

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Tavení oxidů elektromagnetickou indukcí ve studeném  
kelímku**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan DUDA**

Osobní číslo: **E16N0097P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Tavení oxidů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte stručně teorii vzniku tepla elektromagnetickou indukcí v elektricky vodivých a v elektricky nevodivých materiálech.
2. Uveďte fyzikální vlastnosti oxidů tavených ve studeném kelímku a jejich změny v závislosti na teplotě.
3. Objasněte přenos elektromagnetické energie z induktoru do vsázky ve studeném kelímku.
4. Analyzujte výsledky naměřených hodnot elektrických a tepelných veličin z reálných taveb oxidů ve studeném kelímku.
5. Ze získaných poznatků sestavte závěry pro efektivní vedení tavy oxidů ve studeném kelímku.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

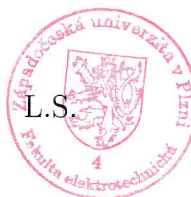
**1. Vhodnou literaturu určí vedoucí práce při úvodní konzultaci.**


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

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

V diplomové práci se zaměřuji na osvětlení problematiky elektromagnetické indukce ve studeném kelímku, a to jak na tavení elektricky vodivých, tak nevodivých materiálů. V diplomové práci se věnuji převážně tavení oxidů. Také zde popisuji problematiku startovací fáze pro elektricky nevodivé materiály a provádím analýzu výsledků z reálných dat z tavení  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Oxidu Hlinitého) ve studeného kelímku. Závěrem pojednávám o možnostech zefektivnění tavicích procesů ve studeném kelímku ze získaných poznatků.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetická indukce, studený kelímek, skull vrstva, hloubka pronikání elektromagnetického vlnění, zářivý vektor

## **Abstract**

In the Diploma work I describe topic of electromagnetic induction in cold crucible for melting electrical conductive and non-conductive materials. Main goal of diploma work are metal oxides and their melting. For these materials I describe problematics of starting phase and I'm doing here analysis of data from real melting of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Aluminium Oxide) in the cold crucible. In conclusion, I discuss the possibilities of simplifying the processes of melting of oxides in the cold crucible from the acquired knowledge.

## **Key words**

Electromagnetic induction, cold crucible, skull, depth of penetration, Poynting's radiant vector

## **Prohlášení**

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.



.....  
podpis

V Plzni dne 22.5.2018

Jan Duda

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce **prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc.** za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval panu **Doc. Ing. Igorovi Poznyakovi, CSc.** za vedení zvláště zajímavého semináře o studeném kelímku, výpočtech a poznatcích z praxe.

Chtěl bych poděkovat panu **Ing. Davidovi Rotovi, Ph.D.** za osvětlení práce s daty získaných z reálných taveb ve studeném kelímku a následné diskuzi při jejich analýze.

V neposlední řadě bych rád poděkoval kolegům **Bc. Martinovi Kopovi** a **Bc. Olze Pisarevě** za pomoc při překladech materiálů z ruského jazyka.

Nakonec bych rád poděkoval **své rodině**, která mě vždy v mém studiu na vysoké škole plně podporovala. Dále bych chtěl poděkovat **svým přátelům**, kteří mi uměli zvednout náladu v těžkých chvílích.

**Obsah**

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 CÍLE PRÁCE A METODIKA ŘEŠENÍ</b> .....	<b>12</b>
<b>2 VZNIK TEPLA ELEKTROMAGNETICKOU INDUKCÍ</b> .....	<b>13</b>
2.1 TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE PŘI INDUKČNÍM OHŘEVU.....	13
2.1.1 <i>Diferenciální tvar Maxwellových rovnic</i> .....	13
2.1.2 <i>Harmonické elektromagnetické vlnění</i> .....	15
2.1.3 <i>Poyntingův zářivý vektor</i> .....	17
2.1.4 <i>Hloubka pronikání elektromagnetického vlnění</i> .....	19
<b>3 STUDENÝ KELÍMEK</b> .....	<b>22</b>
3.1 TECHNOLOGIE A APLIKACE .....	23
3.1.1 <i>Technologie</i> .....	23
3.1.2 <i>Aplikace</i> .....	24
3.2 TAVBA VE STUDENÉM KELÍMKU PRO ELEKTRICKY VODIVÉ MATERIÁLY .....	26
3.2.1 <i>Titan (Ti)</i> .....	26
3.3 TAVBA VE STUDENÉM KELÍMKU PRO ELEKTRICKY NEVODIVÉ MATERIÁLY .....	27
3.3.1 <i>Indukční tavení <math>Al_2O_3</math> ve studeném kelímku</i> .....	28
3.4 MATEMATICKÝ VÝPOČET STUDENÉHO KELÍMKU PRO TAVENÍ $Al_2O_3$ .....	30
3.4.1 <i>Startovací fáze</i> .....	31
3.4.2 <i>Formovací fáze</i> .....	36
3.4.3 <i>Stabilní fáze tavby</i> .....	39
3.4.4 <i>Elektrický výpočet tavby pro stabilní fázi</i> .....	40
3.4.5 <i>Výpočet tepelných ztrát kelímku</i> .....	45
<b>4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ Z REÁLNÝCH TAVEB <math>Al_2O_3</math></b> .....	<b>48</b>
4.1 TAVBA $Al_2O_3$ – 12.1.2017.....	48
4.2 TAVBA $Al_2O_3$ – 12.1.2018.....	52
4.3 TAVBA $Al_2O_3$ – 25.1.2018.....	54
4.4 VÝSLEDNÉ ZHODNOCENÍ TAVEB.....	55
<b>5 DOPORUČENÍ PRO PRAXI</b> .....	<b>56</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>58</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>60</b>



## Úvod

V předkládané práci se zaměřuji na princip tavení oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku a na stručný popis principů indukčního tavení. Věnuji se zde pojmům hloubka pronikání elektromagnetického vlnění či zářivý vektor a odvození rovnic elektromagnetického vlnění z Maxwellových rovnic.

V druhé části diplomové práce se zaměřuji na technologii a aplikaci studeného kelímku a problematiku tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů. U elektricky nevodivých materiálů popisuji problematiku tzv. startovací fáze. Zaměřuji se i na vysvětlení dalších fází, kterými jsou formovací a stabilní fáze.

V jedné z nejdůležitějších částí diplomové práce se zaměřuji na výpočet parametrů vsázky studeného kelímku, jako je hloubka pronikání elektromagnetického vlnění  $\Delta$  či kvalitativní parametr  $x$ . Věnuji se problematice startovací fáze – množství startovacího materiálu, průběhu exotermické reakce a závislosti poloměru startovacího materiálu na frekvenci při pokojové teplotě.

Dále zde popisuji závislost parametrů  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Oxidu hlinitého), jako je rezistivita a susceptance (el. vodivost), na teplotě a změně skupenství.

Pro stabilní fázi uvádím možnosti zlepšení kvalitativního parametru  $x$ , jako je změna kmitočtu, změna teploty tavení či jaký poloměr by měl být pro určitou hodnotu parametru  $x$ .

Pro získání teoretické účinnosti přenosu elektromagnetického vlnění z induktoru do vsázky, zde provádím zjednodušení elektrický výpočet respektující pouze reakci mezi induktorem a taveninou roztavenou v plném objemu (stabilní fáze), bez vlivu působení segmentů studeného kelímku.

Závěrem výpočetní části diplomové práce provádím výpočet tepelných ztrát ve studeném kelímku, a to jak ztrát vedením, prouděním tak i sáláním.

V neposlední řadě analyzuji data z reálných taveb  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve studeném kelímku, realizovaných na fakultě elektrotechnické Západočeské Univerzity v Plzni a za podpory výzkumného oddělení v Řeži u Prahy. U těchto taveb hodnotím jejich průběh, úspěšnost a náročnost procesu.

V závěru práce hodnotím jednotlivé kapitoly a popisuji možná zlepšení parametrů, postupů a technologií dle získaných poznatků v průběhu psaní diplomové práce.

## Seznam symbolů a zkratek

### Symboly:

a .....	výška (m)
A .....	plocha ( $m^2$ )
$\vec{B}$ .....	magnetická indukce (T)
d .....	tloušťka stěny (m)
$\vec{D}$ .....	elektrická indukce ( $C \cdot m^{-3}$ )
$\vec{E}$ .....	intenzita elektrického pole ( $V \cdot m^{-1}$ )
f .....	kmitočet (Hz)
$\vec{H}$ .....	intenzita magnetického pole ( $A \cdot m^{-1}$ )
I .....	proud (A)
k .....	konstanta šíření elektromagnetického vlnění (-)
$k_C$ .....	koeficient redukce parametrů taveniny na indukční parametry
$k_1$ .....	korekční součinitel (-)
$k_r$ .....	tloušťka stěny induktoru (m)
l .....	tloušťka stěny (m)
M .....	intenzita vyzařování ( $W \cdot m^{-2}$ )
$\vec{N}$ .....	Poyntingův zářivý vektor ( $W \cdot m^{-2}$ )
p .....	tlak (Pa)
P .....	výkon, ztráty (W)
r .....	poloměr (m)
R .....	odpor ( $\Omega$ )
S .....	zdánlivý výkon (VA)
T .....	teplota ( $^{\circ}C$ ; K)
U .....	napětí (V)
W .....	energie elektromagnetického pole (J)
$W_E$ .....	energie elektrického pole (J)
$W_M$ .....	energie magnetického pole (J)
x .....	kvalitativní parametr tavby (-)
X .....	reaktance ( $\Omega$ )
Z .....	závity (-)
Z .....	impedance ( $\Omega$ )

---

$\alpha$ .....	fázová konstanta (-)
$\alpha$ .....	součinitel přestupu tepla ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
$\beta$ .....	měrný útlum (-)
$\gamma$ .....	konduktivita – vodivost materiálu ( $S \cdot m^{-1}$ )
$\Delta$ .....	hloubka vniku elektromag. vlnění do el. vodivé vsázky (m)
$\varepsilon$ .....	absolutní permitivita ( $F \cdot m^{-1}$ )
$\varepsilon$ .....	emisivita (-)
$\eta$ .....	účinnost (%)
$\lambda$ .....	tepelná vodivost ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\mu$ .....	absolutní permeabilita ( $H \cdot m^{-1}$ )
$\rho$ .....	objemová hustota náboje ( $C \cdot m^{-3}$ )
$\rho_{mat} (^{\circ}C)$ .....	rezistivita materiálu při určité teplotě ( $\Omega \cdot m$ )
$\rho_{mat}$ .....	hustota materiálu ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\sigma$ .....	Stefan-Boltzmanova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8}$ ( $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-4}$ )
$\omega$ .....	úhlová frekvence záření ( $rad \cdot s^{-1}$ )
$\nabla$ .....	operátor Nabla (-)

**Zkratky:**

$Al_2O_3$ .....	Oxid Hlinitý
ISM .....	Induction Skull Melting (Indukční tavení ve studeném kelímku)
$ZrO_2$ .....	Oxid Zirkoničitý

## 1 Cíle práce a metodika řešení

Hlavním cílem této diplomové práce je provést analýzu naměřených dat z reálné tavyby elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku, provedenou ve výzkumném parku KEE v Plzni. Tavba proběhla za pomoci výzkumného oddělení v Řeži u Prahy, díky jehož podpoře vůbec mohl studený kelímek na půdě ZČU vzniknout.

Analýza se zabývá daty, získanými při tavně  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Oxid hlinitého), při čemž tato data, spolu s nabytými vědomostmi, budu dále využívat pro další zhodnocení možností efektivnější tavyby do budoucna. Jako jsou hodnoty startovací fáze, teplota tavyby a frekvence, na nich závisící hloubka vniku, na které zase závisí rozměr samotného studeného kelímku.

Kromě hlavních cílů diplomové práce zde také osvětluji základní problematiku tavení elektromagnetickou indukcí elektricky vodivých a nevodivých materiálů.

U nevodivých materiálů se zaměřuji převážně na oxidy, konkrétně na  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . U tohoto materiálu vysvětluji problematiku startovací fáze a vznik skull vrstvy, která umožňuje tavení materiálu bez vzniku příměsí a nečistot, čímž vniká materiál o vysoké čistotě.

V neposlední řadě pokládám za důležité se zmínit o vlivu samotné teploty tavyby na vlastnosti oxidů tavených ve studeném kelímku. A také to, že s rostoucí teplotou se z daného materiálu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) stává z izolantu vodič.

## 2 Vznik tepla elektromagnetickou indukcí

### 2.1 Teorie elektromagnetického pole při indukčním ohřevu

(Tuto kapitolu jsem zpracoval z následujícího zdroje [1])

Indukční ohřev je v dnešní době velice výhodnou metodou pro úpravu materiálů, ať už se jedná o povrchové kalení materiálů, nebo samostatné tavení vodivých a za určitých podmínek i nevodivých materiálů. V materiálu, vloženého do střídavého elektromagnetického pole, se neindukují vířivé proudy, které způsobují Jouelovy ztráty, tzv. Jouelovo teplo.

Pro popis elektromagnetického pole se vychází ze známých Maxwellových rovnic, které určují vlnový charakter elektromagnetického pole.

Předpokladem je konečná rychlost šíření vlnových jevů. Prostředí šíření se zjednodušeně řeší jako homogenní a izotropní. Prostředí se pak dá popsat konstantami  $\gamma, \mu, \epsilon$ .

#### 2.1.1 Diferenciální tvar Maxwellových rovnic

Pro základní popis elektromagnetické indukce se vychází z prvních dvou Maxwellových rovnic:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \cdot \vec{E} + \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (2.1.1.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (2.1.1.2)$$

Absolutní permitivita se dá rozložit na dvě části  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ , na permitivitu vakua a permitivitu materiálu. Stejně tak se dá rozložit absolutní permeabilita  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ .

Jelikož uvažujeme prostředí bez vnitřních zdrojů energie, předpokládáme objemovou hustotu náboje  $\rho$  rovnou nule. Potom lze třetí Maxwellovu rovnici napsat v následujícím tvaru:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \operatorname{div} \varepsilon \cdot \vec{E} = \rho = 0 \rightarrow \operatorname{div} \vec{E} = 0. \quad (2.1.1.3)$$

Čtvrtá Maxwellova rovnice bude mít následující tvar:

$$\operatorname{div} \vec{B} = \operatorname{div} \mu \cdot \vec{H} = 0 \rightarrow \operatorname{div} \vec{H} = 0. \quad (2.1.1.4)$$

Provedeme rotaci první Maxwellovy rovnice (2.1.1.1):

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{H}) = \gamma \cdot \operatorname{rot} \vec{E} + \varepsilon \cdot \frac{\partial(\operatorname{rot} \vec{E})}{\partial t}. \quad (2.1.1.5)$$

Druhou Maxwellovu rovnici (2.1.1.2) dosadíme do (2.1.1.5) a dostaneme:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{H}) = -\gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (2.1.1.6)$$

Levou stranu výrazu (2.1.1.6) lze upravit na:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H}. \quad (2.1.1.7)$$

Při respektování (2.1.1.4) můžeme říci, že divergence vektoru  $\vec{H}$  je rovna nule pak výsledná rovnice (2.1.1.6) bude ve tvaru:

$$\nabla^2 \vec{H} = \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (2.1.1.8)$$

Obdobným způsobem lze odvodit rovnici pro elektrické pole, opět provedeme rotaci, ale tentokrát na druhou Maxwellovu rovnici a za rotaci vektoru  $\vec{H}$  dosadíme z první Maxwellovy rovnice. Výsledný tvar rovnice je následující:

$$\nabla^2 \vec{E} = \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (2.1.1.9)$$

Tímto jsme získali základní rovnice pro popis elektrického a magnetického pole. Tyto rovnice se dají dále upravit pro případ elektricky vodivého a nevodivého prostředí. Pro elektricky vodivé prostředí ( $\gamma \neq 0$ ,  $\varepsilon_r = 0$ ) bude jejich tvar následující:

$$\nabla^2 \vec{H} = \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad ; \quad \nabla^2 \vec{E} = \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (2.1.1.10)$$

Pro elektricky nevodivé prostředí tedy  $\gamma = 0$  a  $\varepsilon_r \neq 0$  budou rovnice následující:

$$\nabla^2 \vec{H} = \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad ; \quad \nabla^2 \vec{E} = \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (2.1.1.11)$$

### 2.1.2 Harmonické elektromagnetické vlnění

Z rovnice (2.1.1.9) můžeme odvodit koeficient  $k$  a jeho složky  $\alpha$  a  $\beta$ . Provedeme parciální derivace vektoru  $\vec{E}$

$$\vec{E} = E \cdot e^{j\omega t} \rightarrow \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = j\omega \cdot \vec{E} \rightarrow \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \vec{E}. \quad (2.1.2.1)$$

Za tyto derivace dosadíme do rovnice (2.1.1.9) a položíme rovnou nule

$$\nabla^2 \vec{E} - j \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \omega \cdot \vec{E} + \varepsilon \cdot \mu \cdot \omega^2 \vec{E} = 0. \quad (2.1.2.2)$$

Rovnici dále upravíme

$$\nabla^2 \vec{E} + (\varepsilon \cdot \mu \cdot \omega^2 - j \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \omega) \vec{E} = 0. \quad (2.1.2.3)$$

Součinitele při vektoru  $E$  označíme jako  $k^2$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \cdot \vec{E} = 0. \quad (2.1.2.4)$$

Obdobně pro vektor  $H$



$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \cdot \vec{H} = 0. \quad (2.1.2.5)$$

Rovnice (2.1.2.4) a (2.1.2.5) jsou obecné rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění. To platí pro prostředí jak vodivé, tak nevodivé, dále pro vlnění elektromagnetické rovinné i válcové.

Konstanta  $k$  se nazývá konstanta šíření a obsahuje reálnou a imaginární složku

$$k = \alpha - j\beta. \quad (2.1.2.6)$$

kde  $\alpha$  je fázová konstanta a  $\beta$  je měrný útlum. Komplexní číslo  $k^2$  potom bude

$$k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta - \beta^2. \quad (2.1.2.7)$$

Pokud použijeme odvozenou hodnotu  $k^2$  z rovnice (2.1.2.3) dostaneme rovnici

$$k^2 = \alpha^2 - \beta^2 - j2\alpha\beta = \varepsilon \cdot \mu \cdot \omega^2 - j \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \omega. \quad (2.1.2.8)$$

V závislosti na rovnost reálných a imaginárních členů dostaneme

$$\alpha^2 - \beta^2 = \varepsilon \cdot \mu \cdot \omega^2, \quad (2.1.2.9)$$

$$j2\alpha\beta = j \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \omega. \quad (2.1.2.10)$$

Z rovnosti imaginárních částí (2.1.2.10) získáme konstantu  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\gamma \cdot \mu \cdot \omega}{2\beta}. \quad (2.1.2.11)$$

Tuto hodnotu dosadíme do rovnice reálných částí (2.1.2.9) a provedeme nezbytné úpravy pro získání kvadratické rovnice pro  $\beta^2$

$$4\beta^4 + 4\omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot \beta^2 - \omega^2 \cdot \gamma^2 \cdot \mu^2 = 0. \quad (2.1.2.12)$$

Z výsledné kvadratické rovnice pro  $\beta^2$  získáme kořeny

$$\beta_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot \left[ -1 \pm \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon} \right)^2} \right]. \quad (2.1.2.13)$$

Pro záporné znaménko by bylo  $\beta^2$  záporné a výsledné  $\beta$  potom imaginární, to není v reálných podmínkách možné, proto uvažujeme  $\beta^2$  pouze pro kladné znaménko. Výsledná hodnota  $\beta$  potom vychází

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \mu}{2} \cdot \left[ -1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon} \right)^2} \right]}. \quad (2.1.2.14)$$

Tím získáme měrný útlum  $\beta$ . Abychom získali i fázovou konstantu  $\alpha$  musíme za  $\beta^2$  dosadit do rovnice (2.1.2.9). Po úpravě získáme fázovou konstantu v následujícím tvaru

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \mu}{2} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon} \right)^2} \right]}. \quad (2.1.2.15)$$

### 2.1.3 Poyntingův zářivý vektor

Poyntingův zářivý vektor  $N$  ( $W/m^2$ ) udává hustotu plošného toku výkonu elektromagnetického vlnění v prostoru. Pro odvození Poyntingova vektoru vyjdeme z rovnice pro energii elektromagnetického pole v objemu.

$$W = W_E + W_M = \frac{1}{2} \cdot \int_V \vec{D} \cdot \vec{E} dV + \frac{1}{2} \cdot \int_V \vec{B} \cdot \vec{H} dV. \quad (2.1.3.1)$$

Rovnice (2.1.3.1) se dá dále upravit na

$$W = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \int_V \vec{E}^2 dV + \frac{1}{2} \cdot \mu \int_V \vec{H}^2 dV. \quad (2.1.3.2)$$

Abychom získali výkon musíme provést derivaci energie v čase. Znaménko mínus udává, že není energie dodávána, takže se množství energie může jen snižovat.

$$P = -\frac{\partial W}{\partial t} = -\varepsilon \int_V \vec{E} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} dV - \mu \int_V \vec{H} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} dV. \quad (2.1.3.3)$$

Pokud upravíme 1. Maxwellovu (2.1.1.1) a 2. Maxwellovu rovnici (2.1.1.2) na tvar kde budou derivace vyjádřeny na levé straně pak

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\text{rot } \vec{H} - \gamma \cdot \vec{E}}{\varepsilon} ; \quad \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{-\text{rot } \vec{E}}{\mu}. \quad (2.1.3.4)$$

Za tyto výrazy dosadíme do rovnice pro výkon (2.1.3.3) a provedeme nezbytné úpravy

$$P = -\int_V \vec{E} (\text{rot } \vec{H} - \gamma \cdot \vec{E}) dV + \int_V \vec{H} (\text{rot } \vec{E}) dV. \quad (2.1.3.5)$$

$$P = \int_V \vec{E}^2 \gamma + (\vec{H} \cdot \text{rot } \vec{E} - \vec{E} \cdot \text{rot } \vec{H}) dV. \quad (2.1.3.6)$$

$$\vec{H} \cdot \text{rot } \vec{E} - \vec{E} \cdot \text{rot } \vec{H} = \text{div}(\vec{E} \times \vec{H}). \quad (2.1.3.7)$$

$$P = \int_V \vec{E}^2 \gamma + \text{div}(\vec{E} \times \vec{H}) dV. \quad (2.1.3.8)$$

Výsledný integrál se dá rozložit na dva členy

$$P = \int_V \gamma \cdot \vec{E}^2 dV + \int_V \text{div}(\vec{E} \times \vec{H}) dV. \quad (2.1.3.9)$$

První člen udává množství elektromagnetické energie, které se v objemu V přemění v teplo za 1 sekundu.

Druhý člen s divergencí vyjadřuje množství elektromagnetické energie, která vystoupí (diverguje) z požadovaného objemu za již zmíněnou 1 sekundu. Poyntingův zářivý vektor je potom množství této energie divergující jednotkovou plochou. Po převedení na plošný integrál za pomoci Gaussovy věty nám výraz poslouží jako základ pro určení Poyntingova vektoru.

$$\int_V \operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) dV = \int_S (\vec{E} \times \vec{H}) dS = \int_V \vec{N} dS. \quad (2.1.3.10)$$

Poté můžeme říci, že Poyntingův vektor lze vyjádřit jako vektorový součin intenzity elektrického a magnetického pole.

$$\vec{N} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \left( \frac{W}{m^2} \right). \quad (2.1.3.11)$$

#### 2.1.4 Hloubka pronikání elektromagnetického vlnění

V rámci teorie elektromagnetické indukce je důležité znát výraz hloubka pronikání elektromagnetického vlnění, nebo také zkráceně hloubku vniku. Ta je dána výrazem

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}. \quad (2.1.4.1)$$

Pro praktické použití je výhodnější upravit výraz na

$$\Delta = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{f \cdot \gamma \cdot \mu_r}}. \quad (2.1.4.2)$$

kde  $\Delta$ ...hloubka vniku (m);  $\gamma$ ...konduktivita (vodivost) prostředí ( $S/m$ );  $\mu_r$ ...permeabilita materiálu ( $H/m$ );  $f$ ...pracovní kmitočet (Hz)

Pro většinu výpočtů se uvažuje vsázka v roztavené formě, tedy její permeabilita  $\mu_r$  se rovná jedné. Dále víme, že  $\gamma = \frac{1}{\rho}$ , kde  $\rho$  je rezistivita materiálu ( $\Omega \cdot m$ ) a tedy výraz pro hloubku vniku se dá dále upravit na

$$\Delta = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.1.4.3)$$

Hloubka vniku je definována jako vzdálenost, na které se utlumí intenzita magnetického pole na hodnotu  $e^{-1} \cdot H$ , tedy přibližně na 37% počáteční hodnoty na povrchu vsázky. S tímto faktem souvisí pojem stěna optimální tloušťky, stěna malé tloušťky a stěna velké tloušťky.

Stěna malé tloušťky se dá definovat jako tzv. magneticky průzařná. To znamená, že tloušťka stěny je mnohem menší, než je hloubka pronikání vlny elektrické (magnetické) a vlnění se nestihne utlumit, nevznikne dostatečná proudová hustota naindukovaných vířivých proudů uvnitř materiálu a tím pádem se materiál neohřívá.

Druhým extrémem je stěna velké tloušťky, ve které se sice magnetické vlnění stihne utlumit, ale výsledná efektivita předávání tepla je velice nízká, ohřívání materiálu by trvalo dlouho, nebo by se stíhal samovolně chladit, a nemusel by se zahřát vůbec. Jelikož průběh, podle kterého klesá intenzita magnetického pole ve vodivé vsázce je

$$\vec{H} \sim e^{-\frac{x}{\Delta}} \quad (2.1.4.4)$$

Víme, že za vzdálenost  $2 \cdot \pi \cdot \Delta$  se utlumí téměř 100% magnetické intenzity ve stěně vsázky. Z toho vyplývá, že pokud je tedy stěna větší než zmíněných  $2 \cdot \pi \cdot \Delta$  dá se hovořit o stěně velké tloušťky, z této závislosti a z výrazu (2.1.4.4) se dá vyvodit kvalitativní parametr  $x$ .

$$x = \sqrt{2} \cdot \frac{r}{\Delta} \quad (2.1.4.5)$$

Předchozí výraz platí pro případ válcové vsázky, kde  $r$  je poloměr vsázky a  $\Delta$  je hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky. Parametr  $x$  se převážně volí v rozmezí hodnot 3,5-5, což vychází z poměru poloměru a hloubky pronikání do vsázky. Pro tyto hodnoty je tavba stabilní a má vysokou efektivitu.

Minimální odpor má stěna optimální tloušťky, kterou odvodíme z impedance stěny a představuje tloušťku stěny rovnou  $d_{opt} = \frac{\pi}{2} \cdot \Delta = 1,57 \cdot \Delta$ . Optimální tloušťka stěny se aplikuje vždy v případě, když požadujeme minimální ztráty plochého vodiče při procházejícím časově proměnném proudu, jak vnuceném, tak i naindukovaném. Jde především o tloušťku aktivní strany vodiče induktoru, o tloušťku pásového vedení a uplatní se také u tloušťky stínícího pláště indukčního zařízení.

### **3 Studený kelímek**

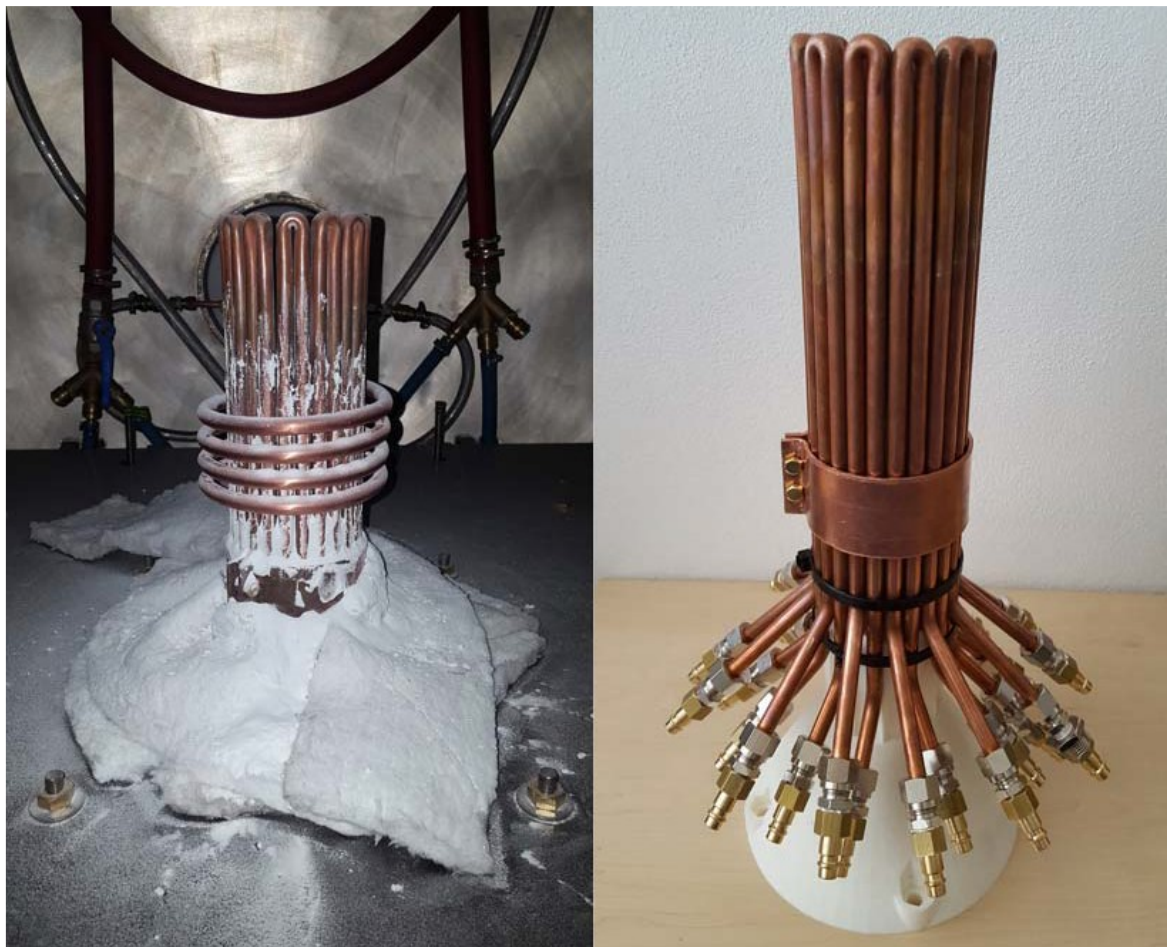
(Následující kapitolu jsem zpracoval z [2] [3])

Reaktivní a vysokotavitelné kovy např. titan, tantal, niobium či molybden, nemohou být s vysokou čistotou taveny v keramických nebo grafitových kelímcích. To je zapříčiněno chemickou reakcí mezi taveninou a materiálem kelímku, kdy tato reakce následně zanáší nečistoty do zmíněných kovů. Nečistoty poté mohou způsobit degradaci materiálu v pozdějším použití. Například tavení titanu či jeho slitin v keramickém kelímku způsobí absorpci kyslíku titanem a jeho následnou křehkost.

Z těchto důvodů bylo výhodné přijít s technologií, která by taková znečištění eliminovala, a právě studený kelímek je pro tento druh tavby (bez příměsí) vhodný. Studený kelímek je zařízení, které sestává z indukční cívky, vodou chlazených měděných bloků umístěných okolo vsázky, a také samotné vsázky, která může být jak z elektricky vodivého, tak i z elektricky nevodivého materiálu.

Před osmi lety vznikla, za podpory výzkumného oddělení v Řeži u Prahy, výzkumná laboratoř se studeným kelímkem v technickém parku v Plzni. Tento kelímek vznikl jako druhý v České republice, přičemž první je právě v Řeži, kde se zabývají především tavením jaderného odpadu a jeho vitifikací ve vakuu. Studený kelímek v Plzni neobsahuje vakuovací zařízení, ale jinak je identický s kelímkem v Řeži.

Studený kelímek v Plzni vznikl především proto, že výzkumné oddělení v Řeži se intenzivně zabývá tavením radioaktivních materiálů. Pro výzkum oxidů pak nebyl v tomto oddělení čas. Proto z vědeckých účelů výzkumu oxidů kovů vznikl studený kelímek i zde v Plzni, který lze vidět na obrázku č.1.



Obrázek č. 1: Studený kelímek v Plzni  
vlevo – kelímek připravený k tavně vpravo – nový studený kelímek

### 3.1 Technologie a aplikace

#### 3.1.1 Technologie

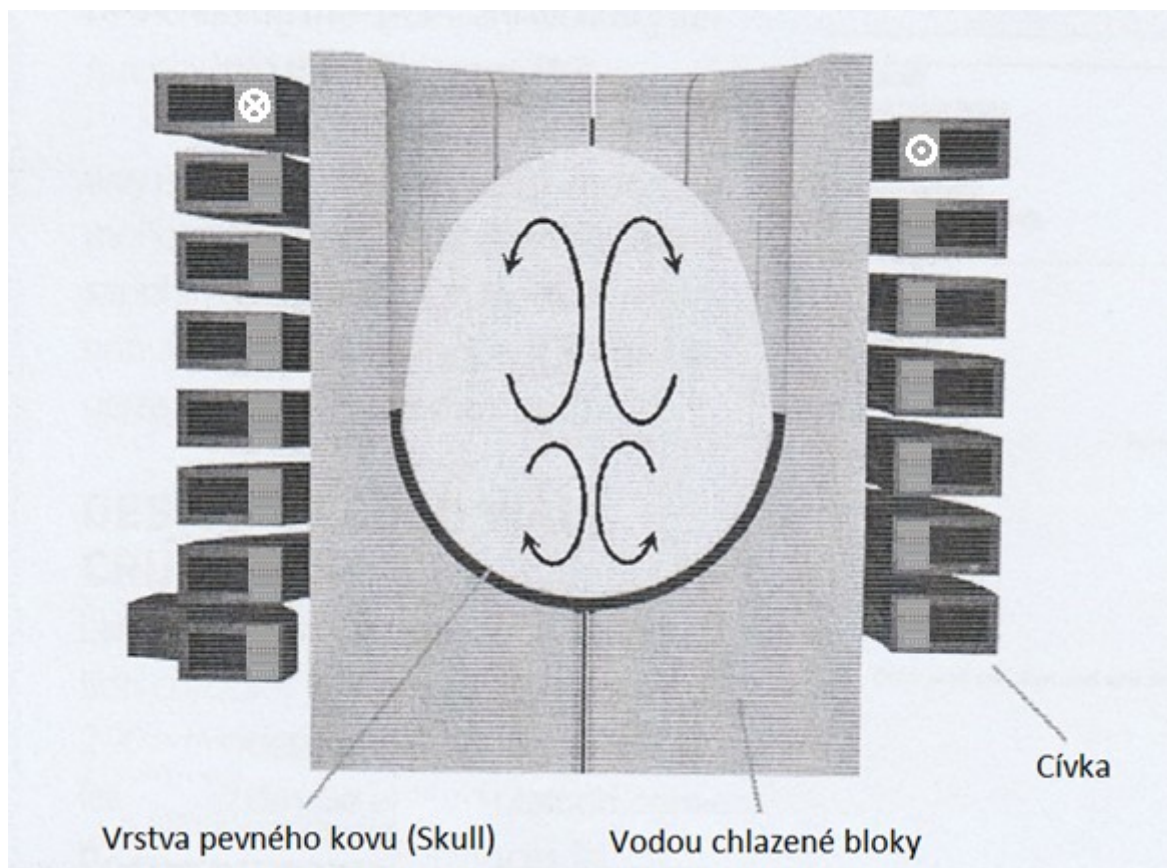
(Následující podkapitulu jsem zpracoval z [2])

Jak jsem se již zmínil v úvodu kapitoly, studený kelímek sestává z cívky, chladících bloků a vsázky. Aby se roztavená vsázka nedostala mimo tavenou oblast, je zapotřebí jí intenzivně chladit. Tuto činnost zastávají měděné chladící segmenty intenzivně chlazené protékající vodou. To má za následek vytvoření tzv. „skull vrstvy“, oddělující taveninu od studeného kelímku (chladící segmenty). Vsázka se tedy může tavit tzv. „sama v sobě“. Díky tomuto principu nedochází k znečištění materiálu, jelikož skull vrstva je ze stejného materiálu jako tavenina.

Nejjednodušší návrh studeného kelímku sestává z jednotlivých dílů kruhového tvaru vodou chlazených jednotek (segmentů), které jsou uchyceny na spodní desce. Měděné, vodou chlazené segmenty nemají mezi sebou žádný elektrický kontakt. Na základě toku



indukovaného proudu uvnitř chladících segmentů (způsobené cívkou) mezi sebou tyto toky vzájemně kolidují a dále vzniká výsledné magnetické pole do vsázky, na kterém se podílí jak cívka, tak i naindukovaný proud do segmentů. Tím se vytváří teplo v principu Joulovými ztrátami ve vsázce. Vrstva kovu v pevném stavu (skull vrstva) pak působí jako samovytvářející se tepelně izolační vrstva. Pokud se jedná o elektricky vodivé materiály, je tato vrstva také elektricky vodivá, což výrazně negativně ovlivňuje účinnost tavení elektricky vodivých materiálů tímto technologickým postupem.



Obrázek č.2: Řez studeným kelímkem s vyznačenými částmi

Obrázek č.2 ukazuje schématický náčrt studeného kelímku. Je zde znázorněn řez jak cívkou, tak chladícími bloky. V roztavené vsázce je zvýrazněna cirkulace materiálu, na tuto cirkulaci mají největší vliv Lorentzovy elektromagnetické síly.

### 3.1.2 Aplikace

Technologie studeného kelímku byla poprvé užita pro tavbu titanu a jeho slitin, ale dnes se užívá na mnoho různých aplikací.

Na základě vlastností kelímku, jako je nízká spotřeba energie, možnost tavení materiálů s teplotou tavení přes 3000°C, se stávají studené kelímky stále více užívanou technologií tavení i při jejich nízké účinnosti (zejména u elektricky vodivých materiálů). Zvláště velkého využití studených kelímků se využívá u tavení žárupevných kovů a jejich slitin, které jsou velmi agresivní v roztavené fázi. Díky studenému kelímku je možné tyto kovy tavit skoro bez příměsí.

Další zajímavou aplikací, na kterou se používá studený kelímek, je přehřívání materiálu, jež obsahuje příměsí materiálu jiného. První tavený materiál musí mít vyšší teplotu varu než druhý materiál a ten se při vyšší teplotě začne vypařovat. Tímto způsobem se zvýší čistota prvního materiálu.

Díky kladným vlastnostem studeného kelímku, je tato technologie průmyslově využívána pro přetavování a vitifikaci jaderného odpadu. Jelikož nedochází ke kontaminaci kelímku jaderným odpadem, může být studený kelímek použit opakovaně.

Tavení ve studeném kelímku se dá využít i pro materiály elektricky nevodivé (za pokojové teploty), u nichž stoupá elektrická vodivost současně s teplotou. Jedná se například o speciální druhy skel, oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) či oxid zirkonia ( $\text{ZrO}_2$ ). Tento materiál je do studeného kelímku vložen v podobě prášku (vsázka). Aby došlo k jeho zahřátí, musíme do vsázky vložit další, ale elektricky vodivý materiál, tzv. startovací materiál. Tento startovací materiál má funkci susceptoru (pohlcovače elektromagnetické energie), zahřátý materiál poté předává teplo okolní vsázce až do dosažení požadované teploty. Přídavné látky se exotermickou reakcí (hořením) odpaří do okolí a nedochází k tvorbě znečišťujících příměsí.

V případě  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bývají startovacím materiálem malé kousky čistého hliníku, které předávají teplo exotermickou reakcí okolní vsázce, tím vytvoří malé množství roztaveného  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které je již elektricky vodivé. Stejně je na tom  $\text{ZrO}_2$ , kde se jako startovací materiál užívají malé kousky čistého zirkonia. Další možností je, že startovací materiál může být zapouzdřen v karbidu křemíku a může být odstraněn z kelímku po přehřátí vsázky.

Dnes  $\text{ZrO}_2$  vytváří po křemíku a safíru kvalitativně nejdůležitější monokrystalický materiál. Vzhledem k vysokému indexu lomu a vysokému lesku se používá např. v laserové technice a patří mezi umělé drahokamy.

## 3.2 Tavba ve studeném kelímku pro elektricky vodivé materiály

U elektricky vodivých materiálů (dále jen vodivých materiálů), především kovů, lze samotné tavby ve studeném kelímku dosáhnout snadněji než u elektricky nevodivých materiálů (dále jen nevodivých materiálů). To způsobuje skutečnost, že vodivé materiály mají za normálních podmínek ( $p=1013,25$  hPa ;  $T=25$  °C) dostačující konduktivitu k tomu, aby se mohly uvnitř těchto materiálů uzavírat vířivé proudy a tím vzniklo uvnitř vsázky požadované teplo k tavbě.

Tavba vodivých materiálů má paradoxně menší účinnost, než je tomu u tavby nevodivých materiálů. Tento jev vysvětlují v následující kapitole. S ohledem na tuto skutečnost se metoda studeného kelímku spíše používá pro tavení nevodivých materiálů.

Jelikož má tavba vodivých materiálů nízkou účinnost, používá se v případech tavení materiálů s vysokou teplotou tavení (žárupevné kovy a jejich slitiny), kdy konvenční kelímkové indukční pece s keramickým kelímkem mohou tyto kovy kontaminovat a tím zanášet nečistoty do struktury kovů.

Metoda tavby ve studeném kelímku se používá především u těchto kovů: kovový zirkon (Zr), molybden (Mo), wolfram (W), křemík (Si) a titan (Ti). Poslední uvedený kov je hojně užívaný například v leteckém či automobilovém průmyslu a v lékařství a budu se mu podrobněji věnovat na následujících stránkách.

### 3.2.1 Titan (Ti)

(Následující podkapitola 3.2.1 je zpracována ze zdroje [4])

Titan vyniká převážně vysokým poměrem pevnosti vůči hmotnosti, proto se často využívá pro vysoce pevné konstrukce. Další důležitou vlastností titanu je jeho odolnost proti korozi.

Proti těmto kladným vlastnostem jde jeho vysoká cena spojená s jeho tavbou, například oproti nerezové oceli je jeho cena trojnásobná z následujících důvodů:

- Při tavbě titanu je zapotřebí zajistit, aby tavba probíhala v ochranné atmosféře - nejlépe ve vakuu, jelikož titan snadno reaguje s kyslíkem a dusíkem.

- Celý proces (tavba, odlévání a tuhnutí) musí probíhat ve vakuu – což představuje velice technologicky náročný a nákladný proces.
- Aby nedošlo ke kontaminaci titanu při odlévání, musí se odlévat do nereaktivních forem, ty jsou vytvořeny ze sloučenin zirkonia, thoria (Th) a yttria (Y).
- Pokud se jedná o tavbu pomocí elektromagnetické indukce v kelímkové keramické peci, může dojít ke kontaminaci materiálu a kelímek se většinou nedá použít opakovaně, proto je komplikovaná recyklace titanu.

V technologii studeného kelímku se používá intenzivně vodou chlazený kelímek z mědi, proto nedochází oproti předchozímu případu keramického kelímku ke kontaminaci kovu reakcí s kelímkem. To se děje díky tomu, že tavenina v kelímku nemá přímý kontakt s měděným kelímkem, ale vzniká mezi nimi tenká vrstva pevného kovu tzv. skull. Díky tomu může vzniknout titan o vysoké čistotě. Protože se materiál nekontaminuje a zároveň nezůstává na „měděném kelímku“, může být tento kelímek použit opakovaně a může tak sloužit i k recyklaci šrotového kovu.

Metoda využívající studený kelímek se nazývá ISM (Induction Skull Melting) a je ekonomicky výhodnější variantou ke stávajícím keramickým indukčním pecím.

Pevnost titanu je kladně závislá na obsahu kyslíku (vyšší obsah kyslíku = vyšší pevnost titanu). Většího obsahu se dá docílit přidáním odpadového kovu do čistého titanu při tavně, nebo se může do taveniny přidat oxid titaničitý.

Jelikož proces ISM dokáže dlouhodobě udržet stabilní teplotu tavby, můžeme této vlastnosti využít pro přidání dalších materiálů (W, Ta) do taveniny, dokud nedojde k jejich kompletnímu roztavení. Přídavné materiály se do taveniny přidávají z důvodu zlepšení vlastností materiálů, jako je například žárupevnost a chemická odolnost materiálu.

### 3.3 Tavba ve studeném kelímku pro elektricky nevodivé materiály

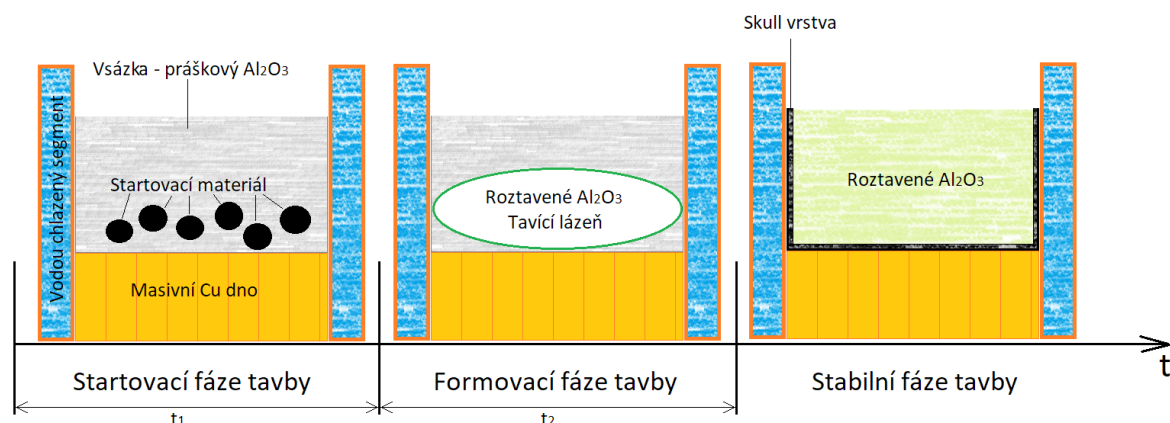
Metody ISM se nejčastěji využívá pro materiály elektricky nevodivé, nebo s nízkou elektrickou vodivostí, jako jsou oxidy - oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), či oxid zirkoničitý ( $\text{ZrO}_2$ ). Další

problematické materiály jsou skla a keramiky, které se dají také touto technologií, na rozdíl od konvenčních metod, zpracovávat bez zanesení nečistot.

Jak jsem již zmínil na začátku kapitoly, aby bylo možné tavit elektricky nevodivé materiály, musíme do procesu tavby zavést tzv. „Startovací fázi“. Ta spočívá v přidání startovacího materiálu, který je ovšem elektricky vodivý. Startovacím materiálem nemůže být jakýkoliv materiál, ale používá se takový materiál, který nezpůsobí znečištění taveného materiálu. Například pro  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se používají jako startovací materiál malé kousky čistého hliníku. Pro tavbu  $\text{ZrO}_2$  se jako startovací materiál používají kousky kovového zirkonu.

V této diplomové práci se zabývám především tavbou materiálu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , proto budu popis dalších fází tavby popisovat v následující kapitole.

Následující obrázek zobrazuje ideologicky jednotlivé fáze tavby



Obrázek č.3: Ideologický obrázek jednotlivých fází tavby

### 3.3.1 Indukční tavení $\text{Al}_2\text{O}_3$ ve studeném kelímku

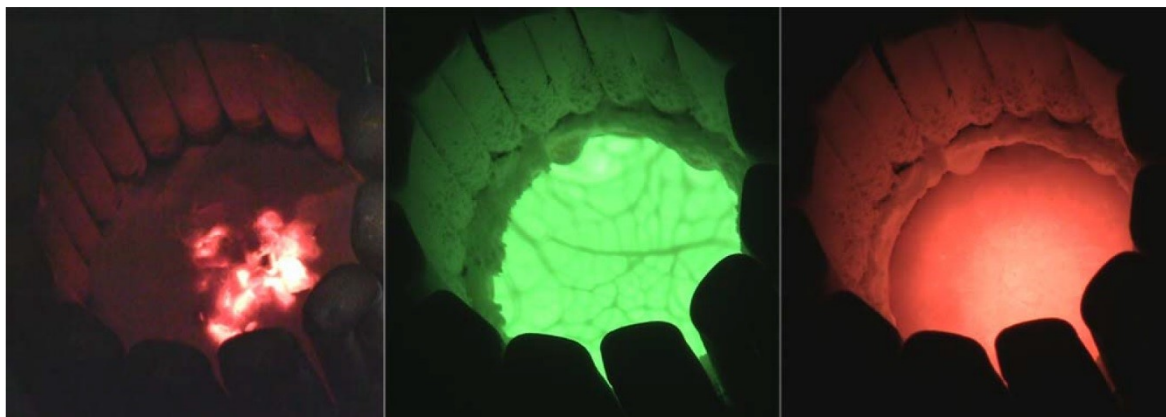
(Následující podkapitola 3.1.1 byla zpracována z [3])

Po startovací fázi, kdy dojde k exotermické reakci hliníku s kyslíkem, dojde k zahřátí okolního materiálu (ve formě prášku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kterému stoupá elektrická vodivost spolu s teplotou. Pokud dosáhneme teploty nad bodem tavení  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $2145\text{ }^\circ\text{C}$ ), stává se tento materiál sám o sobě elektricky vodivým. Tavicí proces se dostává do další fáze tzv. „Formovací fáze“, kdy se část roztaveného  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dále podílí na vedení tepla do celé vsázky. Je důležité snížit výkon generátoru přesně v okamžiku, kdy se stane materiál elektricky

vodivým. Tato fáze končí, když je celý obsah kelímku roztavený. Do této doby je tavenina v nestabilním stavu.

Další fází je tzv. „Stabilní fáze“. Při této fázi tavenina udržuje za stálého výkonu a kmitočtu na stabilní teplotě (2500°C). Dále se dosypává vsázka do roztaveného  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dokud se nedosáhne požadovaného objemu. Poté se musí nechat tavenina „stabilizovat“ při stálé teplotě a po dostatečnou dobu, aby se dosáhlo požadované kvality výtavku - ingotu (v tomto případě umělého korundu).

Poslední fází tavení je chladnutí. Pokud je to možné, je výhodné tento proces regulovat, jelikož rychlost chladnutí ingotu má vliv na růst krystalů. Obecně platí, že čím pomaleji ingot chladne tím větší je růst krystalů. Regulace může být provedena například postupným omezením výkonu zdroje nebo průtoku vody přes chladicí měděný kelímek. Na obrázku č.3 je možné vidět, jak tavenina vypadá v různých fázích.



Obrázek č.4: Tavní proces zleva: startovací fáze, stabilní fáze, chlazení

Vyjmutí vsázky probíhá jednoduše. Studený kelímek je konstruován tak, aby se po ukončení tavení dal odejmout pás držící jednotlivé chladicí segmenty u sebe. Tyto segmenty jsou lisované do drážek axiálně frézovaných na okraji dna kelímku. Na obrázku č.4 uprostřed je vidět kelímek po odstranění segmentů a pásu, vidíme masivní měděné dno kelímku a produkt z tavení „korund“. Na levé straně obrázku je samostatně vidět výsledný „korund“ a na pravé straně můžeme vidět jeho axiální řez a orientační měřítko velikosti. Je zde vidět významný růst krystalů směrem k nejteplejšímu místu výtavku - ingotu.





Obrázek č.5: Ingot korundu; studený kelímek bez chl. segmentů; řez ingotem

### 3.4 Matematický výpočet studeného kelímku pro tavení $\text{Al}_2\text{O}_3$

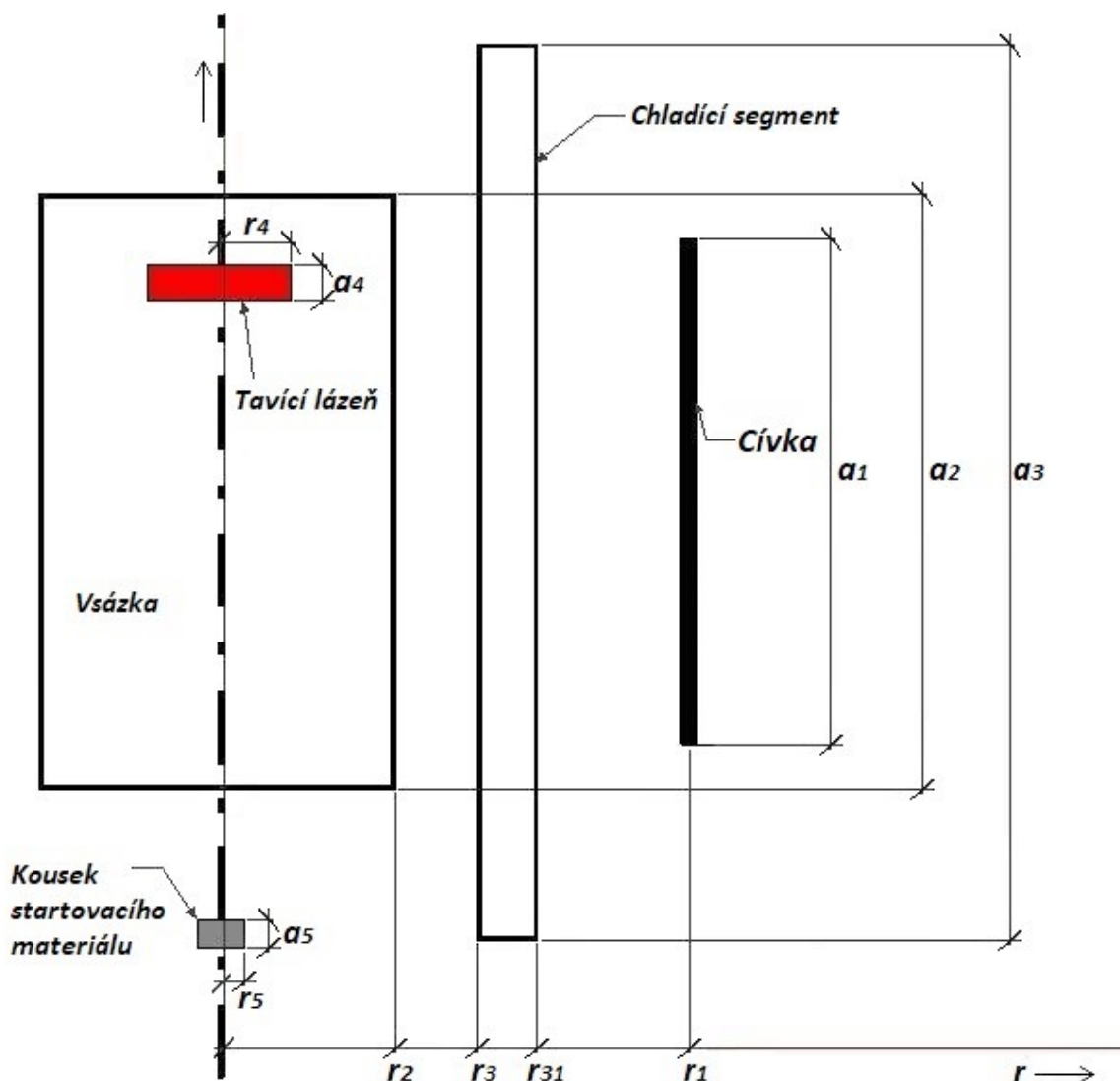
Matematický výpočet jsem provedl na základě získání skutečných rozměrů studeného kelímku ve výzkumném parku v Plzni. Následující tabulka zobrazuje parametry vsázky a cívky studeného kelímku [5].

Název	Jednotka	Hodnota	Název	Jednotka	Hodnota
Průměr vsázky	$d_2$ (cm)	7,2	Průměr cívky	$d_1$ (cm)	13
Poloměr vsázky	$r_2$ (cm)	3,6	Poloměr cívky	$r_1$ (cm)	6,5
Výška vsázky	$a_2$ (cm)	8	Výška cívky	$a_1$ (cm)	8
Hustota mat. ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	$\rho_{vs}$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	3950	Hustota mat. (Al)	$\rho_c$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	2700
Chl. segment $r_{31}$ - $r_3$	$d_3$ (cm)	1	Závity cívky	$z_1$ (-)	3
			Tloušťka stěny ind.	$k_v$ (cm)	2

Tab.č.1: Parametry studeného kelímku

Na následujícím obrázku č.5 je zjednodušeně znázorněn studený kelímek se všemi jeho částmi. Je zde zobrazena tavící lázeň, která vznikne exotermickou reakcí malých kousků

startovacího materiálu. Pro přehlednost je jeden kousek startovacího materiálu umístěn mimo kelímek.



Obrázek.č.6: Náčrt studeného kelímku s vyznačenými parametry

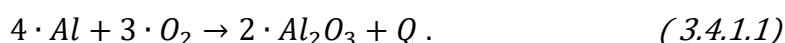
- |   |  |
|---|--|
| $r_1$ – poloměr cívky                   | $r_2$ – poloměr vsázky                     |
| $r_3$ – vnitřní poloměr chlad. segmentu | $r_{31}$ – vnější poloměr chlad. segmentu  |
| $r_4$ – poloměr poč. tavící lázně       | $r_5$ – poloměr jedn. kousku st. Materiálu |
| $a_1$ – výška cívky                     | $a_2$ – výška vsázky                       |
| $a_3$ – výška chladících segmentů       | $a_4$ – výška tavící lázně                 |
| $a_5$ – výška kousku start. materiálu   |  |

### 3.4.1 Startovací fáze

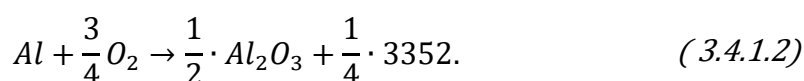
Pro roztavení  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je potřeba tento materiál nejprve zahřát na teplotu, kdy se stává elektricky vodivým. Abychom mohly vsázku sypkého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dostatečně zahřát, musíme provést tzv. startovací fázi, kdy se do vsázky vloží vhodné množství čistého hliníku. Ten zde



slouží jako startovací materiál. Množství energie, které tento hliník předá do okolí exotermickou reakcí, se dá spočítat pomocí rovnice [5]



To znamená, že čtyři molekuly hliníku(Al) plus 3 molekuly kyslíku (O<sub>2</sub>) vytvoří dvě molekuly oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) plus teplo, v tomto případě  $Q = 3352 \text{ kJ}$  [5] [6]. Pro jeden mol hliníku se dá rovnice upravit na



Z exotermické rovnice vychází, že 1 mol Al vytvoří 838 kJ tepla. Pokud znám molární hmotnost hliníku, mohu spočítat kolik tepla bude uvolněno z jednoho gramu hliníku. Molární hmotnost hliníku je 1 mol = 26,98 g [7].

$$Q_{1g} = \frac{Q_{1mol}}{1 \text{ mol}} = \frac{838}{26,98} = 31,06 \frac{\text{kJ}}{\text{g}}. \quad (3.4.1.3)$$

Abychom roztavily Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, potřebujeme zahřát vsázku na teplotu tavení Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. K tomu je zapotřebí entalpie získaná z [8]. Z těchto dat jsem sestavil tabulku s daty a graf s vyznačeným bodem tavení. Pevné skupenství materiálu je myšleno skupenství do bodu tavení materiálu. Kapalně skupenství je pak myšleno pro plně roztavenou vsázku.

#### Pevné skupenství Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:

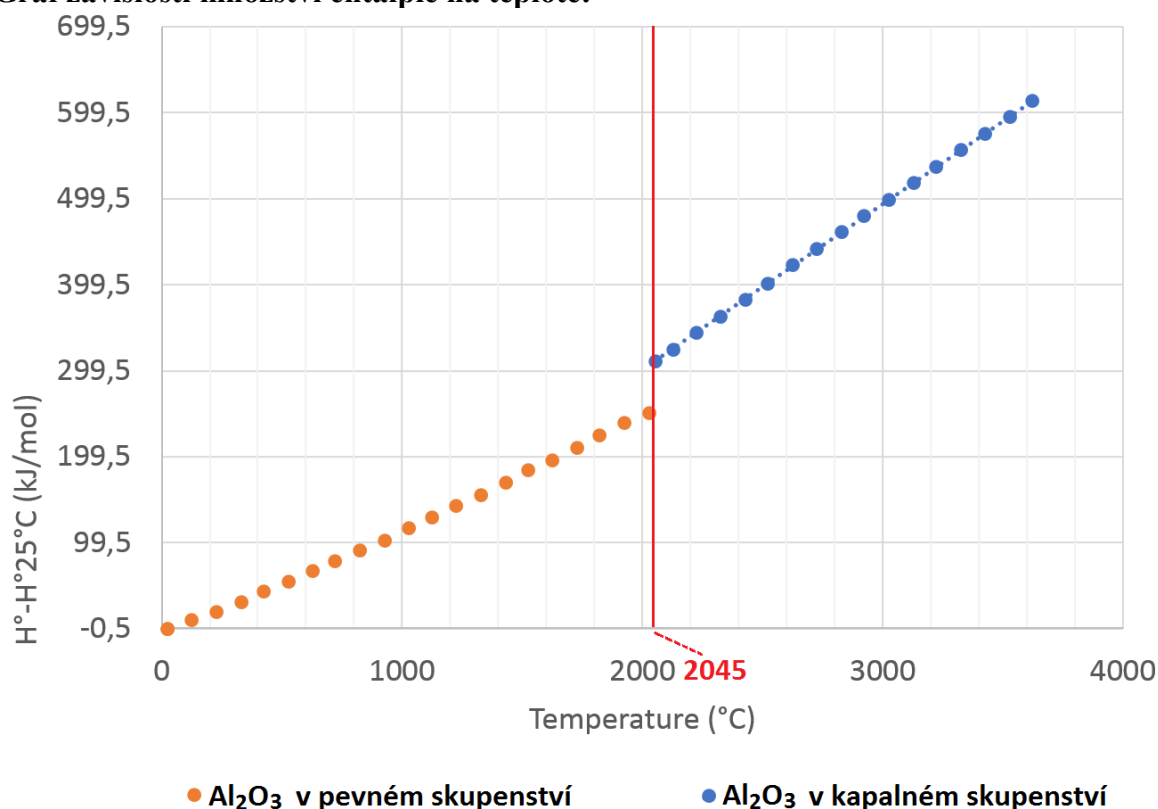
<b>T(°C)</b>	27	127	227	327	527	627	727	827	927
<b>H°-H°<sub>25°C</sub> (kJ/mol)</b>	0,12	9,03	19,21	30,14	41,59	65,55	77,92	90,51	103,3
<b>T(°C)</b>	1127	1227	1327	1527	1627	1727	1827	1927	2027
<b>H°-H°<sub>25°C</sub> (kJ/mol)</b>	129,3	142,4	155,7	182,5	196,1	209,7	223,4	237,2	251

Tab.č.2: Hodnota entalpie potřebné k zahřátí vsázky na určitou teplotu (Pevné skupenství)

**Kapalné skupenství Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:**

T(°C)	2054	2127	2227	2327	2350	2427	2527	2627	2727
H°-H°25°C (kJ/mol)	310,7	324,8	344	363,3	370,36	382,5	401,8	421	440,2
T(°C)	2827	2927	3027	3127	3227	3327	3427	3527	3627
H°-H°25°C (kJ/mol)	459,5	478,7	498	517,2	536,5	555,7	575	594,2	613,5

Tab.č.3: Hodnota entalpie potřebné k zahřátí vsázky na určitou teplotu (Kapalné skupenství)

**Graf závislosti množství entalpie na teplotě:**

Graf č.1: Závislost entalpie na teplotě

Výpočet ideálního objemu startovacího materiálu dle [6].

$$\begin{aligned}
 V_{st} &= (0,04 \div 0,08) \cdot d_2^3 = (0,04 \div 0,08) \cdot 7,2^3 \\
 &= 14,93 \div 29,86 \text{ cm}^3.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.1.4}$$

Abychom zjistili množství potřebného startovacího materiálu, potřebujeme převést hustotu materiálu z ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) na ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$$\rho_{Al} = 2700 \text{ kg/m}^3 = 2,7 \text{ g/cm}^3. \quad (3.4.1.5)$$

Nyní můžeme spočítat množství kovového hliníku v gramech

$$m_{st} = \rho_{Al} \cdot V_{st} = 2,7 \cdot (14,93 \div 29,86) = 40,31 \div 80,62 \text{ g}. \quad (3.4.1.6)$$

Získali jsme rozmezí optimálního množství startovacího materiálu pro náš vnitřní průměr studeného kelímku (= průměr vsázky).

Z tabulky číslo 3 vyčteme, že pro ohřátí vsázky (práškové  $Al_2O_3$ ) na  $2050 \text{ }^\circ\text{C}$  je potřeba entalpie o velikosti  $310 \text{ kJ/mol}$ . Z [8] zjistíme molární hmotnost oxidu hlinitého, což je

$$\begin{aligned} Al_2O_3: 1 \text{ mol} = 101,96 \text{ g} \rightarrow H_{1g} &= \frac{H^\circ - H^\circ_{25^\circ}}{101,96} = \frac{310}{101,96} \\ &= 3,04 \frac{\text{kJ}}{\text{g}}. \end{aligned} \quad (3.4.1.7)$$

Z předchozího výsledku je vidět, že k zahřátí jednoho gramu  $Al_2O_3$  je zapotřebí  $3,04 \text{ kJ}$  energie. Z rozmezí ideálního množství startovacího materiálu, energie, kterou získáme exotermickou reakcí a známé entalpie můžeme spočítat množství roztaveného  $Al_2O_3$ , které nám startovací materiál vytvoří

$$\begin{aligned} m_{Al_2O_3} &= \frac{m_{Al} \cdot Q_{1g(Al)}}{H_{1g(Al_2O_3)}} = \frac{(40,31 \div 80,62) \cdot 31,06}{3,04} \\ &= 411,85 \div 823,7 \text{ g}. \end{aligned} \quad (3.4.1.8)$$

V této chvíli známe množství roztaveného  $Al_2O_3$ , které se bude dále účastnit další tavby. Další fázi tavby se říká formovací fáze.

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, startovací materiál je vkládán do vsázky v podobě malých kousků hliníku. Pomocí hloubky pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky (dále jen „hloubka vniku“) a zvoleného argumentu  $x_5=4$ , mohu zjistit poloměr těchto kousků, který by se mohl použít k startovacímu procesu, aby byla zajištěna dobrá účinnost

procesu. Jako první musíme spočítat hloubku vniku. K tomu potřebujeme znát měrný odpor hliníku  $\rho_{Al(25^\circ C)} = 0,0267 \cdot 10^{-6} (\Omega \cdot m) = 2,67 \cdot 10^{-8} (\Omega \cdot m)$  při počáteční teplotě  $25^\circ C$  [9].

$$\begin{aligned} \Delta_5 &= \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \mu_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{f}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{f}} \\ &= 503,3 \cdot \sqrt{\frac{2,67 \cdot 10^{-8}}{1,64 \cdot 10^6}} \\ &= 6,42 \cdot 10^{-5} m = 6,42 \cdot 10^{-3} cm. \end{aligned} \quad (3.4.1.9)$$

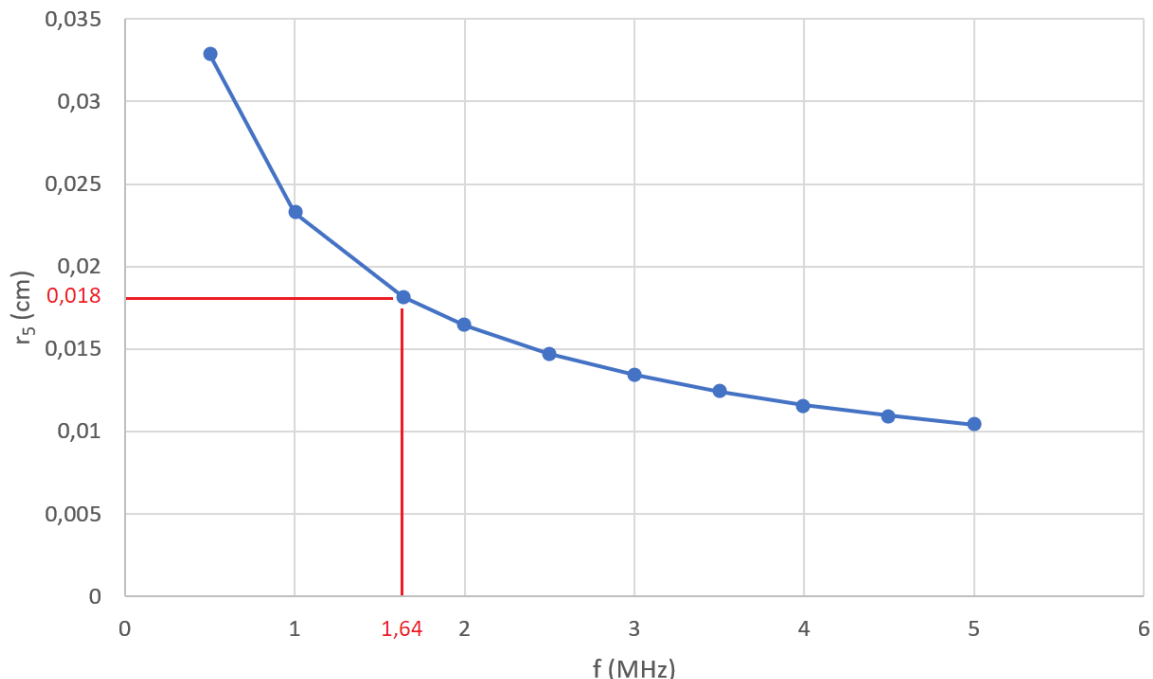
Nyní použijí zvolený parametr  $x_5 = 4$  [10], pro získání poloměru malých kousků startovacího materiálu

$$r_5 = \frac{x_5 \cdot \Delta_5}{\sqrt{2}} = \frac{4 \cdot 6,42 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 0,018 cm. \quad (3.4.1.10)$$

Zde vyšlo, že na frekvenci 1,64 MHz bychom měli použít minimálně startovací materiál o poloměru 0,018 cm. Jelikož je výsledek závislý na frekvenci, uvedu zde jako příklad tabulku závislosti poloměru  $r_5$  (resp.  $a_5$ ) na frekvenci

Frekvence f (MHz)	Hloubka vniku $\Delta_5$ (cm)	Pol. start. materiálu $r_5$ (cm)
0,5	$11,63 \cdot 10^{-3}$	0,033
1	$8,22 \cdot 10^{-3}$	0,023
1,64	$6,42 \cdot 10^{-3}$	0,018
2	$5,82 \cdot 10^{-3}$	0,016
2,5	$5,2 \cdot 10^{-3}$	0,015
3	$4,75 \cdot 10^{-3}$	0,013
3,5	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,012
4	$4,11 \cdot 10^{-3}$	0,011
4,5	$3,88 \cdot 10^{-3}$	0,0109
5	$3,68 \cdot 10^{-3}$	0,0104

Tab.č.4: Tabulka závislosti poloměru startovacího materiálu na frekvenci

**Graf závislosti poloměru  $r_5$  na frekvenci při teplotě tavení 2050 °C:**

Graf č.2: Závislost poloměru kousků startovacího materiálu na frekvenci

Z výsledků lze tvrdit, že optimální poloměr kousků startovacího materiálu klesá spolu s narůstající frekvencí.

**3.4.2 Formovací fáze**

Ve formovací fázi tavby dochází k šíření tepla v tavené vsázce  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pomocí stejného elektromagnetického pole jako při startovací fázi. Změnila se pouze elektrická vodivost materiálu. Teplotu tavení jsem uvažoval 2050 °C až do doby, než bude celý obsah práškového  $\text{Al}_2\text{O}_3$  roztaven. Pracovní frekvence  $f = 1,64$  MHz [5] a rezistivita na této teplotě je  $\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3(2050^\circ\text{C})} = 0,04$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) [10]. Z těchto dat mohu spočítat hloubku vniku do tavicí lázně.

$$\Delta_4 = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{f}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{0,04}{1,64 \cdot 10^6}} = 0,079 \quad (3.4.2.1)$$

$$= 7,9 \text{ cm.}$$

Jelikož je průměr vsázky 7,2 cm, mohu říci, že hloubka vniku vyjde o 0,6 cm větší, než je průměr vsázky. To ovšem není ideální stav. Tuto situaci vysvětlím na parametru  $x_4$ . Tedy pokud bych chtěl dodržet parametr  $x$  zvolený na hodnotě 4, byl by potřebný poloměr tavicí lázně roven

$$r_4 = \frac{x_4 \cdot \Delta_4}{\sqrt{2}} = \frac{4 \cdot 7,9}{\sqrt{2}} = 22,35 \text{ cm.} \quad (3.4.2.2)$$

Průměr by potom měl být dvojnásobkem poloměru, tedy 44,7 cm. To je problém, protože zadaný průměr vsázky, a tedy maximální možný průměr, je 7,2 cm. Pokud bych nechal vypočtenou hloubku vniku z (3.4.2.1) a jako maximální možný poloměr vzal polovinu průměru vsázky ( $r_2 = 3,6$  cm), vyšel by parametr  $x_4$  velice malý.

$$x_4 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{\Delta_4} = \sqrt{2} \cdot \frac{3,6}{7,9} = 0,644. \quad (3.4.2.3)$$

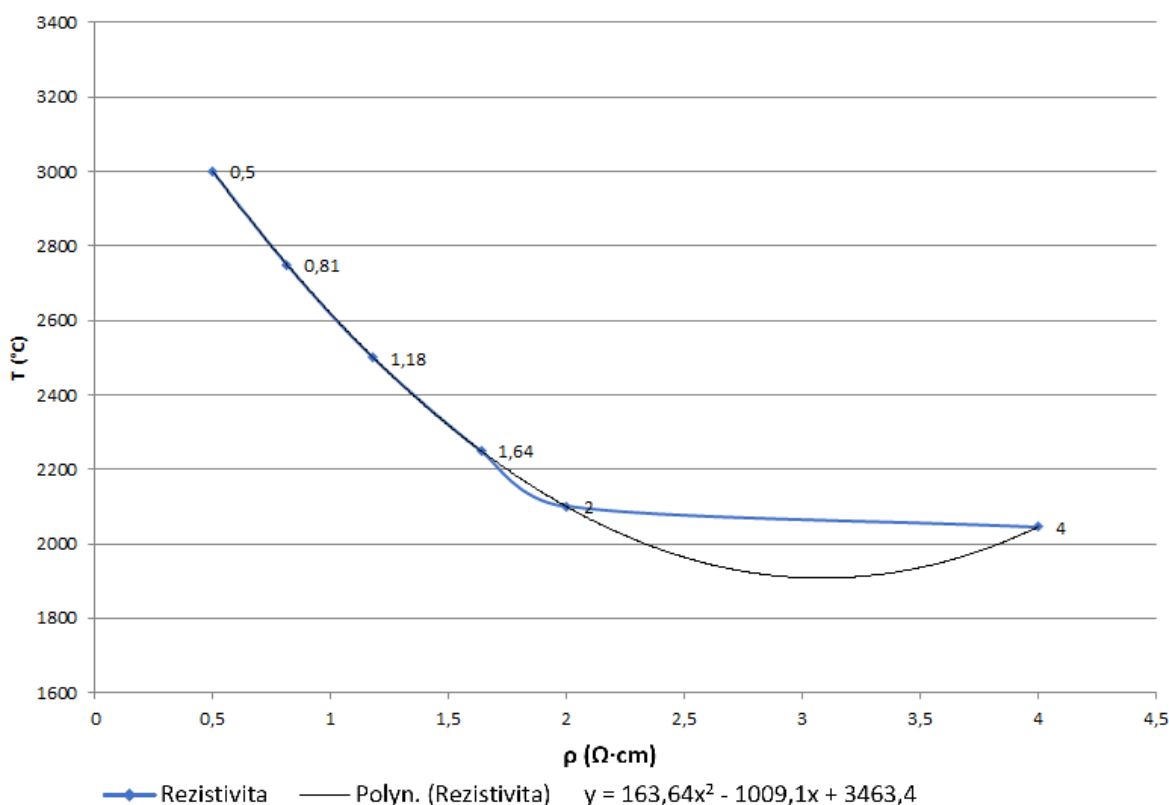
Aby parametr  $x$  mohl být zvolen o hodnotě 4, musela by hloubka vniku do vsázky při stávajícím poloměru  $r_2$ , být

$$\Delta_4 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{x_4} = \sqrt{2} \cdot \frac{3,6}{4} = 1,27 \text{ cm.} \quad (3.4.2.4)$$

Jelikož poloměr vsázky nemohu změnit z důvodu, že je tento parametr zadaný a použitý v reálném kelímku v Plzni, musím změnit hloubku vniku. Ta se dá zmenšit změnou parametrů v její rovnici. Pokud bychom chtěli tavit za teploty 2050 °C musel by výsledný kmitočet být

$$f = \frac{503,3^2 \cdot \rho_{Al_2O_3}}{\Delta_4^2} = \frac{503,3^2 \cdot 0,04}{0,0127^2} = 68,82 \text{ MHz.} \quad (3.4.2.5)$$

To opět není reálně možné, frekvence generátoru může nabývat hodnot 1,5 – 2 MHz [11], proto zbývá poslední možnost, kterou je ohřátí roztaveného materiálu na vyšší teplotu. Rezistivita materiálu klesá s rostoucí teplotou dle následující křivky.

Graf.č.3: Závislost rezistivity  $Al_2O_3$  na teplotě tavení.

Graf vznikl následovně: Znal jsem hodnoty rezistivity při teplotě tavení (2050 °C) dále při teplotě 2100 °C [5] a při teplotě 3000°C. Hodnoty mezi jsem spočítal pomocí funkce „spojnice trendu“, kterou vytvořil program excel. Pomocí rovnice, taktéž uvedené v grafu č.2, jsem poté mohl spočítat hodnoty mezi teplotami 2100 °C (odpovídá  $\rho_{Al_2O_3(2100^\circ C)} = 2 \Omega \cdot cm$ ) a 3000 °C ( $\rho_{Al_2O_3(3000^\circ C)} = 0,5 \Omega \cdot cm$ ). Spočtené hodnoty mezi 2100 °C a 3000 °C jsou vyznačené v grafu. Ty odpovídají teplotám 2250 °C, 2500 °C a 2750 °C. Všechny hodnoty jsem pro přehlednost vynesl do následující tabulky.

Teplota T(°C)	$\rho_{Al_2O_3(T^\circ C)}(\Omega \cdot cm)$	Vodivost $\gamma \left(\frac{S}{m}\right)$
2050	4	25
2100	2	50
2250	1,64	60,78
2500	1,18	84,75
2750	0,81	123,46
3000	0,5	200

Tabulka č.5: Hodnoty rezistivity v závislosti na teplotě

Pokud stále uvažuji  $x_4 = 4$ , pak mohu při maximální možné frekvenci 2 MHz a maximálním možném průměru 7,2 cm určit potřebnou rezistivitu materiálu. Viz (3.4.2.4) - již známe  $\Delta_4 = 1,27$  cm.

$$\rho = \frac{\Delta_4^2 \cdot f}{503,3^2} = \frac{0,0127^2 \cdot 2 \cdot 10^6}{503,3^2} = 0,127 \Omega \cdot \text{cm}. \quad (3.4.2.6)$$

Je vidět, že hodnota rezistivity je mimo hodnoty v tabulce. Dosazením do rovnice uvedené v grafu bychom dostali teplotu 3337 °C. Jelikož teplota varu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je 2980 °C [12] je tato hodnota nedosažitelná.

Ovšem pro provedenou úvahu platí,  $x_4 = 4$  a předpokládá se stabilní fáze tavení. Avšak jak fáze startovací, tak fáze formovací, jsou nestabilní procesy [5]. Tyto procesy mohou být optimalizovány pouze pro menší hodnoty parametru  $x_4$ . Pro porovnání: Když použiji maximální možnou frekvenci (2 MHz) a bral bych v potaz o trochu vyšší teplotu (2100 °C), vyjde parametr  $x$  následovně

$$\Delta_4 = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Al_2O_3}}{f}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{0,02}{2 \cdot 10^6}} = 5,03 \text{ cm}. \quad (3.4.2.7)$$

$$x_4 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{\Delta_4} = \sqrt{2} \cdot \frac{3,6}{5,03} = 1,01. \quad (3.4.2.8)$$

Což je asi ve skutečnosti nejdosazitelnější stav v případě kelímku zkonstruovaném ve výzkumném parku v Plzni.

### 3.4.3 Stabilní fáze tavby

Pokud se podaří startovací a formovací fáze tavby, zbývá poslední fáze a tou je tavba za zvýšené teploty, než je teplota tavení v tzv. přehřátém stavu. To bývá u Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o 200 °C více než je teplota tavení, tedy 2250 °C [5].

Pro tuto teplotu mohu spočítat opět hloubku vniku, včetně toho jak se zlepšil parametr  $x$ , nyní označen jako  $x_2$ . Z tabulky č.5 zjistím hodnotu rezistivity pro 2250 °C ( $\rho_{Al_2O_3} = 1,64 \Omega \cdot \text{cm}$ ) frekvence 2MHz bude stejná jako v předchozím případě.



$$\Delta_2 = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Al_2O_3}}{f}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{0,0164}{2 \cdot 10^6}} = 4,56 \text{ cm.} \quad (3.4.3.1)$$

$$x_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{\Delta_2} = \sqrt{2} \cdot \frac{3,6}{4,56} = 1,12. \quad (3.4.3.2)$$

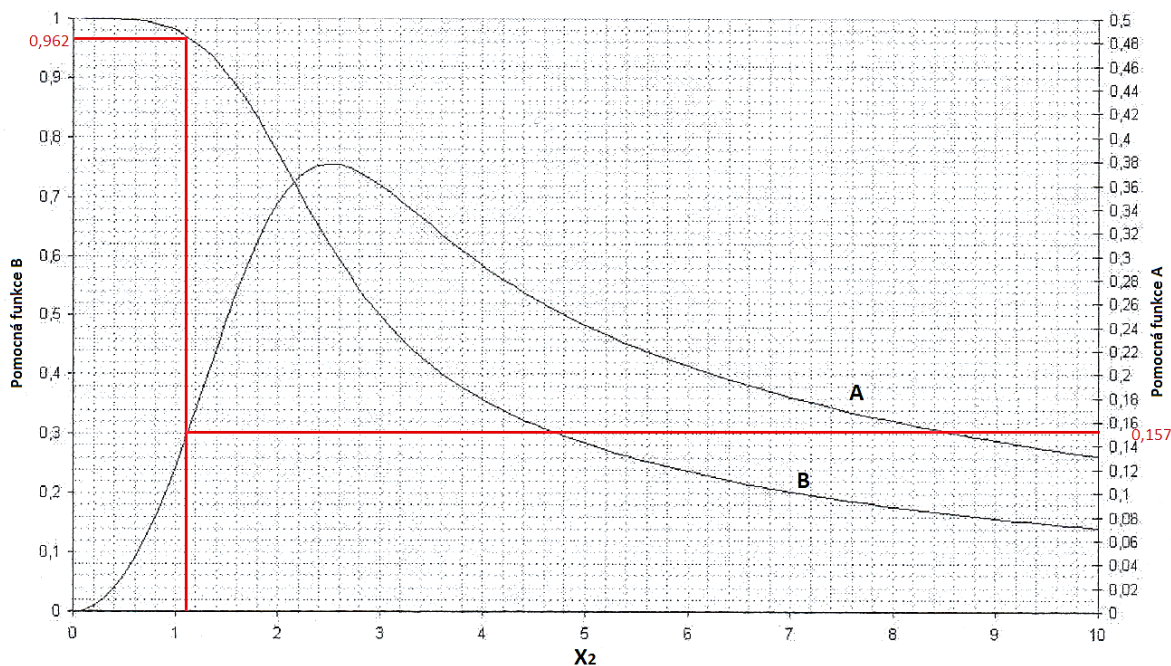
Jak je patrné z výsledného kvalitativního parametru  $x_2$ , tavba na teplotě 2250 °C a při frekvenci 2 MHz nebude ideální, jelikož při takto malé hodnotě bude tato tavba nestabilní. Zlepšení tohoto stavu bych docílil například vyšší teplotou tavení, nebo novým zdrojem, který by zvládl vyšší frekvenci.

#### 3.4.4 Elektrický výpočet tavby pro stabilní fázi

K následujícímu výpočtu je potřeba znát parametry generátoru [5]:

- Napětí generátoru –  $U_{\text{gen}} = 10 \text{ kV}$
- Činný výkon generátoru –  $P_{\text{gen}} = 160 \text{ kW}$
- Frekvence generátoru –  $f_{\text{gen}} = 1,5\text{-}2 \text{ MHz}$

Využil jsem výpočty (3.4.3.1)  $\Delta_2 = 4,56 \text{ cm}$  a (3.4.3.2)  $x_2 = 1,12$ . Pomocí následujícího grafu [6] jsem určil pomocné funkce A a B závislé na parametru  $x_2$ . Výpočet je proveden pro **zjednodušený model bez studeného kelímku**, tedy zahrnující jen induktor a vsázku v roztavené stabilní fázi.

Graf č.4: Závislost pomocných funkcí A a B na parametru  $x_2$ 

Pomocné funkce zvýrazněné v grafu č.5 jsou  $A = 0,157$  a  $B = 0,962$ . Pak odpor a reaktance vsázky vyjdou [13].

$$R_2 = \frac{\pi \cdot \rho_{Al_2O_3} \cdot x_2^2}{a_2} \cdot A = \frac{\pi \cdot 0,0164 \cdot 1,12^2}{0,08} \cdot 0,157 \quad (3.4.4.1)$$

$$= 0,127 \Omega.$$

$$X_2'' = \frac{\pi \cdot \rho_{Al_2O_3} \cdot x_2^2}{a_2} \cdot B = \frac{\pi \cdot 0,0164 \cdot 1,12^2}{0,072} \cdot 0,962 \quad (3.4.4.2)$$

$$= 0,864 \Omega.$$

Pro výpočet odporu a reaktance cívky je zapotřebí znát hloubku vniku do měděné cívky. Pro hloubku vniku jsem použil rezistivitu materiálu cívky  $\rho_{cu} = 1,92 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ .

$$\Delta_1 = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{cu}}{f}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{1,92 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10^6}} = 4,93 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \quad (3.4.4.3)$$

$$R_1 = X_1 = \frac{\pi \cdot \rho_{cu} \cdot d_1}{a_1 \cdot \Delta_1 \cdot g} = \frac{\pi \cdot 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot 13}{8 \cdot 4,93 \cdot 10^{-5} \cdot 0,75} \quad (3.4.4.4)$$

$$= 2,65 \cdot 10^{-3} \Omega = 2,65 \text{ m}\Omega.$$

Parametr „g“ se používá k rozlišení jedno a vícezávitové cívky, pro jeden závit je hodnota rovna jedné a pro více závitů se pohybuje v rozmezí 0,7-0,8. Dále jsem spočítal plochu mezery mezi kelímkem a cívkou

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{\pi}{4} \cdot [d_1^2 - (d_2 + 2 \cdot d_3)^2] \\ &= 0,785 \cdot [13^2 - (7,2 + 2)^2] = 66,2 \text{ cm}^2. \end{aligned} \quad (3.4.4.5)$$

Dalším výpočtem je vnitřní reaktance v důsledku svodového toku mezery  $X_S$

$$\begin{aligned} X_S &= \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{A_S}{a_2} = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot A_S}{a_2} \\ &= 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 0,00662}{0,08} = 1,31 \Omega. \end{aligned} \quad (3.4.4.6)$$

Reaktance prázdného induktoru bez ohledu na okrajový efekt  $X_{I0}$  bude

$$\begin{aligned} X_{I0} &= \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4 \cdot a_1} = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot d_1^2}{a_1} \\ &= 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 0,13^2}{0,08} = 2,62 \Omega. \end{aligned} \quad (3.4.4.7)$$

K výpočtu korekčního součinitele  $k_1$  je zapotřebí, kromě jiného, znát šířku stěny cívky, ta je zadaná jako  $k_v = 2$  cm. Dle [13] se předpokládá masivní induktor.

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{1}{1 + \frac{d_1}{a_1} \left[ 0,515 + 0,218 \cdot \left( \frac{k_v}{d_1} \right)^{0,406} \right]} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{0,13}{0,08} \left[ 0,515 + 0,218 \cdot \left( \frac{0,02}{0,13} \right)^{0,406} \right]} \\ &= 0,499 \end{aligned} \quad (3.4.4.8)$$

Reaktance díky zpětnému magnetickému toku uzavírajícího se mimo induktor  $X_0$  se rovná

$$X_0 = \frac{X_{10}}{\frac{1}{k_1} - \frac{a_2}{a_1}} = \frac{2,64}{0,499 - 1} = 2,629 \Omega. \quad (3.4.4.9)$$

Abych mohl spočítat celkovou reaktanci taveniny a cívky, musím spočítat koeficient redukce parametrů taveniny na indukční parametry „ $k_c$ “. Ten se vypočte následovně

$$\begin{aligned} k_c &= \frac{X_0^2}{R_2^2 + (X_2'' + X_s + X_0)^2} = \\ &= \frac{2,629^2}{0,141^2 + (0,864 + 1,31 + 2,629)^2} = 0,3. \end{aligned} \quad (3.4.4.10)$$

Poté celková reaktance bude

$$\begin{aligned} X_{12} &= X_1 + k_c \cdot \left[ X_2'' + X_s + \frac{R_2^2 + (X_2'' + X_s)^2}{X_0} \right] = \\ &= 2,65 \cdot 10^{-3} + 0,3 \\ &\cdot \left[ 0,864 + 1,31 + \frac{0,141^2 + (0,864 + 1,31)^2}{2,629} \right] = \\ &= 1,196 \Omega. \end{aligned} \quad (3.4.4.11)$$

Celkový odpor po přepočtení pomocí koeficientu  $k_c$  vyjde

$$R_{12} = R_1 + k_c \cdot R_2 = 2,65 \cdot 10^{-3} + 0,3 \cdot 0,141 = 0,045 \Omega. \quad (3.4.4.12)$$

Výsledná velikost impedance induktoru s taveninou vyjde

$$|\bar{Z}_{12}| = \sqrt{R_{12}^2 + X_{12}^2} = \sqrt{0,045^2 + 1,196^2} = 1,197 \Omega. \quad (3.4.4.13)$$

Proud induktoru  $I_1$  bude

$$|\bar{I}_1| = \sqrt{\frac{P_2}{R_2 \cdot k_C}} = \sqrt{\frac{160 \cdot 10^3}{0,127 \cdot 0,3}} = 2049,3 \text{ A.} \quad (3.4.4.14)$$

Napětí induktoru  $U_1$  se spočte jednoduše

$$|\bar{U}_1| = |\bar{Z}_{12}| \cdot |\bar{I}_1| = 2049,3 \cdot 1,197 = 2453 \text{ V.} \quad (3.4.4.15)$$

Jestliže je vstupní napětí generátoru  $U_{gen}$  větší než napětí  $U_1$ , je nutné toto napětí přepočítat na počet závitů induktoru

$$z_1' = \frac{U_{gen}}{|\bar{U}_1|} = \frac{10\,000}{2453} \rightarrow 4. \quad (3.4.4.16)$$

Účinnost induktoru lze vypočítat dle následující rovnice

$$\eta_1 = \frac{R_2 \cdot k_C}{R_{12}} = \frac{0,141 \cdot 0,3}{0,045} = 0,94 = 94 \%. \quad (3.4.4.17)$$

Výkon přenesený do taveniny bude

$$P_2 = \eta_1 \cdot P_1 = 0,94 \cdot 160 = 150,4 \text{ kW.} \quad (3.4.4.18)$$

Celkový zdánlivý výkon dodávaný induktoru je

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = 2049,3 \cdot 2453 = 5024,92 \text{ kVA.} \quad (3.4.4.19)$$



Kde  $\sigma_{\delta}$  je Stefan-Boltzmanova konstanta rovna  $5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right)$ .  $T$  je teplota roztaveného  $Al_2O_3$  na povrchu při stabilní fázi tavby a je rovna  $2250^\circ C$ . Pokud znám plochu (poloměr) kelímku, mohu dopočítat ztráty sáláním  $P_{sál}$  [10] [14].

$$\begin{aligned} P_{sál} &= M \cdot A_{melt} = M \cdot \pi \cdot r_2^2 = 653\,921 \cdot \pi \cdot 0,036^2 \\ &= 2\,662,4\,W = 2,67\,kW. \end{aligned} \quad (3.4.5.2)$$

Kde  $A_{melt}$  je plocha vyzařující sálavý tok. Výsledné ztráty vyzařující z horní části povrchu kelímku vyšly 2,67 kW.

**Přenos tepla prouděním**, jak vody, tak vzduchu, využívá Newtonův zákon. Ten obsahuje součinitel přestupu tepla  $\alpha$ . Nejlepší způsob určení součinitele  $\alpha$  je měřením na konkrétním modelu. Jelikož jsem takový model neměl k dispozici, zvolil jsem minimální hodnoty z následující tabulky [14].

	$\alpha_{min} \left(\frac{W}{m^2 K}\right)$	$\alpha_{min} \left(\frac{W}{m^2 K}\right)$
Klidný vzduch	12,5	125
Proudící vzduch	40	2100
Proudící kapalina	8400	21000

Tabulka č.6: Minimální a maximální hodnoty součinitele  $\alpha$

Pro tepelné ztráty prouděním vody v chladících segmentech je zapotřebí znát plochu válce, který se účastní vedení tepla. Předpokladem je, že na aktivní straně chladících segmentů bude teplota  $150^\circ C$  ( $T_{as}$ ) a teplota chladící vody je  $50^\circ C$  ( $T_{vody}$ ). Jelikož tloušťka skull vrstvy je zanedbatelná, hodnota poloměru válce bude stejná jako poloměr vsázky. Z poloměru se vypočítá obsah válce  $A_{V1}$ . Ztráty se vypočtou následovně [14]

$$\begin{aligned} P_{P(H_2O)} &= \alpha_{min} \cdot (T_{as} - T_{vody}) \cdot A_{V1} \\ &= \alpha_{min} \cdot (T_{as} - T_{vody}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot a_2 \\ &= 8400 \cdot (150 - 50) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,036 \cdot 0,08 \\ &= 15\,200\,W = 15,2\,kW. \end{aligned} \quad (3.4.5.3)$$

Pro tepelné ztráty vzduchem je to velice podobné, jen obsah válce jsem spočetl z většího poloměru  $(r_2 + d_3) - r_{V2} = 0,36 + 0,1 = 0,46$ . Dále se odečítá teplota okolí ( $25^\circ C$ ) od teploty vody ( $50^\circ C$ ).

$$\begin{aligned}
 P_{P(\text{vzduch})} &= \alpha_{\min} \cdot (T_{\text{vody}} - T_{\text{okolí}}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{V2} \cdot a_2 \\
 &= 12,5 \cdot 25 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,046 \cdot 0,08 = 7,23 \text{ W}.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.5.4}$$

Dále uvedu pouze obecně vzorec pro výpočet **tepelných ztrát vedením**, jelikož hodnoty tepelné vodivosti a šířky jednotlivých vrstev je komplikovaně získat. Pro tři vrstvy s vodivostí  $\lambda$  bude vzorec následující

$$P_V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_2 \cdot (T_{\text{tavby}} - T_{\text{as}})}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2 + l_1}{r_2} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_2 + l_1 + l_2}{r_2 + l_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_2 + l_1 + l_2 + l_3}{r_2 + l_1 + l_2}}.
 \tag{3.4.5.5}$$

Dle diskuse [5] se hodnota  $P_V$  dá předpokládat  $60 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ . Jedná se o hodnotu, jež využívají kolegové z Ruska. Pokud znám obsah pláště válce ( $A_{PV}$ ), představující chladící povrch taveniny, mohu orientačně spočítat výsledné ztráty vedením

$$\begin{aligned}
 P_{VA} &= P_V \cdot A_{PV} = P_V \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot a_2 = 60 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 36 \cdot 8 \\
 &= 108\,573 \text{ W} = 100,6 \text{ kW}.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.5.6}$$

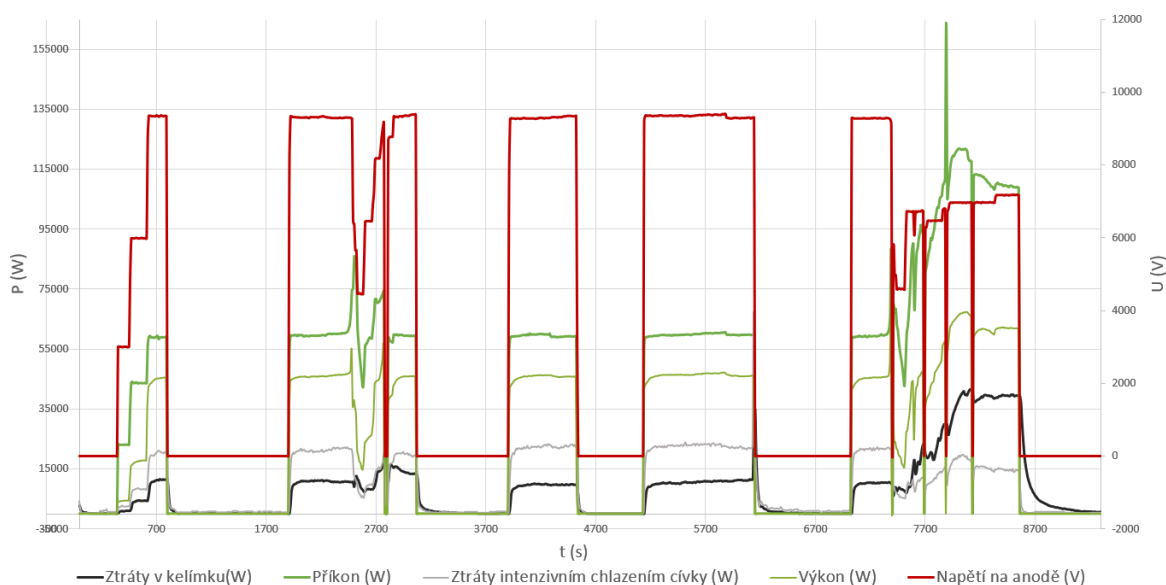


## 4 Analýza výsledků z reálných taveb $\text{Al}_2\text{O}_3$

Jelikož v rámci spolupráce s výzkumným oddělením v Řeži u Prahy mohl vzniknout studený kelímek ve výzkumném parku v Plzni, mohl jsem se i já, jako student, zúčastnit reálné tavy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Oxid hlinitý). Dále jsem obdržel data taveb z předchozích let a měsíců. Celkem jsem zkoumal tři tavy, datovány na 12.1.2017, 12.1.2018 a 25.1.2018. U poslední zmíněné jsem byl přítomen. Data z těchto taveb jsou přiložena na DVD.

### 4.1 Tavba $\text{Al}_2\text{O}_3$ – 12.1.2017

Na grafu č.5 je vidět časový průběh tavy ze dne 12.1.2017, kde proběhlo přesně pět taveb, při čemž je patrné, že první čtyři byly neúspěšné, konkrétně se nepodařilo překonat problematickou startovací fázi tavy. Data z této tavy jsou na přiloženém DVD pod názvem „13\_01\_2017-(LOG-30).xlsx“.



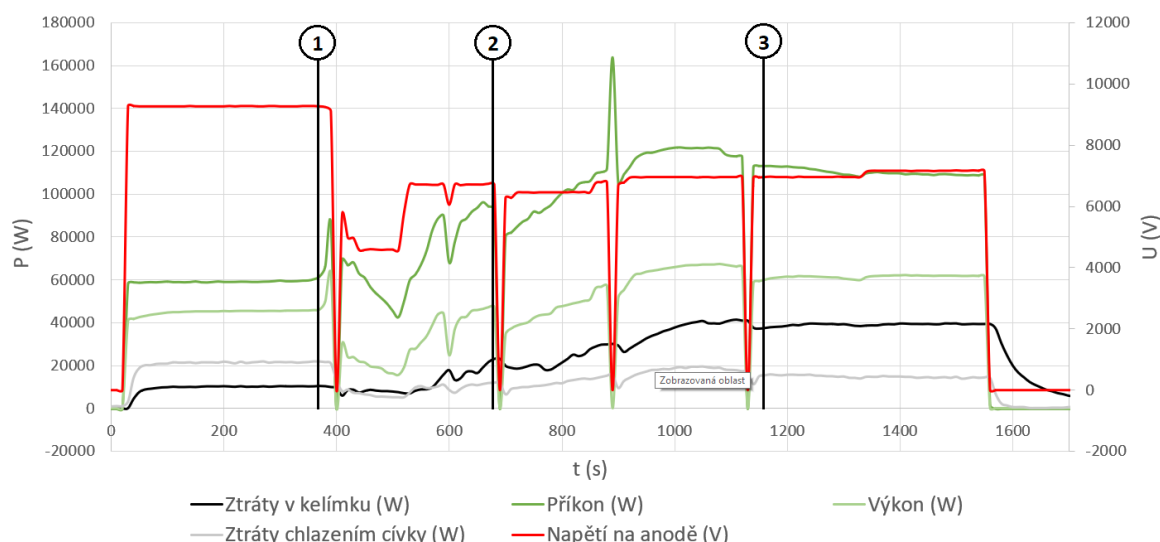
Graf č.5: Průběhy napětí, ztráty a výkony v zařízení studeného kelímku v čase

Hlavním ukazatelem procesu tavy, který je nutno bedlivě kontrolovat, jsou ztráty v kelímku (černá křivka) a výkon (zelená křivka). Pokud tento výkon začne narůstat, znamená to, že se přenosu energie do vsázky začala účastnit i malá část roztaveného materiálu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (vzniklá při startovací fázi) a je tedy nutné snížit napětí, aby nedošlo k přehřátí vsázky.

Přehřátí vsázky totiž může mít za následek zvýšenou tvorbu plynů, které pokud se nemohou uvolňovat do okolí, například pokud vznikne krusta pevného  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na vrchním

povrchu vsázky, může tekutá vsázka vlivem těchto plynů přímo „explodovat“ či vytrysknout ven a poškodit tak zařízení studeného kelímku. Tomu se snažíme za každou cenu zabránit.

Z hlediska stručnosti provedu důkladnější analýzu pouze úspěšně realizované tavby. Ta je přiblížena v grafu č.6. Na přiloženém DVD jsou také obsažena videa z této úspěšně realizované tavby.



**Graf č.6: Průběhy ztrát, výkonů a napětí v závislosti na čase pro pátý pokus**

Na předchozím grafu je důležitý moment, označený číslem jedna. Zde je vidět začátek nárůstu jak příkonu, tak měřeného výkonu při konstantní hodnotě napětí. To je způsobeno náhlou změnou parametrů daného materiálu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , který se změnou svého skupenství zásadně sníží svůj odpor a tedy dle Ohmova zákona razantně vzroste proud indukovaný do vsázky.

S rostoucím proudem pak narůstá výkon. V tomto okamžiku je důležité snížit napětí na menší hodnotu, než byla předtím. Pokud ovšem regulujeme příliš rychle, zareaguje ochrana a napětí spadne na nulu automaticky. To je případ poklesu napětí bezprostředně po dosažení bodu jedna.

Bodem jedna také končí tzv. startovací fáze, kdy se přenosu elektromagnetické energie účastnil pouze čistý hliník (startovací materiál), který svou exotermickou reakcí vytvořil dostatečné množství energie k roztavení prvotní tavicí lázně  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Startovací fázi jsem dostatečně popsal v předchozích kapitolách, proto se jí nyní nebudu dále zabývat.

Zároveň bodem jedna začíná tzv. „formovací fáze“. Tato fáze je další komplikovanou fází tavby ve studeném kelímku. V této fázi je důležité při rychlém nárůstu výkonu regulovat napětí tak, aby nedošlo k dříve popsánému problému. Proto se sleduje výkon a pokud začne klesat, měli bychom zvýšit napětí, aby nedošlo k opětovnému ztuhnutí vsázky a tím by byl tavicí proces ztracen.

Bodem dva končí formovací fáze a začíná stabilní fáze tavby. To se nejlépe pozná tak, že můžeme ponechat konstantní hodnotu napětí a výkon se nám příliš rychle nemění, popř. se ustaluje na nové hodnotě.

Od začátku bodu dva, až po bod tři, jsou vidět celkem tři poklesy napětí na nulu způsobené regulací napětí. Jedinou nejasností je náhlý vrchol příkonu při druhém poklesu napětí, který jde proti logice. Z toho usuzuji, že zde došlo k chybě měření. Jelikož při nulovém napětí nemůže být výkon nenulový. Mezi těmito body se proces tavení nachází v tzv. „Stabilní fázi“. Dále mi přijde vhodné konstatovat, že v této fázi také dochází k dosypávání práškového materiálu  $Al_2O_3$  do roztaveného  $Al_2O_3$ .

Bodem tři začíná tavba v tzv. „udržovací“ fázi. Jedná se stále o stabilní fázi, ale tavenina se udržuje po určitou dobu při konstantním výkonu a napětí pro dosažení vyšší čistoty materiálu. Tato udržovací fáze trvala cca šest minut. Po této době bylo vypnuto napětí a tavenina se začala ochlazovat.

Dále jsem v oblasti stabilní fáze za bodem tři zvolil jeden bod, konkrétně bod v čase 1500 s. Vytvořil jsem tabulku ztrát a výkonů, ze které jsem potom sestavil výšečový graf.

Příkon (W)			
109 022			
Výkon (W)		Účinnost (%)	
61 931		56,81	
	Ztráty (W)	Celkem z výkonu (%)	Celkem z příkonu (%)
Prázdného kelímku	10 407	16,8	9,5
Celkové kelímku	39 635	64	36,4
<b>Z toho užitečné ztráty ve vsázce</b>	<b>29 228</b>	<b>47,2</b>	<b>26,8</b>
Komory	50	0	0
Chlazením cívky	14 760	23,8	13,5
V cívce	2 474	4	2,3
V kondenzátoru	145	0	0
Dnem kelímku	36	0	0
Jiné	4 831	7,8	4,4

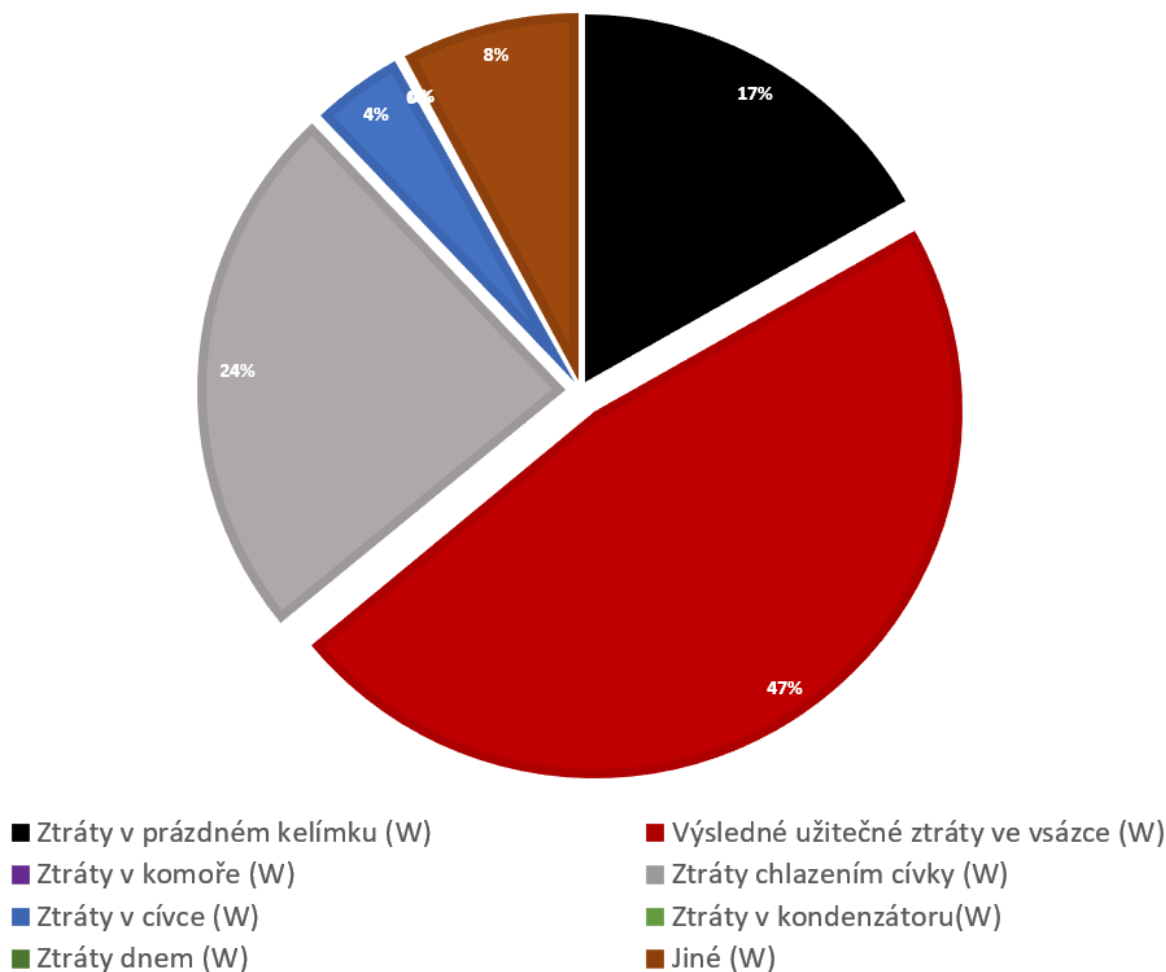
Tabulka č.7: Tabulka procentuálního zastoupení ztrát kelímku k výkonu a příkonu

Při výpočtu užitečných ztrát ve vsázce vycházím z úvahy, že na začátku tavby (při startovací fázi) se kelímek chová jako prázdný kelímek. Tedy ztráty které vznikají, jsou pouze ztráty chladičí vodou odvádějící teplo z měděných chladičích segmentů, které reagují na proměnné elektromagnetické pole a tím se do nich indukuje teplo Joulovými ztrátami.

Od hodnoty ztrát kelímku v čase 1500 sekund (zvolený bod) -  $P_{K_{celk}}$  jsem odečetl hodnotu ztrát prázdného kelímku  $P_{K0}$  v čase 200 sekund. Výsledný výpočet je

$$P_{Vs} = P_{K_{celk}} - P_{K0} = 39\,635 - 10\,407 = 29\,228\,W, \quad (4.1.1)$$

kde  $P_{Vs}$  značí užitečné ztráty ve vsázce,  $P_{K0}$  ztráty v prázdném kelímku a  $P_{K_{celk}}$  jsou celkové ztráty kelímku. Výsledný výsečový graf je zobrazen níže. Celková hodnota a tedy 100% v grafu odpovídá hodnotě výkonu, tedy 61 931 W.

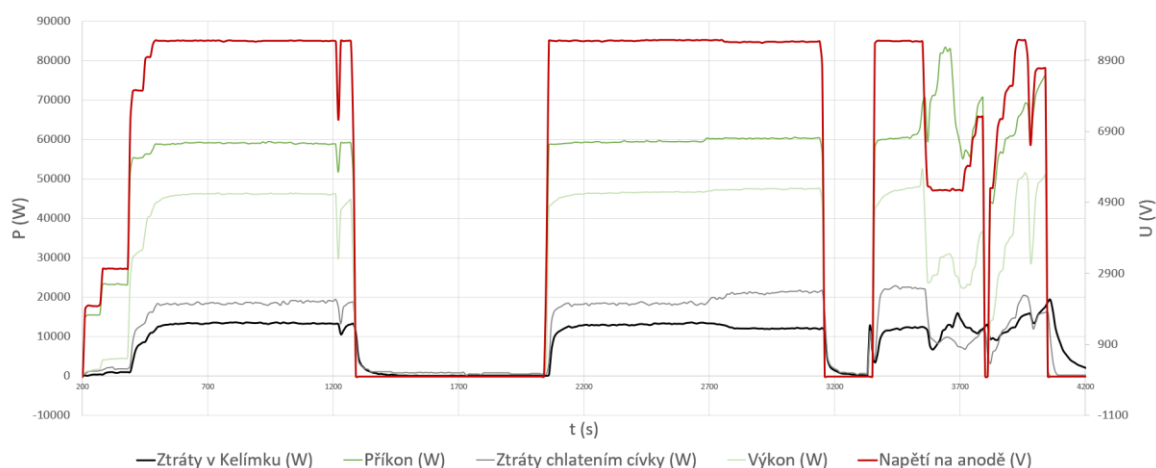


Graf č.7: Procentuální hodnoty ztrát

Pokud vydělím užitečné ztráty výkonem dodávaným do vsázky, dostanu účinnost procesu tavby. Pokud se zaměřím pouze na výkon, nikoliv příkon, dostanu hodnotu účinnosti rovnou 47,2 %. Pokud ovšem budu pracovat s hodnotou příkonu, dostanu reálnou účinnost přeměny energie na užité teplo ve studeném kelímku pouhých 27 %. Tato účinnost se ovšem vztahuje pouze k mnou vytvořenému grafu v bodě 1500 s.

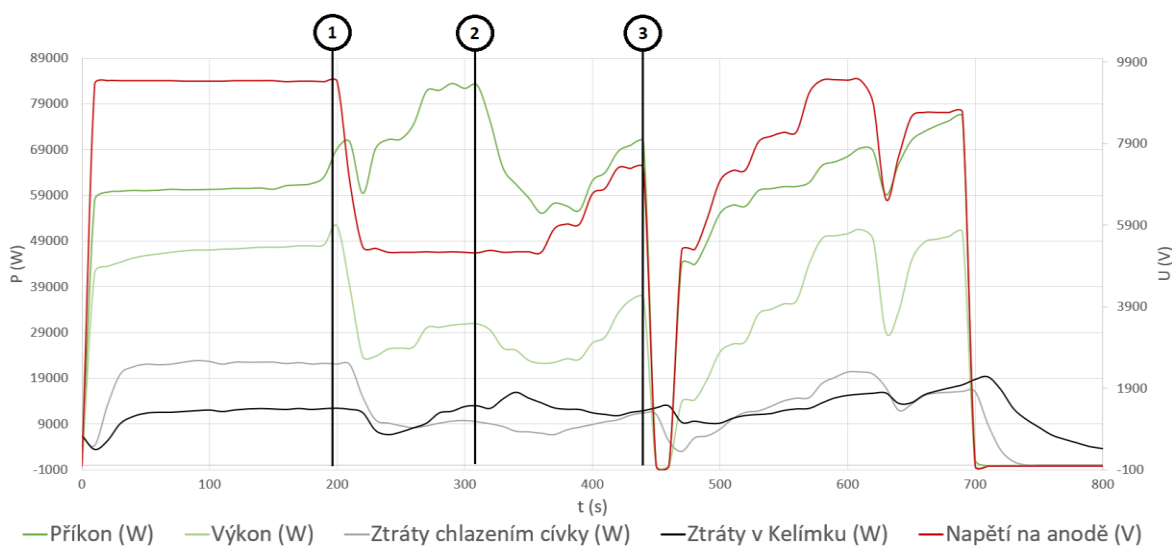
## 4.2 Tavba $\text{Al}_2\text{O}_3$ – 12.1.2018

Z celkových dat tavby z 12.1.2018 jsem vytvořil následující graf. Data jsou přiložena na DVD v souboru „12\_01\_2018-(LOG-30).xlsx“



**Graf č.8: Průběhy ztrát, výkonů a napětí v závislosti na čase**

Stejně jako v předchozí tabuli, první pokusy se nedostaly přes problematickou startovací fázi. První moment, kdy se začalo něco dít, byl až třetí pokus, který dále podrobněji rozeberu. Na grafu č.9 jsou zobrazeny průběhy ztrát, výkonů a napětí.



**Graf č.9: Průběhy ztrát, výkonů a napětí v závislosti na čase pro třetí pokus**

Již na první pohled je patrné, že tavba neprobíhala ideálně. V bodě jedna byl opět znát vliv přeměny skupenství  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kdy se začaly zvyšovat hodnoty výkonu (příkonu). Došlo ke snížení napětí na novou hodnotu. Při tomto konstantním napětí začaly narůstat hodnoty výkonu i ztrát v kelímku, což značí, že se tavby začíná účastnit i roztavená část  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

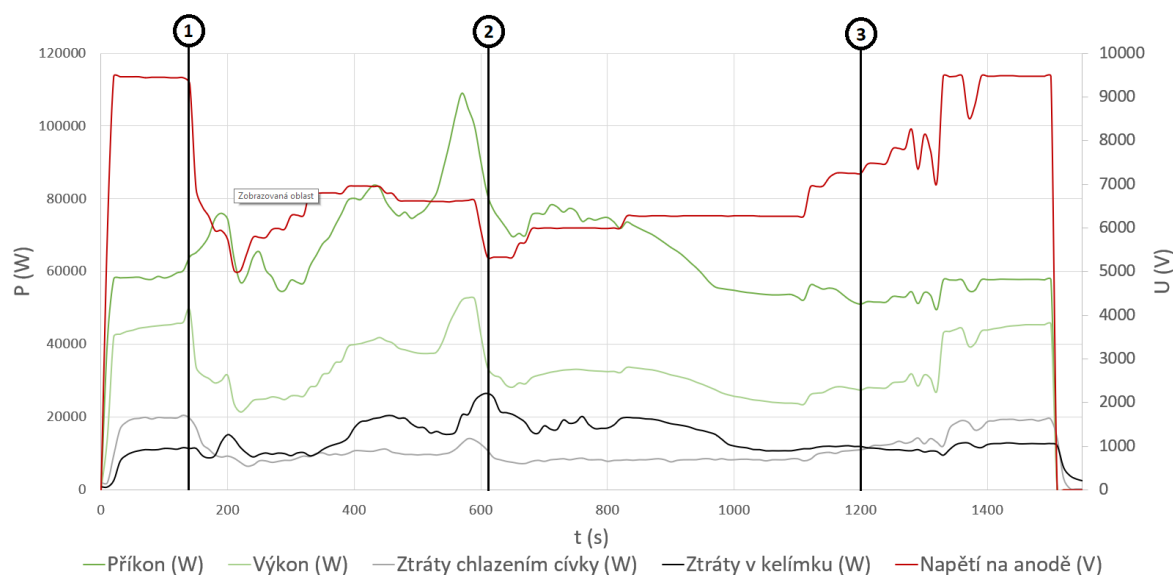
Následně pak v bodě dva začaly tyto hodnoty opět klesat. To mohla zapříčinit chladnoucí tavenina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která s klesající teplotou navyšuje svou rezistivitu. Tomuto poklesu bylo naštěstí zabráněno opětovným zvýšením napětí.

Další problém nastal v bodě tři, kde docházelo k dosypávání materiálu pro tavení. Zde bylo nejspíše nasypáno příliš velké množství materiálu a vsázka nebezpečně zchladla. Snaha tomu zabránit byla zvýšením napětí, což zapříčinilo velké nahromadění plynů. Došlo k přehřátí vsázky a její část vlivem těchto plynů se vzedmula mimo kelímek. Tím tato tavba tím skončila neúspěšně. Video s touto částí tavby je obsaženo na příloženém DVD.

### 4.3 Tavba $\text{Al}_2\text{O}_3$ – 25.1.2018

Poslední tavba, kterou se budu zabývat, je tavba, na které jsem byl osobně přítomen. Data z tavby jsou opět k dispozici na příloženém DVD pod názvem „25\_01\_2018-(LOG-30).xlsx“.

Před samotnou tavbou, která je zobrazena v grafu č.10, proběhly opět čtyři pokusy, které nezvládly startovací fázi. Poslední tavbu, tedy pátý pokus, opět podrobněji rozeberu.



Graf č. 10: Průběhy ztrát, výkonů a napětí v závislosti na čase pro pátý pokus

Jako v předchozích případech jsem bodem jedna označil konec startovací fáze, kdy začne narůstat příkon i výkon, který ovšem začne klesat zároveň se snižujícím se napětím, avšak příkon stále narůstá. Tuto nelogičnost bych opět připisoval chybě měření, jelikož dále již na změnu napětí reaguje příkon adekvátně.

Od bodu jedna do bodu dva vykazují průběhy typické chování pro formovací fázi tavby, kdy je potřeba regulovat napětí v závislosti na změnách výkonů a ztrát v kelímku.

V bodě číslo dva je vidět snížení hodnoty napětí v návaznosti na náhlou změnu výkonu (související nejspíše se změnou skupenství  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a opětovné klesání výkonu spolu se ztrátami v kelímku. Ve stejném okamžiku ještě docházelo k dosypávání vsázky. To zapříčinilo zchladnutí roztavené části  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a následné zhoršení jeho elektrické vodivosti.

V bodě tři je poté vidět snaha o opětovné „nastartování“ tavby zvyšováním napětí, to se bohužel nepodařilo a tavba tedy nebyla úspěšně dokončena.

#### **4.4 Výsledné zhodnocení taveb**

Jako nejlepší tavba se zdá být tavba z 12.1.2017, kde byly dobře rozpoznatelné jednotlivé fáze tavby - jak fáze startovací a formovací, tak výsledná fáze stabilní a fáze udržovací. U této tavby jsem byl také schopný přibližně určit účinnost přeměny elektrické energie (vstupující do cívky) v užitečné teplo (roztavení vsázky  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Účinnost určená z grafu č.6 v bodě 1500 sekund vyšla pouhých 27 %.

Pro ostatní dvě tavby jsem nebyl schopen určit účinnost přeměny elektrické energie v teplo, jelikož ani jedna tavba nedosáhla finální stabilní fáze. V obou případech jsem popsal problematiku jak startovací, tak formovací fáze a jak je vidět z průběhů, není tento proces v dnešní době dostatečně optimalizován, jelikož veškeré změny napětí musí být provedeny ručně.



## 5 Doporučení pro praxi

Považuji za důležité vytvořit zhodnocení výsledků z předchozích kapitol, které by se zaměřilo na zdokonalení procesu tavby elektromagnetickou indukci ve studeném kelímku.

- 1) Jedním z hlavních problémů studeného kelímku je intenzivní vodní chlazení, které je nezbytné, aby nedošlo k poškození kelímku, ale zásadně snižuje celkovou účinnost tavby ve studeném kelímku tepelnými ztrátami. A to převážně ztrátami vedením pláštěm skleněné vrstvy. Tento problém by se dal úplně odstranit tavením experimentální metodou tzv. „levitačního tavení“, kdy se předpokládá částečná, či úplná levitace taveného materiálu. Při úplné levitaci je potřeba, aby Lorentzovy síly překonaly síly gravitační a vsázka se tak mohla vznést. To zajišťuje vhodná volba geometrie budících cívek. Tato technologie je ovšem ve svém prvotním vývoji a její zavedení by nebylo bez obtíží a dále je tato metoda obtížně použitelná pro větší množství vsázky [15].
- 2) S ohledem na výsledky z kapitoly 3.4.2 „Formovací fáze“, které mi vyšly, by bylo pro zlepšení tavby pro stávající kelímek v Plzni vhodné zajistit lepší hodnotu kvalitativního parametru  $x_2$ . Tato hodnota vyšla pro tavbu  $Al_2O_3$  přibližně 1.12, což znamená, že materiál je pružný a elektromagnetické vlnění se nestíhá v jeho objemu dostatečně utlumit. Pro efektivní tavbu je vhodné mít parametr  $x_2$  v rozmezí od 2,5 do 5. Pokud bych chtěl zlepšit tento parametr, musel bych zvýšit hodnotu kmitočtu, nebo zajistit tavbu při vyšší teplotě, kdy materiál  $Al_2O_3$  vykazuje menší rezistivitu. Další možností je zvětšit průměr studeného kelímku ze stávajících 3.6 cm na 12.9 cm, tím bych získal parametr  $x_4$  na hodnotě 4. Problémem ovšem je, že větší poloměr znamená větší plochu, kterou je potřeba chladit = větší tepelné ztráty.
- 3) V kapitole 4.3.4.1 „Elektrický výpočet tavby pro stabilní fázi“ vyšla účinnost induktoru 94 %. Tuto hodnotu jsem spočetl zjednodušeným výpočtem, kde se bralo vzájemné působení pouze mezi roztavenou vsázkou (v plném objemu a ve stabilní fázi) a induktorem. Reálná hodnota bude ovšem menší. Viz účinnost přeměny elektrické energie v užitečné teplo v kapitole 4.4 „Výsledné zhodnocení taveb“, tato účinnost vyšla 27 %.

- 4) Další věc, kterou by bylo potřeba do praxe zlepšit je způsob odlévání roztavené vsázky. Kelímek použitý v Plzni, je zcela dostačující pro laboratorní účely, ovšem pokud by měl být studený kelímek použit pro výrobní účely, bylo by zapotřebí zdokonalit proces odlévání a provádět ho nejlépe kontinuálně při samotné tavně.
  
- 5) Další věcí, která by mohla zlepšit proces tavení ve studeném kelímku, je regulace napětí, která by na základě změny výkonu dokázala napětí automaticky navýšit, či snížit hodnotu napětí. Jak jsem uvedl v kapitole 4, je hlavním problémem nesnížit výkon tak nízko, aby došlo k utuhnutí taveniny a tím zhoršení jejích elektrických vlastností, ale zároveň nezapomenout snížit výkon po startovací fázi, kdy se náhle změny parametry  $Al_2O_3$  změnou skupenství. Při naakumulování velkého tlaku plynů při tavně při vyšší teplotě by mohlo dojít k přehřátí taveniny a její následné explozi, jak je vyobrazeno na přiloženém DVD.

## **Závěr**

V této diplomové práci jsem se zabýval problematikou tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů pomocí elektromagnetické indukce ve studeném kelímku. Studený kelímek je progresivní technologie umožňující tavit materiály ve vysoké čistotě a za velmi vysokých teplot. Využívá se převážně tam, kde konvenční metody selhávají. U elektricky nevodivých materiálů jsem popsal fáze tavby od startovací, přes formovací, až po stabilní fázi.

Hlavní pozornost v rámci diplomové práce jsem věnoval tavení oxidů kovů, v mém případě převážně oxidu hlinitému ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), jelikož tento materiál je hlavním objektem zkoumání zde v Plzni. Díky spolupráci s výzkumným oddělením v Řeži u Prahy vznikl studený kelímek na půdě výzkumného parku KEE v Plzni, tedy i já jsem se mohl zúčastnit jedné z taveb, které zde proběhly.

U umíněného materiálu jsem provedl široký průzkum. Například jsem zde uvedl závislost vlastností  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , jako je rezistivita a s ní spojená vodivost, na teplotě. Dále jsem zde provedl výpočet elektrických parametrů na zjednodušeném modelu, který zahrnoval vzájemné působení induktoru a vsázky bez zahrnutí vlastností segmentů studeného kelímku. Provedl jsem výpočet vhodného množství startovacího materiálu pro startovací fázi, vypočtenou přesně dle parametrů reálného studeného kelímku zde v Plzni. Na základě tohoto množství jsem spočetl objem (hmotnost) prvotní tavící lázně roztaveného  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . V neposlední řadě jsem vysvětlil a kde to bylo možné i spočetl tepelné ztráty kelímku a vsázky.

V úvodní části diplomové práce se zaměřuji na teorii přeměny elektromagnetické energie v teplo. Osvětluji a odvozují zde veličiny jako je měrný útlum, fázová konstanta, Poyntingův zářivý vektor, hloubka pronikání elektromagnetického vlnění či kvalitativní parametr  $x$ .

V předposlední kapitole diplomové práce hodnotím reálné tavby uskutečněné zde v Plzni v datech 12.1.2017, 12.1.2018 a 25.1.2018. U tavby ze dne 25.1.2018 jsem byl osobně přítomen. U těchto hodnocení jsem vycházel z dat a videí, která mi byla poskytnuta. Všechny tyto materiály jsou dostupné na přiloženém DVD.

V samotném závěru diplomové práce se zaměřuji na doporučení pro praxi a další zlepšení procesu tavby pomocí elektromagnetické indukce ve studeném kelímku. Jako zlepšení navrhuji regulaci procesu, porovnávám reálný kelímek se svými výpočty a navrhuji možné změny parametrů studeného kelímku. Uvádím zde novou metodu, tzv. levitační tavení, které předpokládá nulový kontakt taveniny a kelímku.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Prof. Ing. Dr. Emil Langer, DrSc.** *Teorie indukčního a dielektrického tepla.* Praha : Academie, nakladatelství Československé akademie věd, 1979. 21-059-79.
- [2] **Windsheimer, Hans, Waitz, Roland and Wübben, Peter.** *Inductive melting in cold wall crucible: technology and application.* [Článek] Eschenfelden, Germany : Linn High Therm GmbH.
- [3] **Poznyak, Igor, a další.** *Induction Melting of Aluminium Oxide in the Cold Crucible.* 31.00, Plzeň : Department of El. Power Engineering and Enviromental Eng. University of West Bohemia, 2017. 978-1-5090-4606-9/17/\$31.00.
- [4] **Scott, Reed.** Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits. *Industrial Heating.* [Online] 2001. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/articles/83906-induction-skull-melting-offers-ti-investment-casting-benefits?v=preview>.
- [5] **Doc. Ing. Igor Poznyak, CSc.** *Konzultace výpočtů k studenému kelímku.* Plzeň : ZČU, 2018.
- [6] **Ing. Behrens, Torge.** *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters.* Göttingen : CUVILLIER VERLAG, 2007. 978-3-86727-405-0.
- [7] NIST. *National Institute of Standards and Technology.* [Online] U.S. Department of Commerce, 2017. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7429905&Units=SI>. SRD 69.
- [8] **Chase, M.W., Jr.** NIST. *National Institute of Standards and Technology.* [Online] U.S. Department of Commerce, 2017. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C1344281&Units=SI&Mask=2#Thermo-Condensed>.
- [9] Periodická tabulka. *Hliník.* [Online] 2012. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>.
- [10] **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.** *Konzultace výpočtu.* Plzeň : ZČU, 2018.
- [11] **Dokumentace.** *Induction melting system with Cold Crucible and Chamber for melting semiconductor and oxide materials in protection atmosphere or air.* Slovinsko : INDUCTIO, 2016. EN 292-2.
- [12] **VOHLÍDAL, JIŘÍ, ŠTULÍK, KAREL a JULÁK, ALOIS.** *Chemické a analytické tabulky 1. vydání.* Praha : Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-855-5.
- [13] **Petrov, Yu.B.** *Indukční tavení oxidů kovů (přeloženo).* Leningrad : L. Energoatomizdat., 1983.
- [14] **Hradílem, Zdeňek, Lázníčková, Ilona a Král, Vladimír.** *Elektrotepelná technika.* Praha : ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [15] **Prof. Ing. Ivo Doležel, CSc. a Musil, Ladislav.** Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem. *Odborné časopisy.* [Online] 11 2003. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/moderni-prumyslove-technologie-zalozene-na-procesech-v-tekutych-kovech-rizenych-elektromagnetickym-polem--14316.102/03/0047>.

