

**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



## **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.

## **Keywords**

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 vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, prof. Koženému, za cenné profesionální rady a připomínky.

V Plzni dne: 18.05.2018

.....

**Jan Brandtlík**

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 VLNOVÉ ROVNICE.....</b>	<b>10</b>
1.1 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR .....	12
1.2 SKINEFEKT.....	13
<b>2 INDUKČNÍ OHŘEV .....</b>	<b>15</b>
2.1 ELEKTRICKÉ INDUKČNÍ PECE.....	16
2.1.1 <i>Kelímkové pece.....</i>	<i>16</i>
2.1.2 <i>Kanálkové pece .....</i>	<i>16</i>
<b>3 TEPLLO .....</b>	<b>18</b>
3.1 SDÍLENÍ TEPLA .....	18
3.1.1 <i>Sdílení tepla vedením.....</i>	<i>19</i>
3.1.2 <i>Sdílení tepla prouděním .....</i>	<i>20</i>
3.1.3 <i>Sdílení tepla sáláním .....</i>	<i>21</i>
3.2 TEPLOTNÍ POLE .....	21
3.3 PODMÍNKY JEDNOZNAČNOSTI VEDENÍ TEPLA .....	22
<b>4 VLASTNOSTI OXIDU HLINITÉHO .....</b>	<b>24</b>
4.1 HLINÍK.....	24
4.1.1 <i>Oxidování.....</i>	<i>24</i>
4.2 OXID HLINITÝ ( $Al_2O_3$ ) .....	25
4.2.1 <i>Geografický výskyt korundu (<math>Al_2O_3</math>).....</i>	<i>26</i>
4.2.2 <i>Krystalografická soustava .....</i>	<i>26</i>
4.3 VLASTNOSTI $Al_2O_3$ .....	27
4.3.1 <i>Klíčové vlastnosti.....</i>	<i>28</i>
4.3.2 <i>Užití oxidu hlinitého v praxi.....</i>	<i>29</i>
4.4 VLASTNOSTI DALŠÍCH KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ A SKEL.....	29
4.5 PRAVIDLA BEZPEČNOSTI PŘI PRÁCI S $Al_2O_3$ .....	32
<b>5 TECHNOLOGIE TAVENÍ <math>Al_2O_3</math> VE STUDENÉM KELÍMKU.....</b>	<b>33</b>
5.1 TAVENÍ MATERIÁLU VE STUDENÉM KELÍMKU.....	34
5.1.1 <i>Jednorázové tavení.....</i>	<i>34</i>
5.1.2 <i>Průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny.....</i>	<i>35</i>
5.1.3 <i>Průběžné tavení s postupným odebíráním ingotu ze dna kelímku.....</i>	<i>36</i>
5.2 KONSTRUKCE STUDENÉHO KELÍMKU.....	36
5.2.1 <i>Induktorový kelímek.....</i>	<i>37</i>
5.2.2 <i>Segmentový studený kelímek.....</i>	<i>38</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 KRYSTALIZACE 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.....	51
6.4 HODNOCENÍ STUDENÉHO KELÍMKU METODOU 3E .....	52
6.4.1 <i>Ekonomické a energetické hledisko.....</i>	<i>52</i>
6.4.2 <i>Ekologické hledisko.....</i>	<i>54</i>

6.5	PODMÍNKY K DOSAŽENÍ MAXIMÁLNÍ ÚČINNOSTI TAVÍCÍHO PROCESU .....	54
6.6	ZÁVĚRY PRO PRAXI .....	55
6.6.1	<i>Přednosti tavení ve studeném kelímku .....</i>	<i>55</i>
6.6.2	<i>Nevýhody tavení ve studeném kelímku .....</i>	<i>57</i>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM ODBORNÉ LITERATURY .....</b>	<b>61</b>

# Seznam symbolů a zkratk

## 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>
$S$	Pointingůvzářivý 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>
$A$	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>
$\epsilon$	Emisivita	-
$T$	Čas	S

## Konstanty pro elektrické a tepelné pole

značka	Název	Konstanta
$\epsilon_0$	permitivita vakua	$(8,85419 \pm 0,00002) \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
$\mu_0$	permeabilita vakua	$4 \times \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
$E$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$



## Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na průběžné tavení oxidu hliníku „ $Al_2O_3$ “ elektromagnetickou indukcí. Práce je rozdělena do sedmi kapitol. V prvních kapitolách diplomové práce je popsána zjednodušená teorie vlnových rovnic, indukčního ohřevu a přenosu tepla. Ve zbylých kapitolách práce jsou popsány vlastnosti vysokotavitelných materiálů, tavení vsázky ve studeném kelímku, charakteristika studených kelímků, energetická bilance a využití tavení v praxi. V práci používaný výraz „*studený kelímek*“ je myšlen jak induktorový, tak segmentový.

První kapitola je zaměřena na stanovení základních vlnových rovnic, které se objevují v teorii indukčního ohřevu. V diplomové práci jsou popsány rovnice pro elektricky vodivé a elektricky nevodivé prostředí. Kapitola rovněž zahrnuje Poyntingův zářivý vektor v návaznosti na skin efekt. Druhá kapitola je zaměřena na stručnou teorii indukčního ohřevu a zjednodušený popis indukčních pecí. Třetí kapitola se týká přenosu tepla a podmínek souvisejícími s jeho přenosem.

Čtvrtá kapitola diplomové práce je zaměřena na vlastnosti oxidu hlinitého. V kapitole jsou popsány jeho základní chemické a elektrické vlastnosti. Dále je v kapitole uveden jeho geografický výskyt a jeho těžba. V práci jsou taktéž uvedeny výhody a nevýhody  $Al_2O_3$  a možnosti jeho uplatnění v praxi.

Pátá kapitola nese název Technologie tavení  $Al_2O_3$  ve studeném kelímku a jsou v ní popsány možnosti jednorázového a průběžného tavení. Tavení materiálů ve studeném kelímku lze uskutečnit dvěma typy kelímků, induktorovým a segmentovým. U elektricky nevodivých materiálů je zapotřebí nastartování jejich tavby. K zahájení startovací fáze tavby oxidů lze využít: povrchového ohřevu, ohřevu energií exotermické oxidace, nebo vložení elektricky vodivého prstence na povrch vsázky.

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

# 1 Vlnové rovnice

Vlnové rovnice elektromagnetického vlnění 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 pomocí Stokesovy a Gauss – Ostrogradského věty. [1]

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 – Ostrogradského věty, která uvažuje, že plošný integrál vektoru přes uzavřenou plochu je roven objemovému integrálu z divergence daného vektoru.

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

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

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

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

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

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

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

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

- Ve vodivém prostředí lze zanedbat relativní permitivitu  $\epsilon_r$ .
- V nevodivém prostředí lze zanedbat elektrickou vodivost  $\gamma$ .

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

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

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

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

$$\text{Magnetická složka:} \quad \nabla^2 \vec{H} = \mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (9)$$

$$\text{Elektrická složka:} \quad \nabla^2 \vec{E} = \mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (10)$$

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

$$\text{Magnetická složka:} \quad \frac{1}{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0} \nabla^2 \vec{H} = \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (11)$$

$$\text{Elektrická složka:} \quad \frac{1}{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0} \nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (12)$$

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

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

$$\text{Rychlost šíření vlnění:} \quad v^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 \mu_r \epsilon_r} \text{ [m/s]} \quad (13)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua [-],  $\mu_r$  je relativní permeabilita [H/m],  $\epsilon_0$  je permitivita vakua [-],  $\epsilon_r$  je relativní permitivita [F/m].

## 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. Poyntingův vektor pak lze odvodit z časového úbytku celkového množství elektromagnetické energie v objemu  $V$ . [1]

Elektrická a magnetická energie je dána výrazy:

$$\text{Elektrická energie:} \quad W_e = \frac{1}{2} \int_V \vec{D} \vec{E} dV = \frac{1}{2} \epsilon \int \vec{E}^2 dV \quad (14)$$

$$\text{Magnetická energie:} \quad W_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \vec{H} dV = \frac{1}{2} \mu \int \vec{H}^2 dV \quad (15)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

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

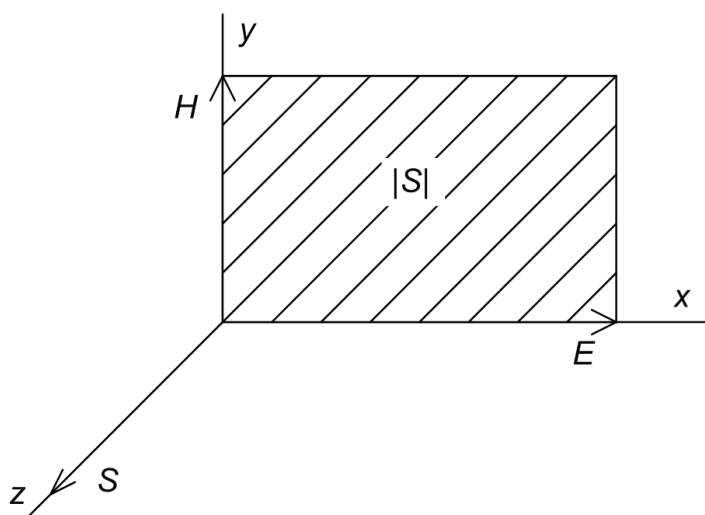
$$-\frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) = - \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \epsilon \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \mu \vec{H}^2 \right) dV \quad (16)$$

Po matematických úpravách přejde rovnice (16) do tvaru:

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

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

Poyntingův vektor je množství energie, která vystoupí z uvažovaného objemu přes plochu za jednu sekundu a je dána součinem vektorů  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$ . Velikost Poyntingova vektoru je rovna ploše obdélníka znázorněného na obrázku 1 se stranami E a H a jeho směr je kolmý k ploše obdélníka. [1]



Obrázek 1: Poyntingův zářivý vektor [2]

Poyntingův vektor:

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

## 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 povrchu a směrem k ose bude jeho hodnota od  $J_0$  exponenciálně klesat. Skin efekt je dán vztahem (19): [1], [3]

Skinefekt:

$$J = J_0 e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (19)$$

kde  $J$  je proudová hustota [A/m],  $\delta$  je hloubka vniku [m],  $d$  je vzdálenost od povrchu vodiče [m],  $J_0$  je proudová hustota na povrchu vodiče [A/m].

Hloubka vniku je hloubka pod povrchem vodiče, kde proudová hustota klesne na hodnotu  $1/e$  (přibližně 37 % proudové hustoty  $J_0$  na povrchu vodiče) a je dána vztahem (20) [1], [4]:

Hloubka vniku:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_0 \mu_r \gamma}} \quad (20)$$

kde  $\delta$  je hloubka vniku [m],  $f$  je frekvence [Hz],  $\mu_0$  je permeabilita vakua [-],  $\mu_r$  je relativní permeabilita [H/m],  $\gamma$  je elektrická vodivost [S/m].

Ze vztahu (20) je patrné, že hloubka vniku elektromagnetického záření je závislá na permeabilitě vsázky, elektrické vodivosti a kmitočtu zdroje, který mimo jiné také ovlivňuje rozložení tepla v sázce.

Účinnost indukčního ohřevu lze teoreticky spočítat ze vztahu:

Účinnost:

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

kde  $P_v$  je výkon pro tavení vsázky [W],  $D$  je vnitřní průměr cívky induktoru [m],  $d$  je průměr vsázky (válcová) [m],  $\delta$  je hloubka vniku [m],  $\rho_i$  je měrný odpor materiálu induktoru [ $\Omega \cdot m$ ],  $\rho_v$  je měrný odpor materiálu vsázky [ $\Omega \cdot m$ ],  $\mu_r$  je relativní permeabilita materiálu vsázky [-].

Ze vztahu 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

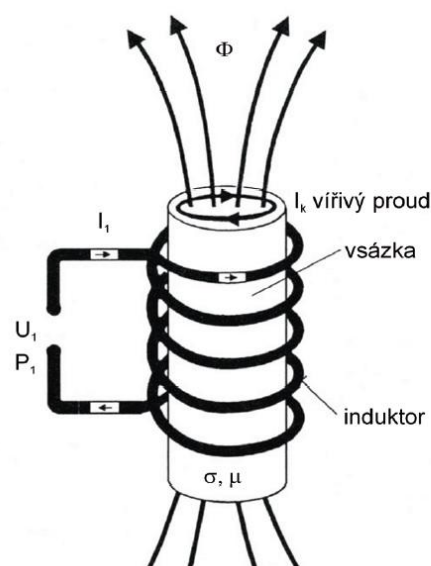
Principem indukčního ohřevu je průchod časově proměnného elektrického proudu vodičem. V důsledku toho vznikne časově proměnné harmonické elektromagnetické pole. Procházející proměnný proud vodičem vybudí v jeho okolí pole, které zasahuje - li do vodivého prostředí, pak v něm vybuduje vířivé proudy. V implikaci naindukovaných vířivých proudů vznikají v materiálu nerovnoměrně rozložené Joulovy ztráty, které vyvolávají následný ohřev materiálu. [4]

Jednoduché konstrukční řešení indukčních zařízení se skládá z cívky, kterou prochází časově proměnný elektrický proud, vysokofrekvenčního napájecího zdroje a vsázky, která slouží k pohlcení časově proměnného elektromagnetického vlnění vybuděného 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 dva 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 naindukovaných vířivých proudů v taveném materiálu, které jsou generovány elektromagnetickou indukcí.

Elektrické indukční pece se dělí dle konstrukce na:

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

### 2.1.1 Kelímkové pece

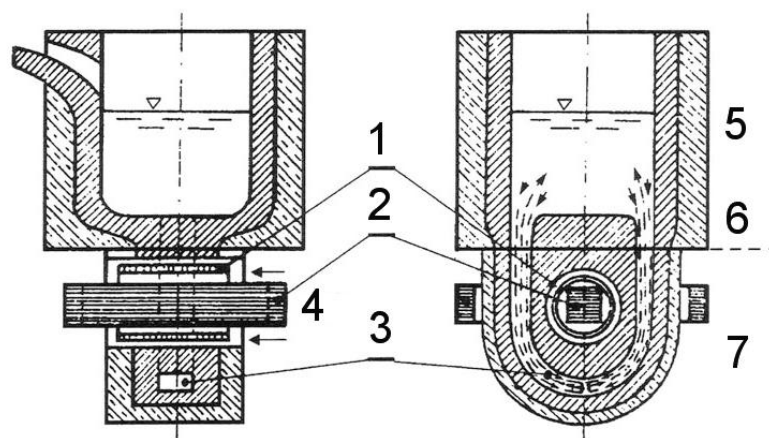
- *Vysokofrekvenční* EIP pec se používá převážně pro laboratorní účely. Pro vsázku EIP pecí jsou nevhodnější materiály s vysokým měrným odporem, jako jsou oxidy kovů a skla. Hmotnost vsázky se pohybuje od několika gramů po několik set gramů.
- *Středofrekvenční* se používají ve slévárnách ocelí k odlévání 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 jejich 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 uskřípovacího jevu. [3]



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

### 3 Teplo

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

#### *Kondukcce tepla*

Při vedení tepla mohou 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:

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

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

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

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

### 3.1 Sdílení tepla

Sdílením tepla je rozuměn přenos tepla v implikaci s existencí teplotního gradientu. Existuje-li v jakémkoliv prostředí rozdíl teplot zákonitě, musí docházet k přenosu tepla. Tepelná energie proudí z místa s vyšší teplotou do místa 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 nadržují 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  $\lambda$ . Lze ji definovat 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, který je definován vztahy:

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

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

Pro stacionární případ lze rovnice kontinuity teplotního toku definovat 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 tepla 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:

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

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

Součinitel přestupu tepla prouděním je ovlivněn: rozdílem teplot, viskozitou, polohou stěn, povrchem atd.

### 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:

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

Za podmínek:

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

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

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:

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

### 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 prostřední. Podmínky jednoznačnosti vedení tepla lze rozdělit do čtyř skupin. Fyzikální, geometrické, počáteční a povrchové. [9]

*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 jeho cyklu tepelné výměny. Počáteční podmínka se neuplatňuje u stacionárních procesů, 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].

*Dirichletova OP:* 
$$T(\Gamma, t) = T_\Gamma(\Gamma, t) \quad (36)$$

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

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

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

*Newtonova OP:* 
$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_k - T) \quad (38)$$

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)

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

Aby mohl být uplatněn OP 4, musí být dodržen přestup tepla sáláním. Podmínka se uplatňuje u teplot nad 500 °C.

## 4 Vlastnosti oxidu hlinitého

V kapitole fyzikální vlastnosti oxidu hlinitého a možnostech jeho tavení budou charakterizovány jeho vlastnosti a vlastnosti dalších materiálů oxidické keramiky a křemičitých skel. V kapitole budou popsány fyzikální, chemické a elektrické vlastnosti oxidu hlinitého, oxidu hořečnatého, oxid zirkoničitýho, oxid chromitýho a křemenného skla. Následně budou popsány možnosti jeho tavení v indukčních zařízeních. Tavení oxidů kovů ve studeném kelímku je velmi komplikovaný proces z důvodu vysokého měrného odporu materiálu ve studeném stavu. Problematika bude dále popsána v následujících kapitolách. V závěru kapitoly dojde k vzájemnému porovnání výše zmíněných vlastností.

### 4.1 Hliník

Hliník (vlastnosti jsou popsány v Tabulce1 [10], [11]) je lehký 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]. I přes výše zmíněné negativní vlastnosti se hliník nadále používá v dálkových rozvodech v *AlFe* lanech 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		
Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
hustota	2700	kg/m <sup>3</sup>
tvrdost	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	nΩ·m

## 4.2 Oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ )

Oxid hlinitý je chemická sloučenina hliníku a kyslíku s chemickým vzorcem  $Al_2O_3$ . Vzhledově ji lze charakterizovat jako bílý krystalický prášek. V přírodě se oxid hlinitý vyskytuje nejčastěji 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 nejčastěji odrůdy korundu vyskytují ve formě zrnitého agregátu též jako smirek, modrého safíru a červeného rubínu.[12]

Korund patří mezi nejtvrdší nerosty, viz Tabulka 2 [10]. V Mohsově stupnici je po diamantu korund nejtvrdším nerostem. Vzhledem ke své tvrdosti ho lze využívat také jako abrazivum v technickém průmyslu. Výše zmíněné formy korundu jako je modrý safír či červený rubín lze využít např. ve šperkařství jako drahé kameny.

Tabulka 2: Mohosova stupnice tvrdosti

Tvrdost	Látka	Chemický název	Chemický vzorec
1	mástek	kyselý metakřemičitan hořečnatý	$H_2Mg_3(SiO_3)_4$
2	sůl kamenná	chlorid sodný	NaCl
3	Kalcit	uhličitan vápenatý	$CaCO_3$
4	fluorit	fluorit vápenatý	$CaF_2$
5	apatit	-	$Ca(PO_4)_3$
6	živec	křemičitan hlinitodraselný	$KAlSi_3O_8$
7	křemen	oxid křemičitý	$SiO_2$
8	topaz	-	$Al_2SiO_4$
9	korund	oxid hlinitý	$Al_2O_3$
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 korund těží na území indického Kašmíru, Corundum Hill ve Franklinu, 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 svírajícími. Existuje sedm základních krystalografických soustav. Jedná se o soustavy typu: triklinická, monoklinická, ortorombická, tetragonální, hexagonální, trigonální a kubická. [15]

Oxid hlinitý krystalizuje v několika modifikacích. Nejběžnějšími modifikacemi jsou  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Jedná se 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 sebou 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:  $a = b \neq c$ ;  $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
- **Modifikace  $\nu$**  – Modifikace  $\nu$  je trigonální a její parametry jsou:  $a = b \neq c$ ;  $\alpha\beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

### 4.3 Vlastnosti $Al_2O_3$

Oxid hlinitý je elektricky nevodivý materiál. Vzniká oxidací tenké vrstvy na povrchu. Hliník je tedy pokryt tenkou vrstvou oxidu, která má tloušťku přibližně  $0,01\mu m$  a slouží jako ochrana před korozi. Tato oxidová vrstva může vzniknout buď uměle eloxováním, nebo působením atmosférického kyslíku. V Tabulce 3 jsou charakterizovány vlastnosti oxidu hlinitého. [12], [16], [17]

Tabulka 3: Vlastnosti oxidu hlinitého

Mechanické vlastnosti		
Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
<i>Yongův (elastický) modul</i>	340-400	<i>GPa</i>
<i>pevnost v tahu</i>	350-580	<i>MPa</i>
<i>pevnost v tlaku</i>	690-5500	<i>MPa</i>
<i>Poissonovo číslo</i>	0,23-0,30	-
<i>lomová houževnatost</i>	3,3-4,8	<i>Mpa·m<sup>1/2</sup></i>
<i>tvrdost</i>	12-20	<i>GPa</i>
Fyzikální vlastnosti		
Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
<i>hustota</i>	3,8 - 4,022	<i>g/cm<sup>3</sup></i>
<i>pórovitost</i>	0	%
<i>absorpce vody</i>	0	%
<i>teplota tavení</i>	2000-2090	°C
<i>teplotní součinitel roztažnosti</i>	7-8E-6	<i>K<sup>-1</sup></i>
<i>max. provozní teplota</i>	1750-1800	°C
<i>tepelná vodivost</i>	26-39	<i>W/m·K</i>
<i>měrné teplo</i>	880	<i>J/kg·K</i>
<i>elektrická pevnost</i>	10-35	<i>kV/mm</i>
<i>měrný odpor</i>	$>10^{14}$	<i><math>\Omega \cdot cm</math></i>
<i>relativní permitivita</i>	12,6	-

### 4.3.1 Klíčové vlastnosti

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

a) *Mezi hlavní přednost oxidické 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  $ZrO_2$  jsou charakteristické výbornými vlastnostmi. Mezi základní vlastnosti patří: vysoká pevnost, lomová houževnatost a chemická odolnost. Tyto 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 žárovevné (tepelné vlastnosti) a používají se jako:

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

*Oxid chromitý* je amorfni oxid, který se nerozpouští ve vodě, v kyselinách ani v zásadách. Využívá se jako ochranný materiál pro: nerezavé oceli, legované oceli apod. Při depozici  $Cr_2O_3$  na materiál se zvyšuje jeho tvrdost a odolnost proti korozi.

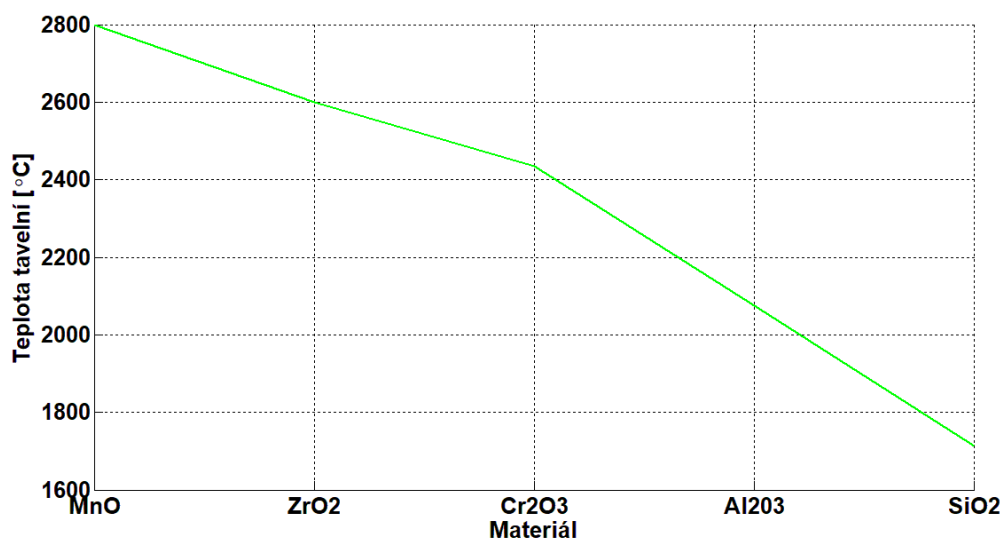
*Oxid křemičitý* je specifický svými vlastnosti, mezi které patří:

- 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 čírost jako optická vlákna.

Tabulka 4: Vlastnosti oxidové keramiky a skla

Mechanické vlastnosti						
Vlastnosti 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>
tvrdost	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>
párovitost	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 standardní 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.

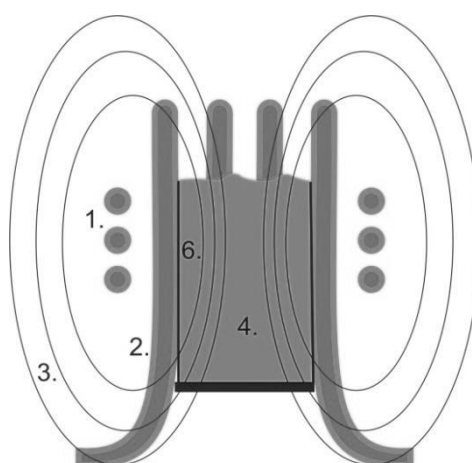
V důsledku opožděných symptomů se mohou objevit dýchací potíže, kašel, gastrointestinální poruchy, bolest hrudníku atd.



## 5 Technologie tavení $\text{Al}_2\text{O}_3$ ve studeném kelímku

Studený kelímek je zařízení, které slouží k vysokofrekvenčnímu ohřevu vodivých i nevodivých materiálů pomocí elektromagnetické indukce. Konstrukční řešení moderních kelímků umožňují konstruovat kelímky pro teploty nad  $3000\text{ }^\circ\text{C}$ . 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. Ochlazování vytváří mezi stěnou kelímku a taveným materiálem tenkou, několika milimetrovou ochrannou krustu. Krusta rovněž slouží jako ochrana proti pronikání taveniny mezi svislými segmenty intenzivního chlazení.

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

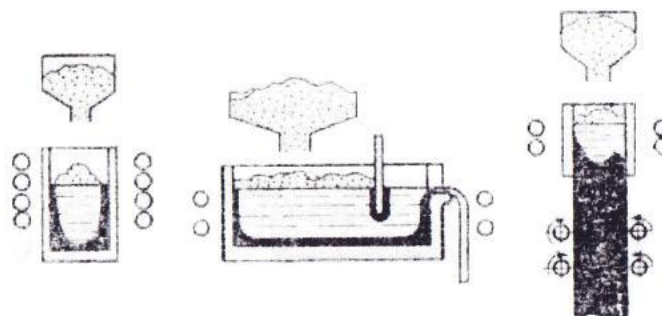


Obrázek 5: Teoretický model studeného kelímku [23]

Vznik studeného kelímku s indukčním ohřevem má své opodstatnění. Pokud je pro ohřev použita elektromagnetická indukce, teplo vzniká přímo uvnitř ohřívajícího materiálu a nikoliv přenosem tepla jako při ohřevu konvekcí a radiací z teplejšího okolí. Tímto způsobem je docíleno zrychlení celého tavicího procesu. Vhodnou volbou kmitočtu, který se pohybuje od  $90\text{ kHz}$  do  $5\text{ MHz}$  lze také řídit rozložení tepla v samotné sázce dosažení vysoké teploty.

## 5.1 Tavení materiálu ve studeném kelímku

Při tavení materiálu ve studeném kelímku se využívá tři základních metod jeho tavení – jednorázové tavení, průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny, a průběžné tavení s postupným odebíráním ingotu ze dna kelímku. Volba způsobu tavení se odvíjí od: konstrukce studeného kelímku, konstrukce tavící komory, vlastnostech vsázky, produktivity procesu, krystalizace ingotu atd. [24], [25]



Obrázek 6: Tavení vsázky ve studeném kelímku – jednorázové tavení materiálu, průběžné tavení s postupným uvolňováním, průběžné tavení s postupným odebíráním ingotu ze dna kelímku. [24]

### 5.1.1 Jednorázové tavení

Při jednorázovém tavení materiálu se využívá dvou možností. První možnost spočívá v tom, že studený kelímek je před tavením naplněn elektricky vodivým, elektricky nevodivým materiálem včetně startovacího prvku a materiál je roztaven v celém svém objemu. Druhou možností je přidávat tavící materiál postupně do již roztavené vsázky. Tavení materiálu probíhá do jeho homogenizace. Další fází jednorázového tavení je chlazení vsázky, které může být kontrolovatelné nebo nekontrolovatelné. Při nekontrolovatelném chlazení vsázky dojde k vypnutí napájecího generátoru. Výhodou nekontrolovatelného chlazení vsázky je rychlost a jednodušší řízení tavícího procesu. Při kontrolovatelném chlazení vsázky dochází k postupnému snižování výkonu generátoru a lze řídit vlastnosti krystalizace. [24], [25]

Tabulka 5: Shrnutí výhod a nevýhod jednorázového tavení

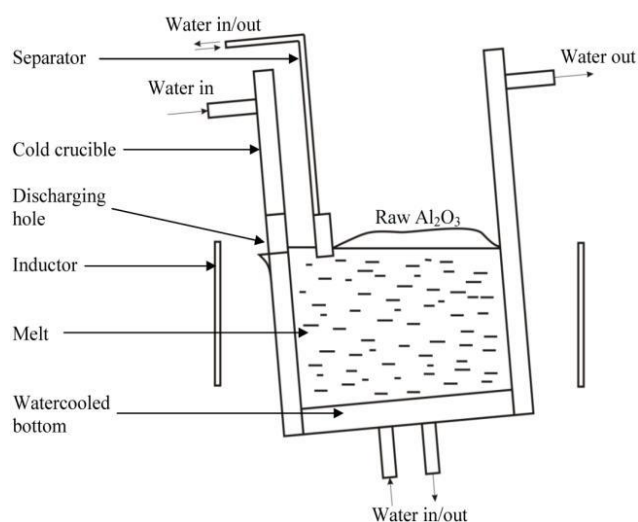
Jednorázové tavení	
výhody	nevýhody
Řízení tavícího procesu	Nízká produktivita vzhledem k montáži a demontáži kelímku při kusové produkci
Produkce ingotů velkých průměrů	Vyšší náklady na tavení

### 5.1.2 Průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny

Při průběžném tavení s postupným uvolňováním taveniny je tavenina z kelímku uvolňována do formy průběžným nebo nárazovým litím. K průběžnému uvolňování dochází třemi základními způsoby – kelímkem se separátorem, kelímkem s hydraulickým naklápěním a kelímkem s výpustní na dně kelímku. [24], [25]

Tabulka 6: Shrnutí výhod a nevýhod průběžného tavení s postupným uvolňováním taveniny

Průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny	
výhody	nevýhody
Vyšší produktivita oproti jednorázovému tavení	Řízení tavicího procesu

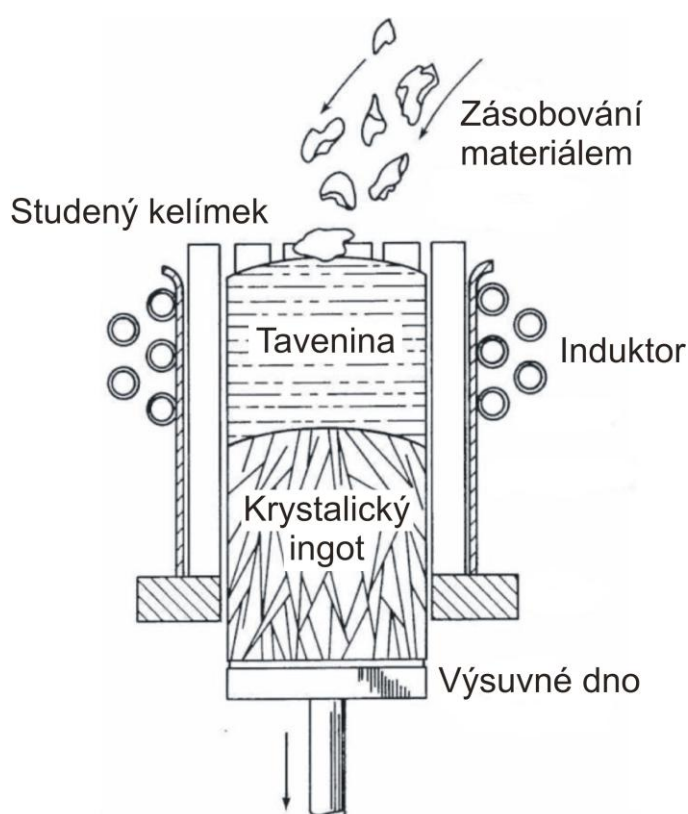


Obrázek 7: Princip studeného kelímku pro postupné tavení. [25]

### 5.1.3 Průběžné tavení s postupným odebráním ingotu ze dna kelímku

Při tavení s postupným odebráním ingotu ze dna kelímku dochází k roztavení vsázky v celém jejím objemu a díky hydraulicky výsuvnému dnu je ze dna kelímku odebrán ztuhlý ingot. Ingot je následně lámán na požadované rozměry dle typu jeho následného využití. Ingot lze odebrat i pomocí Czochralského metody, která spočívá v jeho odebrání přímo z hladiny taveniny. [24], [25]

Výhodou tohoto typu tavení je možnost řízené krystalizace, která je ovlivněna teplotou, časem a průběhem chladnutí ingotu. Rychlost odebrání ingotu je v řádech desetin až desítek milimetrů ingotu za minutu.



Obrázek 8: Model průběžného tavení s odebráním ingotu ze dna studeného kelímku [26]

## 5.2 Konstrukce studeného kelímku

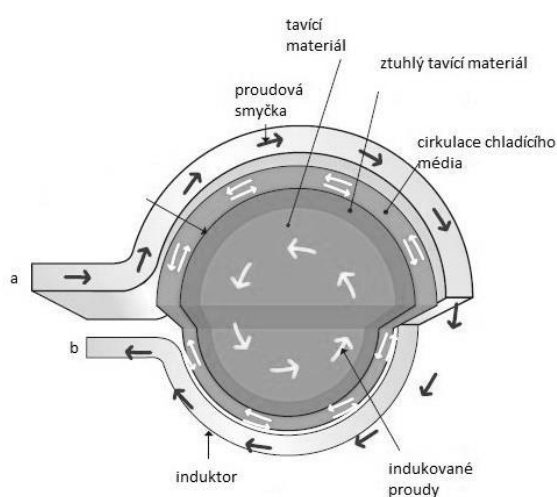
Z konstrukčního hlediska se v současné době vyrábějí dva typy studeného kelímku. Prvním typem studeného kelímku je kelímek s integrovaným induktorem. Tento kelímek se však nehodí pro tavení oxidů kovů a je spíše vhodný k tavení skel. Druhým typem je segmentový kelímek.

### 5.2.1 Induktorový kelímek

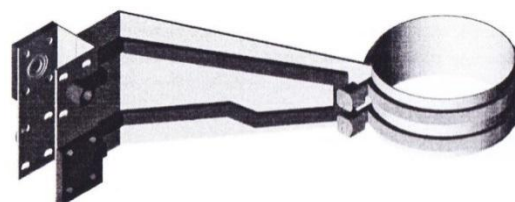
Induktorový kelímek na obrázku 9 tvoří jednozávitový prstencový induktor. Induktor je vyráběn převážně z mědi. Mezi svorkami ab je připojen vysokofrekvenční měnič. Pro napájení slouží tranzistorové měniče. Prstencový induktor slouží zároveň jako kelímek pro tavení materiálu. Tímto uspořádáním tak lze docílit: [8], [27]

- Tavení materiálů s vysokým bodem tavení viz tabulce 4 (v tabulce 4 jsou krom skla  $SiO_2$  i oxidické sloučeniny materiálů, které ale nejsou moc vhodné 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 tavicího materiálu „ztuhlý tavicí materiál“, jak je vidět na obrázku 9. [8], [27]



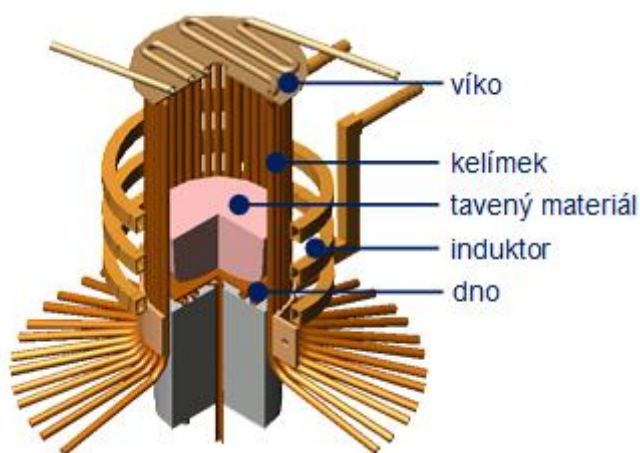
Obrázek 9: Model induktorového kelímku [28]



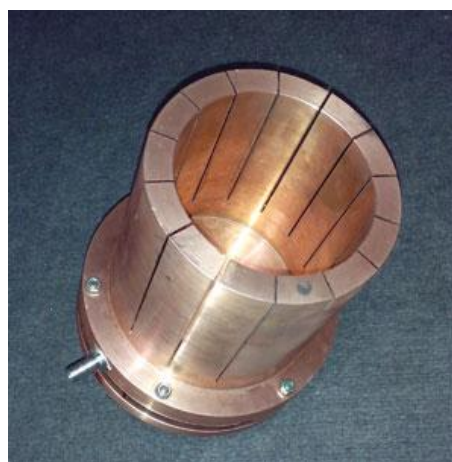
Obrázek 10: Reálný induktorový kelímek [24]

## 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 mají kruhový, nebo 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 mezní hodnotu  $60^{\circ}\text{C}$ . Při překročení mezní hodnoty dochází k odpařování vody. Návrh chladicí soustavy kelímku je velmi složitý proces. Při návrhu se zohledňuje velké množství parametrů, mezi které patří například: rychlost proudící kapaliny, její schopnost odvádět teplo ze segmentů apod. [8], [27]



Obrázek 11: Model segmentového kelímku [29]



Obrázek 12: Reálný segmentový kelímek [30]

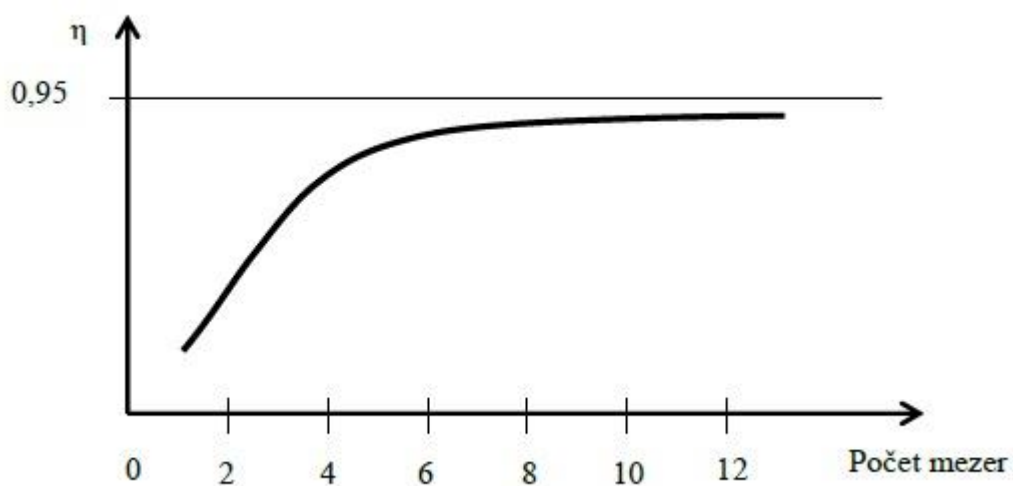
Tím, že je kelímek rozdělen na segmenty, dochází k zmenšení jeho vnitřních ztrát, které jsou důsledkem zmenšení plochy, přes kterou by se vířivé proudy uzavíraly. Mezera mezi jednotlivými segmenty musí být volena tak, aby byl možný přenos elektromagnetické energie do vsázky. Aby nedocházelo k prosakování 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:

Počet segmentů kelímku: 
$$n \approx \frac{\pi D_v}{b+1} < \frac{\pi D_v}{6} \quad (40)$$

kde  $D_v$  je průměr vsázky [mm],  $b$  je šířka segmentu [mm].

Z grafu na obrázku 13 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.



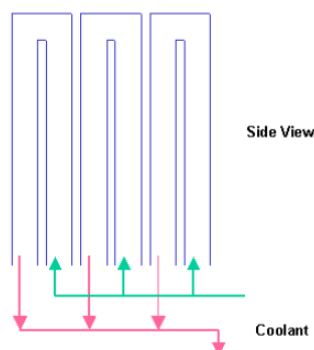
Obrázek 13: Účinnost studeného kelímku [28]

### 5.3 Princip chladicího systému

System 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, tak 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 segment kelímku má dvě části, přítokovou a odtokovou část. Chladicího systému je navržen tak, že chladicí voda přitéká do přítokového kanálku, odkud putuje do vzduchového chladiče a po ochlazení zpět do přítokového kanálku v uzavřeném chladicím okruhu. Chlazení kelímku je zajištěno i pro případ poruchy. Při

výpadku elektrické energie by mohlo v důsledku nefungujícího chladicího okruhu dojít k eventuelnímu styku vsázky s vodou. Je tedy nutné navrhnout systém chladicího okruhu tak, aby k těmto výše zmíněným skutečnostem nedocházelo. [32]



Obrázek 14: 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). S ohledem na hodnoty konduktivity je nutné určit a hlídat charakteristické parametry, který by při nesprávném určení negativně ovlivnily samotný proces tavení.

Jedním z nejdůležitějších parametrů při tavení materiálů elektromagnetickou indukcí je závislost měrného odporu oxidů kovů na teplotě, která je znázorněna na obrázku 15. V tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty měrného elektrického odporu oxidů kovů v závislosti na teplotě a optimální frekvence pro zahájení jejich tavby. Tato frekvence je dána vztahem:

Optimální frekvence pro  
tavbu:

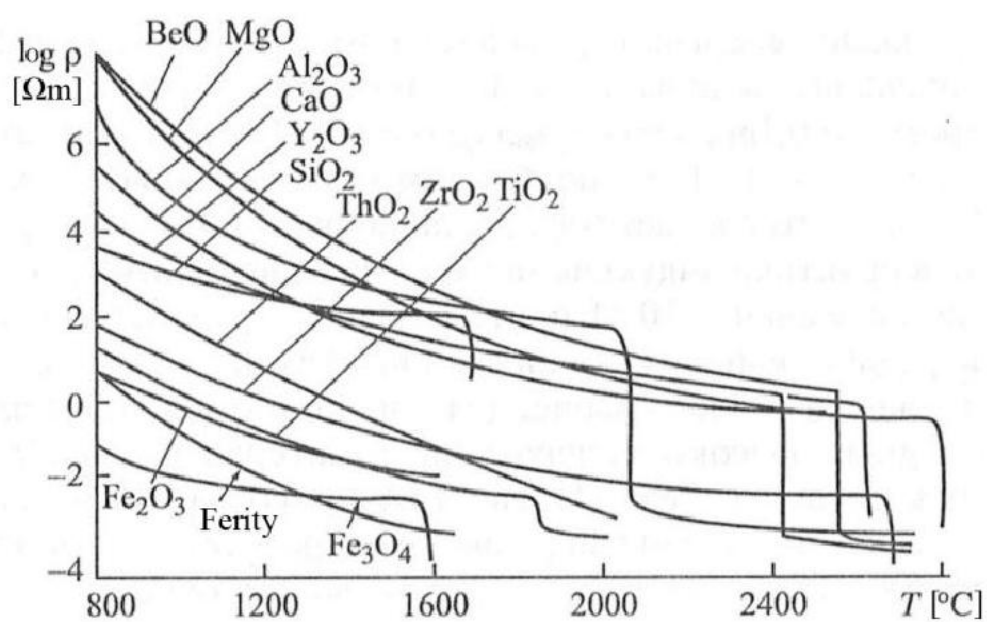
$$f_{min} \geq 3 \cdot 10^6 \frac{\rho}{D_v^2} [Hz] \quad (41)$$

kde  $D_v$  je průměr vsázky [m],  $\rho$  je měrný elektrický odpor vsázky [ $\Omega \cdot m$ ].

V kapitole 5 bylo zmíněno, že frekvence pro indukční ohřev se pohybují od 90kHz do 5MHz (ojediněle se může vyskytnout kmitočet i 10MHz). Z hodnot v tabulce 7 lze nicméně vyčíst, že vhodný kmitočet pro oxid hlinitý ve studeném stavu je 66GHz.



Z tohoto důvodu musí být materiál přehřát, aby byla snížena hodnota elektrického odporu taveného materiálu.



Obrázek 15: Závislost měrného odporu na teplotě [33]

Tabulka 7: Hodnoty elektrického odporu a kmitočtu vybraných oxidů kovů

Materiál	Skupenství	Teplota [°C]	Elektrický odpor [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	Frekvence [kHz]
$Al_2O_3$	pevné	1875	$2,2 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^7$
$Al_2O_3$	tavenina	2200	$1 \cdot 10^{-1}$	300
$Y_2O_3$	pevné	1500	$3 \cdot 10^1$	$90 \cdot 10^3$
$Y_2O_3$	tavenina	2430	$5 \cdot 10^{-2}$	150
$ZrO_2$	pevné	2000	1	$3 \cdot 10^3$

### 5.4.1 Nastartování tavby oxidů

Pro nastartování tavné fáze [27], [33] (set-up, start-up) se využívají různé metody. Každá metoda má svá pro a proti v závislosti na požadovaných vlastnostech materiálu. Nastartování tavby vsázky lze docílit různými způsoby:

- *Ohřevu elektrickým obloukem*

Principem ohřevu elektrickým obloukem je využití tepla elektrického oblouku. Využití elektrického oblouku pro nastartování tavby ojedinělé z konstrukčního hlediska.

- *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 taveného 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*

V tomto případě se k nastartování tavby materiálu využívá malého množství kovu přidaného do objemu tavené vsázky. Je využíváno materiálu, jehož oxid podléhá tavení a to z důvodu nižší elektrické vodivosti čistého kovu oproti jeho oxidu. Tento způsob predehřátí vsázky se využívá převážně u oxidů kovů jako např.  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , a  $Cr_2O_3$ . Čistý vodivý kov (nejčastěji se využívá hliník, zirkonia, chrom) je vložen do objemu vsázky ve formě malých granulovitých částic, pilin, třísek či prášku. Materiál se umísťuje do objemu vsázky také z důvodu minimalizace tepelných ztrát a jeho možnému vzplanutí. Kov je zahříván pomocí elektromagnetické indukce, vyvolávající

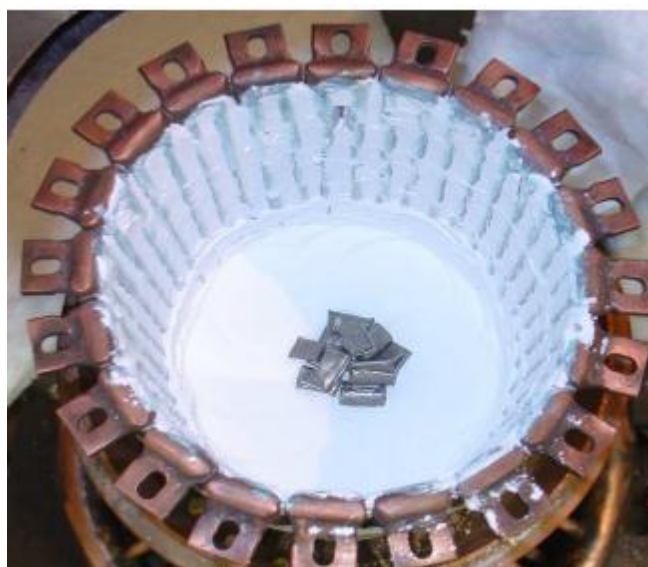
vířivé proudy, předávající teplo de elektricky nevodivé vsázky konvekcí a sáláním. Dochází k mísení kovu a taveného materiálu => dojde ke změně elektrické vodivosti vsázky a tím k jejímu roztavení. Aby nedošlo ke vzplanutí vsázky a její následné kontaminaci při vyšších teplotách je nutné při tavení hlídat její chemické a fyzikální vlastnosti.

Pro stanovení množství kovu vloženého do objemu vsázky  $V_v$  se používá vzorec:

$$\begin{array}{l} \text{Množství kovu pro} \\ \text{nastartování tavby:} \end{array} \quad g = Z \cdot V_v \text{ [Kg]} \quad (42)$$

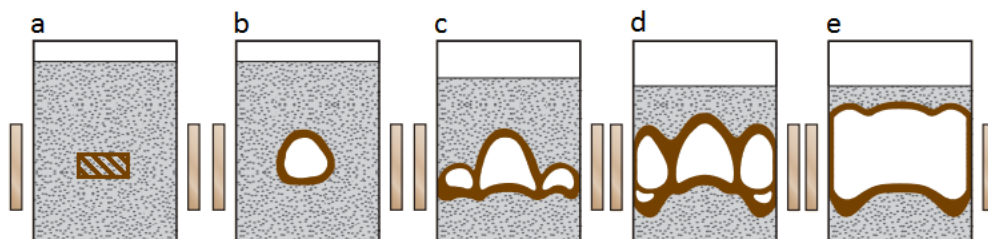
Tabulka 8: Měrná hmotnost kovů

Materiál	Hliník	Titan	Zirkon	Chrom	Berylium	Ytrium	Skandium
$Z \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	2700	4540	4600	2830	1848	4475	2985



Obrázek 16: Kov pro exotermickou oxidaci [34]

Efektivita startovacího procesu při exotermické oxidaci může být ovlivněna objemem startovacího prvku nebo jeho umístěním v sázce. Při nesprávném objemu startovacího prvku stanoveného z rovnice (42) může dojít k elektromagnetické průžárnosti a tím buď k neúměrně době přehřevu vsázky, nebo k přehřevu vůbec nedojde.



Obrázek 17: Fáze startovacího procesu oxidové vsázky ve studeného kelímku. Vložení materiálu do studeného kelímku (a), natavení elektromagnetickou indukcí (b), postupný ohřev objemu vsázky (c,d,e). [24]

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

Tento způsob nastartování tavy se využívá u skel a YBCO. Na vsázku je umístěn elektricky vodivý materiál ve tvaru např. kroužku, nejčastěji z iridia, uhlíku nebo grafitu. Elektromagnetické pole vyvolá vířivé proudy, které ohřívají přidaný startovací kruh. Po zvýšení elektrické vodivosti je startovací kruh vyjmut a materiál se následně taví sám v sobě.



Obrázek 18: Vodivý materiál ve tvaru kroužku [35]

## 5.5 Fáze krystalizace ve studeném kelímku

Jednou z klíčových vlastností při tavení materiálů a skel při použití indukčního ohřevu ve studeném kelímku je krystalizace. Růst krystalů a jejich následné tunutí v ingot má rozhodující roli pro použití v praxi.

Krystaly žárovevných oxidů kovů mají ve vědecké oblasti výzkumu moderních materiálů a technologií hrají 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 krystalu 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 4.

*Proces krystalizace lze uskutečnit následujícími způsoby:*

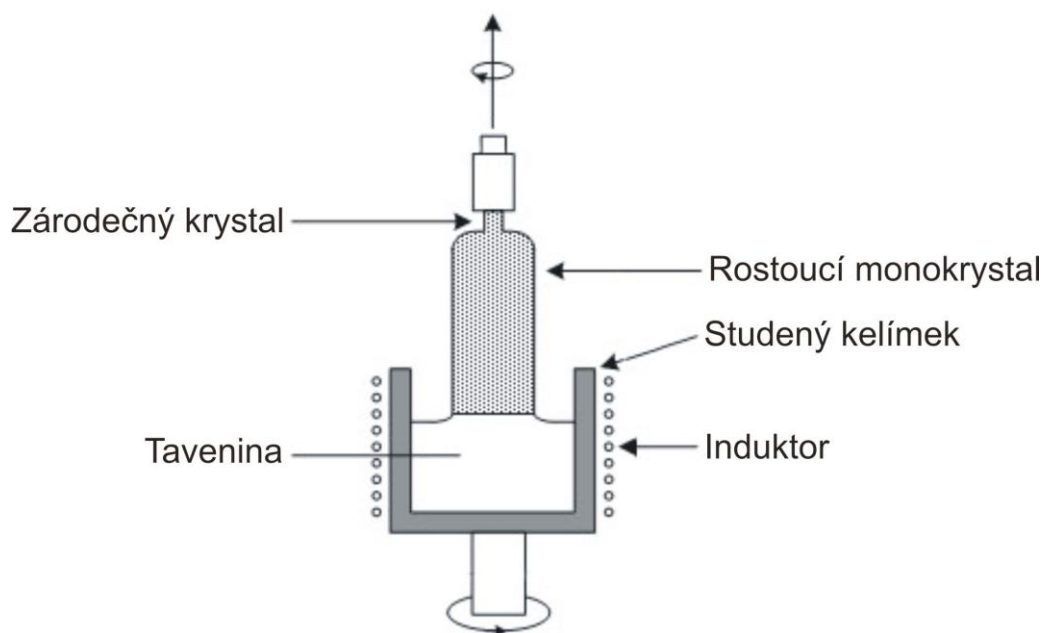
- vypnutím napájecího zdroje,
- litím vsázky do vody,
- ochlazováním vsázky pomocí proudu vzduchu,
- řízenou krystalizací ovládnutím teplotního pole uvnitř kelímku.

*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]

Rozměry - délka taženého ingotu jsou ovlivněny teplotou vsázky a rychlostí otáčení navíjející tyče s ingotem.



Obrázek 19: Czochralského metoda krystalizace [36]

*b) Přímá metoda*

Při průběžném tavení materiálu ve studeném kelímku dochází k tvorbě krystalů způsobem, který je znázorněn na Obrázek 20.

V porovnání s ostatními metodami vytvářející žárovevné odolné krystaly má přímá krystalizace několik výhod: [24], [31]

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

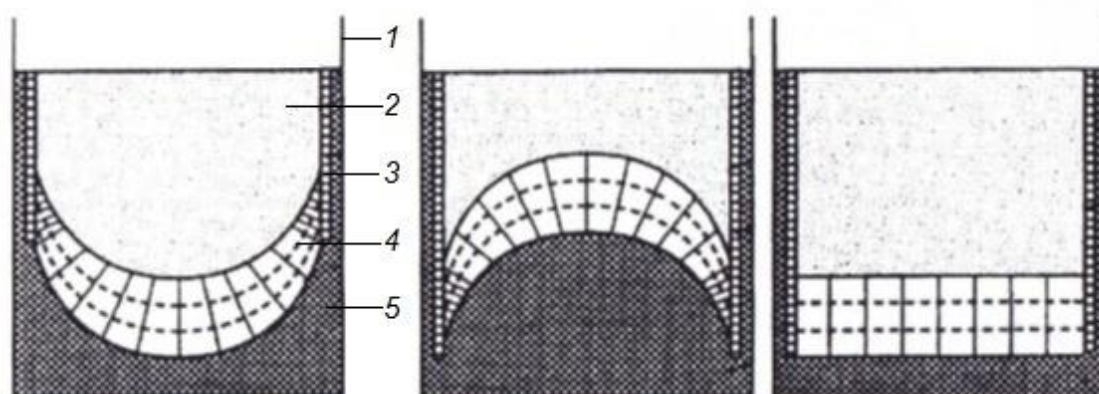
Velikost krystalu při přímé krystalizaci je ovlivněna několika faktory: [24], [31]

- objemem tavené vsázky,
- směrem krystalizace,
- rychlost posuvem studeného kelímku oproti induktoru,
- výkonem a kmitočtem napájecího zdroje - VF generátorem.

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

- elektrickou vodivostí vsázky,
- teplotou tavení vsázky.

V závislosti na výše zmíněných parametrech může hladina vsázky studeného kelímku nabývat tří tvarů: konkávního, konvexního a vodorovného. Viz obrázek 17.



Obrázek 20: 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 21: Jednorázový odlitek  $Al_2O_3$ ; červená) nejteplejší místo při tavně, zelená) směr růstu krystalů, modrá) skull vrstva

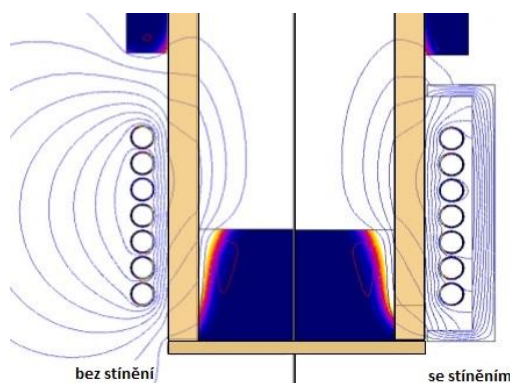
## 5.6 Off-gas systém

Off-gas systém slouží k odstranění 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. V ojedinělých případech se mohou objevit

zbytky radioaktivních prvků a těžkých kovů. Teplota nežádoucích plynů se pohybuje od 100 °C do 200 °C. Off-gas systém taktéž udržuje požadovanou hodnotu tlaku vzduchu v systému a 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

Principem elektromagnetického stínění je potlačit nežádoucí vyzařování elektromagnetických vln, se kterými by mohl přijít do kontaktu personál obsluhujícího zařízení či objekty nacházející se v blízkosti jeho zdroje. Elektromagnetické vlnění lze nejčastěji odstínit kovovým krytem (princip Faradayovy klece), pomocí transformátorových plechů nebo dodržením vzdálenostních limitů. Elektromagnetické stínění se používá hlavně u velkých kelímkových systémů. Odstínění malých kelímků je technologicky problematické. Důvodem jsou rozměry a konstrukce kelímku. Pracovní komora a kovové části jsou proto u malých kelímků vyráběny z nemagnetických materiálů. [32]



Obrázek 22: 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 systému. Hlavními prvky systému jsou: induktor, vsázka, segmenty kelímku a měnič.

K dosažené nejvyšší efektivnosti 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, parametry vsázky atd.

### 6.1 Tepelné ztráty ve studeném kelímku

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

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

kde  $P_v$  je výkon pro tavení vsázky [W],  $P_d$  jsou ztráty do dna kelímku [W],  $P_s$  jsou ztráty do stěn kelímku [W],  $P_p$  jsou ztráty sáláním [W].

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

(ztráty vedením):

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

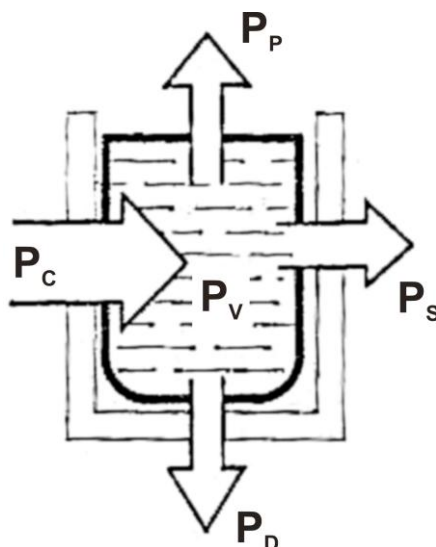
stěn kelímku: (pro rovnou stěnu)

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla mezi stěnou kelímku a vodou [W/m<sup>2</sup>K],  $\lambda_s$  je tepelná vodivost ztuhlé vrstvy [W/m<sup>2</sup>K],  $\lambda_p$  je tepelná vodivost mezery mezi kelímkem a ztuhlé vrstvy [W/m<sup>2</sup>K],  $x_p$  je vzdálenost mezi ztuhlou vrstvou a kelímkem [m],  $\lambda_k$  je tepelná vodivost stěny kelímku [W/m<sup>2</sup>K],  $x_k$  je tloušťka stěny kelímku [m].

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

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

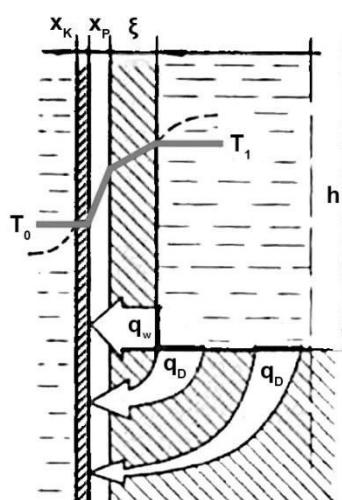
$$\Delta T = (T_1 - T_0) \quad (48)$$



Obrázek 23: Energetická bilance [39]

Tepelné ztráty, které procházejí 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 zvětšujícími rozměry taveniny rostou i ztráty stěnami kelímku a povrchem vsázky.

Z obrázku 24 lze vypočítat, že ztráty, resp. tok proudění tepla ze dna kelímku  $q_D$  (vsázky) se ohýbá a směřuje ke stěnám kelímku. Tepelné ztráty dnem kelímku se podílí přibližně 20 % na celkových ztrátách. Výpočet tepelných ztrát ze dna kelímku je obdobný jako u výpočtu měrných tepelných ztrát stěnou kelímku (studený kelímek musí mít pro tento případ vodou chlazené dno), viz rovnice 46.



Obrázek 24: 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 tepelné ztráty studeného kelímku jsou tedy dány rovnicí 44. Celková tepelná účinnost tavení materiálu ve studeném kelímku je dána poměrem mezi potřebným 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 při procesu tavení 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.

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

Dalšími elektrickými ztrátami jsou ztráty v lamelách kelímku. K určení těchto ztrát je zapotřebí matematických modelů s následným ověřením výsledků. Problém při určování ztrát v segmentech kelímku nastává v orientaci proudu.

- v lamelách je proud orientován proti proudu procházejícímu induktoru,
- proud indukující se v lamelách kelímku má radiální a axiální složku, který se neuzavírá 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% v závislosti na vlastnostech elektricky vodivých materiálů. U účinnosti elektricky nevodivých materiálů lze za odpovídajících předpokladů dosáhnout účinnosti až 90 %. Takhle vysoká účinnost je zapříčiněna rozdílem elektrické vodivosti vsázky a měděného kelímku. Vztah pro elektrickou účinnost je dán vztahem (21), 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:

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

kde  $P_v$  je výkon pro tavení vsázky [W],  $D$  je vnitřní průměr cívky induktoru [m],  $d$  je průměr vsázky (válcová) [m],  $\delta$  je hloubka vniku [m],  $\rho_i$  je měrný odpor materiálu induktoru [ $\Omega \cdot m$ ],  $\rho_v$  je měrný odpor materiálu vsázky [ $\Omega \cdot m$ ],  $\mu_r$  je relativní permeabilita materiálu vsázky [-].

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 Hodnocení studeného kelímku metodou 3E

### 6.4.1 Ekonomické a energetické hledisko

V tabulce 9 a 10 jsou zachyceny parametry produktivity tavicího procesu a energie potřebné pro tavení 1 kg vsázky při jednorázovém a kontinuálním tavení materiálů v závislosti na průřezu vsázky. Ze zaznamenaných údajů je patrné, že kontinuální tavení je oproti jednorázovému výhodnější a to z obou výše zmíněných hledisek. Je to dáno především tím, že při kontinuálním tavení nedochází v takové míře jako u jednorázového tavení k zastavení tavicího procesu a tím k znovunastartování vsázky jako u jednorázového tavení.

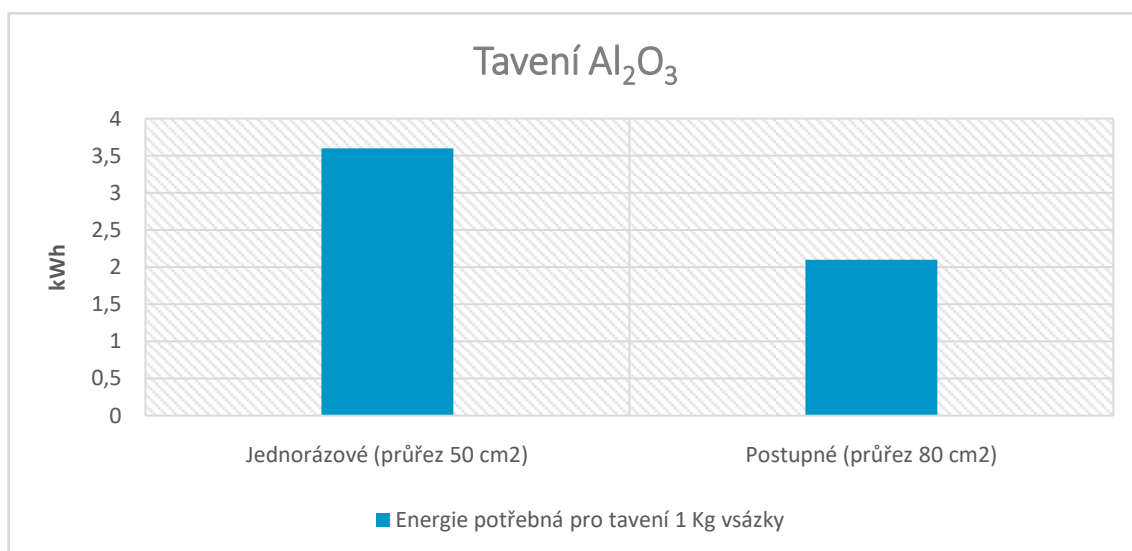
V grafech na obrázku 25 a 26 je zachyceno vzájemné porovnání produktivity procesu potřebné energie k roztavení 1 kg vsázky  $Al_2O_3$  mezi jednorázovým a postupným tavením.

Tabulka 9: Jednorázové tavení oxidických materiálů [24]

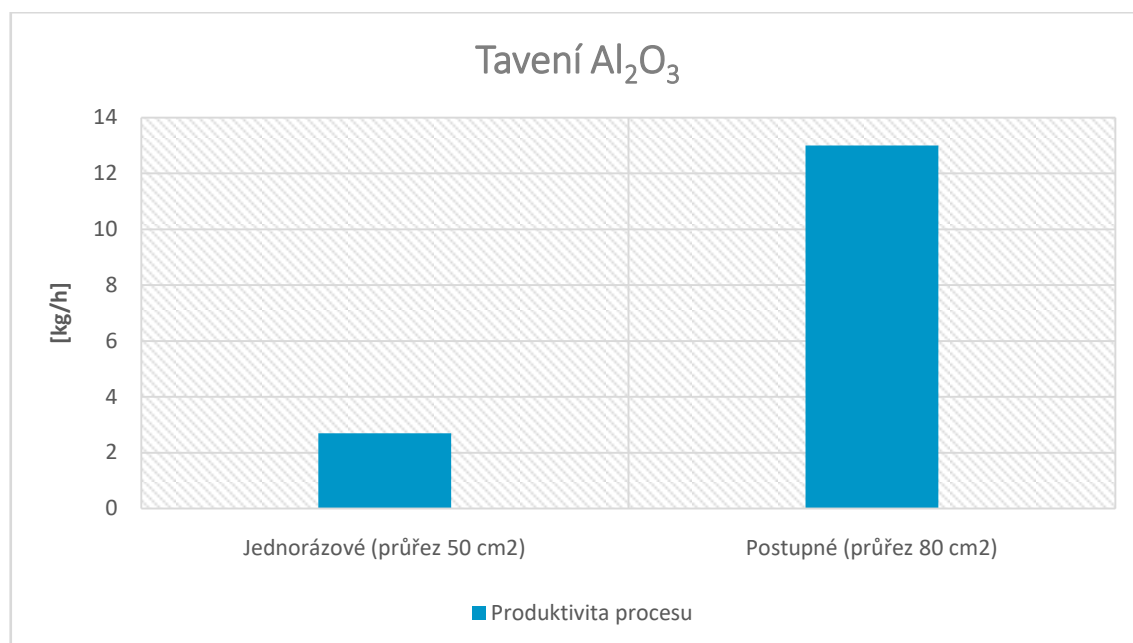
Tavený materiál	Průřez plochy taveniny [ $\text{cm}^2$ ]	Produktivita procesu [kg/h]	energie potřebná pro tavení 1 Kg vsázky [kWh]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	50	2,7	3,6
CaO	65	3,5	8,5
$\text{ZrO}_2$	50	2	7
$\text{Y}_2\text{O}_3$	50	3,1	7,6

Tabulka 10: Kontinuální tavení oxidických materiálů [24]

Tavený materiál	Průřez plochy taveniny [ $\text{cm}^2$ ]	Produktivita procesu [kg/h]	energie potřebná pro tavení 1 Kg vsázky [kWh]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	80	13	2,1
MgO	80	11,5	6
$\text{CeO}_2$	80	9	4,5
$\text{Y}_2\text{O}_3$	95	25	2,3



Obrázek 25: Energie potřebná pro tavení 1 Kg vsázky



Obrázek 26: Produktivita procesu

### 6.4.2 Ekologické hledisko

Tavení ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce má oproti konvenčnímu tavení pomocí fosilních paliv několik výhod. Při tavení elektromagnetickou indukcí odpadá potřeba paliva na tavení vsázky a s tím následný vznik spaliny. Oproti elektricky napájeným pecím lze snadno ve studeném kelímku tavit i materiály obtížně tavitelné. Výhodou studeného kelímku oproti obloukovým pecím je jeho nenáročnost. I přes poměrně vysokou efektivitu obloukových pecí dochází časem k opotřebení tavicích elektrod a musí dojít k jejich výměně. I přes fakt, že ve studeném lze snadno tavit i elektricky vodivé materiály, je v tomto případně lepší použít k jejich tavení indukční, obloukovitou či kanálkovou pec, které mají oproti tavení elektricky nevodivých materiálu relativně vyšší účinnost.

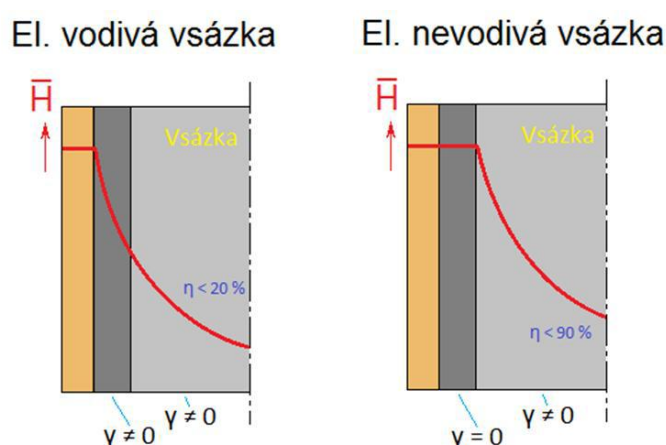
Studený kelímek lze použít i k vitrifikaci vyhořelého radioaktivního odpadu. K jeho zalití se využívá borosilikátových skel. Tavicí komory studeného kelímku bývají opatřeny systémem na odsávání radioaktivních výparů (Off-gass systém), které vznikají při tavení.

### 6.5 Podmínky k dosažení maximální účinnosti tavicího procesu

Jeden z parametrů při hodnocení efektivity tavení vsázky je její elektrická vodivost. Jak

již bylo v předcházejících kapitolách zmíněno, k tavení může být použita jak vodivá tak nevodivá vsázka. Při použití elektricky vodivé vsázky lze dosáhnout účinnosti maximálně 20%. Důvodem takto nízké účinnosti je vytvoření tenké skull vrstvy na rozhraní kelímku a vsázky. Tato vrstva je u elektricky vodivé vsázky vodivá a brání pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky.

U elektricky nevodivé vsázky na bázi oxidů kovů a skel, lze dosáhnout účinnosti až 90%. Tyto materiály mají dobré elektrické a tepelné izolační vlastnosti. Skull vrstva je v tomto případě elektricky nevodivá s malými tepelnými ztrátami, elektricky vodivá je pouze vsázka.



Obrázek 27: Elektrická vodivost skull vrstvy [40]

Na zvýšení účinnosti respektive omezení Joulových ztrát uvnitř kelímku má vliv i tvar lamel segmentového kelímku. Příkladem jsou segmenty kruhového průřezu, kterými lze snížit Joulovy ztráty přibližně o 8% oproti segmentům obdélníkového a lichoběžníkového tvaru. [41]

## 6.6 Závěry pro praxi

Možnosti uplatnění oxidu hlinitého v praxi byly popsány v kapitole 4.3.2. V kapitole závěry pro praxi budou shrnuty hlavní výhody a nevýhody tavení materiálů ve studeném kelímku elektromagnetickou indukci.

### 6.6.1 Předností tavení ve studeném kelímku

- Hlavní předností tavení ve studeném kelímku je možnost tavení materiálů s teplotou tavení až  $3000^\circ C$ . Tato metoda je vhodná spíše pro elektricky nevodivé materiály (myšleno v souvislosti s bodem tavení materiálů). Při tavení

elektricky nevodivých materiálů lze dosáhnout elektrické účinnosti až 90 %. Takto vysoká účinnost je dána především díky nevodivé skull vrstvě.

- Vlivem intenzivního chlazení kelímku dochází na jeho stěnách k vytvoření tenké izolační vrstvy (skull vrsta), která brání styku taveniny se stěnami kelímku. Skull vrstva zabraňuje roztavení kelímku a případné kontaminaci vsázky.
- Jednou z dalších podstatných výhod je možnost kontinuálního tavení. Existují dva typy průběžného tavení – průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny a průběžné tavení s postupným odebráním ingotu ze dna kelímku. Při průběžném tavení nedochází k zastavení tavicího procesu jako u jednorázového tavení, tím je zajištěna vyšší produktivita tavicího procesu při nižší energetické spotřebě. Zároveň není potřeba demontovat studený kelímek při odebrání ingotu jako u jednorázového tavení.
- Při tavení dochází vlivem elektromagnetických sil k promíchávání vsázky v celém jejím objemu.
- 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 jednotlivé fáze jeho tavení. Není tedy potřeba investic do drahých prototypů.
- Pomocí skel a keramiky lze provádět vitifikaci radioaktivního odpadu.
- Pokud se technologicky nevyžaduje super čistého materiálu, lze díky absenci víka kelímku poměrně snadno upravovat jeho parametry.
- Proces tavení lze zefektivnit vhodnou volbou kmitočtu.
- Pro zvýšení účinnosti procesu (omezení tepelných ztrát) tavení je možné nanesení tenké izolační vrstvy z kaolinu nebo přímo taveného oxidu na vnitřní stěny segmentů.
- Nedochází k drastickému tepelnému a atmosférickému zatížení, jelikož se materiál při indukčním ohřevu taví sám v sobě obvykle v uzavřené pracovní komoře s následnou filtrací vzniklých plynných zplodin.



## 6.6.2 Nevýhody tavení ve studeném kelímku

- Tavení elektricky nevodivých materiálů je komplikovaný proces. Při tavení je nutné regulovat parametry jako je výkon, frekvence, proud, chlazení kelímku atd. Při nesprávném stanovení a řízení těchto parametrů může při tavně dojít například k zatuhnutí tavené vsázky, vlivem nesprávného chlazení k roztavení kelímku a tím úniku materiálu, předčasně krystalizaci apod. Při eventuelním protavení kelímku ve styku protavení a styku taveniny s vodou dojde k jejímu rozkladu a následné explozi.
- Při tavení oxidů kovů a skel je zapotřebí k zahájení tavně startovací fáze. Startovací fáze má za úkol snížit vysoký měrný odpor elektricky nevodivých materiálů. Tato nevýhoda sebou nese i mírné zvýšení energetické náročnosti celého procesu tavení.
- Při tavení oxidů kovů může dojít k vytvoření krusty na povrchu vsázky, kterou způsobuje přidávaný materiál. Tím je zabráněno přidávání dalšího materiálu pro tavení. Aby nedošlo ke kontaminaci vsázky, musí být vytvořená krusta před dosypáváním práškovité směsi odstraněna, nejčastěji se tak děje pomocí keramických tyčí.
- Počítačová simulace modelu studeného kelímku je náročná na čas, přípravu, návrh, výpočetní systém atd.
- Při vitifikaci nebezpečného radioaktivního odpadu je nutné dbát vysoké obezřetnosti a přípravy zalití kontaminovaného odpadu. Před samotným zalitím odpadu musí dojít k jeho vysušení v kalcinátoru. Vitifikace nebezpečného odpadu má tři kategorie – nízko, středně a vysoce radioaktivní odpad

## 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 byly popsány klíčové vlastnosti  $Al_2O_3$ , mezi které 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, substráty, snímače teploty atd. Dále byly v práci popsány další oxidické materiály a skla. Využití těchto materiálů je obdobné. Materiály jsou žárovečné.

V práci jsem uvedl rozdíly v elektrické vodivosti a elektrické nevodivosti materiálů v praxi používaných. Elektrická účinnost elektricky nevodivých materiálů dosahuje až 90 %. Oproti tomu elektrická účinnosti elektricky vodivých materiálů se pohybuje na hranici 20–40 %. V práci jsou teoreticky uvedeny elektrické a tepelné ztráty, které vznikají při tavení ve studeném kelímku. Při průběžném tavení je nutné vyřešit plnění kelímku granulátem, tak aby nedošlo k zastavení tavicího procesu. Při samotném tavení je nutné dbát na kontinuitu procesu 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 kelímků zanedbatelné. Jejich tavení probíhá v pracovní komoře konstruované z nemagnetických ocelí. Pracovní komora je dvouvrstvá a má vnitřní chlazení vodou. Při průmyslovém tavení ve studeném kelímku doporučuji využít závěrů z hodnocení kritéria 3E.

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR [2]	13
OBRÁZEK 2: INDUKČNÍ MODEL CÍVKY [4]	15
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]	17
OBRÁZEK 4: TEPLOTA TAVENÍ VYBRANÝCH OXIDŮ A SKLA	31
OBRÁZEK 5: TEORETICKÝ MODEL STUDENÉHO KELÍMKU [23]	33
OBRÁZEK 6: TAVENÍ VSÁZKY VE STUDENÉM KELÍMKU – JEDNORÁZOVÉ TAVENÍ MATERIÁLU, PRŮBĚŽNÉ TAVENÍ S POSTUPNÝM UVOLŇOVÁNÍM, PRŮBĚŽNÉ TAVENÍ S POSTUPNÝM ODEBÍRÁNÍM INGOTU ZE DNA KELÍMKU. [24]	34
OBRÁZEK 7: PRINCIP STUDENÉHO KELÍMKU PRO POSTUPNÉ TAVENÍ. [25]	35
OBRÁZEK 8: MODEL PRŮBĚŽNÉHO TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU [26]	36
OBRÁZEK 9: MODEL INDUKTOROVÉHO KELÍMKU [28]	37
OBRÁZEK 10: REÁLNÝ INDUKTOROVÝ KELÍMEK [24]	37
OBRÁZEK 11: MODEL SEGMENTOVÉHO KELÍMKU [29]	38
OBRÁZEK 12: REÁLNÝ SEGMENTOVÝ KELÍMEK [30]	38
OBRÁZEK 13: ÚČINNOST STUDENÉHO KELÍMKU [28]	39
OBRÁZEK 14: SCHÉMA CHLAZENÍ SEGMENTOVÉHO KELÍMKU [32]	40
OBRÁZEK 15: ZÁVISLOST MĚRNÉHO ODPORU NA TEPLOTĚ [33]	41
OBRÁZEK 16: KOV PRO EXOTERMICKOU OXIDACI [34]	43
OBRÁZEK 17: FÁZE STARTOVACÍHO PROCESU OXIDOVÉ VSÁZKY VE STUDENÉM KELÍMKU. VLOŽENÍ MATERIÁLU DO STUDENÉHO KELÍMKU (A), NATAVENÍ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKCÍ (B), POSTUPNÝ OHŘEV OBJEMU VSÁZKY(C,D,E). []	44
OBRÁZEK 18: VODIVÝ MATERIÁL VE TVARU KROUŽKU [35]	44
OBRÁZEK 19: CZOCHRALSKÉHO METODA KRYSTALIZACE [36]	46
OBRÁZEK 20: 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 21: JEDNORÁZOVÝ ODLITEK $Al_2O_3$ , ČERVENÁ) NEJTEPLEJŠÍ MÍSTO PŘI TAVBĚ, ZELENÁ) SMĚR RŮSTU KRYSTALŮ, MODRÁ) SKULL VRSTVA	47
OBRÁZEK 22: STÍNĚNÍ INDUKTORU STUDENÉHO KELÍMKU [38]	48
OBRÁZEK 23: ENERGETICKÁ BILANCE [39]	50
OBRÁZEK 24: ZTRÁTY DNEM KELÍMKU [39]	50
OBRÁZEK 25: ENERGIE POTŘEBNÁ PRO TAVENÍ 1 KG VSÁZKY	53
OBRÁZEK 26: PRODUKTIVITA PROCESU	54

## Seznam tabulek

TABULKA 1: VLASTNOSTI HLINÍKU .....	25
TABULKA 2: MOHOSOVA STUPNICE TVRDOSTI .....	25
TABULKA 3: VLASTNOSTI OXIDU HLINITÉHO .....	28
TABULKA 4: VLASTNOSTI OXIDOVÉ KERAMIKY A SKLA .....	31
TABULKA 5: SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD JEDNORÁZOVÉHO TAVENÍ .....	34
TABULKA 6: SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD PRŮBĚŽNÉHO TAVENÍ S POSTUPNÝM UVOLŇOVÁNÍM TAVENINY .....	35
TABULKA 7: HODNOTY ELEKTRICKÉHO ODPORU A KMITOČTU VYBRANÝCH OXIDŮ KOVŮ .....	41
TABULKA 8: MĚRNÁ HMOTNOST KOVŮ .....	43
TABULKA 9: JEDNORÁZOVÉ TAVENÍ $Al_2O_3$ [24] .....	53
TABULKA 10: KONTINUÁLNÍ TAVENÍ $Al_2O_3$ [24] .....	53

## Seznam odborné literatury

- [1] LANGER, E.: Teorie indukčního a dielektrického tepla, Praha, Academia, 1979.
- [2] Poyntingvector. 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): WikimediaFoundation, 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/tvrdost-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] NACKE, B. et al. Continuous melting and pouring of analuminum oxide based melt with cold crucible [online]. [cit. 20. 3. 2018]. 2016, France. URL: < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01331350/document> >

[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.aveva.com/activities/liblocal/images/fr/activites/aval/dossiers/creus-et-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://inldigitallibrary.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/compositematerialsformagneticfieldcontrolinep-mss-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.
- [40] LANGER, E. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Academia, 1979, Praha.
- [41] KOŽENÝ, Jiří, a kolektiv. *Power losses in induction furnace with cold crucible with different segments shape* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: [http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/Rocnik2014/Cislo1\\_2014/r8c2c4.pdf](http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/Rocnik2014/Cislo1_2014/r8c2c4.pdf)