ $W/m^2K$ ],

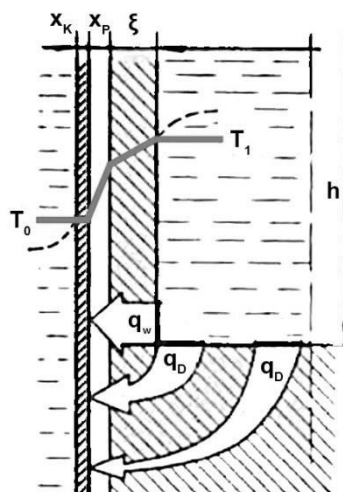
$x_k$  je tloušťka stěny kelímku [ $m$ ].



Obrázek 20: Energetická bilance [39]

Tepelné ztráty, které procházející stěnou kelímku jsou poměrně vysoké a jejich podíl na celkových ztrátách, při tavení ve studeném kelímku je přibližně 60 %. Tyto ztráty jsou závislé především na rozměru taveniny. Se zvětšující se rozměry taveniny, rostou i ztráty stěnami kelímku a povrchu vsázky

Z obrázku 16 lze vypořadovat, že ztráty, resp. tok proudění tepla ze dna kelímku  $q_D$  (vsázky) se ohýbá a směřuje tak ke stěnám kelímku. Tepelné ztráty dnem kelímku se podílí přibližně 20 % na celkových ztrátách. Výpočet tepelných ztrát proudící ze dna kelímku je obdobný jako u výpočtu měrných tepelných ztrát stěnou kelímku (studený kelímek musí mít pro tento případ vodou chlazené dno) viz. rce. 46.



Obrázek 21: Ztráty dnem kelímku [39]

Zbýlých 20 % ztrát připadá na ztráty sáláním. Tyto ztráty vznikají při vysokých teplotách tavení. Možnost jejich ovlivnění (snížení) je dána způsobem tavení. Viz. kapitola 3.1.3. (Každý povrch, který má teplotu vyšší, než 0 K vyzařuje energii formou tepelného záření, která se šíří všemi směry. V případě studeného kelímku se jedná o ztráty, které se při tavení uvolňují z povrchu vsázky.)

Celkové samotné tepelné ztráty studeného kelímku jsou tedy dány rovnicí 44.

Celková tepelná účinnost tavení materiálu ve studeném kelímku je dána poměrem mezi výkonem na tavení vsázky a celkovým dodávaným příkonem.

$$\text{Tepelná účinnost:} \quad \eta_T = \frac{P_v}{P_c} \quad (49)$$

## 6.2 Elektrické ztráty

Elektrické ztráty, které vznikají ve studeném kelímku, jsou dány především ztrátami v induktoru a v lamelách studeného kelímku.

Ztráty v induktoru jsou ztráty, které vznikají průchodem proudu induktorem s jeho následným oteplením, vznikají tedy Joulovy ztráty. A lze je jednoduše určit ze vztahu.

$$\begin{aligned} &\text{Elektrické ztráty} \\ &\text{v induktoru:} \end{aligned} \quad P_{\text{induktor}} = R_{\text{induktor}} \times I_{ef}^2 [W] \quad (50)$$

Dalšími elektrickými ztrátami jsou ztráty v lamelách kelímku. Pro určení těchto ztrát je zapotřebí matematických modelů s následnou vitifikací jejich výsledků. Problém při

určování ztrát v segmentech kelímku nastává v orientaci proudu.

- Jednak je proud procházející induktorem opačně orientován oproti proudu procházející v lamelách kelímku.
- A také má proud indukující se v lamelách krom radiálního směru, také axiální směr a neuzavírá se ve smyčce.

### 6.3 Elektrické parametry

Elektrická účinnost je dána poměrem užitečného výkonu k celkovému příkonu. Elektrická účinnost elektricky vodivých materiálů je přibližně (30-40) % a to dle vlastností materiálů. U elektrické účinnosti elektricky nevodivých materiálů lze za odpovídajících předpokladů dosáhnout účinnosti až 90 %. Takto vysoká účinnost je zapříčiněna rozdílem elektrické vodivosti vsázky a měděným kelímkem. Vztah pro elektrickou účinnost je dán vztahem (51), pro připomenutí:

$$\eta_E = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left[ 1 + \left( 2,5 \frac{\delta}{d} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_v \mu_r}}} \quad (51)$$

Celková účinnost tavení je pak dána vztahem:

$$\eta_C = \eta_T \times \eta_E = \frac{P_v}{P_c} \times \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left[ 1 + \left( 2,5 \frac{\delta}{d} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_v \mu_r}}} \quad (52)$$

Z důvodu vysokých tepelných ztrát, které jsou vázány převážně na stěnu kelímku (60%), je vhodné používat tavení materiálů ve studeném kelímku pouze u speciálních aplikací, za účelem vysoké čistoty materiálu.

### 6.4 Produktivita tavení ve studeném kelímku

V tabulce 7 a 8 jsou zachyceny parametry produktivity tavicího procesu a energie potřebné pro tavení 1 kg vsázky, jak jednorázového, tak postupného tavení materiálů v závislosti na průřezu vsázky.

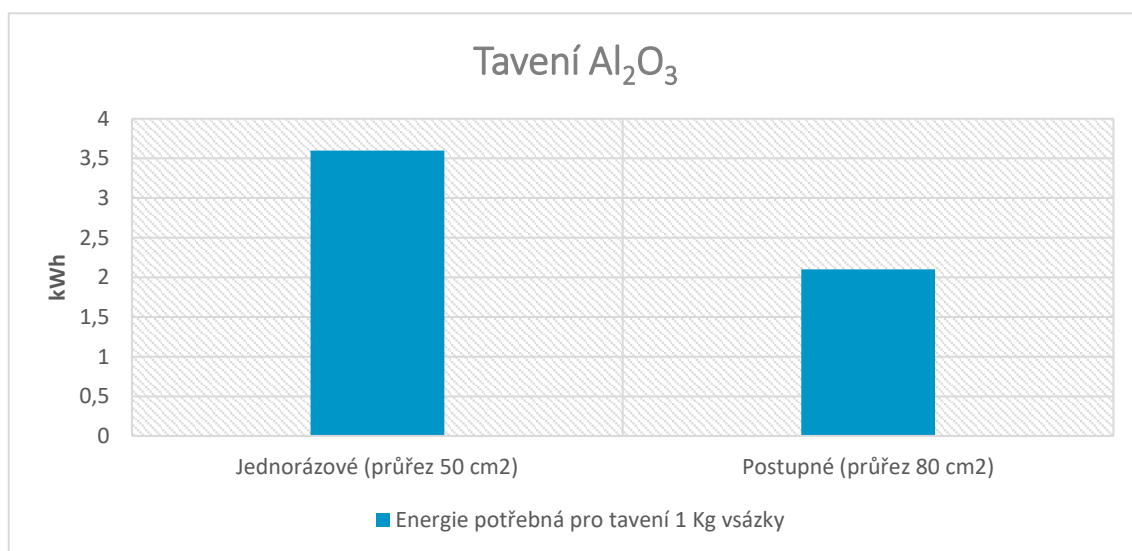
V grafech 4 a 5 je pak zachyceno vzájemné porovnání mezi jednorázovým a postupným tavením produktivity procesu a energií potřebné k tavení 1 kg vsázky  $Al_2O_3$ .

Tabulka 7: Jednorázové tavení  $Al_2O_3$ 

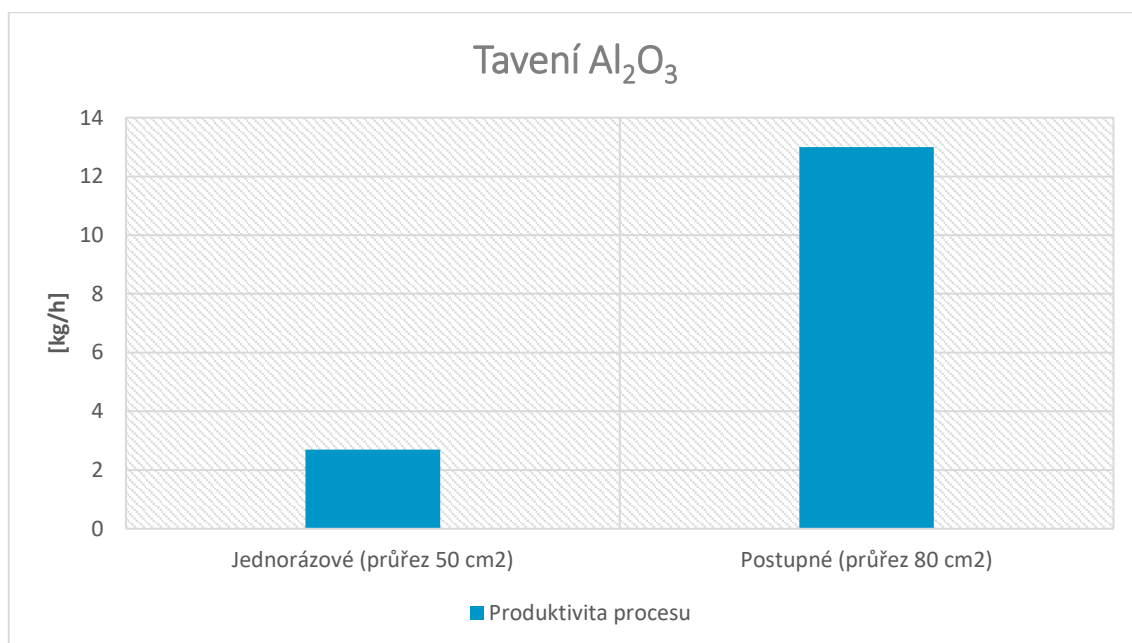
Tavený materiál	Průřez plochy taveniny [ $cm^2$ ]	Produktivita procesu [kg/h]	energie potřebná pro tavení 1 Kg vsázky [kWh]
$Al_2O_3$	50	2,7	3,6
CaO	65	3,5	8,5
ZrO <sub>2</sub>	50	2	7
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	3,1	7,6

Tabulka 8: Postupné tavení  $Al_2O_3$ 

Tavený materiál	Průřez plochy taveniny [ $cm^2$ ]	Produktivita procesu [kg/h]	energie potřebná pro tavení 1 Kg vsázky [kWh]
$Al_2O_3$	80	13	2,1
MgO	80	11,5	6
CeO <sub>2</sub>	80	9	4,5
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95	25	2,3



Obrázek 22: Energie potřebná pro tavení 1 Kg vsázky



Obrázek 23: Produktivita procesu

## 6.5 Závěry pro praxi

Možnosti uplatnění oxidu hlinitého v praxi byly popsány v kapitole 4.3.2. V této kapitole budou tedy shrnuty hlavní výhody a nevýhody tavení materiálů ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce.

### 6.5.1 Předností tavení ve studeném kelímku

- Hlavní předností tavení ve studeném kelímku je možnost tavení materiálu s teplotou tavení až 3000°C. Metoda je tedy vhodná pro materiály elektricky nevodivé, jako jsou oxidy kovů a skla, kde lze dosáhnout elektrické účinnosti až 90 %.
- Vlivem intenzivního chlazení kelímku dochází na jeho stěnách k vytvoření tenké vrstvy (skull), která brání styku taveniny se stěnami kelímku a je tím zabráněno kontaminování tavené vsázky.
- Jednou z dalších podstatných výhod je možnost nepřetržitého tavení. Pokud je kelímek opatřen posuvným dnem, lze snadno vytvářet ingoty různých rozměrů, dle typu pozdější aplikace.
- K tavení dochází vlivem elektromagnetických sil, které se podílejí na promíchávání vsázky v celém objemu. Nečistoty se usazují na povrchu taveniny a lze je tedy snadno odstranit.

- Aby nedocházelo ke zvyšování objemu kyslíku v sázce, lze tavení provádět ve vakuu či inertní atmosféře
- Z ekonomického hlediska je vhodné využít pro návrh zařízení studeného kelímku softwarových nástrojů, které umožňují simulovat fáze jeho tavení. Není tedy potřeba investic do drahých prototypů.
- Pomocí skel a keramiky lze provádět vitrifikaci radioaktivního odpadu.
- Pokud se technologicky nevyžaduje super čistého materiálu, lze díky absenci víka kelímku poměrně snadnou upravovat jeho parametry.
- Proces lze zefektivnit vhodnou volbou kmitočtu, který má vliv na hloubku vniku.
- Pro zvýšení účinnosti procesu (omezení tepelných ztrát) tavení je možné nanesení izolační vrstvy oxidů na stěny jednotlivých segmentů.
- Nedochází k drastickému tepelnému a atmosférickému zatížení, jelikož se materiál při indukčním ohřevu taví sám v sobě.

### 6.5.2 Nevýhody tavení ve studeném kelímku

- Tavení elektricky nevodivých materiálů je velmi komplikovaných proces. Je nutné hlídat spoustu parametrů jako je výkon, kmitočet, proud, chlazení systém kelímku atd. Při nesprávném stanovení a řízení těchto parametrů může při tavbě dojít například k zatuhnutí tavené vsázky, vlivem nesprávného chlazení k roztavení kelímku a tím úniku materiálu, předčasnou krystalizaci apod.
- Mimo to při tavení oxidů kovů a skel je zapotřebí k zahájení tavby tzv. startovací fáze. Startovací fáze má za úkol snížit vysoký měrný odpor elektricky nevodivých materiálů. Tato nevýhoda sebe nese i zvýšení energetické náročnosti celého procesu tavení.
- Přípravy počítačových simulací modelu studeného kelímku jsou náročné, jak po návrhové stránce, tak i co se týče nároků na výpočetní systém.
- Při vitrifikace nebezpečného odpadu je nutné vysoké obezřetnosti a přípravy zalití odpadu pomocí skel. Před samotným zalitím kontaminovaného odpadu musí dojít k jeho vysušení v kalcinátoru.

## 7 Závěr

Diplomová práce přibližuje problematiku tavení materiálů ve studeném kelímku. V práci jsem se věnoval popisu samotného zařízení. Dále jsem se věnoval teoretickým principům: vzniku tepla a elektromagnetické indukci.

V práci byl popsány klíčové vlastnosti  $Al_2O_3$ . Mezi klíčové oxidu hlinitého lze zařadit tvrdost, odolnost proti otěru, dobrá tepelná vodivost, vysoká pevnost a tuhost, výborné dielektrické vlastnosti. Nevýhodou je naopak křehkost a nepřizpůsobivost teplotním skokům. V praxi lze  $Al_2O_3$  využít jako: vysokoteplotní izolátory, elektrotechnické substráty, snímače teploty atd. Dále byly v práci popsány další oxidové materiály a skla. Využití těchto materiálů je obdobné. Materiály jsou žárupevné.

Uvedl jsem rozdíly elektrické vodivosti a elektrické nevodivosti materiálů. Za zmínku také stojí to, že elektrická účinnost elektricky nevodivých materiálů dosahuje až 90 %. Oproti tomu elektrická účinnosti elektricky vodivých materiálů se pohybuje pouze v hranici 20–40 %. V práci jsou teoreticky uvedeny elektrické a tepelné ztráty, které vznikají při tavení ve studeném kelímku. Při průběžném tavení je nutné konstrukčně vyřešit plnění samotného kelímku granulátem, tak aby nedošlo z zastavení procesu. Při samotném tavení je dbát na kontinuitu s ohledem na výrazné změny objemu taveniny.

Práce s  $Al_2O_3$  je bezpečná a nevyžaduje zvláštních opatření. Vliv elektromagnetického záření je u konstrukčně malých kelímku zanedbatelné a nepoužívá se. Z důvodu náročnost tavení, co po energetické, ekonomické a ekologické stránce je vhodné provést případovou studii s kritériem 3E.



## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR [2]	14
OBRÁZEK 2: INDUKČNÍ MODEL CÍVKY [4]	16
OBRÁZEK 3: KANÁLKOVÁ INDUKČNÍ PEC; 1) OHŘÍVACÍ CÍVKA, 2) JÁDRO Z TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ, 3) KANÁLEK, 4) CHLADÍCÍ VZDUCH, 5) VANA PECE, 6) DĚLÍCÍ SPÁRA, 7) INDUKTOR. [3]	18
OBRÁZEK 4: TEPLOTA TAVENÍ VYBRANÝCH OXIDŮ A SKLA	32
OBRÁZEK 5: TEORETICKÝ MODEL STUDENÉHO KELÍMKU [23]	34
OBRÁZEK 6: MODEL PRŮBĚŽNÉHO TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU [26]	35
OBRÁZEK 7: MODEL INDUKTOROVÉHO KELÍMKU [28]	37
OBRÁZEK 8: REÁLNÝ INDUKTOROVÝ KELÍMEK [24]	37
OBRÁZEK 9: MODEL SEGMENTOVÉHO KELÍMKU [29]	38
OBRÁZEK 10: REÁLNÝ SEGMENTOVÝ KELÍMEK [30]	38
OBRÁZEK 11: ÚČINNOST STUDENÉHO KELÍMKU [28]	39
OBRÁZEK 12: SCHÉMA CHLAZENÍ SEGMENTOVÉHO KELÍMKU [32]	40
OBRÁZEK 13: ZÁVISLOST MĚRNÉHO ODPORU NA TEPLOTĚ [33]	41
OBRÁZEK 14: KOV PRO EXOTERMICKOU OXIDACI [34]	43
OBRÁZEK 15: VODIVÝ MATERIÁL VE TVARU KROUŽKU [35]	44
OBRÁZEK 16: CZOCHRALSKÉHO METODA KRYSTALIZACE [36]	45
OBRÁZEK 17: RŮST KRYSTALU VE STUDENÉM KELÍMKU A) KONKÁVNÍ, B) KONVEXNÍ, 3) VODOROVNÁ KRYSTALIZACE; 1) KELÍMEK, 2) TAVENINA, 3) KRYSTALIZACE PODÉL STĚNY KELÍMKU, 4) KRYSTALIZACE PODÉL DNA KELÍMKU, 5) SKULL VRSTVA [24]	47
OBRÁZEK 18: JEDNORÁZOVÝ ODLITEK $Al_2O_3$ ; ČERVENÁ) NEJTEPLEJŠÍ MÍSTO PŘI TAVBĚ, ZELENÁ) SMĚR RŮSTU KRYSTALŮ, MODRÁ) SKULL VRSTVA	47
OBRÁZEK 19: STÍNĚNÍ INDUKTORU STUDENÉHO KELÍMKU [38]	48
OBRÁZEK 20: ENERGETICKÁ BILANCE [39]	50
OBRÁZEK 21: ZTRÁTY DNEM KELÍMKU [39]	51
OBRÁZEK 22: ENERGIE POTŘEBNÁ PRO TAVENÍ 1 KG VSÁZKY	53
OBRÁZEK 23: PRODUKTIVITA PROCESU	54

## Seznam tabulek

TABULKA 1: VLASTNOSTI HLINÍKU .....	26
TABULKA 2: MOHOSOVA STUPNICE TVRDOSTI .....	26
TABULKA 3: VLASTNOSTI OXIDU HLINITÉHO .....	29
TABULKA 4: VLASTNOSTI OXIDOVÉ KERAMIKY A SKLA .....	32
TABULKA 5: HODNOTY ELEKTRICKÉHO ODPORU A KMOTOČU VYBRANÝCH OXIDŮ KOVŮ .....	41
TABULKA 6: MĚRNÁ HMOTNOST KOVŮ .....	43
TABULKA 7: JEDNORÁZOVÉ TAVENÍ $Al_2O_3$ .....	53
TABULKA 8: POSTUPNÉ TAVENÍ $Al_2O_3$ .....	53

## Seznam odborné literatury

- [1] LANGER, E.: Teorie indukčního a dielektrického tepla, Praha, Academia, 1979.
- [2] Poynting vector. Radartutorial.eu [online]. [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: [http://www.radartutorial.eu/07.waves/pic/poynting\\_vector.print.png](http://www.radartutorial.eu/07.waves/pic/poynting_vector.print.png)
- [3] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [4] Rada J.: Elektrotepelná technika, SNTL, Praha, 1985
- [5] ANGER, Emil a Kožený Jiří. Elektrotepelné zařízení indukční. 1. Vyd. Plzeň, 1982, 182 s.
- [6] ŠENBERGER, Jaroslav. Metalurgie oceli na odlitky. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [7] KARBAN, P.: Přednášky z předmětu ATE, Plzeň, 2016. ZCU v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra teoretické elektrotechniky
- [8] PLACHÝ, D.: Možnosti použití studeného kelímku při tavení oxidů kovů Plzeň, 2014. Diplomová práce. ZCU v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie
- [9] PŘÍHODA, Miroslav a Miroslav RÉDR. Sdílení tepla a proudění. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1998. ISBN 80-7078-549-7.
- [10] Aluminium. Lenntech [online]. [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/al.htm>
- [11] Aluminium. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>
- [12] Aluminium oxide. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide)
- [13] Mohosova tabulka tvrdosti. Converter [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/tvrdest-mohs.htm>
- [14] VÁVRA, Václav. [online]. Ústav geologických věd: MUNI [cit. 2017-03-06].

Dostupné z: <http://mineraly.sci.muni.cz/oxidy/korund.html>

[15] Tvary krystalů. Mineralogie pro školy [online]. CUNI [cit. 2017-03-06].

Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/ugmnz/mineral/tvary.html>

[16] Aluminium oxide. Accuratnus [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:

[17] Aluminium oxide properties. Azom [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:

<http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52>

[18] Magnesium oxide. Azom [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:

<http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=54>

[19] Zirconia. Azom [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z:

<http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=133>

[20] Silica. Azom [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z:

<http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>

[21] Chromium oxide. Azonano [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z:

<http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3409#3>

[22] Čisté chemikálie a specializované služby. Lach-ner [online]. [cit. 2017-03-

10]. Dostupné z: [http://www.lach-ner.com/files/1344-28-1\\_Oxid\\_hlinity\\_CZ.pdf](http://www.lach-ner.com/files/1344-28-1_Oxid_hlinity_CZ.pdf)

[23] Studený kelímek. In: Endipédie [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z:

[http://enpedie.cz/domains/enpedie.cz/images/thumb/Kelimek\\_princip.jpg/180px-Kelimek\\_princip.jpg](http://enpedie.cz/domains/enpedie.cz/images/thumb/Kelimek_princip.jpg/180px-Kelimek_princip.jpg)

[24] KUDRYASH, Maxim. Experimental investigation of induction melting in cold crucible for high temperature processing of oxides using HF transistor power supply. Disertační práce. Der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover.

[25] Холодная чашка. Vniitvch [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z:

<http://www.vniitvch.ru/catalog.php?clD=52>

[26] Electromagnetic Casting. [online]. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z:

<http://www.siliconsultant.com/EMC.htm>

[27] JANDA, M.: Přednosti tavení materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném

kelímku, Plzeň, 2011. Diplomová práce, ZCU v Plzni, Fakulta elektrotechnická

[28] The Cold Crucible induction principle. In: Areva [online]. [cit. 2017-04-17].

Dostupné z:

<http://www.areva.com/activities/liblocal/images/fr/activites/aval/dossiers/creuset->

froid/cf-principe-large.jpg

[29] Centrum výzkumu Řež s.r.o.: Laboratoř studených kelímků [online] 2017.

[cit. 2017-04-25] Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/programjpc/laborator-studenych-kelimku/>

[30] Cold crucible [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z:

<http://www.idealvac.ir/wp-content/uploads/2013/12/92-cold-crucible.jpg>

[31] Pozniak, I. Workshopy pořádané katedrou KEE na ZČU v Plzni. Plzeň: ZČU, 2016-2017.

[32] GOMBERT, Dirk, RICHARDSON, John. Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development[online].

[cit. 2017-04-30]. Dostupné z

<https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/3024978.pdf>

[33] ZAJACOVÁ, N.: Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku, Plzeň, 2012. Diplomová práce, ZCU v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie

[34] HLA VATY, I.: Laserové a plazmové řezání (84, 83) [online] 2017. [cit. 2017-

04-30] Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>

[35] ROT, D., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J.: Modelování startovací fáze tavby  $SiO_2$

[36] Czochralski process. In: Halbleite [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z:

<https://www.halbleiter.org/en/waferfabrication/singlecrystal/>

[38] Magnetické stínění [online]. In: [cit. 2017-05-05]. Dostupné z:

<http://image.slidesharecdn.com/compositematerialsformagneticfieldcontrolinepmss-120320151713-phpapp02/95/composite-materials-for-magnetic-field-control-in-epm-10-728.jpg?cb=1404746014>

[39] ПЕТРОВ, ЮБ; ПАТНИКОВ, ДГ. Холодные тигли. Москва : Металлургия, 1972. 112 s.