

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Startovací fáze při indukčním tavení materiálů ve studeném kelímku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán PETŘÍK**
Osobní číslo: **E16N0038K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Startovací fáze při indukčním tavení materiálů 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. Objasněte fyzikální podstatu startovací fáze.
2. Popište průběh startovací fáze a uveďte změny fyzikálních vlastností vsázky během jejího průběhu.
3. Uveďte jaké podmínky musí být splněny pro efektivní průběh startovací fáze a pro přechod do fáze tavení vsázky.
4. Ze získaných poznatků z reálných taveb sestavte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

Seznam odborné literatury:

1. **Literaturu určí vedoucí práce při vstupní konzultaci.**
2. **Jiřinec, S: Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Disertační práce, FEL, KEE, ZCU 2017.**

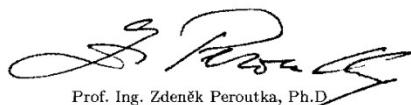
Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 5. října 2018

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou startovací fáze při tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku. Úvod práce obsahuje seznámení s indukčním tavením a se studeným kelímkem. Dále se práce zabývá startovací fází a chováním startovací fáze při tavení ve studeném kelímku. Závěr práce se zaměřuje na zhodnocení tomto chování a vlastností startovací fáze.

Klíčová slova

Indukční tavení, elektromagnetické vlnění, zdroje pro indukční tavení, studený kelímek, startovací fáze, vsázka, oxidy kovu.

Abstract

The submitted thesis is focused on issues of the starting phase during melting of electrically non-conductive materials in the cold crucible. The introduction describes basics to induction melting and the cold crucible. Furthermore, the thesis deals with the starting phase and starting phase behavior during melt in the cold crucible. The conclusion of the thesis is focused on the evaluation on this behavior and properties of the starting phase.

Key words

Induction melting, electromagnetic waves, voltage sources for induction melting, cold crucible, starting phase, charge, metal oxides.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci

„Startovací fáze při indukčním tavení materiálů ve studeném kelímku“

vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucího práce pana Prof. Ing. Jiřího Koženého, CSc., za použití literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne

Bc. Štěpán Petřík

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat panu Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné rady a odbornou konzultaci při tvorbě diplomové práce.

Obsah

1	Indukční tavení.....	12
2	Indukční pece	15
2.1	Kelímková indukční pec	16
2.2	Indukční vysokofrekvenční pece	17
2.3	Indukční kelímkové pece s chladnými stěnami.....	18
2.3.1	Aplikace studeného kelímku.....	20
2.3.2	Kelímek s integrovaným induktorem	20
2.3.3	Segmentový induktor	21
2.4	Levitační tavení	22
2.5	Zdroje pro indukční tavení	24
2.5.1	Zdroj na síťový kmitočet	24
2.5.2	Středofrekvenční zařízení	25
2.5.3	Tyristorový měnič.....	26
2.5.4	Vysokofrekvenční generátor.....	27
3	Startovací fáze.....	29
3.1	Tavení materiálu a tvorba pevné vrstvy	35
3.2	Tuhnutí vsázky	36
3.3	Závislost polohy a tvaru startovací fáze	38
3.4	Model startovací fáze.....	39
3.4.1	Elektromagnetické pole	39
3.4.2	Teplotní pole	42
4	Start tavícího procesu.....	43
4.1	Formovací fáze	44
4.2	Stabilní fáze	44
5	Vytvoření „krusty“	45
5.1	Vzdutí vsázky	47
6	Tavení oxidů	48
6.1	Tavení ZrO ₂	48
6.2	Tavení skel.....	51
7	Závěr	52
8	Seznam literatury	54

Úvod

Diplomová práce se zaměřuje na tavení nevodivých materiálů ve studeném kelímku za pomoci startovací fáze.

V první části jsou probrány základy indukčního tavení, některé typy indukčních pecí a studený kelímek, který je využíván pro tavení nevodivých materiálů.

V druhé části je rozbor startovací fáze, která je potřebná při tavení elektricky nevodivých materiálů. Využívá se pro „nastartování“ tavení, například pro oxid hlíníku Al_2O_3 použijeme čistý hliník, který v důsledku předání tepla vsázce, začne být vsázka elektricky vodivá a její tavení dosáhneme působením elektromagnetické indukce. Část obsahuje i tuhnutí vsázky a získávání krystalu materiálu ze studeného kelímku. Po řízeném ochlazování lze například získat krystaly s různými vlastnostmi. Vysoká čistota materiálu, skvělé optické a tepelné odolnosti.

Závěr obsahuje zhodnocení této diplomové práce a možné závěry pro praxi.

Seznam symbolů

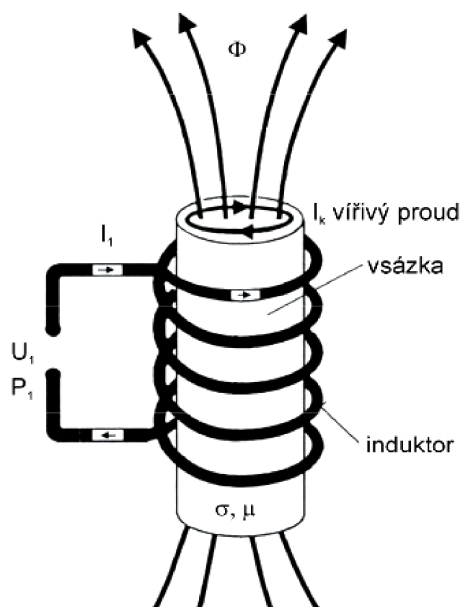
Φ	Magnetický indukční tok	[Wb]
U	Napětí	[V]
P	Výkon	[W]
I	Proud	[A]
W	Energie	[J]
μ	Permeabilita	[H/m]
μ_r	Relativní permeabilita	[-]
μ_0	Permeabilita vakua	[H/m]
ε	Permitivita	[F/m]
ε_r	Relativní permitivita	[-]
ε_0	Permitivita vakua	[F/m]
x	Vzdálenost plochy pod povrchem	[m]
f	Frekvence	[Hz]
a	Hloubka vniku naindukovaných proudů	[m]
η	Účinnost	[-]
L, L ₀	Indukčnost cívky	[H]
R	Odpor rezistoru	[Ω]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
T	Teplo	[°C]
D	Průměr	[m]
g	Hmotnost startovacího materiálu	[kg]
Z	Hěrná hmotnost kovů	[kg.m ⁻³]

V_T	Objem vsázky	[m ³]
B	Magnetická indukce	[T]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
J	Proudová hustota	[A/m ²]
ω	Úhlový kmitočet	[1/s]
K_n	Hustota plošného proudu	[A/m]
q	Plošná hustota výkonu	[W]
α	Fázová konstanta	[-]
Q	Množství tepla	[J]
P_L	Tepelné ztráty prouděním	[W]
P_ω	Tepelné ztráty vedením	[W]
P_{rad}	Tepelné ztráty sáláním	[W]
h	Jednotka vzduť vsázky	[m]
ρ	Hustota nábojů	[C/m ³]

1 Indukční tavení

Indukční tavení je jeden ze základních způsobů předávání tepla mezi dvěma materiály. Přenos energie probíhá mezi cívkou (induktorem) a materiálem (vsázkou). Jedná se tedy o jednoduchý vzduchový transformátor, kde primární stranu tvoří induktor a sekundární stranu tvoří vsázka, představující závit nakrátko. [1]

Princip tavení spočívá v účinku elektromagnetické indukce, kde vložíme předmět z elektricky vodivého materiálu dovnitř cívky, kterou protéká střídavý proud. Pomocí pole v dutině cívky se vybudí ve vsázce vířivé proudy, které na principu Jouleových ztrát vsázku zahřívají. Na obrázku *Obr. 1.1* je znázorněn princip indukčního tavení. [1]



Obr. 1.1 Princip indukčního ohřevu [2]

Pokud vložíme vsázku válcového tvaru, elektromagnetické vlnění se do vsázky dostává povrchem a vyvolá indukované proudy, které vsázku zahřívají. Energie elektromagnetického vlnění se ve vsázce utlumuje a vzniká teplo. Teplota vsázky není rovnoměrně rozložená v celém průřezu, neboť proudová hustota J je ve vsázce také rozdělena nerovnoměrně. Při vysokých frekvencích klesá proudová hustota J od povrchu k ose přibližně podle exponenciální křivky. [2]

Proudovou hustotu lze zapsat vztahem.

$$J_x = J_0 * e^{-kx} \quad 1.1$$

Pak hloubka, do které klesne J na hodnotě $\frac{1}{e}$. Tato hodnota je přibližně 0,368 hustoty na povrchu. Hloubka vniku a představuje relativní hloubku pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky, v dalším textu zkráceně hloubka vniku. [1][3]

Hloubka vniku elektromagnetického vlnění závisí na kmitočtu [2]. Pomocí kmitočtu můžeme ovlivnit rozložení tepla vsázce.

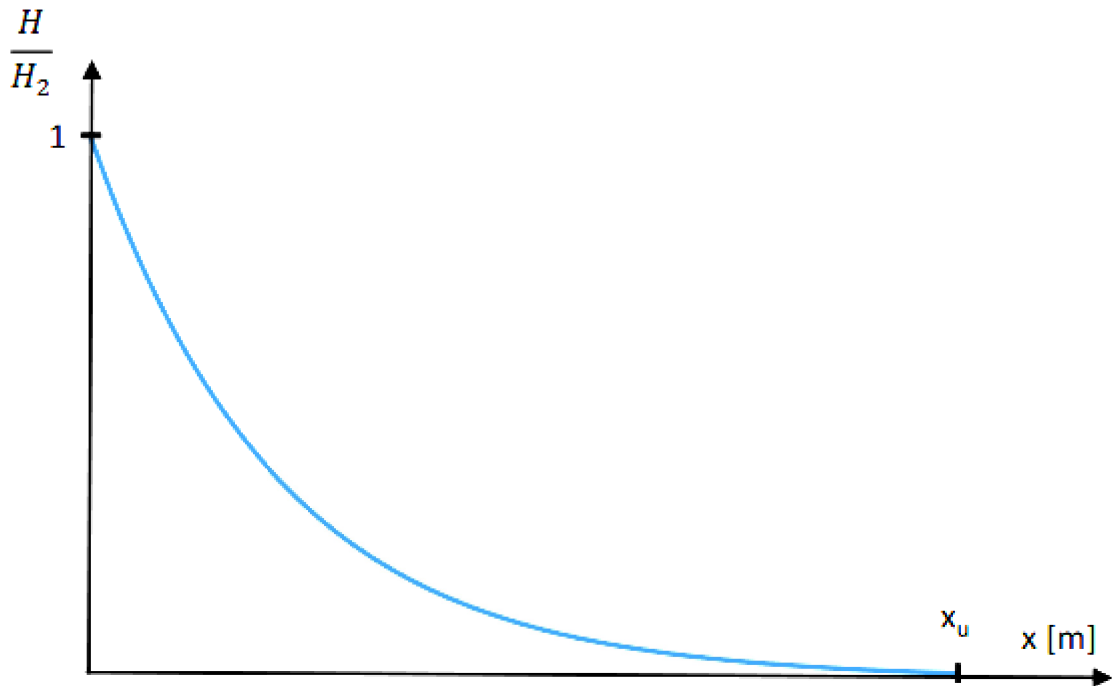
$$a = \sqrt{\frac{2}{2 * \pi * f * \mu * \gamma}} \quad 1.2$$

Kde a je vlastní hloubka vniku [m], f je kmitočet [Hz], μ je celková permeabilita prostředí [H.m^{-1}] složená z permeability vakua μ_0 a relativní permeabilita vsázky μ_r , γ je konduktivita [S.m^{-1}].

Hodnota $\frac{1}{e}$ je důležitá pro útlum elektromagnetického pole v elektricky vodivém prostředí. Elektromagnetické vlnění, které dopadá na stěnu materiálu je exponenciálně tlumeno podle funkce. [5]

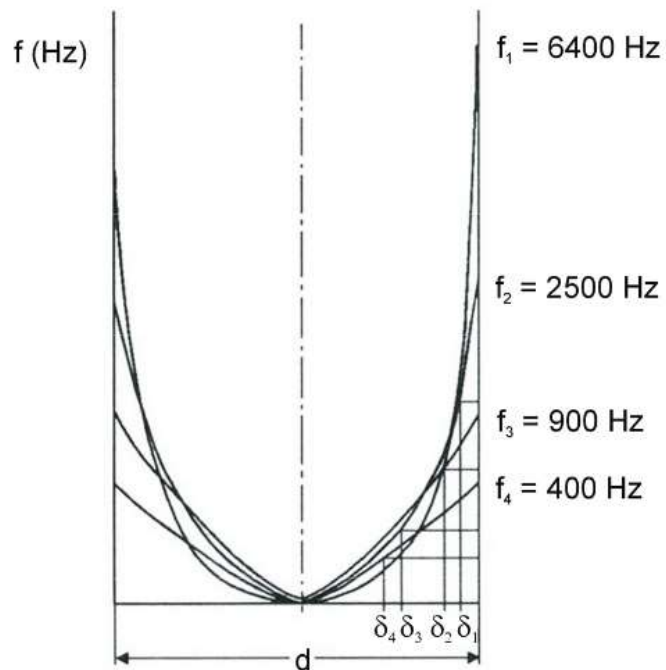
$$\frac{H}{H_2} = e^{-\frac{x}{a}} \quad 1.3$$

Kde x je vzdálenost pod povrchem plochy, kam dopadá elektromagnetické vlnění. Na obrázku *Obr. 1.2* je vidět útlum podle již zmíněné funkce. Hodnota, na které se utlumí elektromagnetická intenzita, je přibližně rovna hodnotě $6a_2$. [5]



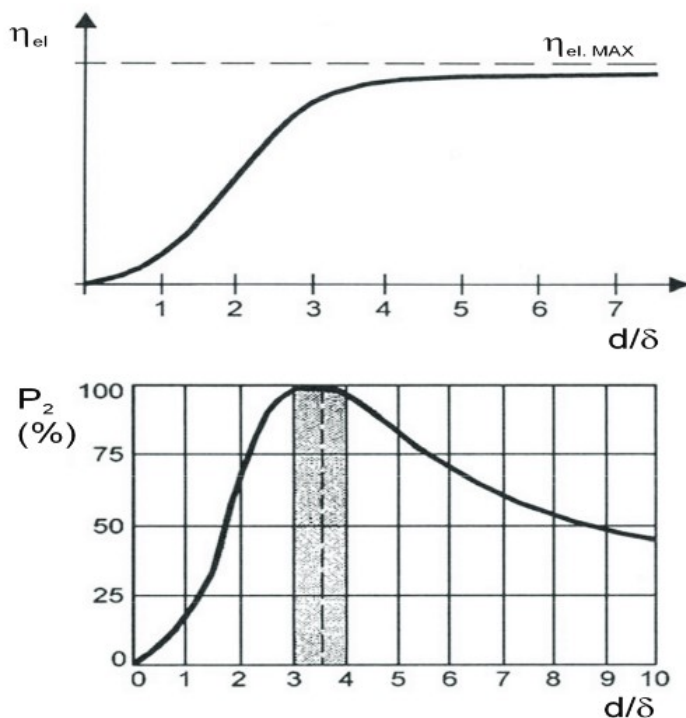
Obr. 1.2 útlum elektromagnetického pole pod povrchem materiálu[5]

Na obrázku Obr. 1.3 je vidět závislost pro hloubku vniku a , na obrázku značené jako δ , proti užívané frekvenci.



Obr. 1.3 Průběh a v závislosti na kmitočtu ($a = \delta$) [2]

Vlastní účinnost ohřevu je závislá na poměru $\frac{d}{a}$, kde d je velikost průměru vsázky a a je již zmíněná hloubka vniku. Účinnost můžeme vidět na obrázku *Obr. 1.4*, kde P_2 je výkon .[2]



Obr. 1.4 účinnost indukčního ohřevu ($a = \delta$) [2]

2 Indukční pece [4][5]

Existuje několik typů indukčních pecí. Nejčastěji se využívají indukční kelímkové pece k tavení kovů a vyrábějí se v nich vysoce kvalitní oceli, keramika nebo vysoce kvalitní skla. [3]

Historicky se začaly u nás vyvíjet po druhé světové válce. První pece byly nízkofrekvenční 50Hz až 60Hz a používaly se především pro výrobu litiny a jako udržovací pece. Problém nastal u menších kelímků, kde bylo zapotřebí vyšších frekvencí. To následně vedlo k vývoji měničů s výstupní frekvencí 150Hz. Vývoj těchto měničů vedl k většímu použití kelímkových pecí. S velkou inovací přišla Německá firma ABB. Vypracovali a realizovali návrh napájecího systému pro pece, který je schopen efektivně napájet dvě pece nezávisle na sobě.

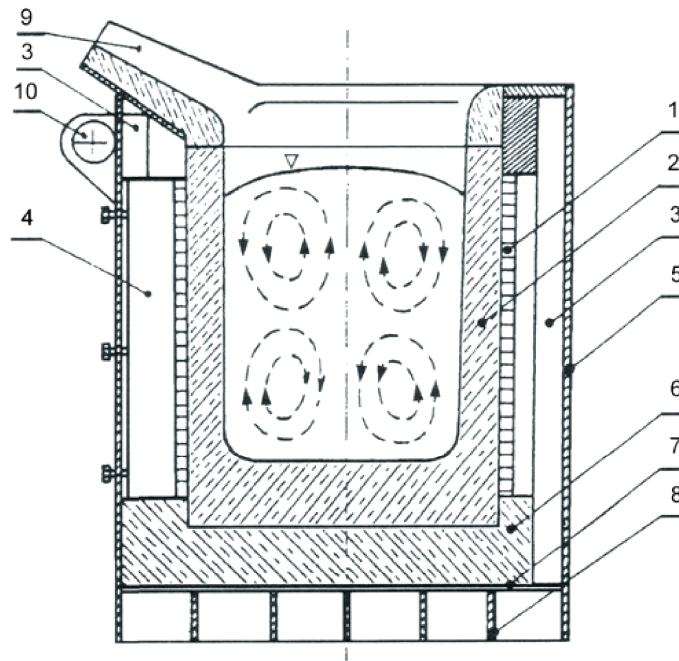
Největší firmu pro kelímkové pece založil v letech 1954 Henry Rowan, která nesla název Inductoterm. Jeho firma skupovala ostatní konkurenční firmy, které se zabývaly vývojem indukčních pecí. Inductoterm se stala největší firmou, která nabízela indukční pece, systémy řízení a systémy slévání.

2.1 Kelímková indukční pec [2][3]

Na obrázku *Obr. 2.1* je znázorněna pec. Kde jednotlivá čísla znamenají :

- 1- Ohřívací cívka, která je navinuta jako jednovrstvá, jedná se nejčastěji o dutý měděný vodič. Touto dutinou protéká chladicí kapalina.
- 2- Vlastní kelímek. Nejčastěji je tvořen z křemičitého písku SiO_2
- 3- Jsou transformátorové plechy, které jsou ve svislém uspořádání po vnitřním obvodu pláště. Plechy mají svádět magnetický tok vně cívky, aby se magnetický tok nedostal do pláště nebo do dalších konstrukčních částí pece.
- 4- Žárovkové trávce pro cívku 1.
- 5- Vnější plášť pece.
- 6- Keramická vyzdívka na dně pece.
- 7- Jedná se o stínící měděný plech, který má zabránit magnetickému toku, aby nepronikal do dna pece.
- 8- Dno pece.
- 9- Hubice pro odlévání materiálu z pece.
- 10- Jedná se o osu, podle které se pec otáčí při vyklápění nebo odpichu.

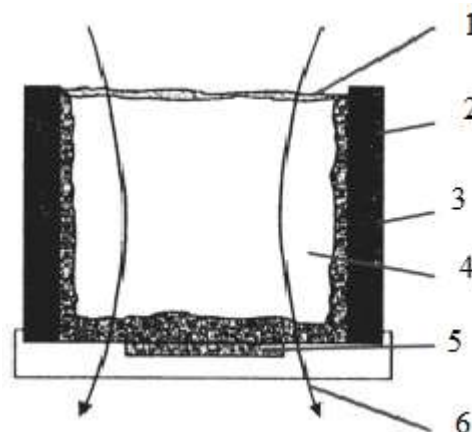
Na vnější straně kelímku je vodou chlazený induktor, napájen ze zdroje střídavého proudu o frekvenci v rozmezí od 50Hz až do 1000Hz. Díky indukovaným vířivým proudům a elektromagnetickým silám dochází uvnitř kelímku k proudění materiálu, což se může projevit vzduším vzestupu horní hladiny taveného materiálu. Pohyb taveného materiálu zaručuje rovnoměrné rozložení teploty ve vsázce.



Obr. 2.1 Indukční kelímková pec[5]

2.2 Indukční vysokofrekvenční pece [4]

Na obrázku *Obr. 2.2* je znázorněn princip pro vysokofrekvenční pece. Pece jsou založeny na technologii SMT (skull melting technology). Na dně i na stěnách vodou chlazeného induktoru se vytvoří „skull“. Tato vrstva chrání dno i stěny před vysokými teplotami, př. 3000°C. Tyto pece se nejčastěji používají pro výrobu oxido-keramických nebo skleněných materiálů.



Obr. 2.2 vysokofrekvenční pec pro tavení špatně vodivé elektrické materiály [4]

- 1- Vrstva materiálu po tavení
- 2- Vodou chlazený induktor
- 3- Vrstva „skull“
- 4- Tavený materiál
- 5- Vodou chlazené dno
- 6- Směr působení siločar magnetického pole

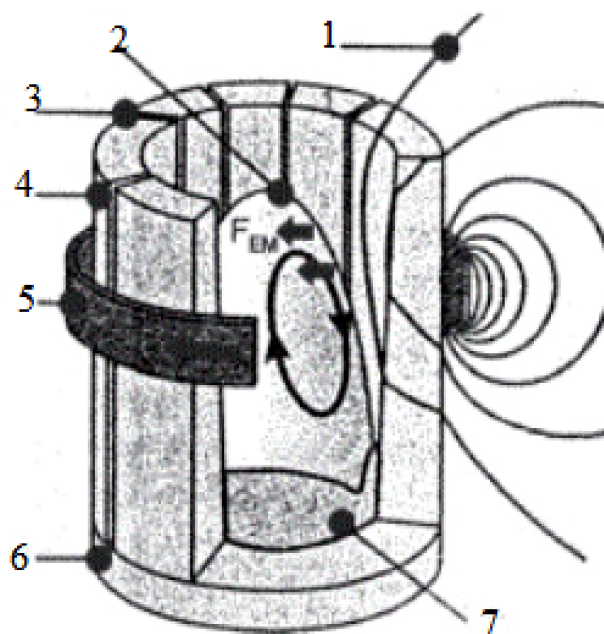
2.3 Indukční kelímkové pece s chladnými stěnami [6] [5]

Na obrázku *Obr 2.3* je zobrazen princip indukčního kelímku s chladnými stěnami. Také se mu říká „studený kelímek“. Nejčastěji je využíván pro tavení kovových i nekovových materiálů s vysokým bodem tavení.

Prostor na tavení je tvořen z dutých měděných segmentů, které jsou chlazené vodou. Dno je rovněž chlazené vodou. Segmenty jsou mezi sebou odděleny malou mezerou. Vlastní induktor je napájen z měniče kmitočtů.

Pece s chladnými stěnami jsou opět založeny na technologii SMT, kde vzniká tenká tuhá vrstva mezi stěnami segmentů, dnem a taveným materiálem.

Tyto pece se používají rovněž pro oxido-keramické materiály, sklo nebo pro výrobu monolitických křemíkových polovodičů.



Obr 2.3 princip studeného kelímku [5]

- 1- Značí magnetické pole
- 2- Vyznačuje vzduťou hladinu taveniny
- 3- Mezera
- 4- Vodou chlazený segment
- 5- Induktor
- 6- Vodou chlazené dno
- 7- „skull“, tenká krusta vytvořena na povrchu stěn kelímku a dna

Induktorem protéká proud o frekvenci 10kHz až 5MHz. Nízké frekvence se používají pro elektricky vodivé materiály a vysoké frekvence naopak pro materiály nevodivé. Studený kelímek může být tvořen s integrovaným induktorem nebo vytvořen pomocí segmentů. [7]

2.3.1 Aplikace studeného kelímku [12] [13]

Studený kelímek můžeme použít při výrobě diamantů, při tavení křemíku nebo pro vitrifikaci například radioaktivního materiálu.

Při výrobě diamantů se využívá zirkon, tzv. náhražka diamantu. Při výrobě těchto náhražek se využívá jevu zónové krystalizace za teploty kolem 3000°C. Výhodou náhražek je jejich cena a možnost vyrobit různě barevné odstíny a sytosti.

Tavení křemíku je možno použít například pro výrobu solárních panelů. Avšak je potřeba použít drahé kelímky a formy, aby se dosáhlo nejvyšší čistoty materiálu. I v případě použití kvalitních prostředků, není zaručeno, že nedojde ke kontaminaci materiálu. Proto tavení ve studeném kelímku dosahuje velmi vysoké čistoty.

Vitrifikace se využívá při zpracování radioaktivního odpadu. Z jaderného odpadu se může vyrobit stabilnější materiál, například sklo nebo keramika, které jsou lépe skladovatelné než radioaktivní odpad. Vitrifikace probíhá ve dvou krocích. V první odstraníme všechnu vodu a přidáme sklotvorný materiál a ve druhém kroku, pomocí klasické sklářské techniky, vytvoříme sklo nebo keramiku.

2.3.2 Kelímek s integrovaným induktorem [8]

Induktor je vytvořen jedním závitem cívky, který je intenzivně chlazen vodou. Pokud je potřeba, je možné umístit více induktorů nad sebe a tím dosáhnout větší intenzity pro tavení materiálů. Toto se například využívá pro tavení materiálů se špatnou vodivostí. Díky chlazení kelímku a dna opět vzniká vrstva „skull“.

Tento kelímek se využívá pro tavení oxidů, skla, kde je zapotřebí vyšší teplota tavení, více jak 2000 °C a splňuje se požadavek na nejvyšší čistotu výtavku.

Vlastní kelímek nelze oddělit od induktoru, což je nevýhoda tohoto systému. A však velkou výhodou je vysoká energetická účinnost a nízké ztráty při tavení. Na obrázku *Obr. 2.4* je integrovaný induktor.



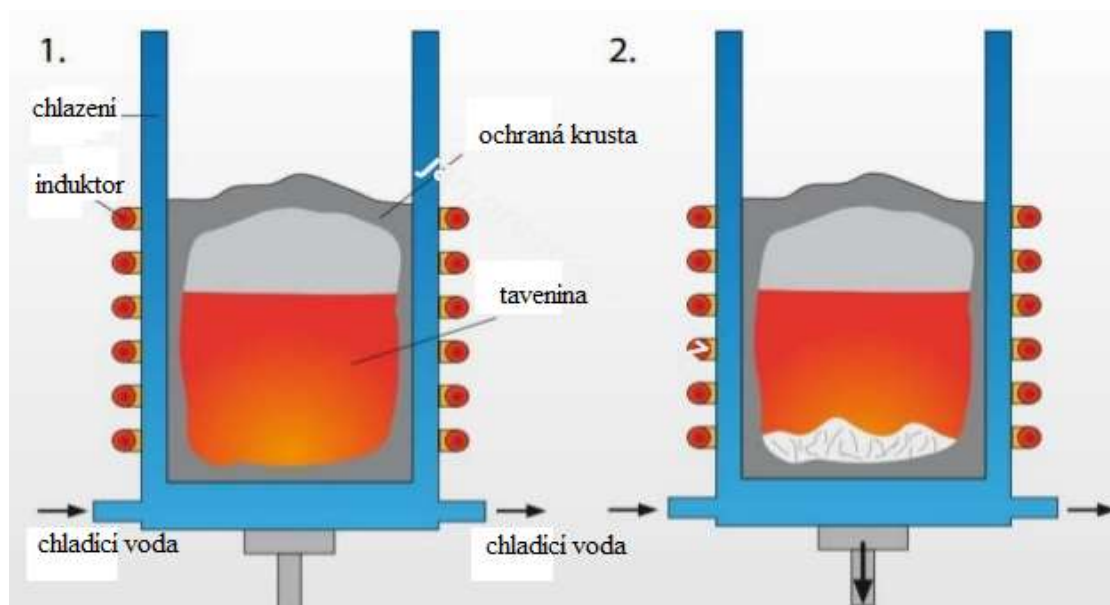
Obr. 2.4 Integrovaný induktor [8]

2.3.3 Segmentový induktor [8]

Segmentové uspořádání je vhodné pro tavení elektricky nevodivých materiálů. Měděné segmenty jsou duté a chlazené vodou. Ve spodní části jsou segmenty připojeny na přívod a odvod chladicí vody. Induktor je tvořen z měděného dutého vodiče, který je také chlazen vodou a může tvořit více než jeden závit. Dno je také vytvořeno z mědi a také je chlazeno vodou. Mezera mezi segmenty bývá kolem 1mm. Tato mezera stačí, aby nedocházelo k odtoku materiálu z kelímku při tavení.

Tvar segmentů nemá na proces tavení žádný vliv, proto se nejčastěji vyrábí segmenty s kruhovým průřezem pro chladicí kapalinu. Vzhledem k velkým tlakům uvnitř segmentů, při protékání chladicí vody, je zapotřebí volit tloušťku stěny segmentu nejméně 1,5mm a vnitřní průměr by neměl být menší než 4mm.

Aby nedocházelo k odtoku materiálu, jsou segmenty kelímku natřeny speciální vazelínou a posléze je oxid vsypán do kelímku.



Obr. 2.5 Princip segmentového uspořádání [8]

Na obrázku *Obr. 2.5* je vidět zjednodušený princip segmentového studeného kelímku. Díky chlazení v segmentech a dnu kelímku se vytvoří na okrajích „skull“.

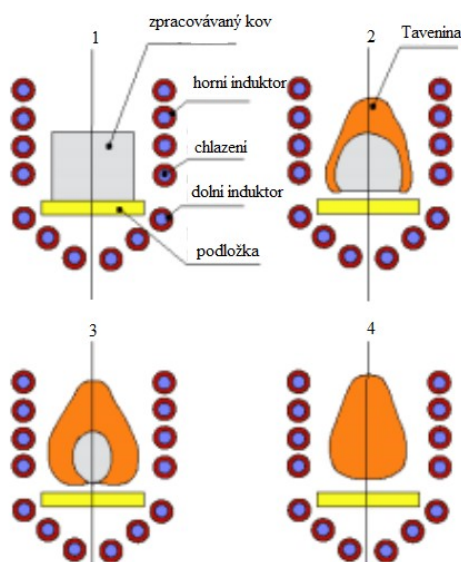
Při tavení elektricky nevodivých materiálů dosahuje účinnost až k 95%, avšak nevodivé materiály je zapotřebí nastartovat, protože je nelze začít indukčně ohřívat v rozsahu nízkých teplot, kdy vsázka není elektricky vodivá.

2.4 Levitační tavení [8] [13][14]

Levitační tavení je velmi podobné tavení ve studeném kelímku. Tento typ technologie se využívá pro slitiny obsahující například hliník, titan, zirkon. Využití této technologie se najde v leteckém průmyslu a ve zdravotnictví.

Princip spočívá v působení elektrodynamických sil na vsázku. Tyto síly udržují vsázku ve vznosu v ose kelímku. Přičemž nedochází ke styku se segmenty studeného kelímku. Působení elektrodynamických sil je ovlivněno vířivými proudy, které závisí na uspořádání cívek a tvaru induktoru.

Je důležité, aby Lorentzovy síly působící ve zpracovávaném materiálu překonaly síly gravitační hned na začátku procesu, protože vložený kov musí ztratit kontakt s okolím ještě před tavením. To docílíme správným geometrickým uspořádáním cívek, velikostí proudu a velikosti používaného kmitočtu. Např. na *Obr. 2.6* je uspořádání se dvěma cívkami, kde horní induktor zajišťuje tavení materiálu a dolní induktor zabezpečuje hlavně levitaci.

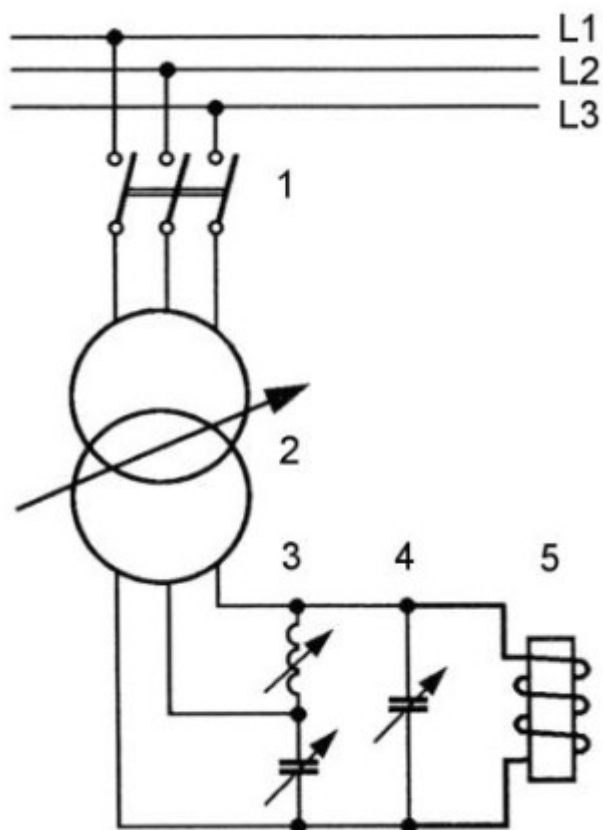


Obr. 2.6 Princip levitačního tavení[14]

Na obrázku *Obr. 2.6* je vidět v krocích levitačního tavení. Uspořádání je osově symetrické, ale toto uspořádání má jednu nevýhodu, a to, že levitační síly působí pouze ve vnějších vrstvách taveniny a v těsné blízkosti osy jsou v podstatě nulové. Díky této nevýhodě lze zpracovávat pomocí levitační technologie malé množství materiálu, jehož povrchové napětí v tekutém stavu zajistí nadnášení i té části, kde síly nepůsobí. Tento efekt lze snížit lepší volbou geometrického uspořádání cívek, ale vždy bude platit, že v těsné blízkosti osy budou síly minimální.

2.5 Zdroje pro indukční tavení [2][3]

2.5.1 Zdroj na síťový kmitočet



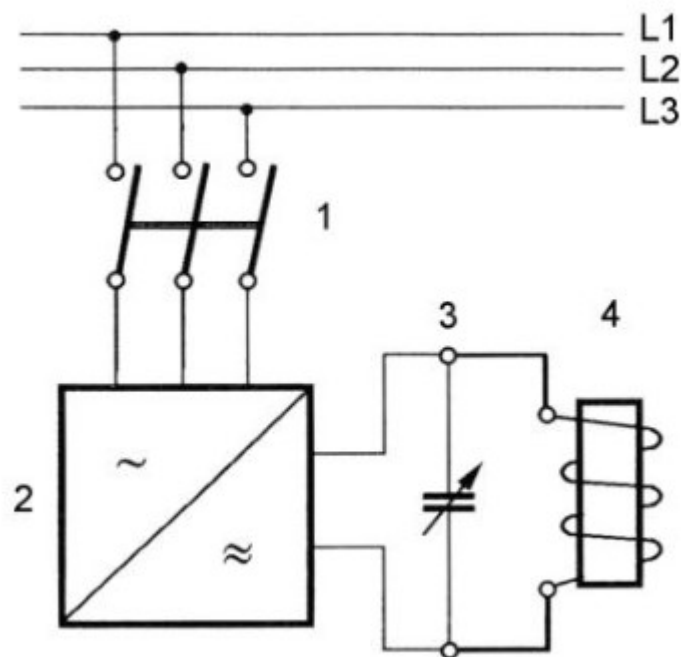
Obr. 2.7 Zdroj připojený na síťový kmitočet [2]

Na obrázku Obr. 2.7 je znázorněné schéma zapojení zdroje pro indukční peci na síťový kmitočet. Kde jednotlivá čísla znamenají:

- 1- Výkonový spínač
- 2- Regulační transformátor
- 3- Obvod, který převádí jednofázovou zátěž na symetrickou třífázovou
- 4- Kompenzátorová baterie, kompenzující jalový výkon cívky
- 5- Indukční pec

Jedná se o napájení ze sítě 3x 400/230V, 50Hz. Tímto způsobem je možno připojit k síti i indukční ohřívačky, pokud je nutno ohřívat tělesa větších průměrů, například u oceli to jsou průměry až do 500mm.

2.5.2 Středofrekvenční zařízení

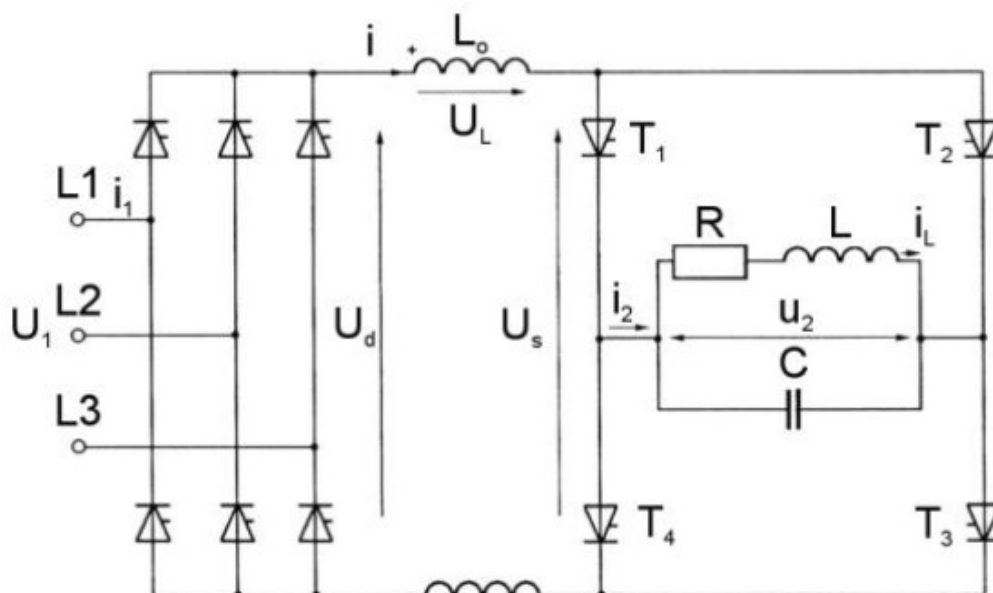


Obr. 2.8 Zdroj pro střední frekvence [2]

Na obrázku *Obr. 2.8* je schéma zapojení pro generování středních frekvencí od 150Hz až do 20kHz. Jednotlivá čísla znamenají:

- 1- Výkonový vypínač
- 2- Měnič frekvence
- 3- Kondenzátorová baterie pro kompenzování jalového výkonu z cívky
- 4- Indukční pec

2.5.3 Tyristorový měnič



Obr. 2.9 Zdroj tyristorového měniče kmitočtu [2]

Na obrázku *Obr. 2.9* je schéma zapojení pro tyristorový měnič kmitočtu. Skládá se z usměrňovače napětí, tlumivky s indukčností L_0 a z měniče.

Usměrňovač plní funkci řízeného trojfázového můstku s možností invertorového chodu. Střídač plní funkci invertoru proudu, který je řízen zátěží. Zátěž tvoří topný obvod. Obvod zátěže je tvořen odporem R , indukčností L a kompenzačním kondenzátorem C . Kondenzátor zároveň slouží jako komutační pro tyristory T_1 a T_4 . Na tyristory jsou kladeny velké nároky, aby správně plnily funkci a zároveň, aby byly lehce vyměnitelné při poruše. Indukčnost v meziobvodu měniče L_0 disponuje velkou indukčností, v řádech mH, a plní tři funkce:

- 1- Funguje jako galvanické oddělení obvodů. Před tlumivkou jsou spínané prvky usměrňovače a za tlumivkou obvod střídače. Tlumivka zachycuje napěťové rozdíly mezi těmito obvody.
- 2- Pro vyhlazení stejnosměrného proudu od usměrňovače.

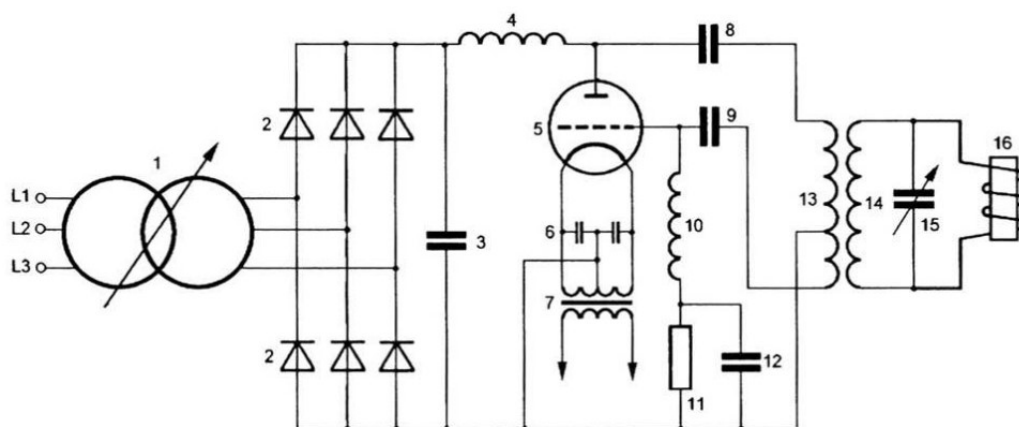
- 3- Zamezuje zkratovému proudu, než zareagují obvody nadproudové ochrany. Důležité je tuto funkci zahrnout při výpočtu tlumivky.

Princip spočívá ve správném spínání tyristorů. Nejdříve tyristory T_1 a T_3 , potom tyristory T_2 a T_4 . Střídavé spínání tyristorů zajišťuje regulátor měniče, který také obsahuje funkci pro start měniče. Start se provádí tak, že se vybijí kondenzátor C . Kondenzátor je potřeba nejdříve nabít, a tak vzniknou tlumené kmity, na které reaguje regulátor a začne spínat tyristory.

Díky spínání tyristorů je zaváděn obdélníkový průběh proudů střídavé polarity do topného obvodu R, L, C . Obdélníkový průběh impulzů je ovlivněn právě velikostí indukčnosti L_0 , která vede konstantní stejnosměrný proud. Díky vyhlazení vyšších harmonických obdélníkového průběhu pomocí kondenzátoru C může být na topném obvodu vyhlazené sinusové napětí u_2 a proud i_L . Kmitočet obvodu je řízen pomocí topného obvodu.

Nevýhodou měniče je zpětná vazba na napájecí síť, avšak tyto jevy lze částečně omezit filtry pro vyšší harmonické.

2.5.4 Vysokofrekvenční generátor



Obr. 2.10 Zdroj vysokofrekvenčního generátoru [2]

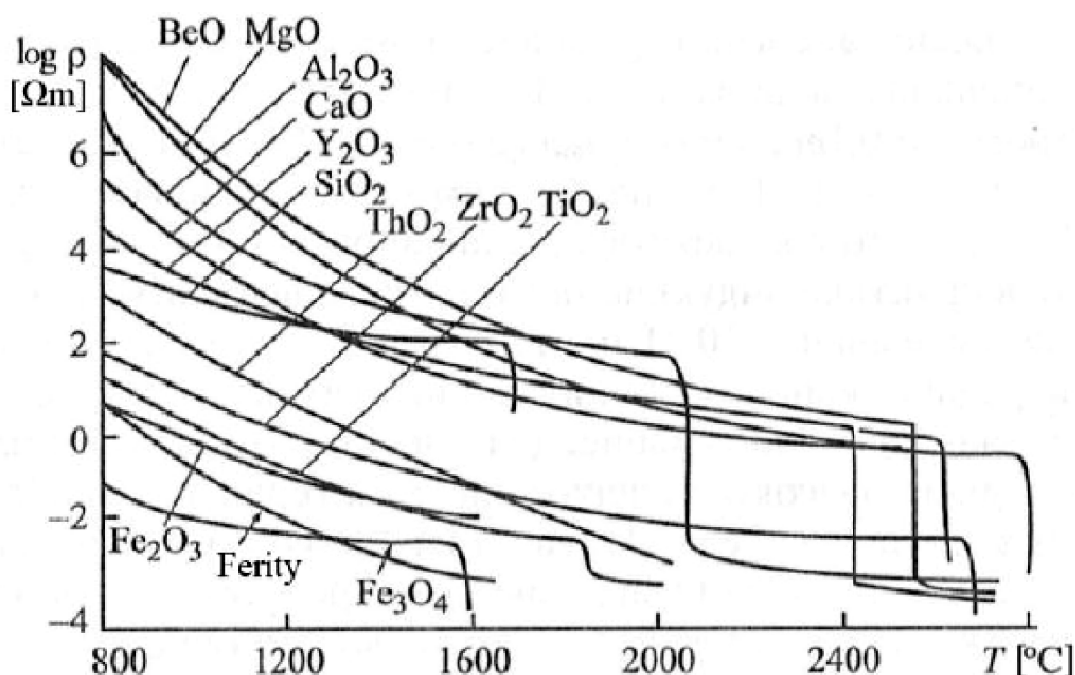
Na obrázku *Obr. 2.10* můžeme vidět:

- 1- Regulační transformátor
- 2- Usměrňovač
- 3- Vyhlažovací kondenzátor
- 4- Oddělovací tlumivka pro střídavou vysokofrekvenční složku na anodě **5**.
- 5- Výkonová trioda
- 6- Kondenzátory pro potlačení vysokofrekvenční složku proudu katody **5**.
- 7- Žhavicí transformátor pro triodu **5**.
- 8- Oddělovací kondenzátor, který potlačí stejnosměrnou složku
- 9- Oddělovací kondenzátor pro stejnosměrné mřížkové přepětí triody **5**., tento kondenzátor však umožňuje průtok vysokofrekvenčním proudům zpětné vazby
- 10- Tlumivka zabraňuje zkratování vysokofrekvenčního mřížkového zpětnovazebního napětí kondenzátorem **12**.
- 11- Odpor, na kterém vzniká záporné předpětí mřížky triody **5**.
- 12- Filtrační kondenzátor předpětí
- 13- Primární vnutí vysokofrekvenčního transformátoru
- 14- Sekundární vnutí vysokofrekvenčního transformátoru
- 15- Laděný kompenzační kondenzátor pro obvod induktoru
- 16- Induktor

Vinutí **13.**, **14.**, **16.** s laděným kondenzátorem **15**. Tvoří oscilační obvod, který pracuje na daném kmitočtu.

3 Startovací fáze [8] [10] [11] [12]

Ve studeném kelímku se nejčastěji taví materiály, které mají malou elektrickou vodivost, v řádech $10^{-12} \text{ S.m}^{-1}$ do 10^{-2} S.m^{-1} . U startovací fáze je důležité hledět na parametry nevodivých materiálů. Jeden ze základních parametrů je závislost elektrického odporu na teplotě, pro nejčastější tavené oxidy, kterou nám ukazuje obrázek *Obr. 3.1*.



Obr. 3.1 Závislost elektrického odporu na teplotě tavených elektricky nevodivých materiálů [11]

Dalším důležitým parametrem je kmitočet napájecích proudů. Tavení materiálů probíhá při teplotách 2000°C až 3000°C, kde rezistivita materiálu, jak pevného a tekutého, se výrazně s teplotou mění. Tabulka *Tab. 3.1* ukazuje různé oxidy kovů, jak jejich teplotu při pevném nebo kapalném skupenství, tak i závislost na frekvenci.

Tab. 3.1 oxidy kovů, jejich rezistivita a frekvence

Materiál	Skupenství	Teplota [°C]	Rezistivita[Ω.cm]	Frekvence [Hz]
Al ₂ O ₃	Pevné	1878	2,2 10 ⁴	6,6 10 ⁷
Al ₂ O ₃	Kapalné	2200	1 10 ⁻¹	300
Y ₂ O ₃	Pevné	1500	3 10 ¹	90 10 ³
Y ₂ O ₃	Kapalné	2430	5 10 ⁻²	150
ZrO ₂	Pevné	2000	1	3 10 ³

Aby se u nevodivých materiálů docílilo zvýšení jejich energie elektromagnetického pole pro tavení, je zapotřebí vysokých frekvencí. Tuto frekvenci lze určit ze vztahu 3.1

$$f_{min} \geq 3 \cdot 10^6 * \frac{\gamma}{D * v^2} \quad 3.1$$

Ze vztahu (3) lze například určit kmitočet pro oxid zirkoničitý ZrO₂. Pokud použijeme vsázku ZrO₂ o průměru D = 12 cm, musíme docílit minimální kmitočet 300MHz.

Startovací fáze se využívá při tavení nevodivých materiálů. Elektricky nevodivé materiály nelze roztavit pomocí elektromagnetické indukce, je nutno vsázku nějakým způsobem ohřát. K ohřátí vsázky právě využijeme již zmíněnou startovací fázi, říká se jí také „start-up“. Existuje pět způsobů jak předejít vsázku, aby se stala elektricky vodivá:

- 1- Pomocí plynového hořáku
- 2- Elektrickým obloukem
- 3- Pomocí plazmy
- 4- Exotermickou oxidací kovu, kde vlastní oxid kovu je taven
- 5- Konvekce z elektricky vodivého materiálu umístěného do vsázky

Je velmi důležité dodržovat chemickou čistotu materiálu. Tyto různé metody mohou více, či méně nebo vůbec ovlivnit čistotu materiálu.

- **Pomocí plynového hořáku**

Plynový hořák zahřívá povrch vsázky a tím dochází k tavení materiálu. Velkou nevýhodou je, že nelze vyloučit kontaminaci vsázky, protože dochází ke vzájemnému

působení spalin a taveného materiálu. Další nevýhoda může být vysoká rychlost proudění plamene, při použití vsázky v pohodě prášku.

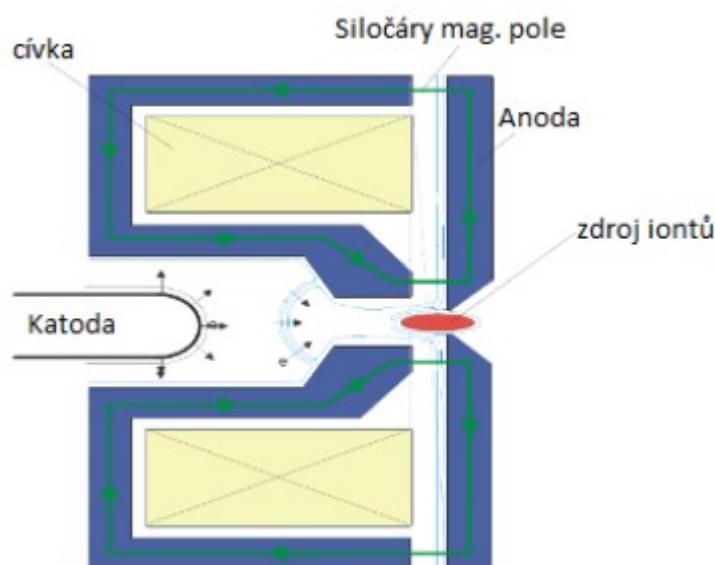
- **Elektrický oblouk**

Využití tepla způsobené elektrickým obloukem, který je směřován na povrch nebo dovnitř vsázky. Nevýhodou je velká kontaminace vsázky.

- **Plazma**

Používaný u tavby skel. Plazma je elektricky vodivý plyn složený z iontů a elektronů. Vlastní plyn vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu nebo roztržením molekul, tzv. ionizací. Aby byl plyn považován za plazmu, musí vykazovat kolektivní chování a kvazineutralitu. Plazma je nejrozšířenější forma látky. Nejpoužívanější plyny pro plazmu jsou argon, dusík, směs argonu a vodíku nebo směs kyslíku a vzduchu. Princip spočívá v přeměně elektrické energie na energii tepelnou usměrněnou plazmou. Hoření oblouku je zajištěno elektrodou a výstupní tryskou.

Může být i použit typ bez elektrody, tak zvané dielektrické plazmatrony. Díky absenci elektrody se nekontaminuje vsázka. Na obrázku *Obr. 3.2* je princip plazmatronu. Katoda zůstává mezi cívkou pouze na začátku procesu. Při proudění plynu pomáhá katoda ionizovat na plazmu.



Obr. 3.2 Princip plazmatronu [17]

Z katody vyletují elektrony směrem k anodě. Elektrony jsou zakřivovány pomocí magnetického pole. Mezi anodou a katodou dochází k ionizaci a ionty jsou odváděny úzkou škvírou v anodě. [17]

- **Exotermickou oxidací kovu, kde je vlastní oxid kovu taven**

Jedná se o nejpoužívanější metodu při tavení nevodivých materiálů. Do oxidové vsázky se umísťuje kovová částice ve formě třísek nebo drti, které po ohřevu pomocí elektromagnetické indukce předávají teplo do nevodivého materiálu. Výhoda je, že nekontaminuje vsázku, protože používáme čisté kovy na bázi vsázky.

- **Umístění startovacího elektricky vodivého materiálu do vsázky**

Do vsázky se vkládá malé množství elektricky vodivého materiálu, například čistý hliník, ve formě drátků, prášku nebo granulí. Pro snížení tepelných ztrát, je následně materiál zasypán tenkou vrstvou oxidu. Při ustálené teplotě dochází k mísení materiálu a následně k vodivosti vsázky. Nevýhodou tvoří vysoké teploty, kdy může dojít ke vzplanutí oxidů a následně ke kontaminaci vsázky. Pro přidání správného množství kovu do vsázky se využívá vzorce:

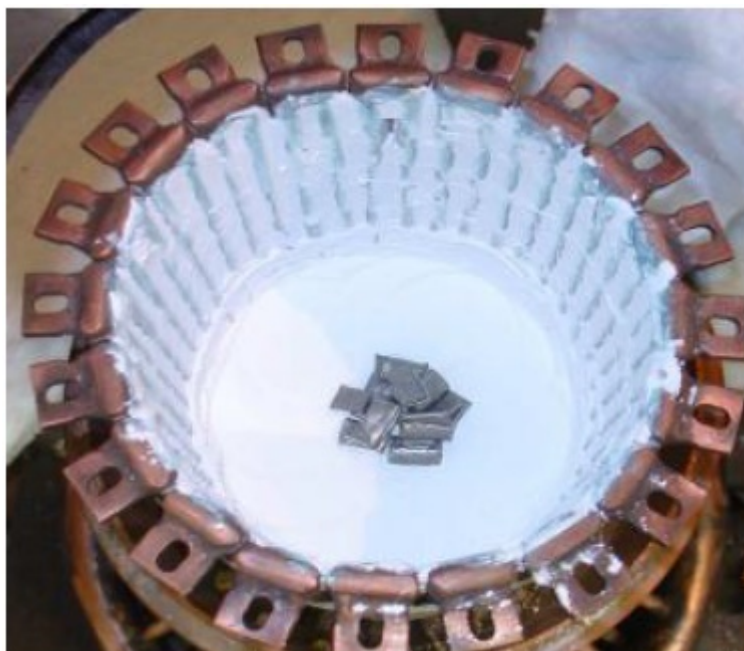
$$g = Z \cdot V_T \quad 3.2$$

Kde g je množství přidaného kovu [kg], V_T je námi známý objem vsázky [m^3] a Z značí měrnou hmotnost kovů [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. Příklad měrné hmotnosti lze vidět v tabulce *tab 2.2*.

Tab. 3.2 měrná hmotnost kovů.

Materiál	Titan	Hliník	Zirkon	Chrom	Berylium	Ytrium	Skandium
Z [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	550	480	1150	1220	420	985	515

Pro snížení energetických ztrát je důležité, aby oxidace byla co nejkratší. Doba varu kovu je ovlivněna právě velikostí a plochou přidaného materiálu. Na obrázku *Obr. 3.3* je vidět přidané malé množství vodivého materiálu do vsázky.



Obr. 3.3 Přidání malého množství vodivého materiálu do vsázky [11]

Umístěný elektricky vodivý materiál může mít i tvar kruhu. Tento způsob je převážně využíván u tavení skel. Princip spočívá rovněž ve vložení elektricky vodivého materiálu (nejčastěji například grafit nebo iridium) ve tvaru kruhu na vsázku. Kruh je rovněž ohříván elektromagnetickým polem od induktoru. Po dosažení elektrické vodivosti materiálu je kruh vyjmut, aby nedošlo ke kontaminaci vsázky.

Například u Oxidu hliníku můžeme vložit kruh z čistého hliníku. U vložení materiálu z čistého hliníku nastává problém, kde hliník má teplotu tání kolem 650°C a oxid kolem 2200°C . Tento rozdíl může mít za důsledek, v nejhorším případě, vznícení kruhu nebo varu, jak bylo zmíněno výše. Čistý hliník pomalu vstupuje do materiálu a způsobuje elektrickou vodivost oxidu.

Na obrázku *Obr. 3.4* je již zmíněný kruh vložen na povrch vsázky.

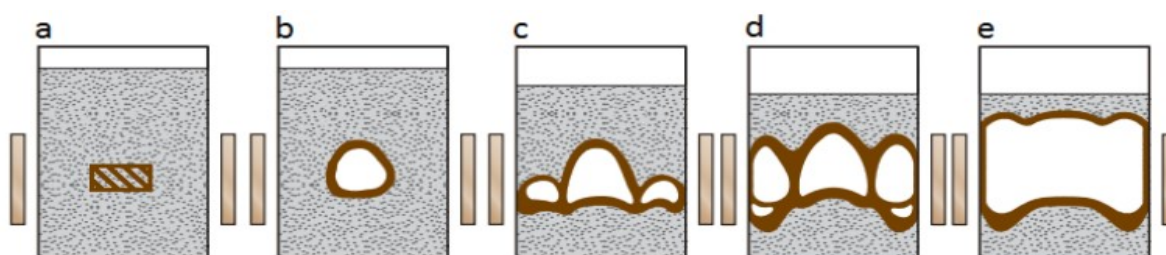


Obr. 3.4 elektricky vodivý kruh [11]

Na obrázku *Obr. 3.5* je vidět postupné tavení vsázky po vložení vodivého materiálu.

Kde:

- a.** Je vidět část materiálu, která je vložena do vsázky
- b.** Probíhá nastavení elektromagnetické indukce a vsázka začíná být vodivá
- c.** i možnosti **d.** a **e.** je postupný ohřev vsázky



Obr. 3.5 Postup tavení vsázky po vložení elektricky vodivého materiálu do vsázky [11]

3.1 Tavení materiálu a tvorba pevné vrstvy [13]

Při dosažení všech nastavení pro tavení materiálu a po dosažení potřebného objemu, vzniká mezi taveninou a studeným kelímkem již zmíněná vrstva „skull“.

S rostoucí teplotou roste i elektrická vodivost taveného materiálu. Avšak „skull“ vrstva má mnohem nižší vodivost než tavený materiál a vrstva je propustná pro elektromagnetické pole, které ohřívá vsázku. Energie dodávaná vysokofrekvenčním zdrojem je přímo absorbována taveninou, vrstva „skull“ je zachována a tím nedochází ke kontaktu mezi taveným materiálem a studeným kelímkem. Výhodou je extrémní čistota taveného materiálu.

Velký rozdíl vrstvy je při tavení vodivých a nevodivých materiálů. Při tavení vodivých materiálů je „skull“ vytvořena pomocí vodivého materiálu a pohltí většinu elektromagnetického pole, které ohřívá vsázku. Vzhledem k tomu, je účinnost kolem 15%. Avšak při tavení nevodivých materiálu je vrstva tvořena nevodivým materiálem a propustí, jak již bylo zmíněno, elektromagnetické pole a účinnost dosahuje přibližně 90%.

Teplu zůstává na vnějších stranách taveného materiálu, vlivem skinefektu. Zde je elektrická vodivost a teplota vyšší. Oblast izoluje tavený materiál tak, že elektromagnetické pole nepronikne k materiálu při pracovních frekvencích. Tímto případem proniká teplo do vsázky pomocí prouděním, sáláním a vedením.

Velice důležitá je tepelná stabilita v kelímku. Energie, která je odevzdána v důsledku tepelných ztrát přes stěny kelímku a povrchem taveného materiálu, musí být průběžně zvyšována pomocí výkonového zdroje, aby tavený materiál „nezamrzl“. Například při snížení teploty v chladicí vodě může dojít k postupné krystalizaci taveného materiálu nebo při poklesu objemu taveného materiálu pod kritickou mez, může dojít k přerušení procesu tavení.

3.2 Tuhnutí vsázky [8] [13] [15]

Po dosažení správných vlastností materiálu, dochází k ochlazování, které může probíhat několika způsoby. Při odpojení zdroje nebo při pomalém snižování výkonu zdroje, dochází ke krystalizaci a to vede ke vzniku krystalu.

Při pomalém snižování výkonu, kdy materiál tuhne pomalu, může docházet k jevu, který může mít čistící účinky. Při krystalizaci dochází k vytlačování nečistot do horní oblasti taveného materiálu. Nečistoty vytvoří na povrchu taveniny vrstvu, která se jednoduše oddělí.

K vlastní krystalizaci materiálu může docházet několika způsoby:

- ***Pomalé snižování napětí měniče***

Při pomalém snižování napětí dochází k řízené krystalizaci vsázky. Nezáleží však jen na postupném snižování napětí, ale také na poloze induktoru a kelímku. Pomocí polohování induktoru a kelímku lze dosáhnout správně rozložené teploty ve vsázce a tím řídit krystalizaci.

- ***Nárazové vypnutí zdroje***

Při nárazovém vypnutí dojde k rychlé krystalizaci vsázky. Na obrázku *Obr. 3.2.1* je ztuhlá vsázka.



Obr. 3.2.1 Ztuhlá vsázka Al_2O_3 [15]

- ***Pomocí směrového tuhnutí***

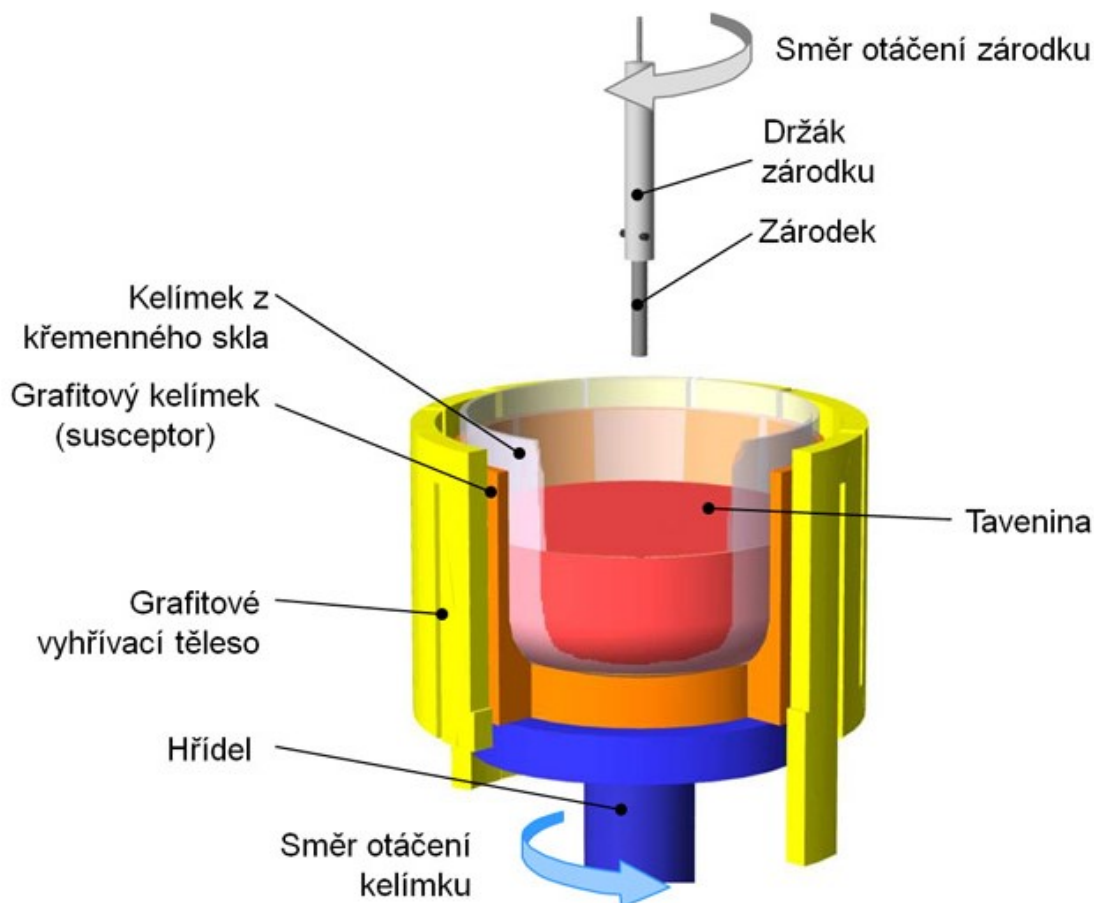
Směrové tuhnutí se využívá například při tavení Al_2O_3 . Jedná se o efektivní způsob, díky snadnému přenosu tepla do studeného prostředí. Nevýhodou této metody je malá velikosti zrn z důvodů rychlého ochlazení. Výhodou je velká čistota výtavku.

- ***Pomocí Czochralského metody***

Jedná se o zařízení nazvané „tažička“, slouží k výrobě monokrystalu přetavením polykrystalu s řízenou krystalizací právě pomocí této metody.

Střepey monokrystalu se nasypou do studeného kelímku, který je tvořen ze dvou částí. Vnitřní část kelímku, která je složena z křemenného skla, kde je uložen polykrystalicky křemík. Tento kelímek je vložen do vnější části kelímku, který je tvořen z grafitu a je zahříván a rovnoměrné rozvádí teplo do vnitřní části.

Polykrystal v křemenné části se pomalu vkládá do rozehrátého grafitového kelímku a dochází k postupnému tavení materiálu. Důležité je, aby vkládání bylo opravdu pomalé a polykrystal se odtavoval pomalu ode dna. Tak je zajištěno dokonalé roztavení. Po roztavení materiálu se do něj vloží držák se zárodkem krystalu. Zárodek je monokrystal se stejnou krystalovou strukturou, která je požadována od výsledného monokrystalu. Ponořený zárodek se také začne tavit a tím se vytvoří vazba s taveným materiálem. Zárodek se začne vytahovat z taveného materiálu podstatně větší rychlostí, než při vkládání zárodku. Vzniká tak úzký krček, který odstraňuje případné nedokonalosti krystalové mřížky (Dislokace), které mohly vzniknout při vkládání zárodku do taveného materiálu. Tato dislokace se šíří od středu osy k povrchu materiálu, kde zaniká. Obrázek *Obr. 3.2.2* naznačuje princip této metody.



Obr. 3.2.2 Czochralského metoda výroba monokrystalu [16]

3.3 Závislost polohy a tvaru startovací fáze na vložení do kelímku [7]

Dalším důležitým parametrem u startovací fáze je poloha startovacího materiálu a jeho tvar, jaký je vložen do vsázky. Induktor, který tvoří tělo kelímku, může ovlivnit proces startovací fáze. Startovací fáze se může vložit, například:

- ***Rovnoběžně s osou segmentů kelímku***

Jelikož startovací materiál může být uložen v blízkosti induktoru, vznikají větší Jouleovy ztráty. A blízkost segmentů, které jsou chlazeny, má za následek nižší výslednou teplotu startovací fáze.

- ***Kolmo k ose segmentu***

Startovací materiál je uložen dále od induktoru, než je v případě rovnoběžnosti s osou segmentu. To vede k nižším Jouleovým ztrátám a tím k nižší výsledné teplotě. Ale jelikož startovací fáze se nenachází v blízkosti chladících segmentů, má výsledná teplota startovací fáze vyšší hodnoty než v případě rovnoběžnosti s osou.

- ***Uprostřed vsázky***

V tomto případě je startovací materiál poměrně daleko od induktoru. Tím vznikají malé Jouleovy ztráty ve startovacím materiálu a tím je výsledná teplota menší.

Při posuzování o ideálním umístění startovací fáze je důležité brát v úvahu Jouleovy ztráty, které jsou rozhodující při ohřívání startovacího materiálu a následně vsázky. A hlavně je nutné řešit rozložení elektromagnetického pole a teplotní pole.

3.4 Model startovací fáze [21]

U startovací fáze dochází k ovlivňování polí v materiálu. Matematický model startovací fáze se sestává z rovnic pro nestacionární elektromagnetické pole a z rovnic pro teplotní pole.

3.4.1 Elektromagnetické pole [21]

Analýza elektromagnetického pole je založena na řešení parciálních rovnic pro vektorový potenciál, ten je definován rovnicí:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad 3.3$$

Pro odvození vektorového potenciálu A je využito prvních dvou Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad 3.4$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad 3.5$$

Z těchto rovnic lze vyjádřit intenzitu elektrického pole a proudovou hustotu

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad}\varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{E}_v + \mathbf{E}_i \quad 3.6$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_v - \gamma * \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_i \quad 3.7$$

Proudová hustota vnuceného proudu $\mathbf{J}_v = \gamma \mathbf{E}_v$, odpovídá proudu induktorem připojeného ke zdroji. $\mathbf{J}_i = \gamma \mathbf{E}_i$ je proudová hustota posuvného proudu. Při uváze jen kvazistacionární pole, lze zanedbat Maxwellův posuvný proud z rovnice 3.4. K vyšším kmitočtům napájecího zdroje a k vlastnostem použitého materiálu, je nutné kontrolovat, zda je splněna podmínka kvazistacionarity, pro kterou platí:

$$J_{ef} \gg \varepsilon \omega E \rightarrow \gamma \gg \varepsilon \omega \quad 3.8$$

Při splnění podmínky kvazistacionarity a využití rovnic (3.4-3.6):

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \gamma \mathbf{E}_v - \gamma * \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad 3.9$$

Pro zjednodušení, lze uvažovat lineární prostředí $\mu = \text{konstantní}$, pak výsledná parciální derivace pro vektorový potenciál:

$$\Delta \mathbf{A} = \mu \gamma * \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mu \mathbf{J}_v \quad 3.10$$

Pro získání řešení rovnice, je nutné formulovat okrajové, počáteční podmínky a podmínky na rozhraní, pro správné rozložení elektromagnetického pole. Avšak programy založené na metodě konečných prvků podmínky na rozhraní nevyžadují, protože vzhledem k metodě jsou automaticky splněny.

Podmínky na rozhraní Γ_R lze formulovat takto:

- ***Spojitosť vektorového potenciálu***

$$\mathbf{A}_1(\Gamma_R) = \mathbf{A}_2(\Gamma_R) \quad 3.11$$

- ***Rovnice pro normálové derivace***

$$\frac{1}{\mu_1} * \frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial \mathbf{n}} - \frac{1}{\mu_2} * \frac{\partial \mathbf{A}_2}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{K}_n \quad 3.12$$

\mathbf{K}_n značí lineární hustotu proudu.

Z vlastností vektorového potenciálu a vektoru \mathbf{B} vyplývá, že magnetické indukční čáry jsou ekvipotenciálou vektoru \mathbf{A} . Pokud je hranice totožná se siločarou, bude pro vektorový potenciál platit podmínka Dirichletova. Pokud hranice prochází rovinou symetrie nebo povrchem dokonale permeabilního materiálu, kde tečné složka \mathbf{B} je nulová, platí nulová Neumannova podmínka.

- ***Dirichletova podmínka***

$$\mathbf{A}(\Gamma_\Omega, t) = f_{01}(\Gamma_\Omega, t) \quad 3.13$$

Kde \mathbf{A} je hledaná hodnota vektorového potenciálu, $\mathbf{A}_{\Gamma_\Omega}$ je požadovaná hodnota vektorového potenciálu na hranici Γ_Ω .

- ***Neumannova podmínka***

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}}(\Gamma_\Omega, t) = f_{01}(\Gamma_\Omega, t) \quad 3.14$$

Kde f_{01} představuje požadovanou hodnotu derivace \mathbf{A} dle vnější normály.

3.4.2 Teplotní pole [21]

Fourier – Kirchhoffova rovnice

$$C_p * \rho * \frac{\partial T}{\partial t} = -div(-\lambda * gradT) + w_j \quad 3.15$$

Jedná se o speciální případ energetické rovnice. Platí v případě, za předpokladu pevného skupenství látek, konstantní tlaku, konstantní měrné tepelné kapacity, nulovou viskozitu a nulovou rychlost ohřívání. W_j představují Jouleovy ztráty.

- **Podmínky na rozhraní**

Na rozhraní dvou materiálů je teplota $T_1 = T_2$ a rozdíl toků energie k rozhraní a od rozhraní je roven plošné hustotě energie vznikající na rozhraní za čas.

$$\lambda_1 * \frac{\partial T_1}{\partial n} - \lambda_2 * \frac{\partial T_2}{\partial n} = q \quad 3.16$$

Kde n představuje normálový vektor se směrem do druhého prostředí, q vyjadřuje plošnou hustotu výkonu.

Pokud na rozhraní nevzniká žádná tepelná energie $q=0$, tak platí na rozhraní

$$\lambda_1 * \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 * \frac{\partial T_2}{\partial n} \quad 3.17$$

- **Okrajové podmínky**

Může se využívat Dirichletovy podmínky, kde známe teplotu na hranici Γ_R . Neumannovu podmínku, kde známe velikost toku tepelné energie přes hranici Γ , využívána především na osách symetrie při nulovém tepelném toku energie přes hranici. Newtonovu podmínku nebo podmínku IV. Druhu.

V případě indukčních ohřevů dochází zpravidla k ohřevům z nízké teploty, na teplotu vysokou. Proto je zapotřebí řešit smíšenou podmínku na rozhraní

$$\lambda * \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha * (T_{gass} - T) + \varepsilon * C * (T_{ext}^4 - T^4) \quad 3.18$$

4 Start tavicího procesu [18] [5]

Jak již bylo zmíněno, převážně se startovací fáze využívá k tavení oxidů ve studeném kelímku. Ale oxidy jsou ze základu nevodivé, tak je potřeba tavení nastartovat. Oxidy se do kelímku vkládají ve formě prášku. Prášek se co nejvíce utemuje, aby byly vzdálenosti mezi částicemi oxidu co nejmenší. Startovací materiál se vkládá do studeného kelímku tak, aby ho překrývala tenká vrstva oxidu. Důvodem tohoto uložení je dobrý přenos tepelné energie do vsázky a také z důvodů nízkých ztrát. Využívají se oxidy hliníku Al_2O_3 nebo již zmíněný oxid zirkonu ZrO_2 . Na obrázku *Obr. 4.1* je ukázka oxidu hliníku, pro který je využíván startovací materiál jako čistý hliník.



4.1 Oxid hlinitý v prášku [19]

K nastartování tavy je zapotřebí malé množství materiálu, obvykle postačí 0,01% hmotnosti výchozí vsázky. K postupnému tavení dochází při dostatečném množství startovacího materiálu. Tento objem se nazývá kritický objem. V případě menšího množství by nemusel stačit pro rozehrání celé vsázky. Právě od startovacího materiálu se šíří ohřev naindukovanými proudy do celé vsázky. Během tavení dochází k oxidaci za přítomnosti kyslíku a se zvyšující teplotou dochází k vzplanutí startovacího materiálu. Tento proces je popisován, jako zahoření startovacího materiálu. Teplota tavení startovacího materiálu nesmí být nižší než bod tavení vsázky. Jinak by mohlo dojít k odpaření startovacího materiálu dříve než by se spustil proces tavení pomocí elektromagnetické indukce.

Po přivedení výkonu na induktor začne vzniklé elektromagnetické pole indukovat proudy do startovacího materiálu a pomocí tepelné výměny ohřívá vsázku. V tuto chvíli je potřebná energie předána vsázce, která začíná být elektricky vodivá a může dojít k tavně oxidu. Pokud je přítomno dostatečné množství kyslíku při oxidaci (zahoření startovacího materiálu), nedochází ke kontaminaci vsázky. Jedná se o velkou výhodu tohoto procesu.

Avšak při tavení materiálu dochází ke snížení hladiny vsázky, přibližně na 25% původního objemu a je zapotřebí dosypávat oxid, aby bylo dosaženo cílového množství, s ohledem na správné působení induktoru. Dosypávání doprovází problém, kde na povrchu vsázky je vytvořena tenká pevná vrstva, díky tepelným ztrátám.

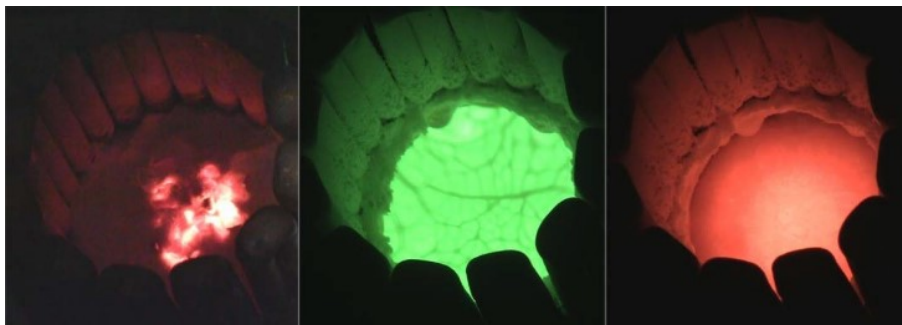
4.1 Formovací fáze [20]

Jedná se o fázi, kdy se materiál stává elektricky vodivým. Část taveného oxidu se podílí na vedení tepla do celé vsázky. Je důležité, aby byl snížen výkon generátoru v okamžiku, kdy se materiál stává vodivým. Tato fáze končí v momentě, kdy je celá vsázka roztavena. Do této doby se jedná o nestabilní stav.

Dochází k šíření tepla ve vsázce pomocí stejného elektromagnetického pole, jako při startovací fázi. Mění se pouze elektrická vodivost vsázky.

4.2 Stabilní fáze

Jedná se o udržení tavení ve stabilním chodu. Udržuje se stálý výkon a stálý kmitočet při stabilní teplotě, přibližně při 2500°C. Jak je zmíněno výše, materiál je nutno dosypávat, abychom dosáhli požadovaného množství objemu vsázky. Na obrázku *Obr. 4.2.1* jsou jednotlivé fáze. Vlevo startovací fáze, uprostřed stabilní fáze a vpravo chladnutí vsázky.



Obr. 4.2.1 fáze tavení [20]

5 Vytvoření „strusky“ [11]

Tavení materiálu probíhá většinou v otevřeném kelímku. Vlivem chlazení dojde mezi taveninou a segmenty, na povrchu, k vytvoření ztuhlé vrstvy, dále už jen „strusky“. Kelímek je důležité chladit a také je důležité regulovat přenášený výkon do vsázky. Díky skinefektu jsou vířivé proudy vytlačovány k povrchu taveného materiálu, k strusce. Tím dochází ke zvýšení vodivosti a následně i k zvýšení teploty v dané oblasti. Vlivem víření taveného materiálu dochází k homogenizaci. Další důležitou věcí je výkonově kompenzovat ztráty do okolí, především, jak už bylo zmíněno, vedením a sáláním, jinak by tavený materiál mohl ztuhnout v nesprávný okamžik.

Výkon, který je přenášen z induktoru do taveného materiálu lze spočítat pomocí vztahu:

$$P_2 = \frac{dQ_2}{dt} + P_L \quad 5.1$$

Kde P_2 je výkon přenášený do vsázky a kde P_L spočítat jako:

$$P_L = P_\omega + P_b + P_{rad} \quad 5.2$$

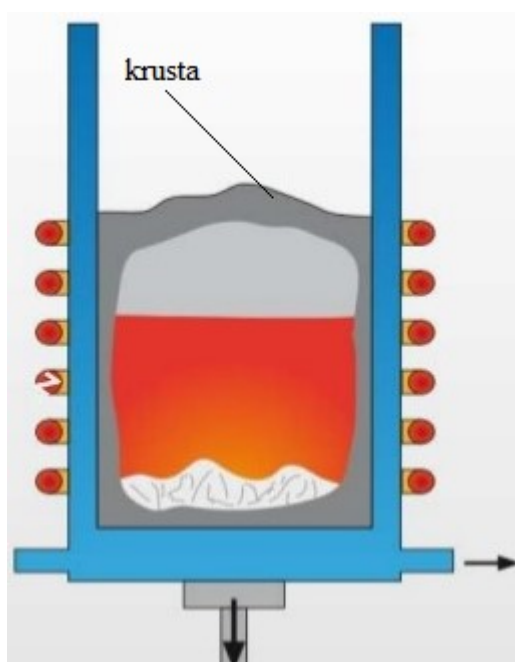
Ztráty vzniklé do dna kelímku mohou být zanedbány, vlivem izolace. Ztráty způsobené tepelným vedením do stěny kelímku lze spočítat jako:

$$P_\omega = \pi * d_2 * h_2 * q_\omega \quad 5.3$$

Ztráty sáláním na povrchu taveného materiálu lze spočítat:

$$P_{rad} = \frac{\pi}{4} * d_2^2 * \varepsilon_0 * a * (T_2^4 + T_0^4) \quad 5.4$$

Problém s krustou mezi taveným materiálem a okolím je, že zamezuje dalšímu přidání materiálu do taveniny. Strusky se lze zbavit několika způsoby. Nejčastějším používaným způsobem je rozbití strusky pomocí keramických tyčí. Na obrázku *Obr. 5.1* je znázorněná struska.



Obr. 5.1 Krusta na povrchu taveniny [9]

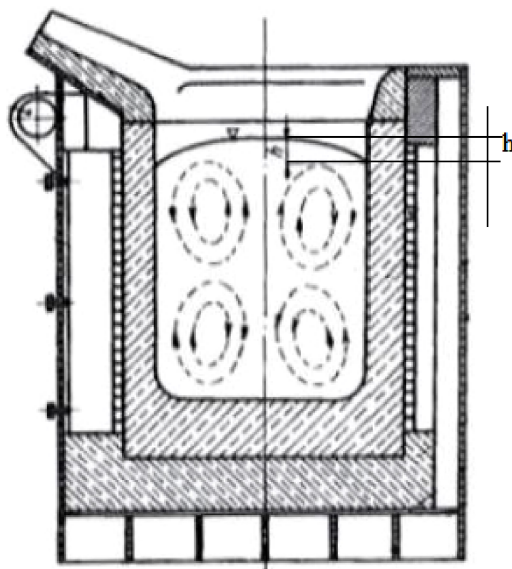
Pokud nedojde k odstranění, zabrání se tak k odpařování nežádoucích látek a vsázka zůstane kontaminována nebo nelze přisypat oxid, aniž by se spojil s původní taveninou. Pokud je využit způsob tavení materiálu bez speciální ochranné atmosféry, vzniká velké množství nežádoucích příměsí, jako například síra, dusík, chór a další. Dále se musí kontrolovat rychlost odpařování, která je závislá na teplotě a tlaku vypařujících se par. Pokud se páry budou odpařovat velmi rychle, může dojít až k zastavení ohřevu taveniny.

5.1 Vzduť vsázky [18]

Po nastartování vsázky a jejího roztavení, působí ve vsázce víření, které je důležité k promísení taveniny z hlediska homogenity a teploty. Víření taveniny způsobí magnetohydrodynamické jevy, které mají za následek v okolí osy vsázky vnik vyvýšené hladiny, tzv. vzduť. A tím je zajištěno trvalé rozlévání taveniny po průřezu kelímku. Podobná situace se děje i u dna studeného kelímku. Je možné tedy říct, že v ose vsázky působí přetlak a u stěn kelímku podtlak. Vzduť h je možné spočítat ze vztahu:

$$h = K * \frac{P_1}{\rho_h} * \sqrt{\frac{\gamma * \mu_r}{f}} \quad 5.5$$

Výsledná hodnota h je v metrech. K značí konstantu, P_1 je příkon vztažen na jednotku plochy vsázky, ρ_h značí hustotu vsázky, μ_r je relativní permeabilita, γ značí konduktivitu a f je pro kmitočet zdroje. Na obrázku *Obr. 5.1* je znázorněno vzduť vsázky.



Obr. 5.1 Vzduť vsázky [22]

6 Tavení oxidů [18]

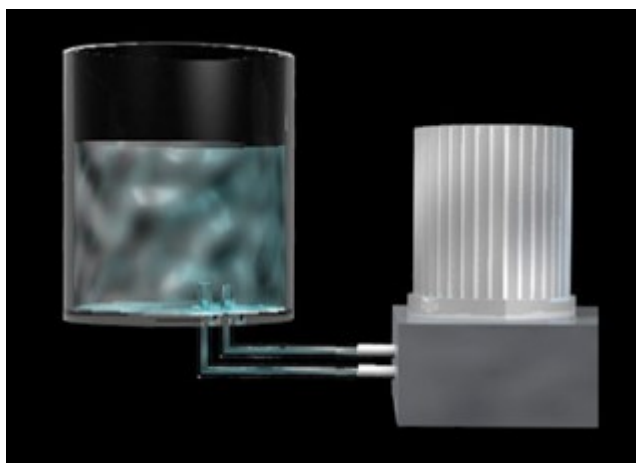
Pro tavení oxidu se využívá vysokofrekvenčního tranzistorového generátoru, kapacitní baterie s vysokofrekvenčním transformátorem, komora se separovaným induktorem a studený kelímek s vodním chlazením.

Generátor disponuje výkonem až 300kW a rozsahem kmitočtu do 350kHz. Napětí na induktoru může být zvýšeno pomocí sériového spojení kapacitní baterie a vysokofrekvenčního transformátoru před induktorem.

6.1 Tavení ZrO_2 [12] [17]

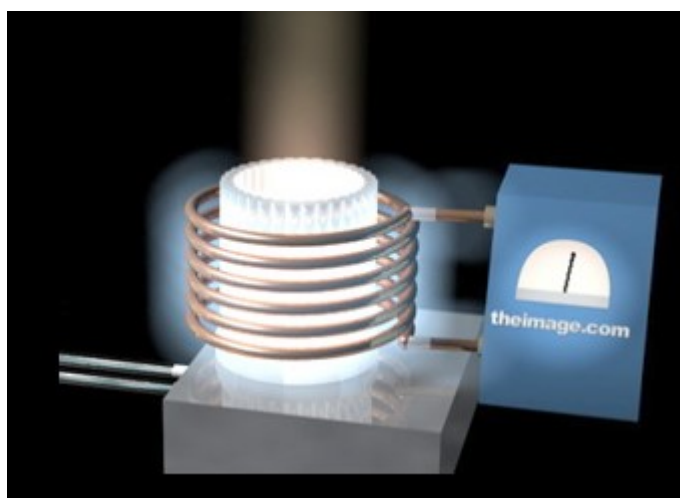
Oxid zirkoničitý ZrO_2 se často využívá pro výrobu umělých diamantů, tzv. zirkonů. Bod tání zirkonu je přibližně $2750^\circ C$. Aby se dal oxid tavit, je potřeba ho nejdříve stabilizovat. Do studeného kelímku se nejprve vloží malé procento oxidu vápenatého nebo oxid yttria.

Pro tavení se využívá studený kelímek se separovaným induktorem. Kelímek je tvořen z měděných trubek, kterými protéká chladicí kapalina. Na obrázku *Obr. 6.1.1* je chladicí nádrž a studený kelímek, ve kterém bude oxid zirkoničitý taven.



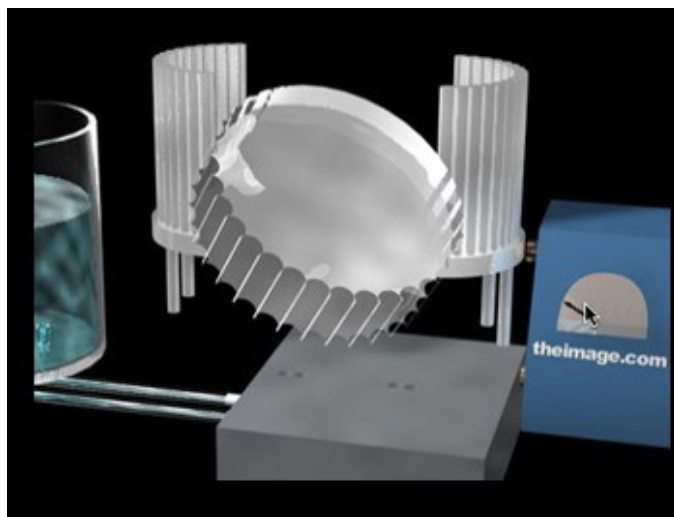
Obr. 6.1.1 Studený kelímek [17]

Induktor je umístěn kolem kelímku a je napájen zdrojem střídavého proudu. Tavení materiálu nastává přibližně při kmitočtu 4MHz a při výkonu kolem 100kW. Ale oxid ZrO_2 je jeden z materiálů s malou elektrickou vodivostí a je potřeba ho nastartovat. Na tento proces, lze využít více metod, ale nejčastěji používanou metodou je přidání malého množství kousků kovového zirkonu. Kousky zirkonu se roztaví a smísí se s oxidem zirkoničitým. Vsázka se stane tedy elektricky vodivá a může dojít k ohřevu pomocí elektromagnetické indukce. Na obrázku *Obr. 6.1.2* je induktor připojený ke zdroji o požadovaných parametrech a probíhá tavení materiálu.



Obr 6.1.2 Tavení zirkonu [17]

Po dokončení tavy dojde k pomalému ochlazení a ke krystalizaci. Krystalizace má smršťovací účinek, a díky tomu je roztavený materiál složen z mnoha dílčích krystalů. Na obrázku *Obr. 6.1.3* je dokončená tava zirkonu a ukázka krystalu.



Obr. 6.1.3 Krystal zirkonu po dokončení tavby ve studeném kelímku [17]

Využívá se ve šperkařském průmyslu, jako umělý diamant. Důvodem jsou podobné vlastnosti jako u diamantu, vysoký index lomu světla. Ve slévárenském a sklářském průmyslu se zirkon využívá jako tavicí nádoby nebo tavicí pece, jako zirkonoxidové keramiky. Tyto keramiky jsou velice kvalitní. Nevýhodou těchto keramik je výrazně vyšší cena oproti směsím Al_2O_3 . Zirkonoxidové keramiky se využívají například jako vysoce odolný materiál ke zhotovení korunek a můstků zubních náhrad.

Po přidání různých oxidů kovů do zirkonu, můžeme vytvořit zirkon jiné barvy, jak můžeme vidět na obrázku Obr. 6.1.4. Přidávané oxidy mohou být například CuO , NiO , TiO a řada dalších.



Obr. 6.1.4 různé barvy zirkonu [12]

6.2 Tavení skel [12]

Tavení skla lze provádět i v kelímku, ve kterém není nutné, aby sklo před indukčním tavením mělo větší elektrickou vodivost, díky větší teplotě. Teplota u takových pecí vstupovalo z rozehrátého kelímku dovnitř vsázky, kterou tvořilo sklo. Je zde obtížné dosáhnout vyšších teplot a výsledná skelná tavenina obsahuje nežádoucí příměsi v důsledku kontaminace. Díky tomu je indukční tavení skel ve studeném kelímku mnohem efektivnější. Využívá se kelímku, který je konstrukčně tvořen z hliníku. Skull vrstva pak obsahuje stejné chemické složení jako tavený materiál. Al_2O_3 , oxid hlinitý, je součástí příměsí skel a tudíž není žádné riziko ke kontaminaci vsázky od studeného kelímku. Významnou vlastností skel je jejich vysoká viskozita, která zamezuje důležitému faktoru při tavení ve studeném kelímku a to míšení vsázky. Není-li zajištěné dokonalé promíšení vsázky a tím není úplná homogenní struktura výsledné taveniny. Výsledná skla se využívají v optické technice, u hodinek. Míšení taveného materiálu je zajištěno pomocí vodou chlazeného míchadla.

7 Závěr

Účelem diplomové práce bylo zkoumat vlastnosti startovací fáze ve studeném kelímku u elektricky nevodivých materiálů. Při zpracování práce jsem čerpal povětšinou z dostupných diplomových, bakalářských a disertačních prací. Na základě informací z těchto zdrojů jsem vypracoval rešerši na téma startovací fáze.

V první části je popsán základní princip indukčního ohřevu. Je zde popsán princip některých indukčních pecí. Nejvíce textu je věnováno studenému kelímku, který je pro diplomovou práci důležitý.

Druhá část se zabývá startovací fází. Jsou zde popsány principy, jakým způsobem lze přidávat startovací fázi do oxidu kovů. Model startovací fáze popsán pomocí elektromagnetického pole a pomocí teplotního pole. Start a průběh tavicího procesu pomocí startovací fáze. Tuhnutí vsázky a některé problémy vznikající při tavení.

Tavení ve studeném kelímku má řadu výhod. Výsledné výtavky jsou pevné materiály, které jsou velice čisté. Lze tavit elektricky nevodivé materiály, právě za pomoci startovací fáze. Tavení probíhá při 3000°C.

V praxi jsou možnosti jak přidat startovací materiál do elektricky nevodivé vsázky. Nejčastějším způsobem je přidání čistého kovu, například pro Al_2O_3 . Čistý kov hliníku má teplotu tavení přibližně kolem 650°C, avšak oxid hliníku až při 2250°C. Zde je potřeba řešit následný problém, je důležité určit správné množství startovací fáze, aby nedošlo k tomu, že se vypaří dříve, než předá teplo oxidu hliníku. Při správném zvolení hmotnosti startovacího materiálu, vsázka začne být elektricky vodivá a může dojít k tavení materiálu. Víření materiálu zajišťuje homogenitu a míšení materiálu. Tavený materiál se zredukuje přibližně na 25% původní hodnoty. Proto je potřeba dosypávat vsázku, abychom dosáhli požadovaného objemu. Zde vzniká další problém. Na povrchu taveniny se vytvoří struska, ta se rozbije pomocí keramických tyčí, avšak lze i zvýšit výkon zdroje. Zvýšení výkonu zdroje je nebezpečné. Tavený materiál se pod struskou začne přehřívat a vytváří nežádoucí páry, které se nemají kudy vypařit. V krajních případech může vsázka „explodovat“. Po zničení strusky, potřebujeme dosypat materiál. Ten se dosypává nejčastěji z velké blízkosti tavené vsázky. Z taveniny se vypařují páry, které by rozfoukaly prášek oxidu, který dosypáváme.

Při dosažení všech našich požadavků na materiál ohledně objemu a dalších vlastností dochází ke krystalizaci vsázky.

Studený kelímek má v praxi velké využití. Uplatňuje se pro výrobu speciálních slitin, skel, keramik, výrobu syntetických diamantů nebo pro vitifikaci radioaktivního odpadu.

8 Seznam literatury

- [1] Roboterm spol. S.R.O., Chotěboř.[online]. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.roboterm.cz/home/co-je-indukcni-ohrev>
- [2] Hradílek Zdeněk, Lázničková Ilona, Král Vladimír. *Elektrotepelná technika*. Praha, 2011. České vysoké učení technické.[online]. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-3-elektrotepeln.pdf>
- [3] Koubek Ondřej. *Návrh studeného kelímku*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24936/F3-DP-2014-Koubek-Ondrej-prace.pdf?sequence=3>
- [4] Elektro, časopis pro elektrotechniku. Obsah čísla 12/2002 .[online]. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655>
- [5] Souček Petr. *Optimalizace tvaru segmentů u studeného kelímku pro tavení oxidů kovů*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/22988/1/Optimalizace_tvaru_segmentu_u_studeneho_kelimku_pro_taveni_oxidu_kovu_PETR_SOUCEK.pdf
- [6] Kučera Petr. *Rozptylová magnetická pole při ohřevech elektromagnetickou indukcí*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18723/1/BP%20Kucera%20Petr.pdf>
- [7] Ing. Jiřinec Stanislav. *Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Školitel práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.
- [8] Volf Vladimír. *Přenos energie v systému induktor – vsázka při tavení materiálů ve studeném kelímku*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 3. 5. 2019]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18831/1/DP_Vladimir_Volf.pdf
- [9] Grégr Jan. *Chemické základy moderních materiálů*. Technická univerzita v Liberci, 2015. [online]. [cit. 4. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/martin.slavik/chemick-zklady-modernch-materil> (str. 60)

- [10] Topinka Jiří. *Přenos energie v systému induktor – vsázka při tavení materiálů ve studeném kelímku*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. ZČU. [online]. [cit. 5. 5. 2019]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/27962/1/Topinka_Jiri_DP_Prenos%20energie%20v%20systemu%20induktor%20-%20vsazka%20pri%20taveni%20materialu%20ve%20studenem%20kelimku.pdf
- [11] Plachý Jan. *Možnosti použití studeného kelímku při tavení oxidů kovů*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Ing. David Rot, Ph.D.
- [12] Juřáš Petr. *Analýza systémů tavení materiálů elektromagnetickou indukcí*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 10. 5. 2019]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18720/1/Petr_Juras_BP_2015.pdf
- [13] Heindl Michal. *Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve „studeném kelímku“*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 10. 5. 2019]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/7473/1/DP%20-%20Michal%20Heindl.pdf>
- [14] Elektro, časopis pro elektrotechniku. Obsah čísla 11/2003.[online]. [cit. 15. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/moderni-prumyslove-technologie-zalozene-na-procesech-v-tekutych-kovech-rizenych-elektromagnetickym-polem--14316>
- [15] Kopa Martin. *Analýza výsledků tavení oxidů ve studeném kelímku*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 15. 5. 2019]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31545/1/Kopa%20Martin%20-%20Diplomova%20prace%20%282018%29.pdf>
- [16] Šulc Tomáš. *Od písku k procesoru – výroba křemíkového waferu*. 2012.[online]. [cit. 16. 5. 2019]. Dostupné z: <https://pctuning.tyden.cz/hardware/procesory-pameti/24350-od-pisku-k-procesoru-vyroba-kremikoveho-waferu?start=4>
- [17] Hudeček Jan. *Depozice tenkých vrstev pomocí iontového naprašování IBS/IBAD*. Brno, 2015. Bakalářské práce. VUT. [online]. [cit. 20. 5. 2019]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104634

- [18] Singer Michal. *Skull – melting jako metoda tavení materiálů*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. ZČU.[online]. [cit. 20. 5. 2019]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/2778/1/BP_Singer_2012.pdf
- [19] Oxid hlinitý. Poslední aktualizace 25. 9. 2018.[online]. [cit. 20. 5. 2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_hlinit%C3%BD#/media/File:Oxid_hlinit%C3%BD.JPG
- [20] Duda Jan. *Tavení oxidů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 20. 5. 2019]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31558/1/DP_Jan%20Duda-2018_FINAL.pdf
- [21] Ing. Jiřinec Stanislav. *Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Školitel práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.
- [22] Vávrovský Jaroslav. *Elektrodynamické síly při ohřevech elektromagnetickou indukcí*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZČU.[online]. [cit. 26. 5. 2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/113014430-Elektrodynamicke-sily-pri-ohreveh-elektromagnetickou-indukci-jaroslav-vavrovsky-2015-zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka.html>