

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra výkonné elektrotechniky a strojů

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

„Studený kelímek“ jako aktuální metoda tavení materiálů  
elektromagnetickou indukcí

Autor práce: **Jaroslav Němec**  
Vedoucí práce: **Prof. Ing. Kožený, CSc.**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2021/2022

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jaroslav NĚMEC**  
Osobní číslo: **E18B0052K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **„Studený kelímek“ jako aktuální metoda tavení materiálů elektromagnetickou indukcí**  
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

#### Zásady pro vypracování


1. Popište tavicí zařízení „studený kelímek“.
2. Uveďte fyzikální princip tavení ve studeném kelímku.
3. Uveďte podmínky pro efektivní tavení elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů.
4. Uveďte a objasněte účinnosti tavení uvedených materiálů.
5. Uveďte příklady elektrických a geometrických parametrů některých tavicích zařízení.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Behrens, T.: Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie, Cuvillier Verlag Goettingen 2007.
2. Andree, W.: High Powered Induction Crucible Furnaces, MEP 2008, Hannover 2008.
3. Umbrashko, A. a kol.: Melt Flow and Skull Formation, MEP 2008, Hannover 2008.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky  
Oponent bakalářské práce: **Ing. Stanislav Jiřinec, Ph.D.**  
Centrum energetického výzkumu  
Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**

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

  
  
**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na aktuální metodu tavení materiálů elektromagnetickou indukcí ve „Studeném kelímku“. Popis základních schémat studeného kelímku a odlišností jednotlivých druhů tavicího zařízení. V práci jsou popsány základní fyzikální principy pro pochopení elektromagnetické indukce a tavení jejím působením. Efektivní způsoby tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů, jejich účinnost a elektrické i geometrické parametry.

## **Klíčová slova**

Studený kelímek, tavení, elektromagnetická indukce, účinnost tavení, tavicí zařízení, elektricky vodivé materiály, elektricky nevodivé materiály, Maxwellovy rovnice, elektromagnetické, geometrické parametry zařízení.

## **Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the current method of melting materials by electromagnetic induction "Cold crucible". Description of basic schemes of a cold crucible and differences of individual types of melting equipment. The thesis describes the basic physical principles for understood magnetic induction and melting with its help. Effective methods of melting electrically conductive and non-conductive materials, their efficiency and electrical and geometric parameters.

## **Key Words**

Cold crucible, melting, electromagnetic induction, melting efficiency, melting equipment, electrically conductive materials, electrically non-conductive, materials, Maxwell's equations, electromagnetic parameters, geometric parameters.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu Bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesní rady, připomínky a metodické vedení práce. Též bych chtěl poděkovat katedře výkonné elektrotechniky a strojů za podporu a pomoc v různých oblastech této práce.

## Obsah

0	Úvod .....	- 1 -
1	Popis tavicího zařízení „studený kelímek“ .....	2
1.1	Popis jednotlivých druhů kelímkových pecí.....	3
1.2	Vznik tepla v indukčních zařízeních, Induktor .....	6
1.3	Stínění indukčních kelímkových pecí .....	7
1.4	Elektrické napájení indukčních pecí .....	8
1.5	Metoda ISM (ISMT) – „studený kelímek“ .....	10
2	Fyzikální principy studeného kelímku .....	12
2.1	Maxwellovy rovnice v integrálním a diferenciálním tvaru .....	12
2.2	Poyntingův zářivý vektor.....	14
2.3	Válcové elektromagnetické vlnění .....	15
2.4	Relativní hloubka vniku elektromagnetického záření do elektricky vodivého prostředí vsázky .....	16
2.5	Teplotní pole ve vsázce .....	17
3	Obecné podmínky efektivního tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů.19	
3.1	Čistota taveného materiálu .....	19
3.2	Kusovost taveného materiálu.....	20
3.3	Cizí materiál ve vsázce.....	20
3.4	Metodika vkládání vsázky do pece .....	22
4	Podmínky pro efektivní tavení různých elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku .....	23
4.1	Podmínky efektivního tavení vodivých materiálů, např. titanu a jeho slitin .....	23
4.2	Podmínky efektivního tavení elektricky nevodivých materiálů např. oxidů kovů, skel .....	27
5	Elektrické a geometrické parametry některých tepelných zařízení.....	32
5.1	Elektrické náhradní schéma indukčního zařízení.....	32
6	Závěr.....	35
7	Použitá literatura: .....	36

## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
B	Magnetická indukce	T
D	Elektrická indukce	$C.m^{-2}$
E	Intenzita elektrického pole	$V.m^{-1}$
H	Intenzita magnetického pole	$A.m^{-1}$
I	Proud	A
J	Hustota elektrického proudu	$A.m^{-2}$
N	Poyntingův zářivý vektor	$W.m^{-2}$
Q	Elektrický náboj	C
R	Odpor	$\Omega$
T	Teplota	K
U	Napětí zdroje	V
V	objem	$m^3$
a	Hloubka vniku elektromagnetického vlnění	m
d	Průměr	m
e	Eulerovo číslo	-
f	Frekvence	Hz
k	Konstanta šíření vlnění	-
m	Hmotnost	kg
q	Měrné tepelné ztráty	$W.cm^{-2}$
r	Poloměr	m
t	Čas	s
v	rychlost	$m.s^{-1}$
$\omega$	Úhlová rychlost	$rad.s^{-1}$
$\rho$	rezistivita	$\Omega.m$
$\Phi$	Magnetický indukční tok	Wb
$\sigma$	konduktivita	$S.m^{-1}$
$\mu$	permeabilita	$H.m^{-1}$
$\epsilon_0$	Permitivita	$F.m^{-1}$
$\epsilon_r$	Relativní permitivita	-
$\lambda$	Tepelná vodivost	W/m.K



$\mu_0$	Permeabilita Vakuu	H/m
$\mu_r$	Relativní permeabilita	-
$\alpha$	Poměr hloubky vniku a průměru vsázky	-

## 0 Úvod

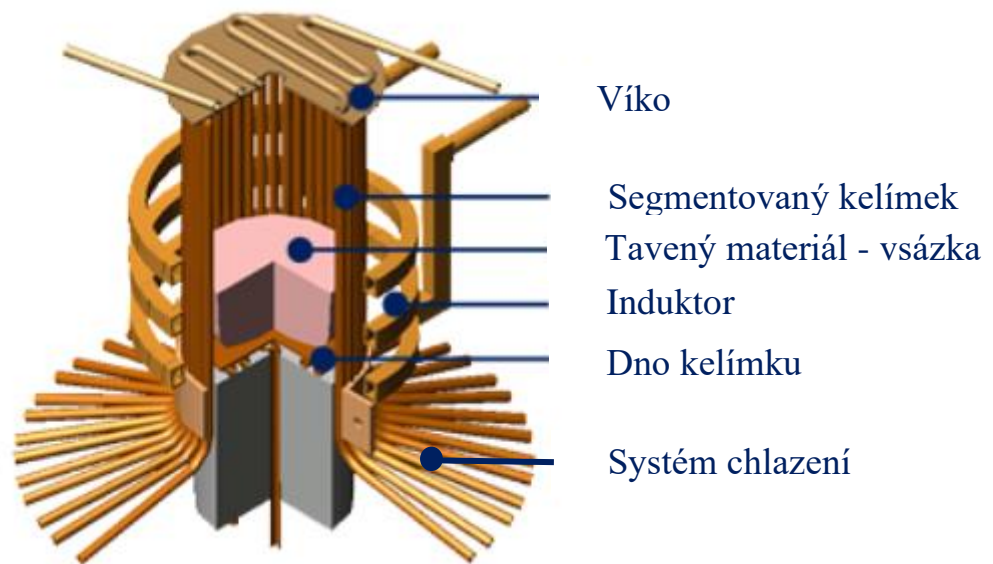
Tato bakalářská práce si klade za cíl v prvních dvou kapitolách popsat metodu tavení materiálů elektromagnetickou indukcí v různých kelímkových pecích, popsání jejich nejdůležitějších částí a fyzikálních principů důležitých pro tavení. V následujících kapitolách se práce zabývá možnostmi efektivního tavení jednotlivých druhů materiálů, a to jak elektricky vodivých, mezi které řadíme titan, niob, molybden, kobalt nikl, tak i elektricky nevodivých materiálů, jako jsou například oxidy různých kovů,  $Al_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$ , CaO, MgO. V posledních kapitolách se tato práce zaměřuje na příklady elektrických a geometrických parametrů tavicího zařízení.

Za vznikem této metody zpracování materiálů stojí mnoho objevů a objevitelů, kteří postupně, každý svým dílem, přispěli ke vzniku této metody. V 19 století anglický fyzik a chemik Michael Faraday přinesl pro elektrotechnické obory dva zásadní objevy. První již roku 1821, kdy definoval elektromagnetickou rotaci, která se stala základním principem elektromotoru. O deset let později, roku 1831 učinil druhý zásadní objev pro elektrotechnické obory a ten je i stěžejní pro tuto práci. Tím objevem byla elektromagnetická indukce. Během svého pokusu, ovinul železný prsten dvěma cívkami. Jednu připojil ke zdroji proudu a na druhé cívkce se objevil proudový náraz. [8]

V posledních letech stoupá na významu zpracování kovů elektromagnetickou indukcí. Jedním z důvodů je snaha o co největší čistotu zpracovávaných kovů a jejich slitin, kterou tato metoda umožňuje. Další zásadním důvodem je rychlost tavení a vysoká účinnost této metody a tím šetření energetických zdrojů, nákladů na výrobu a ekologii.

## 1 Popis tavicího zařízení „studený kelímek“

Tavicí zařízení „studený kelímek“ patří mezi vysokofrekvenční indukční zařízení. Touto metodou lze tavit různé elektricky vodivé i nevodivé materiály, jako je titan, kobalt, nikl, různé druhy oxidů, skla a krystaly. Tyto materiály jsou vkládány do segmentů kelímku ve tvarech od drtě až po trubky a pláty. Proud v závitech induktoru vytváří elektromagnetické pole, které naindukovanými vířivými proudy do vsázky vsázku ohřívá. Název studený kelímek je odvozen z faktu, že všechny součásti studeného kelímku dosahují maximálně teploty 50 °C i když vsázka může mít průměrnou teplot až 3000 °C. [6]



Obr 1.1 Základní schéma studeného kelímku. [16]

Indukční ohřev má několik výhod oproti konvenčnímu ohřevu:

- Velmi rychlý ohřev díky vzniku tepla přímo ve vsázce.
- Změnou kmitočtu lze jednoduše měnit rozložení teplotního pole ve vsázce.
- Bezvyzdívková konstrukce, materiál se nedotýká přímo stěn kelímku. Nedochozí k působení materiálu kelímku na vsázku za vysokých teplot.
- Na rozhraní kelímku mezi vnitřní stěnou intenzivně chlazeného kelímku a taveného materiálu vzniká tenká vrstva tuhého materiálu z roztavené vsázky, tzv „skull“.
- Vsázka se tak taví „sama v sobě“ [6]

## 1.1 Popis jednotlivých druhů kelímkových pecí

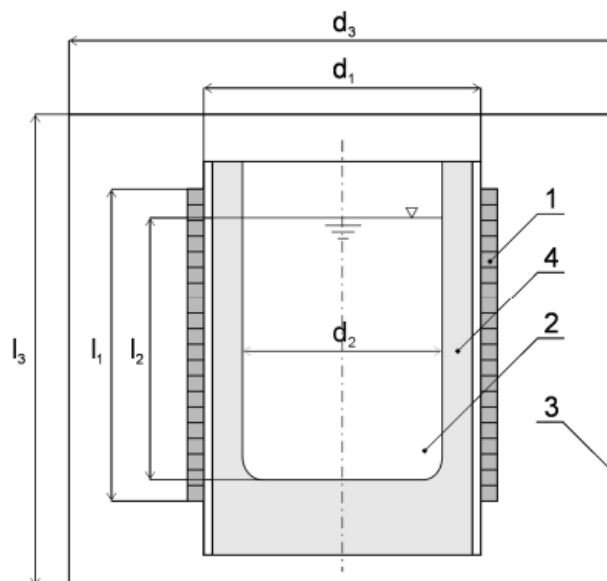
Indukční kelímkové pece lze rozdělit do čtyř základních typů: indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem, indukční kelímkové pece s vodivým stínícím pláštěm, indukční kelímkové pece se svazky transformátorových plechů jako stínění a indukční kelímková pec s vodivým kelímkem.

### a. Indukční kelímkové pece s nevodivým kelímkem

Vnitřní prostor induktoru cívky kelímku je vyplněný keramickou hmotou. Tento druh pece může mít stínící měděný plášť, nebo stínění ze svazků transformátorových plechů umístěných na vnějším povrchu induktoru. [7]

### b. Indukční kelímkové pece s vodivým stínícím pláštěm

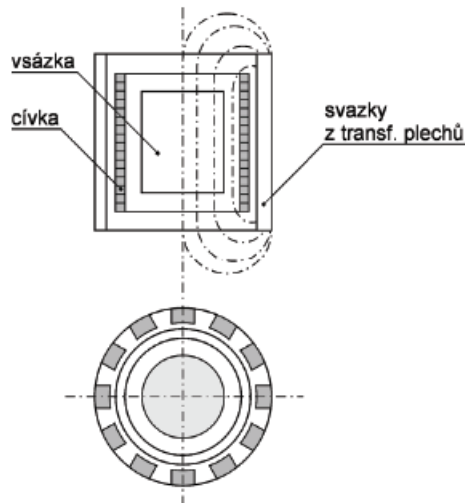
Kelímek je prakticky vždy ve tvaru válce se vsázkou umístěnou uvnitř. Cívka induktoru je převážně z měděných dutých vodičů obdélníkového tvaru, kterými prochází proud o kmitočtech 50-1000 Hz a induktorem chlazeným vodou. Z pohledu principu ohřívání vsázky dochází k vyzařování elektromagnetického vlnění vybuzeného induktorem. Proměnný magnetický tok prochází vsázkou a vsázkou je pohlčován. V důsledku naindukování proudu do vsázky, dochází ve vsázce k přeměně elektromagnetické energie v tepelnou. Dalším důležitým prvkem pece je stínění dobře vodivým pláštěm na principu vzniku stínícího pole opačného směru než je elektromagnetické pole induktoru. U menších pecí lze stínění vynechat, pokud to konstrukce pece umožňuje. Pro ilustraci je schéma indukční kelímkové pece s vodivým stínícím pláštěm vidět na obrázku 1.2. [7]



Obr. 1.2 Schéma indukční kelímkové pece s vodivým stínícím pláštěm. 1 – cívka pece, 2 – keramické zadusání kelímkové pece, 3 – dobře vodivý plášť (stínění), 4 – žárobetonové trámce. [7]

### c. Indukční kelímkové pece se transformátorovými plechy vně cívky

U tohoto druhu indukční pece jsou svazky transformátorových plechů umístěny vně cívky, toto stínění je tvořeno z většího počtu svazků transformátorových plechů s vysokou magnetickou vodivostí. Svazky transformátorových plechů výrazně snižují nežádoucí účinky rozptylového magnetického pole na konstrukci pece, které působí vně pláště, a to díky uzavření magnetického toku těmito transformátorovými plechy, jak je vidět na obrázku 1.3. [7]

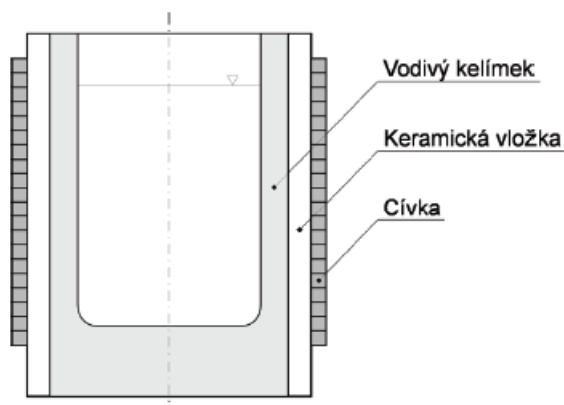


Obr 1.3 Kelímková pec se železným jádrem vně cívky [7]

Další výhodou kelímkové pece s transformátorovými plechy vně cívky je zvýšení indukčnosti cívky a tím magnetického toku buzeného induktorem pro jednotkový proud. K tomu dojde právě zmíněným snížením magnetického odporu magneticky vodivými svazky transformátorových plechů. [7]

#### **d. Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem**

Používá se přednostně pro tavení dobře elektricky vodivých materiálů s vysokou elektrickou vodivostí jako je například měď, hliník, stříbro, zlato a jejich slitin. Kelímek se nejčastěji zhotovuje z ocelolitin, nebo ze směsi šamotu s grafitem, který množstvím určuje elektrickou odolnost kelímku. Mezi kelímkem a cívkou je keramická vrstva působící izolačně. Tato izolační vrstva snižuje únik tepla do induktoru chlazeného vodou a elektricky izoluje. K zahřívání vsázky dochází procházením proudu cívkou, která z povrchu vyzařuje elektromagnetické vlnění, toto elektromagnetické vlnění dopadá na kelímek a indukuje v kelímku proud a jeho průchodem se zahřívá. Kelímek pak zahřívá vsázku. Část elektromagnetického vlnění prochází vsázkou a zahřívá jí přímo. Schéma kelímkové pece je vidět na obrázku 1.4. [7]



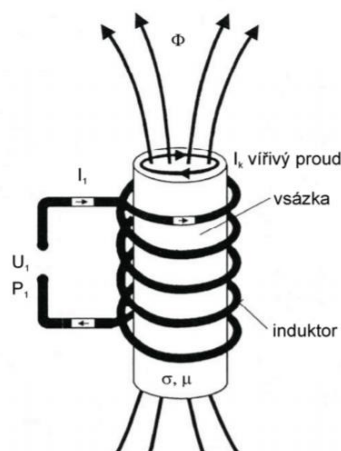
Obr 1.4 Schéma kelímkové pece s vodivým kelímkem [7]

## 1.2 Vznik tepla v indukčních zařízeních, Induktor

Zařízení indukčního typu sestávají ze tří částí. První částí je vsázka, na kterou působí elektromagnetické vlnění cívkou. Druhou částí tohoto zařízení je cívka a poslední částí je zdroj. Při průchodu proudu cívkou válcového tvaru, dochází ke vzniku válcového elektromagnetického vlnění, které směřuje vně tavicího zařízení. Toto elektromagnetické vlnění směřující do vsázky a dochází k naindukování proudu do jejího povrchu. Při následné přeměně proudu v tepelnou energii se vsázka zahřívá. Vzniká Jouleovo teplo, pro které platí vztah:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1.1)$$

Základní schéma induktoru je znázorněno na obrázku níže: [7]



Obr 1.5 Základní schéma indukčního zařízení [7]

Důležitou veličinou pro ohřev elektromagnetickou indukcí je relativní hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do ohřívané vsázky „a“

$$a = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (1.2)$$

Z výše uvedeného matematického vztahu vyplývá že hloubka vniku elektromagnetického vlnění, a tedy i účinku indukčního ohřevu je závislá na frekvenci „f“ induktoru, konduktivitě ohřívajícího materiálu „ $\gamma$ “ a permeabilitě materiálu „ $\mu$ “. [7]

### 1.3 Stínění indukčních kelímkových pecí

V principu jsou dvě metody stínění indukčních kelímkových pecí, a to stínění dobře vodivým pláštěm a stínění pomocí svazků transformátorových plechů.

Stínění pomocí vodivého pláště na principu vzniku stínícího pole je znázorněno na obrázku 1.2. Toto pole je vyvolané elektromagnetickou indukcí a má opačný směr než pole vyvolané induktorem. Výhodou této metody je nízká cena a nižší hmotnost pece než v případě stínění pomocí svazků transformátorových plechů. Nevýhodou je snížení intenzity



magnetického pole v kelímku, které způsobuje opačný směr polí induktoru a stínícího pláště. Tento jev má ale za následek určité snížení celkové účinnosti ohřevu.

Stínění pomocí svazků transformátorových plechů je znázorněno na obrázku 1.3. Svazky stínění jsou tvořeny několika transformátorovými plechy, které jsou navzájem izolované. Transformátorové plechy mají velmi malou elektrickou vodivost, protože jsou tvořeny slitinou železa a křemíku. Tato slitina má vysokou permeabilitu. Nevýhodou tohoto typu stínění jsou vyšší pořizovací cena a konečná hmotnost pece oproti peci se stíněním vodivým pláštěm. Naproti tomu je značnou výhodou zvýšení účinnosti tavení. Toho se dosáhne tím, že rozptylový magnetický tok je uzavírán přes dobře magneticky vodivé svazky transformátorových plechů. Tím se zvýší indukční tok, a to vede ke zvýšení intenzity magnetického pole, které indukuje proud do vsázky. [16]

#### **1.4 Elektrické napájení indukčních pecí**

Zdroje indukčních pecí plní dvě důležité funkce. První funkcí je samotné napájení indukční pece. Druhou neméně významnou funkcí je řízení indukční pece. Z pohledu řízení je hlavním regulovaným parametrem frekvence a výkon. [7]

##### **a) Síťové napájení o napětí 3x400/230V s kmitočtem 50 Hz**

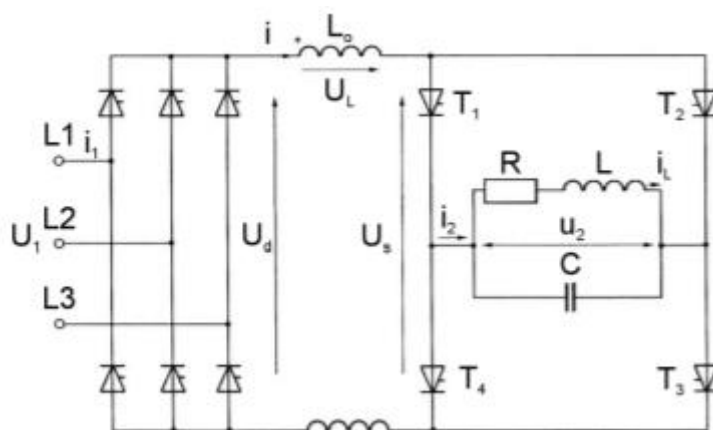
Tento síťový zdroj lze použít pro ohřevy oceli např. o průměru válce vsázky 160mm až 500mm. Připojení induktoru k síti je realizováno přes výkonový spínač s regulačním transformátorem, symetrizačním obvodem s cívkou a kondenzátorovou baterií. [7]

##### **b) Napájecí napěťové zdroje se střední frekvencí**

Zdroje s frekvencí mezi 50Hz a 20kHz. Připojení induktoru k síti je provedeno přes výkonný spínač, měnič frekvence a kondenzátorovou baterií. Jako zdroj se používají tyristorové měniče kmitočtu určené pro středofrekvenční ohřev. Dříve se ještě používaly rotační měniče, nebo tyristorové zdroje. [7]

Samotný tyristorový měnič sestává z usměrňovače, meziobvodové tlumivky a střídače:

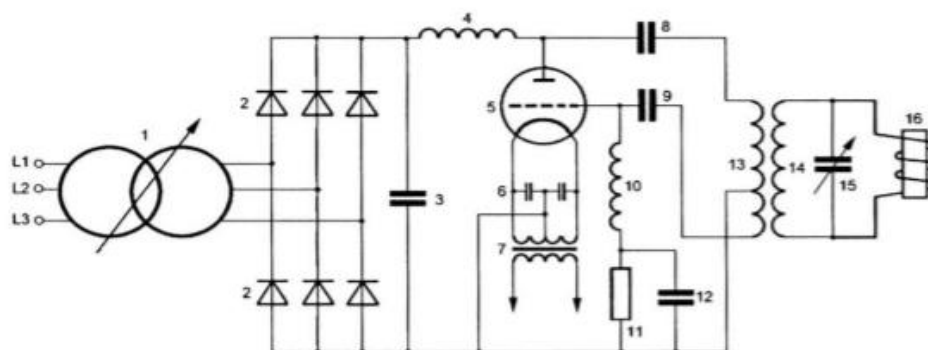
- Usměrňovač – trojfázový můstek který je celořízený, umožňující invertovaný chod.
- Střídač – pracuje jako invertor proudu, řízený zátěží.
- Meziobvodová tlumivka – má velkou indukčnost a tři funkce v obvodu: funkci oddělovací, vyhlazovací a omezovací. [7]



Obr 1.6 Tyristorový měnič středních frekvencí – Zapojení [7]

### c) Napět'ové zdroje s vysokou frekvencí

Používají se pro generaci frekvencí nad 50 kHz. Schéma vysokofrekvenčního zdroje je uvedeno na obr.1.7:

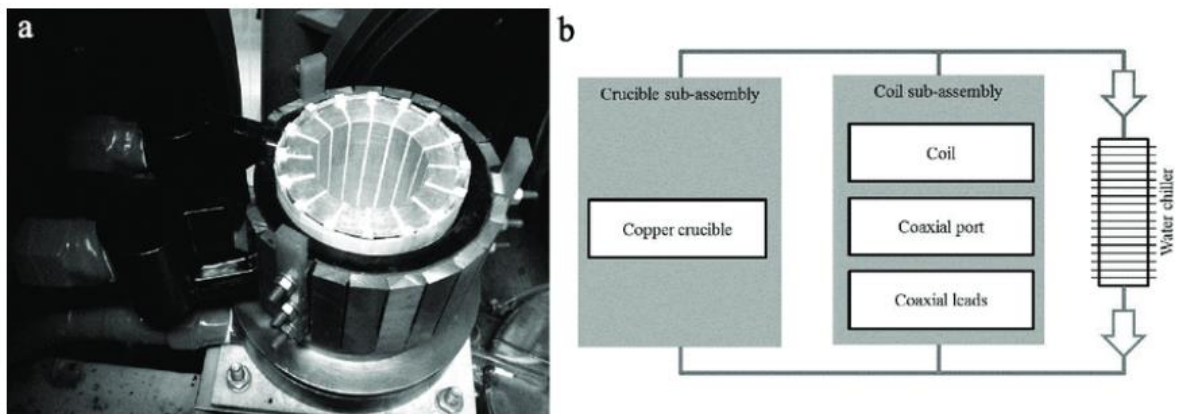


Obr 1.7 Schéma vysokofrekvenčního elektronkového generátoru

Na schématu vysokofrekvenčního elektronkového generátoru zleva doprava jsou tyto prvky: 1- vstupní transformátor, 2- usměrňovací diody, 3- vyhlazovací kondenzátor, 4- oddělovací tlumivka, 5- triody, 6- kondenzátory zkratující vysokofrekvenční složku proudu katod, 7- Žhavicí transformátor triody, 8- oddělovací kondenzátor propouští střídavou složku, 9- oddělovací kondenzátor stejnosměrného přepětí triody, 10- tlumivka znemožňující zkratování zpětnovazebného napětí kondenzátoru, 11- odpor kde vzniká záporné přepětí triody, 12- filtrační kondenzátor, 13- primární vnutí vysokofrekvenčního transformátoru, 14- sekundární vnutí vysokofrekvenčního transformátoru, 15- kompenzační kondenzátor induktoru, 16- s kondenzátorem 15 tvoří oscilační obvod. [7]

### 1.5 Metoda ISM (ISMT) – „studený kelímek“

Technologie ISM (Induction skull melting) umožňuje tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů v pevném skupenství s vysokou úrovní chemické čistoty vytaveného produktu-výtavku. Vysokou čistotu umožňuje minimální kontakt taveniny se studeným kelímkem během tavení, pomocí velmi intenzivního elektromagnetického pole. Tento minimální kontakt zajišťuje „skull“ vrstva, která vzniká ve vnitřní stěně a u dna studeného kelímku během úvodní fázi tavení. [10],[13]



Obr 1.8 a) Segmentovaný studený kelímek, b) Schéma segmentového studeného kelímku [16]

Specifika procesu ISM:

- Přehřívání taveniny nad bod tání od 500K výše
- Tavenina je v minimálním kontaktu se stěnou kelímku, díky tomu může mít materiál vysokou chemickou čistotu

- Proces tavení ve vakuu nebo řízené atmosféře
- Chemická syntéza při vysokých teplotách
- Periodický i kontinuální režim tavení a krystalizace [10],[13]

Vzhledem k popsaným vlastnostem je metoda ISM ideální pro tavení velice čistých oxidů, keramických materiálů, syntéz skel, výrobě krystalů a vysokoteplotních materiálů např. titanu, kobaltu, niklu a dalších prvků a jejich sloučenin. Popis, využití metody ISM a její rozdíl oproti metodě VAR (Vakuové obloukové tavení) jsou dále hlouběji popsány v kapitole 4. [10],[13]

## 2 Fyzikální principy studeného kelímku

Fyzikální princip a teoretické základy jsou založeny na vzniku tepla elektromagnetickou indukcí. Toto teplo vzniká v materiálu vsázky, na kterou působí proměnné elektromagnetické pole. Tavený materiál se nedotýká funkční části kelímku a prochází jím naindukovaný střídavý proud. Tento střídavý proud způsobuje postupné oteplení vsázky na principu Jouleových ztrát. Důvodem samotného oteplení vsázky jsou naindukované vířivé proudy, vznikající působením proměnného elektromagnetického pole. [1]

Pro popis matematického modelu studeného kelímku se vychází z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru, které se následně upravují pomocí Fourierovy transformace. Intenzity elektrického a magnetického pole se vyjadřují válcovým elektromagnetickým vlněním. [1], [4]

### 2.1 Maxwellovy rovnice v integrálním a diferenciálním tvaru

James Clerk Maxwell byl fyzik původem ze Skotska. Mezi jeho největší objevy patří matematický popis magnetického pole. Maxwellovy rovnice jsou ve dvou tvarech, ve tvaru integrálním a diferenciálním. V integrálním tvaru rovnice popisují konkrétní oblast v elektromagnetickém poli. Diferenciální tvar Maxwellových rovnic popisují v dané oblasti konkrétní bod. Celkem jsou čtyři Maxwellovy rovnice, každá má svůj integrální i diferenciální tvar, všechny tvary těchto rovnic jsou popsány v následujícím textu [1],[2]:

- **První Maxwellova rovnice – Ampérův zákon**

Diferenciální tvar:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_{com} + \vec{J}_r \quad (2.1)$$

Rotace vektoru intenzity magnetického pole  $H$  je rovna hustotě vodivého proudu  $J_{com}$  a hustotě posuvného proudu  $J_r$ .

Integrální tvar:

$$\int_L \vec{H} dl = \sum I = I_{com} + I_r \quad (2.2)$$

Cirkulace vektoru intenzity magnetického pole H po uzavřené křivce, se rovná součtu celkového proudu  $I_{com}$  plochou ohraničenou touto křivkou a časovou změnou elektrického indukčního toku  $I_r$  plochou.

- **Druhá Maxwellova rovnice – Zákon elektromagnetické indukce**

Diferenciální tvar:

$$rot \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (2.3)$$

Rotace vektoru intenzity elektrického pole E je rovna záporné hodnotě časové derivace magnetické indukce B.

Integrální tvar:

$$e = \oint_L \vec{E} dl = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Cirkulace po křivce intenzity elektrického pole E je rovna záporné změně magnetického toku plochou.

- **Třetí Maxwellova rovnice známá také jako Gaussův zákon elektrostatiky**

Diferenciální tvar:

$$div \vec{D} = q \quad (2.5)$$

Derivace vektoru elektrické indukce je rovna objemové hustotě náboje q.

Integrální tvar:

$$\int_S \vec{D} ds = Q \quad (2.6)$$

Vektor elektrické indukce libovolně vně orientovanou plochou S je roven celkovému volnému náboji Q.

- **Čtvrtá Maxwellova rovnice – Zákon spojitosti indukčních toků**

Diferenciální tvar:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.7)$$

Divergence vektoru magnetické indukce B je rovna nule.

Integrální tvar:

$$\int_S \vec{B} dS = 0 \quad (2.8)$$

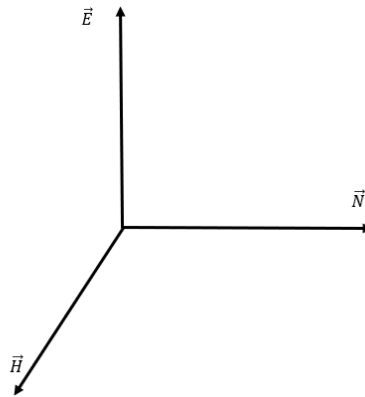
Vektor magnetické indukce uzavřenou orientovanou plochou S je roven 0. [1], [2]

## 2.2 Poyntingův zářivý vektor

John Henry Poynting byl anglický fyzik, narozen v polovině 19 století. Jako profesor působil na akademické půdě dvou Universit. Po něm je též pojmenován Poyntingův zářivý vektor. Tento vektor se značí  $\vec{N}$  a je vektorovým součinem intenzit elektrického „ $\vec{E}$ “ a magnetického „ $\vec{H}$ “ pole. Ve vektorovém tvaru pro základní vyjádření lze zapsat rovnicí takto [7]:

$$\vec{N} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.9)$$

Vzájemná orientace vektorů  $\vec{N}$ ,  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  je znázorněna na obr 2.1.



Obr 2.1 Poyntingův zářivý vektor

### 2.3 Válcové elektromagnetické vlnění

Studený kelímek má většinou konstrukci válcového tvaru tvořenou vynutím obdélníkového tvaru. Za zdroj elektromagnetického vlnění je tedy uvažována plocha válce o poloměru  $r$  a nekonečné délce. Ke zjednodušenému vyjádření válcového elektromagnetického vlnění se používá zjednodušená cylindrická souřadnicová soustava: [4]

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (2.10)$$

Vlnová rovnice pro válcové elektromagnetické vlnění má toto vyjádření pro intenzitu magnetické pole  $\vec{H}$ :

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{H}}{\partial r} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (2.11)$$

a pro intenzitu elektrického pole  $\vec{E}$ : [7]

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{E}}{\partial r} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.12)$$

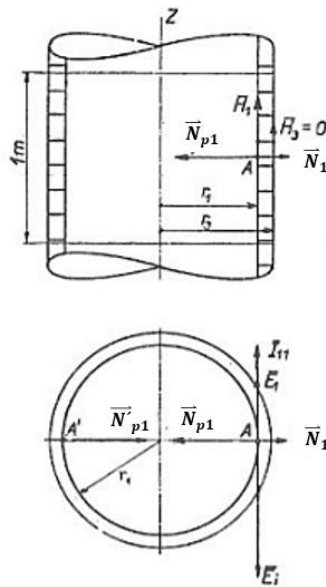
Aby bylo možné určit i směr jednotlivých veličin ve válcovém poli, je třeba vyjít z Poyntingova zářivého vektoru, jak bylo popsáno v kapitola 2.2. Pro libovolný bod na válcové ploše se nejprve určí směr intenzity elektrického pole  $\vec{E}$ , tento směr bude shodný se



směrem proudu. Orientace vychází z matematického vztahu proudové hustoty a intenzity elektrického pole:

$$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (2.13)$$

Potom je třeba určit směr intenzity magnetického pole  $\vec{H}$ , ta bude směřovat směrem k nám, při pohledu na spodní část obrázku 2.2. Jak již bylo popsáno v předchozí podkapitole, Poyntingův zářivý vektor je kolmý jak k magnetické, tak k elektrické intenzitě pole. Lze ho tedy vypočítat vektorovým součinem intenzity elektrického a magnetického pole. Na obrázku je jeho směr značen  $\vec{N}$ .  $\vec{N}_1$  směřuje do stěny cívky a definuje ztráty v induktoru.  $\vec{N}_{p1}$  směřuje do osy cívky a  $\vec{N}_{p1}$  vyjadřuje hustotu jalového elektromagnetického toku. [4]



Obr 2.2 Orientace vektorů v prostoru [4]

## 2.4 Relativní hloubka vniku elektromagnetického záření do elektricky vodivého prostředí vsázky

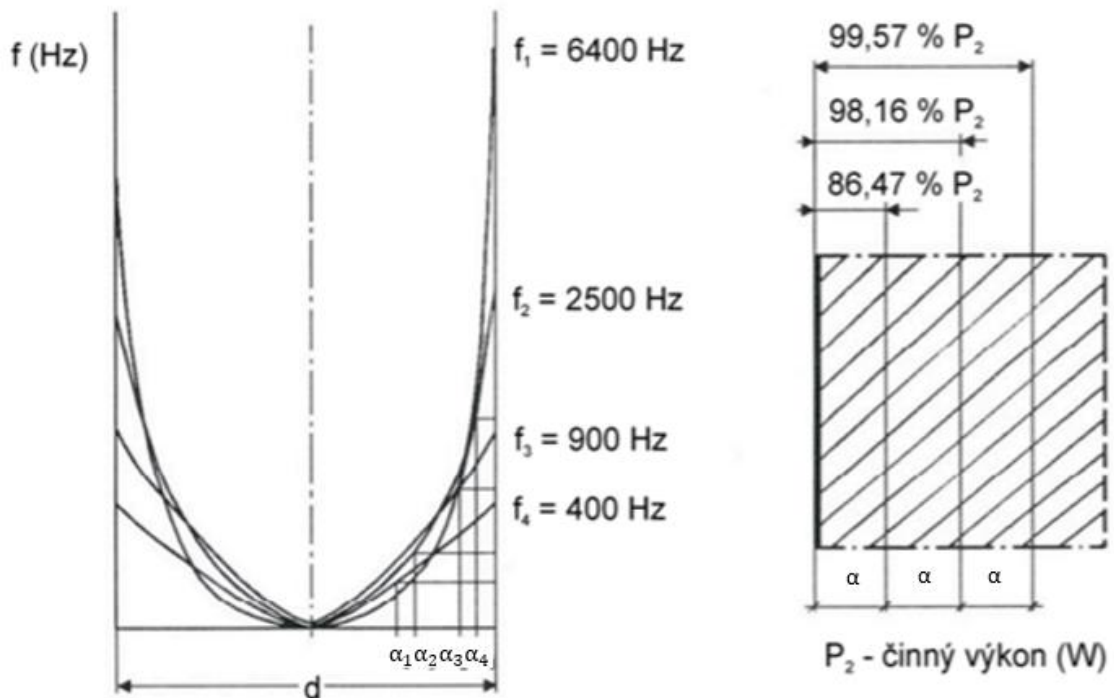
Celkové rozložení tepla ve vsázce je závislé na frekvenci proudu, který prochází induktorem. Změnou frekvence lze upravit tepelné podmínky ve vsázce. Elektromagnetické vlnění procházející vsázkou je mimo kmitočtu také závislé na konduktivitě a permeabilitě materiálu vsázky. Postupně jak se akumuluje elektromagnetické vlnění ve vsázce do hloubky

dojde k jeho přeměně na energii tepelnou. Když poklesne na hodnotu  $\frac{1}{e}$ , mluvíme o takzvané hloubce vniku elektromagnetického vlnění. [7]

Tato hloubka vniku elektromagnetického vlnění je definovaná vztahem:

$$a = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (2.14)$$

Kde „a“ je hloubka vniku v m, f je frekvence v Hz, „ $\gamma$ “ je konduktivita v  $S \cdot m^{-1}$  a „ $\mu$ “ je permeabilita v  $H \cdot m^{-1}$ . [7]



Obr 2.3 Závislost hloubky vniku na kmitočtu. Mezi frekvencí a hloubkou vniku je nepřímá úměra. Čím je frekvence vyšší, tím je hloubka vniku menší. [7]

## 2.5 Teplotní pole ve vsázce

Pokud je znám zdroj elektromagnetického tepla, lze dopočítat distribuci tepla materiálem vsázky. Teplo vznikající ve vsázce se šíří dvěma základními směry. První směr je pro proces užitečný, a to je do středu vsázky, jedná se o užitečné teplo. Pro co největší účinnost je třeba, aby nejvíce tepla směřovalo právě tímto směrem vně do vsázky. Druhý směr je ve směru

ven ze vsázky, toto teplo se musí efektivně odvádět, neboť může způsobit tepelné poškození až úplné zničení částí zařízení pece teplem. [1]

Pro výpočet tepelného vztahu uvnitř kelímku, kde je třeba počítat s kusovitostí vsázky je matematicky vhodný vzorec 2.15:

$$\frac{d}{dt}(\rho\varepsilon) = \operatorname{div}(\lambda\operatorname{grad}T) + W_e \quad (2.15)$$

Integrovaný tvar tepelné vodivosti lze definovat pomocí integrování předchozí rovnice 2.15 v objemu a ploše. [1]

$$\int_V \frac{d}{dt}(\rho\varepsilon) dV = \int_S \lambda\operatorname{grad}T dS + Q \quad (2.16)$$

Levá strana rovnice 2.16 vyjadřuje rychlost samotné změny vnitřní energie. Zatím co pravá strana této rovnice vyjadřuje proud procházející plochou S v objemu V. [1]

### **3 Obecné podmínky efektivního tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů**

U kelímkových pecí obecně je velmi důležitá čistota vkládaného materiálu. Jedná se jak o nečistoty kovové, tak i nekovové. Mezi kovové lze zařadit různé příměsi cizích materiálů v základním materiálu pro tavení, a to od stopového množství až po množství větší. Mezi nekovové nežádoucí příměsi patří zejména různé oleje, voda a koroze na taveném materiálu. Ty se na něj dostaly při předchozím zpracování, skladování, nebo jako ochrana povrchu materiálu. Znečištění materiálu v kelímkové peci může ovlivnit několik aspektů, mezi ty patří hlavně:

- Kvalita vyráběného kovu
- Rychlost výroby
- Objem vyrobené strusky
- Spotřeba energie
- Životnost žárupevné vyzdívky
- Bezpečnost závodu a personálu. Obzvláště nebezpečná je voda ve vsázce, riziko exploze vodíku. [9]

#### **3.1 Čistota taveného materiálu**

Materiál připravený pro tavení by měl být co nejsušší a jednoho druhu, nejlépe s co nejmenším množstvím rzi, nebo jiných povrchových nečistot. Množství nečistot a různorodost materiálu výrazně omezuje množství tepla které lze použít. Z těchto důvodů dochází k prodloužení času tavení. Tato problematika je vidět v tabulce 1. na příkladu materiálu se rzi a bez ní. [9]

Tabulka 3.1 Vliv rzi materiálu na spotřebu energie během tavení [9]

Použitý materiál	Použité množství v kg	Doba v minutách, než dojde k dosažení 1500 °C v tavenině	Spotřebovaná energie v kWh.	Spotřeba energie v kWh/tuna
Čistý materiál	250	75	210	840
Materiál se rzí	200	185	270	1350

Obecně platí, že čím delší je doba tavení, tím větší jsou celkové tepelné ztráty a narůstá spotřeba energie. Jak již bylo zmíněno, u znečištěných materiálů dochází k prodloužení doby tavení, a to má i za následek větší ztráty během celého cyklu. V případě znečištění taveného materiálu nekovovým materiálem jako jsou například různé oleje a jiné mastnoty, hrozí reálné nebezpečí výbuchu v kelímkové peci, pokud by nebyl materiál odstraněn před tavením. Výbuch může být tak silný, že vede k poranění osob, poškození pece, nebo přilehlých zařízení. [9]

### 3.2 Kusovitost taveného materiálu

Kusovitost taveného materiálu je jeden z důležitých parametrů u kelímkových pecí, které jsou provozovány při nižších frekvencích. Souběžně s kusovitostí hraje důležitou roli i hustota taveného materiálu, v případě materiálů s menší hustotou dochází k pomalejšímu naindukování tepla do vsázky a k významnějšímu prodloužení doby tavení. Nevhodná volba kmitočtu způsobuje elektromagnetickou průzařnost vsázky a tím i její neohřátí. [9]

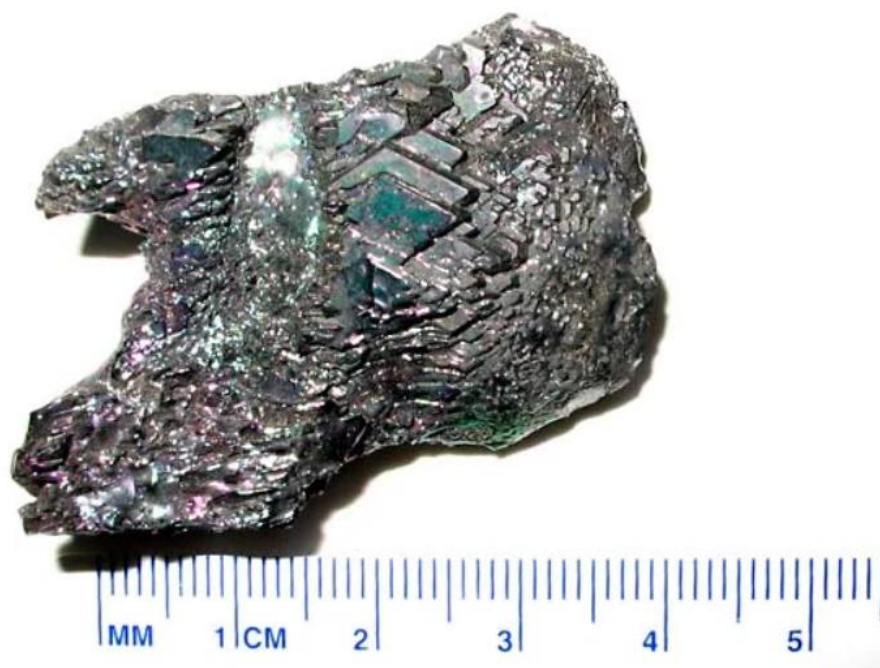
Neopomenutelný je i způsob plnění prázdného kelímku taveným materiálem, jak u malých ručně plněných pecí, tak u velkých pecí. Důležitá je hlavně orientace jednotlivých kusů, tak aby nevznikaly velké mezery mezi jednotlivými kusy. Nízká hustota vede k oxidačním ztrátám a k prodloužení doby tavení. Brikety a balený materiál se též považují za nevhodný pro efektivní tavení z důvodu časté silné oxidaci během tavení. [9]

### 3.3 Cizí materiál ve vsázce

Mezi jeden z nejvíce nežádoucích materiálů ve vsázce lze zařadit uhlík, u kterého je hlavní snaha ho zachytávat v roztavené liti. V praxi je nejčastěji k těmto účelům používán grafit nebo ropný koks. Z pohledu velikosti grafitu či ropného koksu není velikost

podstatná v případě, kdy je v peci velká turbulence kovu. V případě pecí s nízkou turbulencí kovu je situace jiná. U těchto pecí je třeba použít jemnější kusovitost grafitu nebo ropného koksu. [9]

Mezi nejoblíbenější a nejčastěji používaný materiál na místo grafitu a ropného koksu je metalurgický karbid křemíku s obsahem 63% křemíku a 31% uhlíku. Karbid křemíku je vidět na obrázku 3.1. [9]



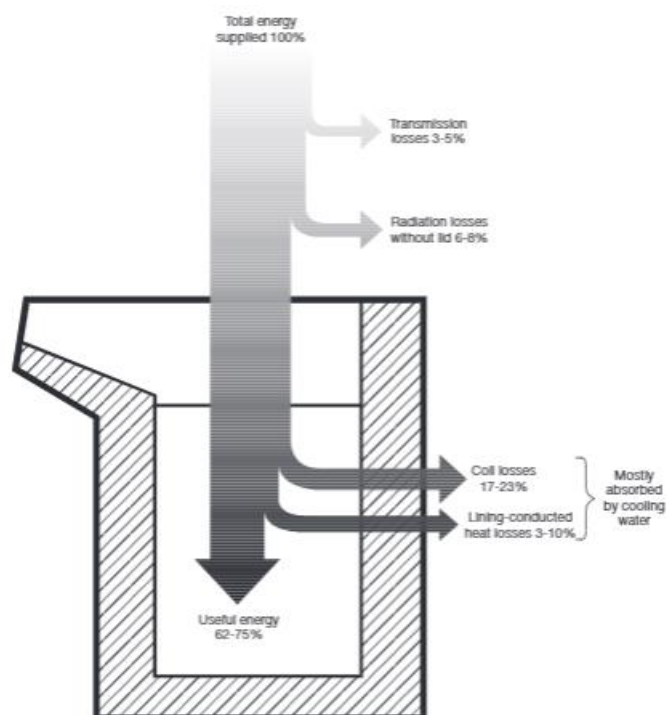
Obr 3.1 Karbid křemíku [8]

Výhody karbidu křemíku:

- Vysoká absorpce
- Působí jako deoxidátor a tak prodlužuje životnost vyzdívky, protože snižuje až odstraňuje agresivní oxidy z kovů
- Ve srovnání s ropným koksem a graitem obsahuje méně síry, vodíku a dusíku [9]

### 3.4 Metodika vkládání vsázky do pece

Jednou z největších tepelných ztrát jsou ztráty tepla horní otevřenou částí kelímkové pece, kdy tímto prostorem uniká značné množství tepla sáláním. Standardní tepelné ztráty jsou vyjádřené v Shankey diagramu na obrázku 3.2 [9]



Obr 3.2 Shankey diagram - znázornění ztrát v indukčních pecích. [9]

Tepelné ztráty vyzařováním u pecí bez vsázky jsou znázorněny v tabulce 2. [9]

Tabulka 3.2 Ztráty vyzařováním u pecí o kapacitě 6 a 10 tun.

Kapacita pece v tunách	Ztráty energie v kW		
	Otevřené víko	Zavřené víko	Rozdíl mezi otevřeným a zavřeným víkem
6	70	9	61
10	130	13	117

Navržený postup plnění pece materiálem a její doplňování hrají také důležitou roli. Mělo by se docílit co nejčistějšího chemického složení taveniny. [9]

## **4 Podmínky pro efektivní tavení různých elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku**

V dnešní době je kladen důraz na získání velmi čistých kovů, cenově dostupných s velmi dobrými mechanickými a chemickými vlastnostmi. Mezi nejčastěji tavené vodivé materiály, které nabízejí tyto vlastnosti patří například titan, následně nikl a kobalt a jejich slitiny. K nevodivým materiálům s vhodnými vlastnostmi nejčastěji tavených ve studených kelímcích patří například oxidy kovů, skla, výroba krystalů, vitrifikace jaderného odpadu. [11]

### **4.1 Podmínky efektivního tavení vodivých materiálů, např. titanu a jeho slitin**

Titan a jeho slitiny mají velmi dobré mechanické a chemické vlastnosti, odolává bez problémů běžným korozivním účinkům, chemicky je stálý a zároveň má nízkou hmotnost. Čistého titanu až kolem 5N (99,9988%) lze dosáhnout metodou vysokoteplotního vakuového tavení ve studeném kelímku. Z pohledu použitých materiálů pro konstrukci studeného kelímku nelze použít jako materiál běžné žárupevné oxidy vzhledem k velké afinitě titanu a jeho slitin ke kyslíku a dusíku. Pokud by tyto materiály z běžných žáruvzdorných oxidů byly použity pro konstrukci kelímku, došlo by k reakci materiálu kelímku s materiálem vsázky a vytvoření hluboké křehké reakční vrstvy s pórovitostí na okrajích taveniny. V této reaktivní vrstvě mohou vzniknout trhliny, které se dále mohou šířit odlitkem titanu. Celková pevnost materiálu titanu je těmito jevy výrazně snížena.

Tavení, odlévání a chlazení musí také probíhat z výše popsaných důvodů bez přítomnosti kyslíku z atmosféry, tyto procesy probíhají ve vakuu nebo v řízené atmosféře do speciálních nereaktivních forem z oxidu zirkoničitého. Další problematikou tavení titanu je jeho špatná tekutost v roztaveném stavu, smršťování a výskyt plyných defektů. Z důvodu nutnosti snížit finanční nákladnost byla vyvinuta metoda ISM. Tato metoda má několik podstatných výhod pro odlévání titanu, mezi ně patří rychlé cykly a využití vodou chlazeného měděného kelímku. Tím se eliminuje kontaminace, která je běžná například u keramických kelímků. [10], [11], [13]





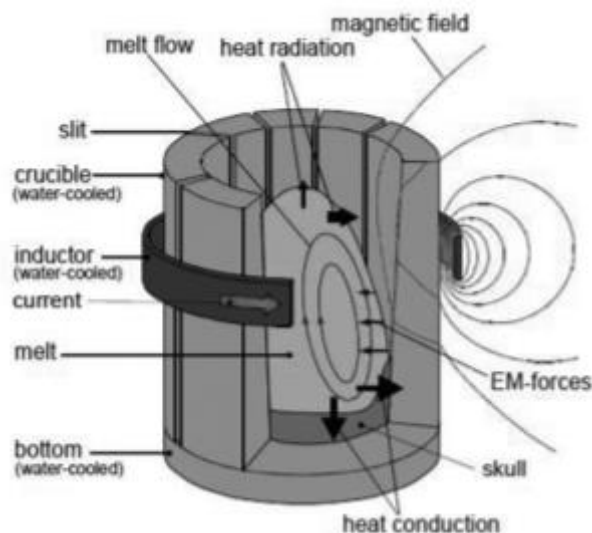
Obr 4.1 Studený kelímek, odlévání titanu odstředivě [10]

#### **a) Metoda VAR (Vacuum arc remelting)**

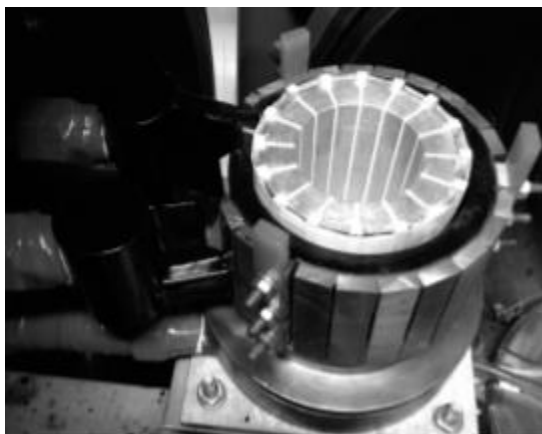
U některých kovů bývají mechanické vlastnosti jako pevnost v tahu u odlitků často horší než u tvářených slitin. Oproti tomu titan mívá většinou lepší mechanické vlastnosti při tváření. Nesmí být, ale odlívány tradiční metodou vakuové obloukové pece (VAR) do vodou chlazeného měděného kelímku. Tato metoda má sice výhodu, že dochází k velmi malému přehřátí, a to napomáhá slévateľnosti titanu. Na druhou stranu je znatelnou nevýhodou této metody to, že k tomuto malému přehřátí taveného materiálu dochází pouze v horní vrstvě kelímku. To způsobuje, že první vlévaný materiál do formy je znatelně teplejší než zbytek vlévané materiálu z kelímku. Následkem toho dochází ke špatnému procesu tuhnutí ve formě. Celkový odlitek pak nemá stejné mechanické vlastnosti v různých místech jeho profilu. Z těchto důvodů dochází metodou VAR k prodražení a prodloužení výroby vyšších jakostí titanových odlitků. [10]

## b) Metoda ISM (Induction skull melting)

Metoda využívá měděného segmentovaného kelímku oproti metodě VAR, kde se používá měděný nesegmentovaný kelímek. Segmentovaný kelímek je naplněn materiálem pro tavení, kterým prochází magnetické pole, jenž je dodávané induktorem. Vsázka se roztaví a kolem jejích stěn a na dně vznikne tenká skořápka tzv. „skull vrstva“. [10], [12]



Obr 4.2 Schéma indukčního tavicího kelímku (skull), na obrázku je zobrazena indukční cívka, skořápka taveniny, tavenina a vířivé proudy v tavenině. [12]

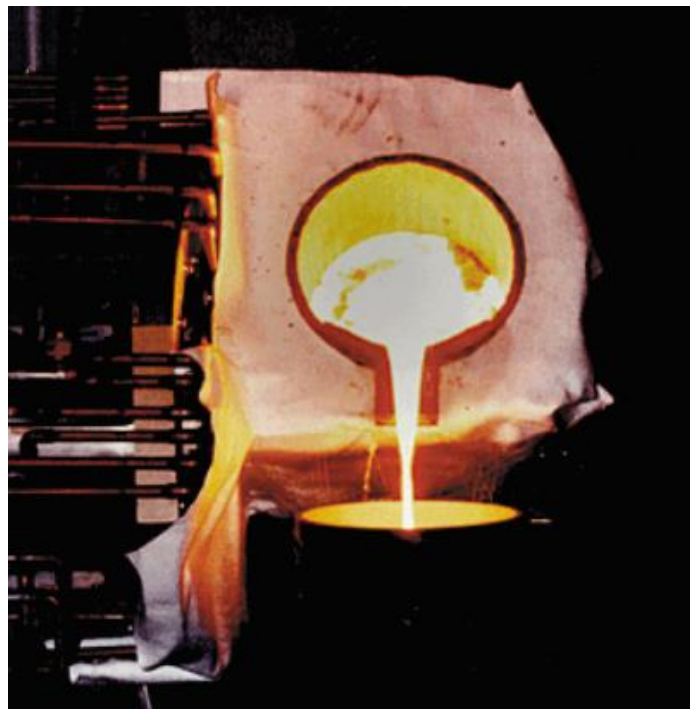


Obr 4.3 Příklad kelímku ISM, jde o polo průmyslový typ s 16 segmenty a štěrbinami 1mm.

Metoda ISM nemá žádné zvláštní požadavky na kusovitost vkládaného materiálu, materiál může mít formu od trubek přes desky až po ingot, které se rozměrově vejdu do kelímku. Z pohledu ceny a tavení je z tvaru materiálu nejvhodnější plátový šrot. Celá vsázka se roztaví za pomoci magnetického pole, není třeba žádných elektrod jako například u

elektrických vakuových obloukových tavicích pecí. Díky tomu se náklady na provoz rapidně snižují, výroba elektrod pro elektrické vakuové obloukové tavicí pece patří mezi velice nákladné produkce a jejich používání má velký vliv na konečnou cenu produktu u tavicích zařízení. [10]

Pevnost odlitku titanu lze jednoduše regulovat množstvím kyslíku v titanu. Obsah kyslíku je ve vstupním materiálu sledován a materiál je s různým obsahem kyslíku míchán dle pevnostních požadavků na konkrétní odlitek. Množství kyslíku lze také navýšit přidáním oxidu titaničitého, tím lze zajistit i opakovatelnost při dosahování předepsaných pevností titanu pro série odlitků. Titan může být taky legován, a to za pomoci žárupevných kovů jako jsou tantal a wolfram. U těchto žárupevných kovů se tavenina drží ve studeném kelímku po určitou dobu na vysokých teplotách, tak aby došlo k plnému roztavení těchto žárupevných kovů. [10], [14]



Obr 4.4 Odlévání ze studeného kelímku do formy

Na efektivitu tavení a minimalizaci ztrát má také vliv poměr výška taveniny a její průměr. V případě menších průměrů kelímků je proudění intenzivnější v blízkosti středové osy. Toto proudění po středové ose zlepšuje teplotní homogenizaci a zabraňuje ztuhlosti materiálu na

dně. Nevýhodou těchto menších průměrů je větší kontaktní plocha s kelímkem a tím i větší tepelné ztráty přes chladicí okruh. [13], [14]

Tabulka 4.1 Závislost poměrů taveniny k výkonu přeneseného do taveniny [13]

Poměr taveniny výška/průměr	Proud induktoru, kA	Celkový výkon, kW	Výkon v tavenině, kW	Výkon v tavenině, %
0.84	4.6	275.3	50	18.2
1.20	4.0	188.0	50	26.6
1.67	3.7	138.6	50	36.1

#### 4.2 Podmínky efektivního tavení elektricky nevodivých materiálů např. oxidů kovů, skel

Mezi tavené elektricky nevodivé materiály můžeme zařadit oxidy, keramické materiály, syntézu skel, umělé drahokamy, výrobu krystalů a vysokoteplotních materiálů. Pro tavení a odlévání se používá metoda ISM přesněji vysokoteplotní tavení v elektromagnetickém poli. [11]

Z pohledu umístění induktoru se používají tři možné pozice jeho umístění vůči kelímku, a to pod dnem kelímku, nad taveninou v kelímku a po obvodu kelímku tzv. „válcový induktor“. Základní rozdíly ISM technologie používaných pro tavení materiálů dle podmínek a konečného produktu lze popsat takto:

- ISM s pozvolným uvolňováním taveniny. Tato technologie umožňuje odlévání taveniny ve formě kapek nebo proudu do formy. Lze takto tavit sklo a čedič pro průběžné odlévání.
- ISM s postupným odléváním krystalických ingotů. Toto tavení je určeno pro získání materiálu ingotu v jeho roztavené fázi, nebo syntéze v tekuté fázi.
- ISM vsázkový ohřev, pro něj je charakteristická akumulace taveniny v objemu kelímku. Metoda je ideální pro růst krystalů, odlévání nebo výzkumné účely. [1]

U elektricky nevodivých materiálů je velmi důležitá fáze předehřevu vsázky tzv. „startovací fáze“, též „start up“. Dokud elektricky nevodivý materiál nedosáhne určité

minimální teploty není dostatečně elektricky vodivý pro samotný vznik tepla v elektromagnetickém poli. Je několik druhů startovacích fází, mezi ně můžeme zařadit ohřev vsázky exotermickou oxidací taveného oxidu, ohřev plazmou, přímý ohřev elektrickým obloukem nebo plynovým hořákem, umístěním elektricky vodivého materiálu do vsázky. Vložený elektricky vodivý materiál pro startovací fázi je s taveným materiálem společně taven. Z uvedených metod se nejčastěji používána pro startovací fázi metoda umístění vodivého materiálu do vsázky ve formě hoblin, drtě nebo jiného tvaru. Mezi jednotlivými metodami jsou i určitá omezení. Pokud chceme například získat co nejčistší materiál, je metoda přehřevu plynovým hořákem nevhodná z důvodu nadměrné přítomnosti nečistot ve vsázce po přehřevu. [1]

#### **a) Vysokoteplotní syntéza oxidů**

Mezi hlavními složkami syntetizovanými během syntézy oxidů jsou oxidy, fluoridy a jiné příměsi se kterými samotné tavení probíhá. Tavení oxidů je prováděno nejčastěji ve studeném kelímku při vyšších teplotách ve formě tekuté taveniny za přirozené atmosféry. Tato vyšší teplota musí dosahovat hodnot nad teplotu tání jednotlivých tavených komponentů taveniny. V závislosti na viskozitě a rozpustnosti plynných komponentů v tavenině mohou nastat v tavenině tyto dvě situace:

- Může dojít k rychlému vyhoření jednoho komponentu, a to může způsobit nestabilitu v procesu tavení a zhoršení kvality produktu. Samotnou nestabilitu procesu tavení způsobí pokles elektrické vodivosti po vyhoření vodivější součásti taveniny.
- Může dojít ke zvýšené absorpci kyslíku, který je obsažený ve vzduchu a následnému zhoršení krystalizace. To povede k navýšené poréznosti ve výtavku až k jeho plnému znehodnocení. [1]

#### **b) Syntéza skel**

Výroba skel je omezena teplotou 1873K s ohledem na tvorbu plynů a následnému poklesu čistoty odlévaných skel ve vysokoteplotních plynových a elektrických pecích. Pro výrobu speciálních skel je vhodnější volit metodu tavení ve studeném kelímku, při které se na okraji taveniny vytvoří tzv. „skull“ vrstva na vnitřním povrchu studeného

kelímku, jde o tavení „sama v sobě“. Nedochozí tak ke kontaminaci taveniny i při vyšších teplotách tavení. [1]

Další procesy a technologie které mají vliv na kvalitu a čistotu výtavku při tavení ISM metodou:

- Používání pouze jednoduchých oxidů při tavení. Při tavení kovových solí dochází k reakci s nečistotami a materiálem studeného kelímku.
  - Startovacímu procesu samotného tavení musí předcházet přehřátí materiálu.
  - Z důvodů velké viskozity skel je nutné použít míchání taveniny pro zaručení homogenity taveniny materiálově i teplotně v jejím celém objemu. (Optimálně 100 a více otáček za minutu.)
  - Odstraňování vnitřního pnutí je vhodnější provádět ve speciální peci vzhledem k závislosti konduktivity taveného materiálu na teplotě. Pokud by při poklesu teploty došlo k absorpci energie vysokofrekvenčního pole, mělo by to za následek rychlou krystalizaci taveniny a zničení skleněného výtavku.
- [1]

### c) Výroba krystalů

Krystaly jsou dnes nezastupitelné v mnoha odvětvích buď jako hlavní komponent, nebo jeho subkomponenty v optice, mikroelektronice, v laserových technologiích a jiných zařízeních. Pro výrobu krystalů se používá metoda: „Czochranského metoda“. Pro tuto metodu je důležitá odpovídající distribuce tepla a přímý vysokofrekvenční ohřev. [1]



Obr 4.5 Výtavek ze studeného kelímku, krystal o délce 50 mm. [13]

#### d) Vitrifikace radioaktivního odpadu

Jaderné elektrárny nabízejí možnost výroby levné, bezpečné elektřiny. Jedná se z mnoha pohledů i o ekologicky vyráběnou elektrickou energii. Je třeba ale vyřešit co s jaderným odpadem. Tento odpad je velice toxický a radioaktivní. Řešení tohoto problému se zpracováním odpadu nabízí jeho zalití do skleněné, popřípadě keramické matrice za pomoci studeného kelímku. Běžně je zpracováno až 50% jaderného odpadu touto metodou. [1], [15]

Úložiště	Hostim	Richard	Bratrství	Dukovany
V provozu	1959 – 1965 (1997)	od r. 1964	od r. 1972	od r. 1998
Objem úložiště využitelný k ukládání RAO	200 m <sup>3</sup>	16 170 m <sup>3</sup>	270 m <sup>3</sup>	55 450 m <sup>3</sup>
Objem uložených odpadů v současnosti	cca 200 m <sup>3</sup>	2 700 m <sup>3</sup>	240 m <sup>3</sup>	cca 1 500 m <sup>3</sup>
Celková zbytková aktivita	0,1 TBq	1.304 TBq	1 TBq	

Obr 4.6 Uložiště jaderného odpadu v Českých zemí [15]

Radioaktivní odpad se dělí do 3 kategorií dle míry radioaktivity:

- LLW (nízko aktivní odpad – tvoří až 90% veškerého jaderného odpadu. Do této skupiny se řadí zbytky z radioaktivního provozu, kontaminované nářadí, oděvy, obaly a další provozní materiál. Díky nízké míře kontaminace může být odpad zpracován bez stínění a chlazení, následně uložen do povrchových úložišť, nebo spalován.
- ILW (středně aktivní odpad) – Tvoří necelých 10% veškerého odpadu, patří sem servisní materiál, povlaky paliva, konstrukční materiály palivových součástí a další podobný materiál. Tento odpad musí být radioaktivně odstíněn během přepravy a zpracování. Nemusí být chlazen. Některé z těchto odpadů musí být skladovány v hlubokých úložištích.
- HLW (vysoce aktivní opad) - 1% veškerého odpadu ze kterého 90% tvoří vyhořelé palivo. Během přepravy a zpracování musí být odpad radioaktivně

odstíněn a chlazen. Odpad bývá uložen do skleněných matric a je ukládán do hlubokých uložišť, kde je předpokládána dlouhodobá životnost uložišť. [15]

Během zpracování radioaktivního odpadu je třeba zmenšit objem odpadu, převézt ho na stabilnější, nerozpustné formy a uzavření do vhodného obalu. Cílem je hlavně zamezit úniku radioaktivity do životního prostředí. Další možností zpracování radioaktivního odpadu je jeho přepracování a znovu využití. Zatím za dostupných technologií je tato varianta nerentabilní, přepracování je finančně nákladnější než cena nového paliva. [1], [15]



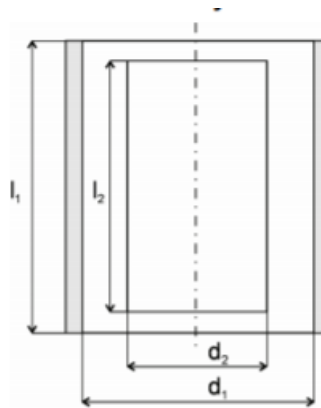
## 5 Elektrické a geometrické parametry některých tepelných zařízení

### 5.1 Elektrické náhradní schéma indukčního zařízení

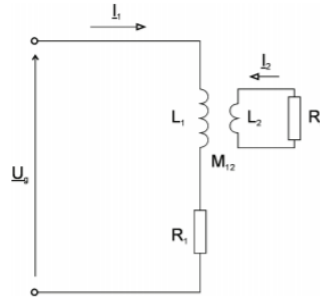
Obecně lze schémata pro indukční zařízení rozdělit na obvody dvousouosé a třísouosé. Dvousouosé a třísouosé obvody mají podobné schéma, třísouosé se liší přítomností třetího obvodu v podobě stínícího pláště z dobře elektricky vodivého materiálu (Al, Cu). Každý obvod obsahuje svou indukčnost a odpor. U dvousouosých obvodů je přítomna jediná vzájemná indukčnost mezi indukčnostmi obvodu u třísouosého jsou tyto vzájemné indukčnosti dvě. Schéma dvousouosého elektrického obvodu je vidět a obrázku 5.2. a třísouosého na obrázku 5.4., kde je vidět i přítomnost třetího obvodu a druhé vzájemné indukčnosti.

#### a. Obvody elektrické dvousouosé

U dvou souosých elektrických obvodů je tvořen obvod cívkou a vsázkou. Uložením vůči sobě je obvod vsázky uvnitř obvodu cívky. Jak je vidět na obrázku 5.1. a 5.2. [7]



Obr 5.1 Schéma obvodu elektrického dvou souosého kde  $l_1$  je výška cívky,  $l_2$  je výška vsázky,  $d_1$  je průměr cívky,  $d_2$  je průměr vsázky [7]



Obr 5.2 Náhradní schéma dvou souosých elektrických obvodů.  $L_1$  – indukčnost cívky,  $L_2$  – indukčnost vsázky,  $R_1$  – Odpor cívky,  $R_2$  – odpor vsázky,  $M_{12}$  – vzájemná indukčnost vsázky a cívky,  $I_1$  – proud cívky,  $I_2$  – proud vsázky.  $U_g$  – napětí zdroje. [7]

Pro analýzu tohoto typu obvodu se často používá metoda náhradních průměrů prof. Langer. Tato metoda se využívá v případě, že hloubka vniku „a“ je výrazně menší než poloměr vsázky. Pro tento případ jsou vztahy pro výpočet upraveny tímto způsobem: [7]

- Pokud platí ( $a_1 \ll r_1$ ) pak platí pro cívku vztah  $d_c = d_1 + a_1$
- Pokud platí ( $a_2 \ll r_2$ ) pak platí pro vsázku vztah  $d_v = d_2 + a_2$  [7]

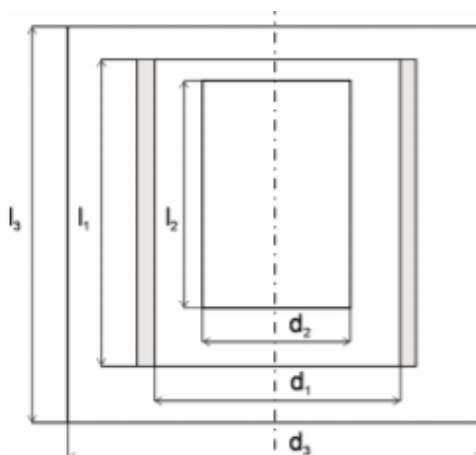
V současné době lze proces tavení ve studeném kelímku matematicky modelovat s využitím výpočetní techniky.

## b. Obvody elektrické třísouosé

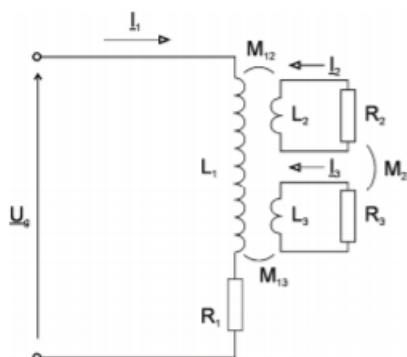
Obvody elektrické třísouosé jsou schématicky shodné s dvousouosými obvody a doplněny o jeden obvod, stínící plášť. V případě stínícího pláště lze mluvit o třísouosých obvodech jen v případě stínění pomocí dobře vodivého pláště, tento plášť tvoří v obvodu druhou vzájemnou indukčnost s cívkou. Pokud by bylo stínění indukční pece zajištěno svazky transformátorových plechu jedná se o obvod dvousouosý, protože v obvodu se nachází pouze jedna vzájemná indukčnost, a to mezi vsázkou a cívkou. Z toho vyplývá, že u obvodů třísouosých je třeba počítat s dvěma vzájemnými indukčnostmi, jak je vidět na obrázku 5.3. a 5.4.. Stejně jako u dvousouosých elektrických obvodů můžeme použít teorii válce o náhradním průřezu tloušťky. Je třeba ale zahrnout ještě třetí elektrický obvod, kterým je stínění elektricky vodivým pláštěm: [7]

- Pokud platí ( $a_1 \ll r_1$ ) pak platí pro cívku vztah  $d_c = d_1 + a_1$
- Pokud platí ( $a_2 \ll r_2$ ) pak platí pro vsázku vztah  $d_v = d_2 + a_2$
- Pokud platí ( $a_3 \ll r_3$ ) pak platí pro stínění vztah  $d_v = d_3 + a_3$  [7]

Schémat třísousého elektrického obvodu jsou znázorněné na obrázku 5.3. a 5.4.:



Obr 5.3 Schéma obvodu elektrického tří sousého kde  $l_1$  je výška cívky,  $l_2$  je výška vsázky,  $l_3$  je výška stínění,  $d_1$  je průměr cívky,  $d_2$  je průměr vsázky,  $d_3$  je průměr stínění. [7]



Obr 5.4 Náhradní schéma tří sousých elektrických obvodů.  $L_1$  – indukčnost cívky,  $L_2$  – indukčnost vsázky,  $L_3$  – indukčnost stínění,  $R_1$  – odpor cívky,  $R_2$  – odpor vsázky,  $R_3$  – odpor stínění,  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$  – vzájemná indukčnost vsázky, cívky a stínění,  $I_1$  – proud cívky,  $I_2$  – proud vsázky,  $I_3$  – proud stínění pláště.  $U_g$  – napětí zdroje. [7]

## 6 Závěr

V posledních letech je velký tlak na výrobu co nejčistších materiálů a zároveň o nejmenší energetické ztráty během těchto procesů. Metoda studeného kelímku nabízí spojení těchto dvou požadavků dnešní doby. Tato metoda také nabízí bezpečné zakonzervování nebezpečného radioaktivního odpadu.

Za pomoci technologie studeného kelímku lze tavit jak elektricky vodivé, tak i elektricky nevodivé materiály při vysokých teplotách (až  $3000\text{C}^{\circ}$ ). U elektricky nevodivých materiálů musí předcházet takzvaný „start up“, to znamená přehřev elektricky nevodivého materiálu před samotným tavicím procesem, protože do nevodivých materiálů za normální teploty nelze naindukovat teplo přímo. Elektricky nevodivé materiály a izolanty se při zvyšující teplotě stávají elektricky vodivé i pro elektromagnetické vlnění. Mezi vodivé materiály v popředí vyniká svými vlastnostmi hlavně titan, tavit se ale i kobalt a nikl. V této práci je kobalt a nikl jen zmíněn, práce se spíše věnuje tavení titanu, vzhledem k jeho širokému využití pro jeho dobré mechanické, elektrické i teplotní vlastnosti. [7], [11], [13]

Mezi nevodivé tavené materiály patří především skupiny materiálů jako jsou oxidy kovů, skla, růst krystalů a další. K nevodivým materiálům se řadí i proces vitifikace jaderného odpadu pomocí tavení ve studeném kelímku. Možnost přepracování jaderného odpadu je již také možný, nicméně v této době jsou schopné tuto metodu implementovat jen velmi bohaté a vyspělé státy jako Francie, velká Británie, USA a Rusko. Za stávajících technologií, je přepracování jaderného odpadu finančně nákladnější, než je cena nového jaderného paliva o stejné hmotnosti. [1], [7], [15]

Hlavními přednostmi tavení ve studeném kelímku je možnost tavení materiálů s vysokou teplotou tání, získávání výtavků s velmi vysokou čistotou výtavku až na mezi měřitelnosti. Své využití nachází tato metoda i při výrobě lékařského materiálu, kde je důležitá především čistota materiálu, jeho dlouhá životnost a jeho nereaktivnost s tkáněmi které např. poskytují čistý titan a jeho slitiny.

## 7 Použitá literatura:

- [1] Kudryash, M. Experimental investigation of induction melting in cold crucible for high temperature processing of oxides using HF transistor powersupply. 1nd ed. SV Sierke Verlag. Honnover, 2011. 168 stran. ISBN 13:978-3-86844-330-1
- [2] Lukáš, D. Fyzika maxwellových rovnic a formulace okrajových úloh [online]. Seminář Helmholtzových rovnic. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Katedra aplikované matematiky. Ostrava. 2007 [cit. 03-10.04.2007]. Dostupné z:  
[https://homel.vsb.cz/~luk76/Teaching/MMEP/Fyzika\\_Maxwellovych\\_rovnic.pdf](https://homel.vsb.cz/~luk76/Teaching/MMEP/Fyzika_Maxwellovych_rovnic.pdf)
- [3] Klič, A., Volka, K., Dubcová, M., Fourierova transformace [online]. 3nd ed. Vysoká škola-technická v Praze. Ústav matematiky. Praha, 2002. 195 stran. Dostupné z:  
<http://old.vscht.cz/mat/Pavel.Pokorny/students/ft/skripta/Four.pdf>
- [4] Topinka, J. Tavení materiálů ve studeném kelímku [Online]. V Plzni, 2013. Bakalářská práce (Bc). Západočeská Universita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc. Dostupné z :  
[https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18721/1/Topinka\\_Studený\\_kelimek.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18721/1/Topinka_Studený_kelimek.pdf)
- [5] Umbrashko, A., Baake E., Jakovics, A. Melt flow and skull formation modelling possibilities for TiAl melting process in induction furnace with cold crucible [Online]. Modeling for electromagnetic processing, International scientific colloquium. Hannover. 2008 [cit. 27-29.10.2008]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/profile/Andris-Jakovics/publication/242678839\\_Melt\\_Flow\\_and\\_Skull\\_Formation\\_Modelling\\_Possibilities\\_for\\_TiAl\\_Melting\\_Process\\_in\\_Induction\\_Furnace\\_With\\_Cold\\_Crucible/links/565178a108ae1ef929725f33/Melt-Flow-and-Skull-Formation-Modelling-Possibilities-for-TiAl-Melting-Process-in-Induction-Furnace-With-Cold-Crucible.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andris-Jakovics/publication/242678839_Melt_Flow_and_Skull_Formation_Modelling_Possibilities_for_TiAl_Melting_Process_in_Induction_Furnace_With_Cold_Crucible/links/565178a108ae1ef929725f33/Melt-Flow-and-Skull-Formation-Modelling-Possibilities-for-TiAl-Melting-Process-in-Induction-Furnace-With-Cold-Crucible.pdf)
- [6] SUSEN, Laboratoř studených kelímků [online]. [cit. 2015]. Dostupné z:  
<http://susen2020.cz/projekty/infrastruktura/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/>.
- [7] Hradílek, Z., Lázníčková, I., Král, V. Elektrotepelná technika. České vysoké učení technické v Praze. Praha, 2011. 266 stran. ISBN 978-80-01-04938-9
- [8] Acheson, E. G., Tikkanen A. Silicon carbide chemical compound. [online].  
<https://www.britannica.com/biography/Edward-Goodrich-Acheson>
- [9] Efficient melting in coreless induction furnace [Online]. ETSU, Hrwel, Didcot, Oxfordshire, OX11 0RA. Crown copiright, 2000. 49 stran. Dostupné z:  
[https://lists.man.lodz.pl/pipermail/odlew-pl/2012/10/att-0003/guide\\_coreless\\_induction\\_furnaces.pdf](https://lists.man.lodz.pl/pipermail/odlew-pl/2012/10/att-0003/guide_coreless_induction_furnaces.pdf)
- [10] INDUSTRIAL HEATING, induction skull meltin offers Ti investment casting benefits [online]. [cit. 3..2015]. Dostuné z:  
<https://www.industrialheating.com/articles/83906-induction-skull-melting-offers-ti-investment-casting-benefits>
- [11] Bojarevics, V., Pericleous, K., Harding, R., Wiskins, M. ; Cold crucible Melting of Reactive Metals using combined DC and AC Magnetic Fields [online]. [cit. 3.5.2015]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/233784716\\_Cold\\_crucible\\_melting\\_of\\_reactive\\_metals\\_using\\_combined\\_DC\\_and\\_AC\\_magnetic\\_fields](https://www.researchgate.net/publication/233784716_Cold_crucible_melting_of_reactive_metals_using_combined_DC_and_AC_magnetic_fields)

- [12] Herrero-Dorca, N., Bernal D., Hurtado I. Induction skull Melting of Ti-6Al-4V: Process control and efficiency optimization. MDPI. Basel Switzerland, 2019. 11 stran. DOI:10.3390/met9050539. Dostupné z: <https://www.proquest.com/openview/1c225d1fec30e5cd1d174a2c848c8e66/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032361>
- [13] Nacke, B., Kudryash, M., Behrens, T., Niemann, B., Lopukh, D., Martynov, A., Chepluk, S. Induction skull melting of oxides and glasses in cold crucible. International scientific colloquium. Modelling for material processing. Riga, 2006. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228517696\\_Induction\\_Skull\\_Melting\\_of\\_Oxides\\_and\\_Glasses\\_in\\_Cold\\_Crucible](https://www.researchgate.net/publication/228517696_Induction_Skull_Melting_of_Oxides_and_Glasses_in_Cold_Crucible)
- [14] Umbrashko, A., Baake, E., Jakovics, A. Melt flow and skull formation modelling possibilities for TiAl melting process in induction furnace with cold crucible. International scientific colloquium. Modelling for electromagnetic processing. Hannover, 2008. 7 stran. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Andris-Jakovics/publication/242678839\\_Melt\\_Flow\\_and\\_Skull\\_Formation\\_Modelling\\_Possibilities\\_for\\_TiAl\\_Melting\\_Process\\_in\\_Induction\\_Furnace\\_With\\_Cold\\_Crucible/links/565178a108ae1ef929725f33/Melt-Flow-and-Skull-Formation-Modelling-Possibilities-for-TiAl-Melting-Process-in-Induction-Furnace-With-Cold-Crucible.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andris-Jakovics/publication/242678839_Melt_Flow_and_Skull_Formation_Modelling_Possibilities_for_TiAl_Melting_Process_in_Induction_Furnace_With_Cold_Crucible/links/565178a108ae1ef929725f33/Melt-Flow-and-Skull-Formation-Modelling-Possibilities-for-TiAl-Melting-Process-in-Induction-Furnace-With-Cold-Crucible.pdf)
- [15] Radioaktivní odpad. Centrum experimentální geotechniky [online]. 2002 [cit. 19.09.2006]. Dostupné z: [https://ceg.fsv.cvut.cz/ceg-old/CZ/ceg-uvod/02\\_ukladani.htm#rozd%C4%9Blen%C3%AD%20odpad%C5%AF](https://ceg.fsv.cvut.cz/ceg-old/CZ/ceg-uvod/02_ukladani.htm#rozd%C4%9Blen%C3%AD%20odpad%C5%AF)
- [16] Kršňák, J. Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích [Online]. V Plzni, 2015. Bakalářská práce (Bc). Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektrotechniky. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18654/1/Bakalarska\\_prace\\_Josef\\_Krsnak\\_Taveni\\_kovu\\_v\\_indukcnich\\_kelimkovych\\_pecich.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18654/1/Bakalarska_prace_Josef_Krsnak_Taveni_kovu_v_indukcnich_kelimkovych_pecich.pdf)

(U každého odstavce je na jeho konci uveden zdroj. Pokud u části textu, odrážek, nebo odstavce není uvedený zdroj, platí pro tuto část textu zdroj uvedený u následujícího odstavce.)