

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Přenos energie v systému induktor – vsázka při tavení  
materiálů ve studeném kelímku**

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

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří TOPINKA**  
Osobní číslo: **E15N0044P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Přenos energie v systému induktor - vsázka při tavení materiálů ve studeném kelímku**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište stručně účel tavení materiálů ve studeném kelímku
2. Uveďte fyzikální principy tavení elektricky vodivých materiálů v indukční kelímkové peci a ve studeném kelímku
3. Uveďte princip tavení elektricky nevodivých materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku
4. Proveďte úvahu o podmínkách efektivního tavení ve studeném kelímku
5. Vyhodnoťte studený kelímek kritériem 3E a vyslovte závěry pro praxi

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

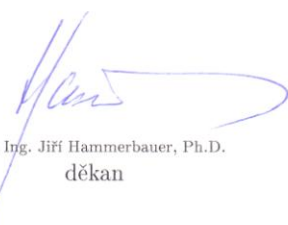
**1. Literaturu určí vedoucí práce při předběžném kontaktu**

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

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



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

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá indukčním ohřevem vsázky pomocí elektromagnetické indukce. Pro tyto účely je popsána technologie studeného kelímku a indukční kelímkové pece pro tavení elektricky vodivých vsázek, a pro studený kelímek také možnost tavení elektricky běžně nevodivých vsázek a vitrifikace radioaktivních odpadů. Jsou zmíněny konstrukční provedení základních součástí obou zařízení, uvedeny jejich výhody, nevýhody, a praktické využití. Jsou rozebrány možnosti zpracování taveniny a krystalizace vsázky ve studeném kelímku, a navíc popsány jevy mající vliv na efektivní tavení vsázky ve studeném kelímku.

## **Klíčová slova**

Indukční ohřev, Maxwellovy rovnice, studený kelímek, segmentový studený kelímek, induktorový studený kelímek, indukční kelímková pec, krystalizace, startovací proces, skinefekt, elektromagnetická průzařnost, vitrifikace odpadů

## **Abstract**

Presented diploma thesis describes induction heating of charge by electromagnetic induction. For this purpose, technologies of a cold crucible and an induction coreless furnace for melting electrically conductive charges are described, and also using a cold crucible for melting of electrically non-conductive charges, and for a possibility of vitrification of radioactive wastes. Design and constructional solutions of all basic components of these two devices are mentioned, their advantages and disadvantages, and their practical application. Possibilities of melt processing and crystallisation of a batch in a cold crucible are analyzed, and in addition, phenomena influencing an effective melting of the batch in a cold crucible are described.

## **Key words**

Induction heating, Maxwell equations, cold crucible, segmented cold crucible, inductor cold crucible, induction coreless furnace, crystallization, start-up process, skin effect, electromagnetic transparency effect, vitrification of waste

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 14.5.2017

Jiří Topinka

## **Poděkování**

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

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE</b> .....	<b>12</b>
1.1 MAXWELLOVY ROVNICE .....	12
1.2 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR .....	13
1.3 SKINEFEKT A RELATIVNÍ HLOUBKA VNIKU ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ DO ELEKTRICKY VODIVÉHO PROSTŘEDÍ .....	14
1.4 JEV BLÍZKOSTI A KRUHOVÝ EFEKT .....	15
1.5 VLNOVÉ ROVNICE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE.....	16
1.6 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ .....	17
1.7 ELEKTROMAGNETICKÁ PRŮZAŘNOST .....	18
1.8 ELEKTRODYNAMICKÉ VÍŘENÍ A TLAK.....	19
<b>2 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ V INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECI</b> .....	<b>21</b>
2.1 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC .....	21
2.2 PROVEDENÍ KELÍMKU INDUKČNÍ PECE .....	21
2.3 INDUKTOR KELÍMKOVÉ PECE, SYSTÉM CHLAZENÍ .....	26
2.4 NAPÁJECÍ ZDROJE PRO INDUKČNÍ PECE.....	28
2.5 ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ INDUKČNÍCH PECÍ.....	31
2.6 MĚŘENÍ TEPLoty UVNITŘ INDUKČNÍ PECE .....	33
2.7 TAVENÍ A RECYKLACE HLINÍKU V INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECI.....	34
2.8 TAVENÍ VE VAKUOVÉ INDUKČNÍ PECI (VIM, VACUUM INDUCTION MELTING).....	38
<b>3 STUDENÝ KELÍMEK</b> .....	<b>41</b>
3.1 TECHNOLOGIE STUDENÉHO KELÍMKU.....	41
3.2 INDUKTOROVÝ STUDENÝ KELÍMEK.....	42
3.3 SEGMENTOVÉ PROVEDENÍ STUDENÉHO KELÍMKU .....	43
3.4 INDUKTOR A CHLAZENÍ STUDENÉHO KELÍMKU .....	44
3.5 TAVICÍ KOMORA A STÍNĚNÍ STUDENÉHO KELÍMKU .....	45
3.6 ZPRACOVÁNÍ TAVENINY .....	46
<b>4 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU</b> .....	<b>49</b>
4.1 SPECIÁLNÍ SLITINY, REAKTIVNÍ KOVY, A JEJICH TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU .....	49
4.2 TAVENÍ TITANU A JEHO SLITIN.....	50
4.3 PROCES ČIŠTĚNÍ TITANU OD NEŽÁDOUCÍCH PŘÍMĚSÍ .....	53
<b>5 TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU</b> .....	<b>55</b>
5.1 STARTOVACÍ PROCES PRO TAVENÍ.....	55
5.2 CHLADNUTÍ PŘETAVENÉ VSÁZKY A JEJÍ KRYSTALIZACE.....	57
5.3 CZOCHRALSKÉHO METODA RŮSTU KRYSTALŮ .....	57
5.4 METODA PŘÍMÉ KRYSTALIZACE .....	59
5.5 VYSOKOTEPLOTNÍ SYNTÉZA OXIDŮ, TAVENÍ KERAMIK A SKEL VE STUDENÉM KELÍMKU .....	60
5.6 VITRIFIKACE ODPADU VE STUDENÉM KELÍMKU .....	63
<b>6 HODNOCENÍ STUDENÉHO KELÍMKU METODOU 3E, EFEKTIVITA TAVENÍ A ZÁVĚRY PRO PRAXI</b> .....	<b>65</b>
6.1 EKOLOGICKÉ HLEDISKO VYUŽITÍ STUDENÉHO KELÍMKU .....	65
6.2 EFEKTIVNÍ TAVENÍ VSÁZKY VE STUDENÉM KELÍMKU .....	66



6.3	EKONOMIKA PROVOZU STUDENÉHO KELÍMKU .....	68
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>ZDROJE A LITERATURA .....</b>	<b>72</b>

## Seznam symbolů a zkratek

Označení	Popis	Jednotka
$E$	Intenzita elektrického pole	V/m
$H$	Intenzita magnetického pole	A/m
$D$	Elektrická indukce	C/m <sup>2</sup>
$B$	Magnetická indukce	T
$I$	Elektrický proud	A
$U$	Elektrické napětí	V
$J$	Proudová hustota	A/m <sup>2</sup>
$S$	Poyntingův vektor	W/m <sup>2</sup>
$a$	Hloubka vniku elmag. vlnění	m
$d$	Průměr válcové vsázky	m
$P$	Elektrický výkon	W
$m$	Hmotnost (vsázky)	kg
$Q$	Elektrický náboj	C
$V$	Objem	m <sup>3</sup>
$k$	Konstanta šíření vlnění	-
$f$	Frekvence	Hz
$e$	Eulerovo číslo	-
$T$	Teplota	°C
$\eta$	Účinnost	-
$\Phi$	Magnetický tok	Wb
$\mu_r$	Relativní permeabilita	-
$\mu_0$	Permeabilita vakua	H/m
$x_2$	Poměr průměru vsázky a hloubky vniku	-
$\varepsilon_0$	Permitivita vakua	F/m
$\varepsilon_r$	Relativní permitivita	-
$Re$	Reynoldsovo číslo	-
$h$	Vzednutí hladiny taveniny	m
$q$	Měrný příkon do vsázky	W/m <sup>2</sup>
$p$	Elektrodynamický tlak ve vsázce	Pa
$\varphi$	Reflektivita povrchu	-

## Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na tavení materiálů ve studeném kelímku. Cílem této práce je rozbor technologie studeného kelímku při tavení běžně elektricky nevodivých materiálů, a možnosti studeného kelímku a indukční kelímkové pece v případě tavení materiálů elektricky vodivých.

Na přelomu 19. a 20. století došlo k zásadním pokrokům v oblasti tavení materiálů na principu elektromagnetické indukce. Již v roce 1887 navrhnul S. de Ferranti první indukční pec pro tavení kovů, která posloužila jako předloha pro podobná zařízení navržená a zdokonalená v dalších desetiletích. V roce 1899 navrhl a sestrojil první reálně použitelné zařízení pro indukční tavení kovů F. A. Kjellin. Tato indukční pec byla konstruována na 50 kg vsázky oceli, značnou nevýhodu ale tvořily vysoké energetické nároky. Zařízení této doby pracovala se síťovou frekvencí 50, resp. 60 Hz.[1],[2]

K vývoji indukčních pecí značně přispěl pokrok v oblasti vysokofrekvenčních zdrojů napájení: motor-generátor, jiskrový generátor, vysokofrekvenční elektronkový generátor. V roce 1916 E. F. Northrup navrhnul a následně také nechal patentovat kelímkovou pec využívající k tavení kovů frekvenci 20 kHz a v roce 1930 pak V. P. Vologdin sestrojil indukční kelímkovou pec s pracovní frekvencí 200 kHz. V roce 1931 byl vydán patent společnosti Siemens & Halske na tavení kovů elektromagnetickou indukcí ve vodou chlazeném kelímku, tzv. studený kelímek.[1],[2]

K dalšímu rozvoji technologie studeného kelímku docházelo v druhé polovině 20. století. Velkou výhodou byla možnost tavit jak elektricky vodivé, tak i nevodivé materiály s vysokým bodem tavení. Z elektricky vodivých materiálů jmenovitě speciální oceli, slitiny titanu, hliníku, hořčíku, chromu, a dalších. V případě nevodivých materiálů se pak jedná o speciální keramiky, monokrystaly zejména křemíku, oxidy a skla. Tyto materiály nacházejí uplatnění v širokém spektru aplikací – od automobilového průmyslu, zdravotnictví, po vesmírné programy.[5]

# 1 Teorie elektromagnetického pole

## 1.1 Maxwellovy rovnice

Elektromagnetické pole je popsáno Maxwellovými rovnicemi, které vyjadřují vzájemnou provázanost veličin elektrického a magnetického pole. Elektrické a magnetické pole tvoří jediný fyzikální celek, který nazýváme elektromagnetické pole. Lze je zapsat buď v integrálním, nebo diferenciálním tvaru. Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté konečně velké oblasti a platí obecně. V diferenciálním tvaru pak tyto rovnice platí v určitém bodu takovéto oblasti. Vektory intenzity elektrického a magnetického pole  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  jsou na sebe vzájemně kolmé.[5],[12]

První Maxwellova rovnice, zákon celkového proudu, říká, že cirkulace vektoru intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  délky  $l$  je rovna součtu celkového proudu  $I$  a posuvného proudu  $\frac{d\psi}{dt}$ , spřaženého křivkou  $c$  (1.1.1). Křivka  $c$  a libovolná plocha  $S$ , jež křivku obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě. V diferenciálním tvaru (1.1.2) je pak vyjádřena rovnost rotace vektoru intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  a součtu proudové hustoty  $\mathbf{J}$  a posuvného Maxwellova proudu  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ . [5],[12]

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (1.1.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.1.2)$$

Druhá Maxwellova rovnice, zákon elektromagnetické indukce pak říká, že cirkulace vektoru elektrické intenzity  $\mathbf{E}$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna záporně vzaté časové derivaci magnetického indukčního toku  $\frac{d\phi}{dt}$  spřaženého křivkou  $c$  (1.1.3). Křivka  $c$  a libovolná plocha  $S$ , jíž křivka obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě. Vlivem časově proměnného magnetického pole tedy vzniká elektrické pole a toto pole je vírové (1.1.4).[5],[12]

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1.3)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1.4)$$

Třetí Maxwellova rovnice, Gaussův zákon elektrostatiky, uvádí, že elektrický

indukční tok  $\mathbf{D}$  libovolnou vně orientovanou plochou  $S$  je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti ohraničené plochou  $S$  (1.1.5). Elektrické pole volných nábojů je zřídlové (1.1.6). [5],[12]

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (1.1.5)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (1.1.6)$$

Čtvrtá Maxwellova rovnice, Zákon spojitosti indukčního toku, říká, že magnetický indukční tok  $\mathbf{B}$  libovolnou uzavřenou orientovanou plochou  $S$  je roven nule (1.1.7). Magnetické pole je nezřídlové, neexistuje magnetický monopol (1.1.8).[5],[12]

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.1.7)$$

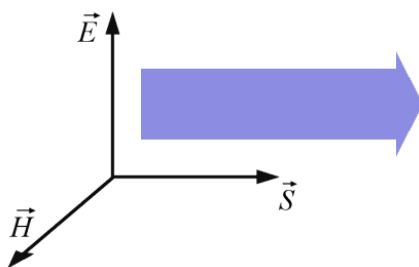
$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1.1.8)$$

## 1.2 Poyntingův zářivý vektor

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] \quad [W/m^2] \quad (1.2.1)$$

Poyntingův zářivý vektor  $\mathbf{S}$  je vektorový součin vektorů intenzity elektrického a magnetického pole. Vektory intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  a magnetického pole  $\mathbf{H}$  jsou kolmé k sobě i ke směru šíření elektromagnetické vlny. Vektory  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{S}$  tvoří pravotočivou soustavu a Poyntingův vektor je kolmý na rovinu, v níž leží  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ . Poyntingův vektor představuje tok vyzařované energie jednotkou plochy za jednotku času, absolutní hodnota Poyntingova vektoru pak udává měrný výkon. Energie není přenášena vnitřkem vodiče, ale prostorem okolo něj. Celkový výkon vycházející z tělesa o objemu  $V$  je dán rovnicí:[5]

$$\int_V \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV = \int_V \operatorname{div} \mathbf{S} dV = \oint_A \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.2.2)$$



Obr. 1.2.1: Poyntingův zářivý vektor.[10]

### 1.3 Skinefekt a relativní hloubka vniku elektromagnetického záření do elektricky vodivého prostředí

Protéká-li vodičem střídavý proud, rozložení proudové hustoty v jeho průřezu není lineární. Hodnota proudové hustoty bude klesat se vzdáleností od povrchu vodiče směrem do jeho středu vlivem působení vířivých proudů. Hloubka vniku záření je definována jako hloubka pod povrchem vodiče, kde proudová hustota klesne na  $1/e$  (přibližně 37% proudové hustoty  $J_0$  na povrchu vodiče). Pronikající elektromagnetické vlnění se ale ve vsázce utlumuje, hloubka vniku vlnění do elektricky vodivého prostředí závisí na kmitočtu proudu induktorem, permeabilitě a konduktivitě vodiče, resp. vsázky (1.3.1).[4]

$$a = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_r \mu_0 \gamma}} \quad (1.3.1)$$

kde  $a$  [m] je hloubka vniku elmag. záření,  $f$  [Hz] frekvence,  $\mu_r$  [-] relativní permeabilita,  $\mu_0$  [H/m] permeabilita vakua,  $\gamma$  [S/m] elektrická vodivost. Přibližná hodnota proudové hustoty ve vodiči je pak určena jako

$$J = J_0 \cdot e^{-y/a} \quad (1.3.2)$$

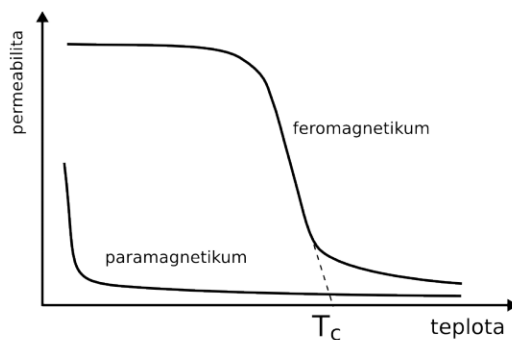
kde  $J$  [A/m] je proudová hustota,  $y$  [m] je vzdálenost od povrchu vodiče,  $J_0$  [A/m] je proudová hustota na povrchu vodiče, a  $a$  [m] je hloubka vniku elektromagnetického záření. (1.3.1). [4]

Tab. 1.3.1: Závislost hloubky vniku na kmitočtu a teplotě [4]

$f$ [kHz]	Hloubka vniku $a$ [mm]					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
<b>1</b>	2,100	7,100	2,700	7,000	1,800	15,900
<b>10</b>	0,670	2,250	0,860	2,200	0,560	5,000
<b>1000</b>	0,067	0,220	0,086	0,220	0,056	0,500

Jak je znázorněno v tabulce 1.1, hloubka vniku  $a$  se mění s narůstající teplotou. V případě indukčních ohřevů feromagnetických materiálů je nutno tento jev uvažovat,

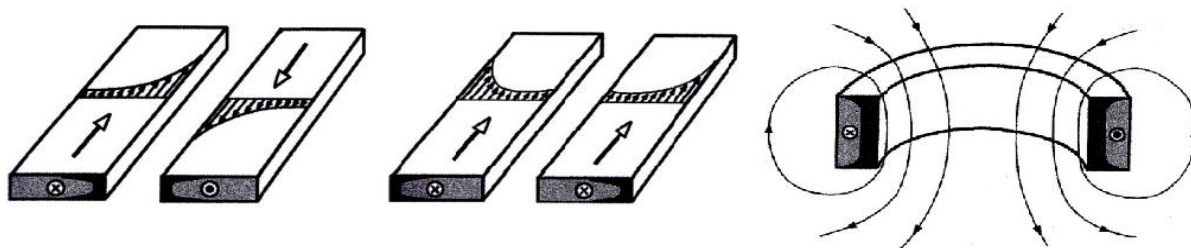
protože hloubka vniku elektromagnetického záření se může během tavicího cyklu zvýšit několikanásobně a tavená vsázka se tak může v průběhu procesu změnit z elektromagneticky neprůzařné na průzařnou. To je způsobeno především změnou relativní permeability a proto je nutno frekvenci napájení indukčního ohřevu nastavit tak, aby hloubka vniku odpovídala hodnotě relativní permeability  $\mu_r = 1$  za Curieovým bodem  $T_c$ . [4]



Obr. 1.3.1: Změna relativní permeability v případě ohřevu materiálů, Curieův bod  $T_c$ . [13]

#### 1.4 Jev blízkosti a kruhový efekt

Mějme dva vodiče u sebe protékané proudem. V případě, kdy oběma vodiči protékají harmonické proudy, dochází k jevu blízkosti. Proudová hustota ve vodičích je vlivem vzájemného působení magnetických polí vodičů v případě opačně orientovaných proudů vytěsňována na vnitřní stranu vodičů, a v případě souhlasně orientovaných proudů na vnější stranu (Obr. 1.4.1 a), b)). Tento jev bude tím výraznější, čím budou tyto vodiče blíže u sebe. Je-li navíc z těchto vodičů vytvořena cívka, vzniká k tomu i kruhový efekt, kdy je uvnitř této cívky větší koncentrace magnetického pole (Obr. 1.4.1c)).



Obr. 1.4.1: Jev blízkosti, rozložení proudové hustoty ve vodičích v případě proudů a) opačně orientovaných (vlevo), b) proudů se stejnou orientací (uprostřed), c) kruhový efekt pro cívku s vodičem obdélníkového průřezu (vpravo).[4]

Oba tyto jevy, navíc v kombinaci se skinefektem, zásadním způsobem ovlivňují návrh induktorů pro indukční ohřevy. Proudová hustota není rovnoměrně rozložena po celém průřezu induktoru, zvyšují se ohmické ztráty a je tedy úměrně tomu nutné dimenzovat chlazení induktoru, resp. jeho tvar.[4]

## 1.5 Vlnové rovnice elektromagnetického pole

Při průchodu proudu rovinným zářičem vzniká v jeho okolí rovinné elektromagnetické vlnění, pro válcovou cívku pak platí, že vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění. Podle konfigurace pole ve vsázce může být elektromagnetické vlnění podélné nebo příčné, podle prostředí, kterým se vlna šíří, elektricky vodivé nebo nevodivé.[5]

Vlnové rovnice harmonického elektromagnetického pole se získají transformací Maxwellových rovnic na rovnice, které budou vyjádřeny pouze jednou proměnnou složky intenzity elektromagnetického pole, tj. buď elektrickou  $\mathbf{E}$ , nebo magnetickou  $\mathbf{H}$ . Vlnové rovnice pro časově harmonický průběh obou složek pak vyjadřují šíření magnetické a elektrické složky stejné harmonické vlny v elektricky libovolném prostředí.[5]

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j\omega \gamma \mu) \mathbf{H} = \nabla^2 \mathbf{H} + \mathbf{k}^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1.5.1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j\omega \gamma \mu) \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.5.2)$$

$\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  jsou to rotující fázory v komplexní rovině, pro které platí

$$\mathbf{E} = E_m e^{j\omega t}, \quad \mathbf{H} = E_m e^{j\omega t} \quad (1.5.3)$$

Elektrické vlastnosti prostředí a úhlová rychlost vlnění jsou souhrnně uvedeny v konstantě šíření vlnění  $k$ , tzv. vlnové číslo. Vlnové číslo je všeobecně komplexním číslem, tj. má reálnou a imaginární složku. Reálná složka vlnového čísla  $\alpha$  se nazývá fázová konstanta a imaginární složka  $\beta$  je činitel tlumení.[5]

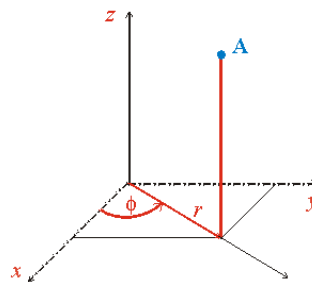
$$\mathbf{k}^2 = (\omega^2 \varepsilon \mu - j\omega \gamma \mu) = -j\omega \mu (\gamma + j\omega \varepsilon) \quad (1.5.4)$$



$$\mathbf{k} = \sqrt{-j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon)} = \alpha - j\beta \quad (1.5.5)$$

## 1.6 Válcové elektromagnetické vlnění

Válcové elektromagnetické vlnění vzniká v dutině válcové cívky protékané střídavým proudem. Indukované vířivé proudy se v tomto souosém systému uzavírají po obvodu vsázky v rovinách kolmých na společnou osu cívky a vsázky. Hustota proudu se zmenšuje směrem k této ose. V důsledku utlumování vlnění ve vodivé vsázce směrem k její ose dochází útlumu magnetické složky intenzity pole z maximální hodnoty na povrchu vsázky na minimální hodnotu k ose vsázky. V tomto uspořádání je axiální (podélné) magnetické pole a radiální elektrické pole. Pro válcové elektromagnetické vlnění je vhodné zavést válcovou soustavu souřadnic  $(r, \varphi, z)$  namísto kartézských souřadnic  $(x, y, z)$ . [5]



Obr. 1.6.1: Válcový souřadný systém. [5]

Pro válcové elektromagnetické vlnění se vyjadřují rovnice v cylindrických souřadnicích a pro jednorozměrnou úlohu se použije transformace

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \quad (1.6.1)$$

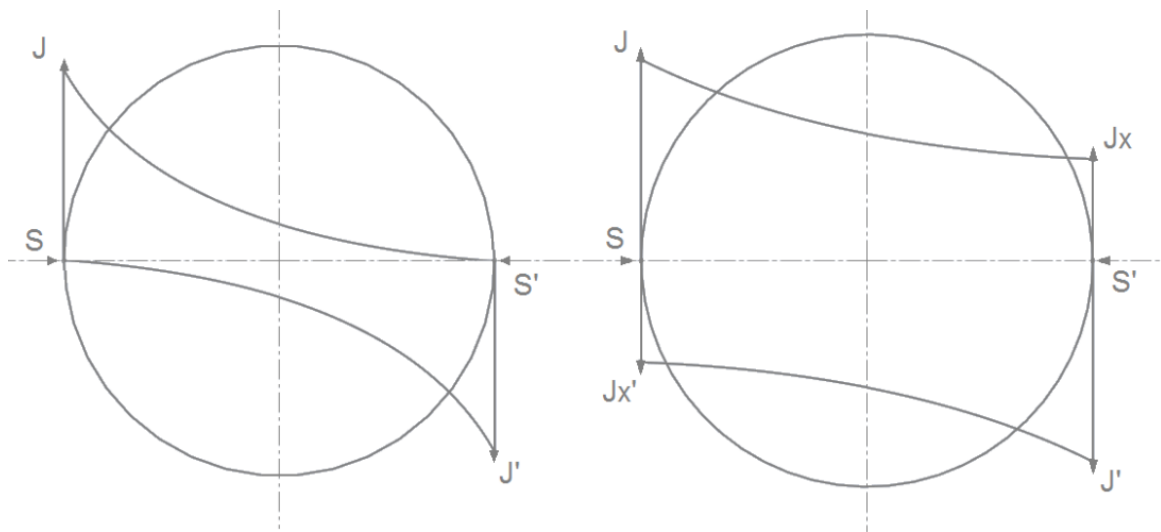
vlnové rovnice válcové elektromagnetické vlny pro všeobecné prostředí mají pak tvar: [5]

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{H}}{dr} + \mathbf{k}^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1.6.2)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{E}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{E}}{dr} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.6.3)$$

## 1.7 Elektromagnetická průzařnost

Elektromagnetická průzařnost je nežádoucí jev, který nastává při nevhodně zvolených parametrech indukčního ohřevu, vliv má zejména nevhodná volba kmitočtu. V případě nevhodně zvoleného průměru indukci ohřívaného tělesa, resp. vsázky, dochází pak k jevu elektromagnetické průzařnosti – vlnění prochází vsázkou, ale neohřívá ji dostatečně.



Obr. 1.7.1: Válcová vsázka, na kterou radiálně dopadá z induktoru elektromagnetické vlnění, vsázka vlevo má pak průměr vsázky optimální nebo blížíci se optimu, vsázka vpravo má malý argument  $x_2$ , průměr vsázky je moc malý a dochází tak k elektromagnetické průzařnosti.

Pro množství tepla, které se vyvine ve válcové vsázce o poloměru  $r_2$  [m] pak platí

$$P_{21} = \rho \pi x_2 \cdot P_{(x_2)} \cdot H_2^2 \quad (1.7.1)$$

kde  $P_{21}$  [W/m] je množství tepla ve vsázce,  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] je měrná rezistivita vsázky,  $P_{(x_2)}$  [W] je výkon,  $H_2$  [A/m] je intenzita magnetického pole na povrchu vsázky, a argument  $x_2$  [-] je vyjádřen jako

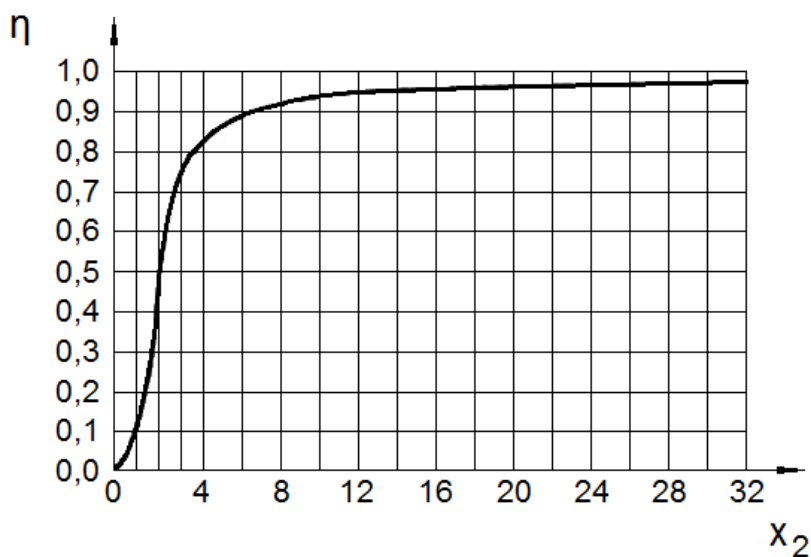
$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \quad (1.7.2)$$

kde  $a$  [m] je hloubka vniku elektromagnetického vlnění. Pro indukční tavení materiálů je nevhodné, aby vrstva, kde vzniká teplo, byla moc tenká. Takového rozložení se využívá

např. pro kalení či žíhání, ne však pro tavení. Naopak nesmí docházet při indukčním ohřevu k jevu pružnosti, a proto lze označit ideální poloměr indukčně tavené válcové vsázky pro konkrétní kmitočet, resp. hloubku vniku jako

$$r_2 = (2,5 \div 3,0) \cdot a_2 \quad (1.7.3)$$

V Obr. 1.7.1 jsou vyznačeny průběhy proudové hustoty  $J$ ,  $J'$  vyvolané dopadem elektromagnetického vlnění  $S$ ,  $S'$ . Obě proudové hustoty mají vzájemně opačný smysl a výsledná proudová hustota ve vsázce je tedy dána jejich rozdílem, což v případě malých hodnot argumentu  $x_2$  bude znamenat nízkou účinnost přenosu energie z induktoru do vsázky.[5],[22].



Obr. 1.7.2: Závislost účinnosti absorbování elektromagnetické energie, která se přemění ve vsázce na teplo na argumentu  $x_2$  válcové vsázky.[22]

## 1.8 Elektrodynamické víření a tlak

V případě elektromagnetických indukčních zařízení pro tavení materiálů dochází také k intenzivnímu víření taveniny vlivem působení střídavého elektromagnetického pole. Toto víření roztaveného materiálu je důležitou vlastností jak studeného kelímku, tak i indukční kelímkové pece a způsobí dokonalou homogenizaci taveniny při procesu, které by nebylo možno dosáhnout při jiném než indukčním způsobu tavení. U indukčních tavicích zařízení způsobuje elektrodynamický tlak zvednutí hladiny v místě osy vsázky, které vyvolá neustálé víření taveniny. Skutečné vzdutí taveniny je však vždy menších hodnot,

než hodnota teoretického vzednutí této hladiny, která je vyjádřena jako

$$h_s = 6,40 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\mu_r}{s} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot H_{2s} \right)^2 \quad (1.8.1)$$

kde  $h_s$  [m] je teoretické vzednutí hladiny taveniny,  $\mu_r$  [-] je relativní permeabilita,  $s$  [kg/m<sup>3</sup>] je měrná hmotnost,  $H_{2s}$  [A/m] intenzita magnetického pole na povrchu vsázky. Hodnota elektromagnetického tlaku pak může být vyjádřena v závislosti na měrném příkonu, který je přiváděn do vsázky, kde měrný příkon je

$$q = \frac{\pi}{\sqrt{10}} \cdot \sqrt{(f \cdot \rho \cdot \mu_r)} \cdot 10^{-3} \cdot I_{11}^2 \quad (1.8.2)$$

a elektromagnetický tlak pak

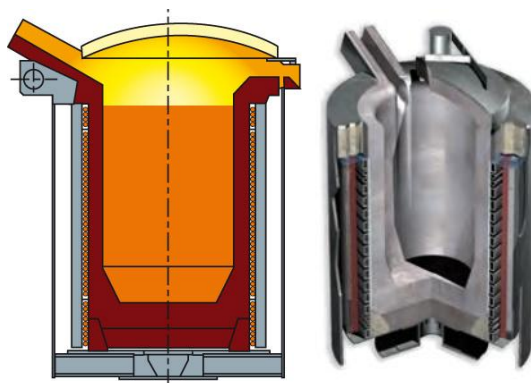
$$p_{os} = 3,162 \cdot 10^{-4} \cdot q \sqrt{\left( \frac{\mu_r}{\rho \cdot f} \right)} \quad (1.8.3)$$

přičemž  $q$  [W/m<sup>2</sup>] je měrný příkon do vsázky,  $f$  [Hz] je frekvence proudu induktorem,  $\rho$  [Ω.m] je měrná rezistivita vsázky,  $\mu_r$  [-] je relativní permeabilita,  $I_{11}$  [A] proud v induktoru o osové délce 1 m,  $p_{os}$  [Pa] elektrodynamický tlak ve vsázce.[22]

## 2 Tavení elektricky vodivých materiálů v indukční kelímkové peci

### 2.1 Indukční kelímková pec

Indukční kelímková pec je zařízení pro tavení elektricky vodivých materiálů za pomoci elektromagnetické indukce. Mezi hlavní přednosti tohoto způsobu tavení materiálů patří dobrá účinnost (70 – 75 %) způsobená vznikem tepla přímo uvnitř ohřívaného materiálu, snadné řízení celého procesu, a dobrá výsledná čistota a homogenita taveniny. Tyto pece se nejčastěji používají pro zpracování oceli, litiny, či neželezných kovů (zejména hliníku a mědi). Mezi hlavní součásti patří kelímek, ve kterém je tavený materiál. Tento kelímek je buď elektricky nevodivý, nebo může být použit i elektricky vodivý kelímek. Kelímek je umístěn uvnitř induktoru, který je z vinutého dutého měděného vodiče a který je vnitřně chlazený vodou. Celé zařízení musí být stíněno, ať už svazky transformátorových plechů, či vodivým pláštěm. Mezi další součásti patří řídicí systémy, systémy napájení, kontrola atmosféry. Indukční kelímková pec funguje na podobném principu jako vzduchový transformátor. Induktor umístěný okolo kelímku indukuje do vsázky uvnitř kelímku elektromagnetické vlnění, vsázka se tedy chová jako sekundární vinutí transformátoru o jednom závitě. To způsobí relativně rychlý ohřev vsázky a její následné míchání vlivem elektrodynamických sil. Výhodou tohoto jevu je fakt, že výsledný ingot má dobrou čistotu, a je homogenní. Naopak nevýhodou při špatně zvolené frekvenci může dojít i k erozi stěny keramického kelímku, a dále také k vysokému vzednutí hladiny taveniny nebo k elektromagnetické průžažnosti vsázky.[6],[7],[22]



Obr. 2.1.1: Indukční kelímková pec [8],[14]

### 2.2 Provedení kelímku indukční pece

V případě kelímkové indukční pece bývá nejčastěji použit kelímek z keramiky na

bázi oxidů křemíku, hořčíku a hliníku s přidavkem dalších materiálů, sloužících jako pojivo. Konkrétní výběr materiálu kelímku je ovlivněn v první řadě teplotou taveniny, typem kovu, resp. slitiny, která má být tavena. Vliv má také použitá frekvence napájení, způsob a doba tavicího procesu. Průmyslové indukční pece jsou nejčastěji vyzdívané materiálem na bázi oxidu křemičitého, především kvůli dobrým provozním vlastnostem a ceně tohoto materiálu. Na rozdíl od oxidů hliníku či hořčíku má totiž oxid křemičitý lepší odolnost proti působení strusky vytvářené při tavení na stěně kelímku a větší odolnost vůči teplotním rázům. Velké indukční kelímkové pece navíc mohou být vyzdívané formou cihel, u malých a středních pecí jde výlučně o monolitickou vyzdívkou vytvořenou suchým pýchováním. Jako pojivo materiálu žáruvzdorné vyzdívkové pece bývá použit oxid boritý, procentuální podíl v celkovém množství pak závisí na provozních parametrech pece. Při předběžném zpracování materiálu dochází k drcení na konkrétní velikost zrna a následnému přidání pojiva. Pro dosažení maximální možné hustoty vyzdívkové pece je potřeba smíchat správný poměr zrna, nejčastěji pak: [15],[19]

Tab. 2.2.1: Příklad zrnitosti žáruvzdorného materiálu kelímku indukční pece a % podílu jednotlivých zrnitostí v objemu materiálu této vyzdívkové pece. [19]

Hrubé zrno	Středně hrubé zrno	Jemné zrno	Ultra jemné zrno
>850 $\mu\text{m}$	850 - 200 $\mu\text{m}$	200 - 63 $\mu\text{m}$	<63 $\mu\text{m}$
33%	30%	17%	20%

Tab. 2.2.2: Příklad chemického složení materiálu kelímku na bázi křemíku,  $\text{B}_2\text{O}_3$  zde slouží jako pojivo. [20]

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{B}_2\text{O}_3$
98,80 %	0,80 %	0,18 %	0,22 %

Tab. 2.2.3: Další materiály kelímku indukční pece a jejich vlastnosti a použití. [57]

Materiál kelímku	Max. teplota [°C]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Odolnost vůči teplotním rázům	Použití pro typ vsázky
MgO	1600	2,8	Dobrá	Speciální slitiny, ocel
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1900	3,7	Dobrá	Speciální slitiny, ocel
$\text{ZrO}_2$	2300	5,4	Horší	Speciální slitiny, ocel
Grafit	2300	1,5	Výborná	Měď, hliník

V určitých případech lze také použít elektricky vodivý kelímek, nejčastěji na bázi litiny, oceli, nebo grafitu. Při použití elektricky vodivého kelímku je pomocí vířivých proudů ohříván tento kelímek, a teplo se tak do vsázky přenáší především vedením. Tento způsob konstrukce indukční kelímkové pece se zpravidla využívá pro tavení materiálů s nízkou rezistivitou, kupříkladu pro měď, hliník, mosaz, či některé vzácné kovy.[4]



Obr. 2.2.2: a) Působení taveniny na vyzdívku kelímku indukční pece (vlevo), b) Havárie při erupci rozžhavené vsázky mimo kelímek, kontakt taveniny s vlhkostí (vpravo).[15]

Pro indukční pec s nevodivým kelímkem platí, že je potřeba použít co nejtenčí stěnu tohoto kelímku, aby se předešlo zbytečným ztrátám při přenosu energie z induktoru do tavené vsázky. Zároveň je však nutné, aby stěna kelímku měla dostatečnou tloušťku, aby nedošlo k poškození vyzdívky teplotními a mechanickými vlivy, zejména vířením taveniny. V případě poškození vyzdívky roztavenou vsázkou může mít únik taveniny mimo kelímek velmi vážné následky. Jako nejčastější důvody poškození stěny kelímku lze uvést kupříkladu

- Nevhodně zvolený materiál vyzdívky pro konkrétní typ vsázky či jeho špatné zpracování
- Dlouhodobé působení teplotních a mechanických vlivů na vyzdívku pece
- Neadekvátní řízení tavicího procesu, nedostatečná údržba
- Usazování strusky.[15],[18]

Velké škody může také způsobit přidání vlhkého materiálu do již roztavené vsázky. V případě kontaktu taveniny například s nedostatečně vysušeným šrotem, který je dopravníkem dodáván do pece, dochází k přeměně na páru a následné explozi. V případě indukčních tavicích zařízení je zde navíc ještě riziko, že tato exploze rozžhavené taveniny poškodí i chladicí okruh induktoru, a dojde tak k další explozi – je tedy nutné drť nebo šrot dostatečně vysušit a predehřát před jejím vložením do indukční pece.[18]



Obr. 2.2.3: a) Uvolnění kelímku, resp. odsekání jeho vrchní části, z indukční pece (vlevo),  
 b) Vysunutí kelímku z indukční pece za pomoci hydraulického vysouvacího zařízení  
 (vpravo).[11]

V praxi častěji používaný nevodivý kelímek se vyrábí dvěma způsoby. První způsob je vytvoření samotného kelímku přímo uvnitř indukční pece pomocí pěstování. Druhý, a výrobně jednodušší způsob, je předem vyrobený kelímek, který je vytvořen mimo indukční pec, a do té je poté instalován jako hotová součást. Tento způsob je výhodnější použít pro pece menších objemů, zpravidla jednotek až desítek tun vsázky. Hlavní výhodou použití předem vyrobeného kelímku je rychlá instalace a nízké náklady, v porovnání s pěstováním kelímku přímo v indukční peci. Před instalací nového kelímku do indukční pece je nejprve nutné odstranit starý kelímek. V praxi je toto provedeno pomocí pneumatických kladiv, které uvolní kelímek shora od okolní izolační vyzdívky, a následně je zbylá část kelímku z indukční pece vysunuta hydraulicky. Před instalací nového kelímku musí proběhnout vyčištění pece a vložení vyzdívky a následně je kelímek vložen do indukční pece, vycentrován a zafixován. Poté přichází na řadu sintrování kelímku roztavenou vsázkou. Během tohoto procesu je nutné sledovat nárůst teploty taveniny, pro pece do 5 tun vsázky nárůst přibližně 90°C za 1 hodinu, u indukčních pecí většího objemu pak méně. Hladina taveniny uvnitř kelímku při sintrování musí mít stejnou výšku a zhruba o 50°C vyšší teplotu, jak při běžném provozu této pece. Teplota taveniny při sintrování ale nesmí přesáhnout maximální dovolenou teplotu vsázky pro konkrétní materiál kelímku.[11],[16],

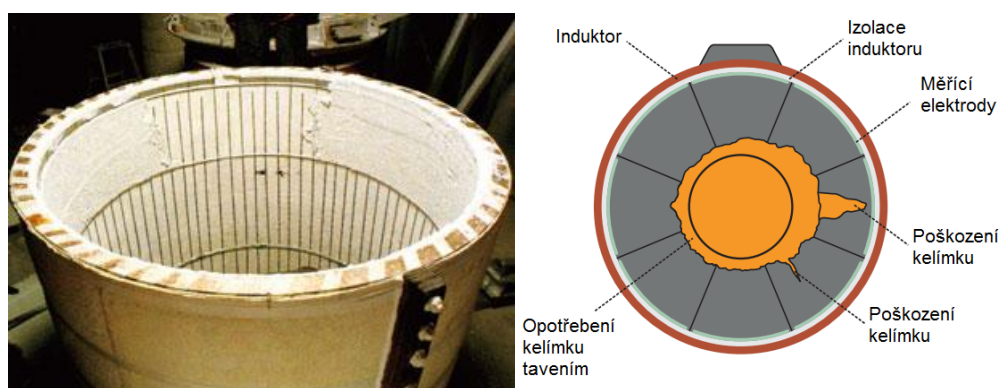
Pro pece nad 25 tun vsázky, či pro pece na tavení litiny, je nutné tento stav udržovat po dobu dvou hodin, pro menší indukční pece pak dostačuje jedna hodina. Po ukončení sintrování kelímku může začít běžný provoz indukční pece. V případě, že je potřeba sintrovací teplotu snížit, lze navíc přidat do materiálu kelímku kyselinu boritou. [16],[17]





Obr. 2.2.4: Struktura stěny indukční pece, použití nevodivého kelímku. Induktor je oddělen od samotného kelímku vrstvou cementu.[18]

Mezi základní bezpečnostní systémy patří detektory úniku taveniny, úniku chladicí vody, a měření tloušťky stěny kelímku. V případě, že je podezření na únik taveniny ať už stěnou nebo dnem kelímku, je nutné celý tavicí proces zastavit, vyprázdnit kelímek a následně zkontrolovat jeho strukturu. Tento systém bývá v případě pěchovaného nevodivého kelímku umístěn přímo v materiálu vyzdívky kelímku formou elektrod, v případě vodivého kelímku nebo pro vkládané nevodivé kelímky platí, že tyto elektrody jsou mezi kelímkem samotným a termoizolační cementovou vyzdívkou u induktoru. Měření tloušťky stěny kelímku pak bývá prováděno měřením teploty na vnějším okraji kelímku indukční pece. V místě, kde dojde k zmenšení tloušťky stěny kelímku, ať již opotřebením roztavenou vířící vsázkou nebo kvůli náhodným prasklinám sintrované vrstvy v případě nevodivého kelímku, dochází k nárůstu teploty, ze které je následně vyhodnocena zbývající tloušťka stěny kelímku.[18],[34],[35]



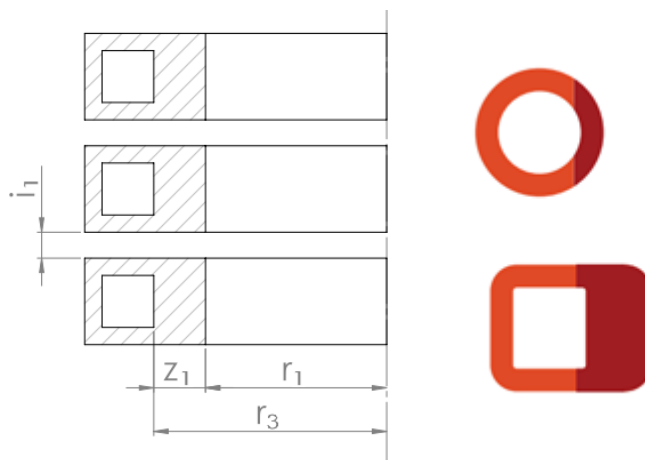
Obr. 2.2.5: Elektrody pro měření teploty k zjištění úniku taveniny umístěné ve vyzdívce indukční pece (vlevo, [34]), schéma detektoru úniku taveniny z kelímku včetně měření síly kelímku (vpravo, [35])

### 2.3 Induktor kelímkové pece, systém chlazení

Induktor kelímkové pece je vinut z měděné trubky obdélníkového průřezu (Obr. 2.3.1). Aktivní část induktoru, která vede většinu proudu, tvoří optimální tloušťka mědi  $z_1$ . Má-li mít tato aktivní část cívky minimální rezistivitu a tedy ztráty, musí pak platit vztah:

$$z_1 = \frac{\pi}{2} \cdot a_1 \quad (2.3.1)$$

kde  $z_1[mm]$  je aktivní tloušťka induktoru (viz. Obr. 2.3.1),  $a_1[mm]$  je hloubka vniku elektromagnetického pole vytvořeného induktorem. Indukční pece s hmotností několika tun vsázky mají velikost aktivní části induktoru řádově v jednotkách milimetrů, s narůstajícím objemem a výkonem pece se tato tloušťka zvětšuje. V případě indukčních kelímkových pecí je induktor omotán izolační páskou, zhruba 2 – 3 milimetry tlustou. Materiál této izolace bývá zpravidla tvořen slídovou fólií a skelnou látkou s keramickými vlákny, a musí zajišťovat dobrou elektrickou i tepelnou izolaci a také absorpci vibrací.[22],[23]



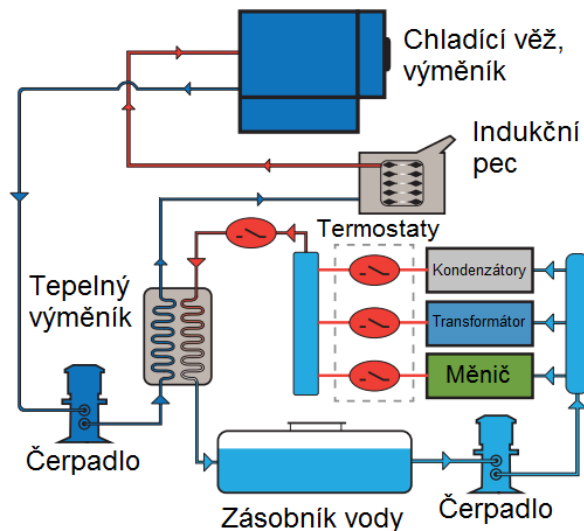
Obr. 2.3.1: Řez induktorem (vlevo, [22]), znázornění rozdílu rozložení proudové hustoty pro induktor vinutý z trubkového vodiče kruhového a obdélníkového průřezu (vpravo, [21])

V případě indukční pece není induktor konstruován na vysoké teploty, a musí být tedy vnitřně chlazen. Bez chlazení by s rostoucí teplotou induktoru klesala jeho elektrická vodivost a zvyšovaly by se ztráty, a po čase by došlo k nevratnému poškození celého vinutí. Většina tepla odváděného chladícím okruhem je generována průchodem proudu induktorem, menší část odvedeného tepla pak tvoří teplo přijaté vedením od vyzdívky samotné pece. Nedostatečné chlazení by navíc v místě přehřívání mohlo způsobovat rozklad izolačního materiálu cívky a vznik vodíku, metanu či propanu, a následné riziko

exploze. Střední rychlost průtoku vody se volí zpravidla v řádu jednotek  $m/s$  tak, aby vzniklé proudění chladicího média bylo turbulentní. Tato podmínka je splněna, platí-li

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot s}{\eta \cdot g} > 2320 \quad (2.3.2)$$

kde  $Re [-]$  je Reynoldsovo číslo,  $v [m/s]$  je střední rychlost proudění chladicího média v induktoru,  $d [m]$  je vnitřní průměr chladicího kanálku,  $s [kg/m^3]$  měrná hmotnost kapaliny,  $g = 9,81[m/s^2]$  je gravitační zrychlení,  $\eta [N \cdot s/m^2]$  je viskozita kapaliny. Viskozita chladicí vody je závislá na teplotě.[18],[22]



Obr. 2.3.2: Schéma chladičho systému celého indukčního zařízení, uzavřené okruhy.[21]

Mezi základní součásti chladičho systému patří vodní čerpadla, tepelné výměníky voda-voda a voda-vzduch, čidla tlaku, teploty a vodivosti chladicího média, řídicí elektronika, zásobník chladicího média – demineralizované a deionizované vody. V dnešní době jsou indukční zařízení vybavena zejména uzavřeným chladičím okruhem. Uzavřený okruh je méně náchylný k zanášení chladicích kanálků a údržba i řízení je snazší, než v případě okruhu otevřeného. V případě nedostatečné údržby otevřeného chladičho okruhu bude docházet k usazování nečistot na stěnách chladicích kanálků a snížení průtoku média. Pro induktor pece (primární chladičí okruh) platí, že přijatelná elektrická vodivost média se pohybuje v rozsahu  $10 - 30 mS/m$ . Pro sekundární okruh chlazení (tj. napájecí soustava) pak platí, že je nutné udržovat elektrickou vodivost média pod  $5 mS/m$ . [18],[21],[24]

Indukční pec musí mít také nouzový systém chlazení na dodávku chladicí vody do

pece při výpadku proudu nebo selhání čerpadla, aby se mohly všechny systémy dále chladit a nedošlo tak k poškození pece. Většina indukčních pecí má navíc také záložní čerpadlo pro případ výpadku primárního čerpadla a nouzový chladicí systém musí být dostatečně dimenzován. Jako zálohové zdroje chladicí vody lze označit připojení systému k vodovodní síti, použití záložního čerpadla napájeného generátorem, popř. baterií, anebo instalace nádrže s vodou na vyvýšeném místě.[24]

## 2.4 Napájecí zdroje pro indukční pece

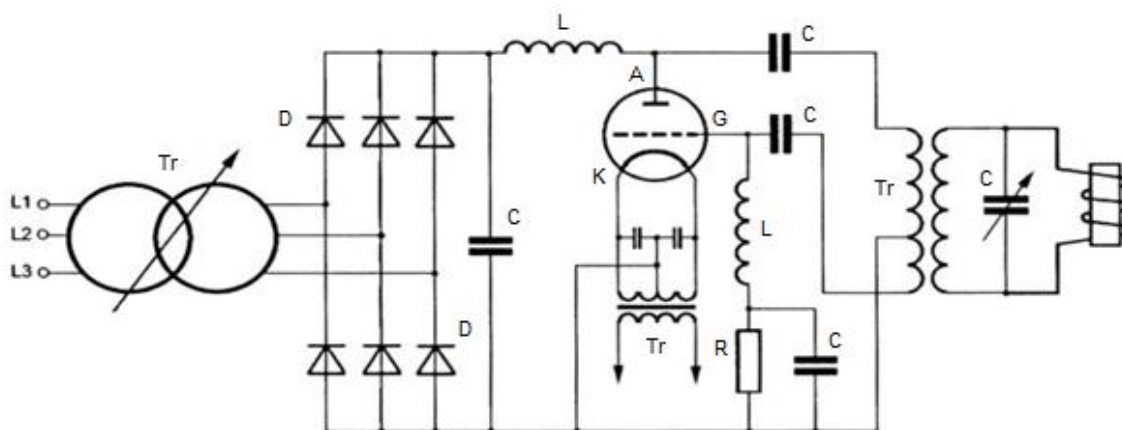
### Přímé napájení ze sítě

Přímé napájení ze sítě, ať už jednofázové nebo třífázové, bývá nejčastěji využíváno pro indukční pece větších objemů, zpravidla se standardním napětím 230/380 V. Přímé napájení ze sítě je relativně jednoduché a účinné, a především ekonomicky výhodné – není třeba žádného měniče kmitočtu. Nevýhodou u indukční pece napájené sítíovou frekvencí tvoří nemožnost začít tavit drcený šrot bez předehtání této vsázky, resp. pro studený start použít kusy šrotu přibližně o průměru 16 cm a větší, což je obtížně realizovatelné. V praxi se u těchto zařízení používá spíše větších průměrů kelímku, přičemž se po roztavení vsázky ponechá část taveniny v kelímku, do které je následně dosypáván šrot pro další tavení.[6],[22],[28]

### Rotační měniče kmitočtu

Rotační generátory tvoří z hlediska napájecích zdrojů pro indukční zařízení spíše historický pozůstatek, přesto je lze ještě v dnešní době najít v provozu. Na statoru rotačního generátoru jsou dva druhy drážek – v menších drážkách je uloženo pracovní vinutí, které vytváří proudy vyšších frekvencí pro indukční zařízení, ve větších drážkách je pak vinutí budící napájené stejnosměrným proudem. Rotor tohoto stroje není vinutý, má po obvodu pouze drážky. Pracovní frekvence tohoto zdroje se pohybuje do zhruba 10 kHz, přičemž se vzrůstající frekvencí klesá účinnost generátoru. Pro frekvenci 500 Hz je pak účinnost generátoru zhruba 90 %, pro frekvence okolo 10 kHz je pak účinnost přibližně 70 %. Hlavní výhodou rotačního měniče je dlouhá životnost a minimální nutnost údržby. Naproti tomu nevýhodou těchto zařízení jsou hluk a vibrace, které vytváří při provozu.[22]

## Vysokofrekvenční elektronkový generátor



Obr. 2.4.1: Zapojení vysokofrekvenčního elektronkového generátoru.[7]

Vysokofrekvenční elektronkový generátor se v dnešní době používá už jen zřídka, často se jedná o zastaralá zařízení. Poslední elektronkové generátory byly vyráběny začátkem devadesátých let, kdy pole středofrekvenčních a vysokofrekvenčních napájecích zdrojů pro indukční ohřevy ovládly polovodičové systémy. Celé zapojení je tvořeno usměrňovačem, vyhlazovacím kondenzátorem a tlumivkou, triodou, jejím žhavicím transformátorem a vysokofrekvenčním transformátorem. Pracovní frekvence těchto zdrojů se pohybuje do asi 150 MHz s výkony do 250 kW. Účinnost tohoto generátoru je přibližně 40 - 60 %, v závislosti na typu použité elektronky, a průměrná životnost v provozu je řádově desetitisíce hodin. [5],[7],[25],[26]

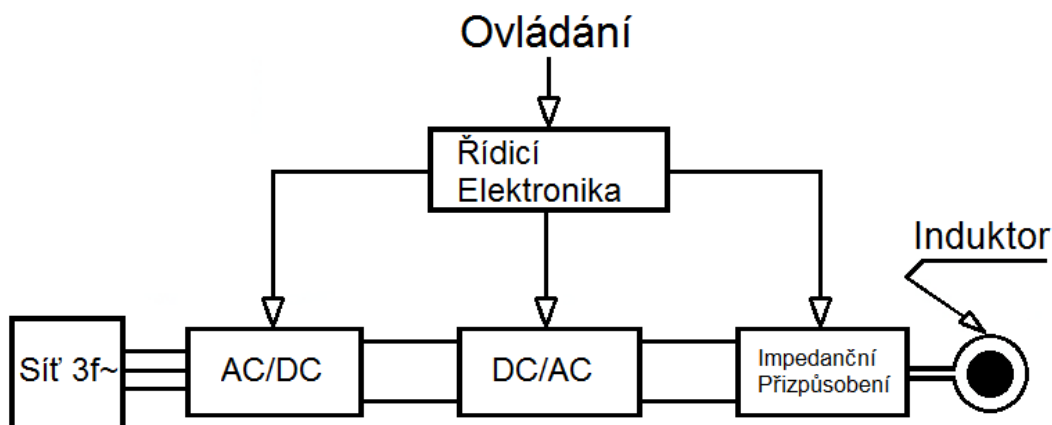
## Polovodičový měnič kmitočtu

Mezi požadované vlastnosti polovodičových měničů patří: co nejkratší vypínací doba, vysoké blokovací a závěrné napětí, vysoký proud v propustném režimu. Mezi hlavní výhody polovodičového frekvenčního měniče pak patří:

- Dobrá účinnost, podle konkrétního typu měniče: 90 - 98 %
- Velký rozsah nastavení výkonu na výstupu při zachování účinnosti
- Velký rozsah výstupního kmitočtu
- Spolehlivost startů a chodu měniče v širokém rozsahu zatěžovací impedance
- Relativně jednoduché řízení, vysoká odolnost proti elektromagnetickému rušení

- Téměř vždy je výkonový měnič chlazen pomocí uzavřeného chladicího okruhu s vodou, v případě menších výkonů lze použít i chlazení vzduchem
- Vysoký stupeň krytí umožňuje umístění měniče v prašném prostředí
- Galvanické oddělení řídicích a silových obvodů

Obr. 2.4.2 zobrazuje základní blokové schéma polovodičového frekvenčního měniče. Jako vstup slouží třífázová síť 50/60 Hz s napětím zpravidla 230 – 575 V. V následujícím bloku, který představuje řízený usměrňovač, je střídavý proud ze vstupu usměrněn na stejnosměrný o požadované velikosti. Tento proud je ideálně konstantní, nezvlněný, o což se stará tlumivka umístěná za usměrňovačem. Dalším blokem je střídač, kde dojde k rozstředání stejnosměrného proudu na střídavý s požadovanou frekvencí. Mezi induktorem a střídačem se nachází impedanční přizpůsobení kvůli maximalizaci přenášeného výkonu do induktoru. Řídicí elektronika pak má na starost nastavení a změnu spínací frekvence střídače a nastavení proudu resp. napětí z řízeného usměrňovače.[4]

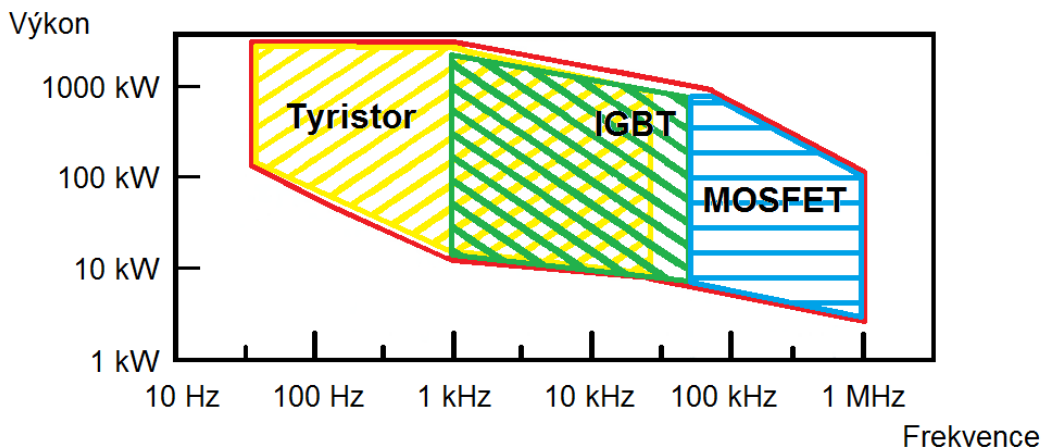


Obr. 2.4.2: Blokové schéma nejběžnějšího zapojení polovodičového měniče kmitočtu pro indukční ohřevy.[4]

S rozvojem polovodičů se jako napájecí zdroje pro indukční pece začaly nejprve využívat tyristorové měniče kmitočtu. Tyto měniče se využívají pro nízko a středofrekvenční ohřevy a dnes dosahují výkonů až 10 MW. V dřívější době se pro tyto frekvence používaly rotační měniče, avšak tyristorové frekvenční měniče je ve většině parametrů předčí.[5],[7],[27]

V případě, že je požadavek pro napájení indukční pece na použití vyšších frekvencí, je nutné použít v měniči tranzistorové střídače (IGBT, MOSFET) namísto tyristorových. IGBT tranzistory lze využít k napájení indukčních pecí s nejvyšší pracovní frekvencí přibližně 100 kHz, pro tranzistory typu MOSFET pak platí, že jejich reálné využití končí u

napájecích frekvencí zhruba 0,8 – 1 MHz, ovšem s nižším maximálním výkonem. [4],[29],[30]



Obr. 2.4.3: Praktické využití polovodičových měničů v závislosti na výkonech a použité frekvenci.[4]

U výkonových tranzistorů IGBT a MOSFET s narůstající frekvencí spínání také narůstá potřebný výkon pro sepnutí. To způsobí, že je potřeba nejen adekvátně dimenzovat chlazení a počet jednotlivých bloků tranzistorů spojených paralelně kvůli proudové zátěži, ale i použít techniky řízení jako ZVS a ZCS (Zero Voltage a Current Switching), které omezí ztráty při spínání při vyšších frekvencích.[29]

## 2.5 Elektromagnetického stínění indukčních pecí

Pro napájení indukční pece obecně využívá nižších napětí, ale zato velkých proudů. Stínění je tedy důležitá součást indukční pece, která má za úkol snížit intenzitu silného magnetického pole vytvořeného induktorem pece na minimum. Toho je dosaženo buďto umístěním vodivého stínícího pláště vhodného průměru i tloušťky okolo indukční pece, nebo pak umístěním jádra z magneticky měkkého materiálu vně induktoru. Stínění musí být dimenzované úměrně výkonu i pracovní frekvenci pece tak, aby se téměř všechny magnetický tok jdoucí jinak volně do prostoru uzavíral ve stínění. Účelem stínění indukční pece tedy je:

- Ochrana částí indukční pece či předmětů v jejím okolí proti nežádoucímu ohřevu
- Maximalizace magnetického toku uvnitř tavené vsázky, zlepšení účinnosti zařízení
- Eliminace vlivu elektromagnetického pole na čidla a senzory pro řídicí systémy pece



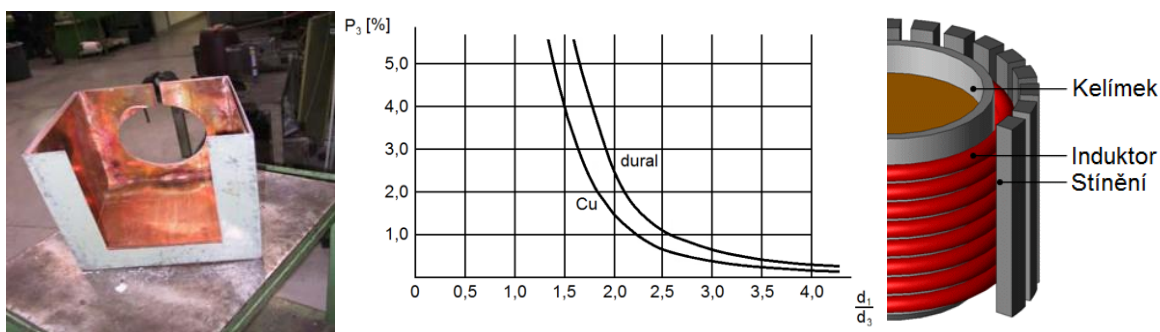
- Dodržení EMC standardů a ochrana osob v okolí indukční pece.[7],[31],[32]

### Stínící plášť

Při použití elektricky vodivého stínícího pláště je indukční pec obklopena souosým válcem z plechů či komorou z mědi, duralu, nebo hliníku. Ztráty ve stínícím plášti klesají s nárůstem vnitřního průměru stínícího pláště, na druhou stranu je však snaha aby pec byla z praktických důvodů prostorově co nejmenší. Průměr celého stínícího pláště se v praxi volí přibližně jako dvojnásobek průměru induktoru, a ztráty při optimální tloušťce stěny budou tvořit 1,51 % z příkonu pece při použití mědi, pro duralový plášť pak tyto ztráty budou rovny 2,5 %. V případě pecí s větším příkonem je tento stínící plášť vnitřně chlazen vodou. Ztráty ve stínícím plášti jsou minimální, pokud bude platit, že tloušťka stěny pláště je rovna optimální tloušťce  $s_3$ :

$$s_3 = \frac{\pi}{2} \cdot a_3 \quad (2.5.1)$$

Kde  $s_3$  [mm] je optimální tloušťka stínícího pláště,  $a_3$  [mm] hloubka vniku elektromagnetického vlnění. Pro některé frekvence by však mohla být stěna moc tenká, a tak se z mechanických důvodů volí tloušťka stěny preventivně větší. Přestože je z teoretického hlediska měď pro stínění lepší než dural, je využití duralu více ekonomicky výhodné. Stínění vodivým pláštěm se využívá pro indukční pece do přibližně stovek kg vsázky.[22],[28],[33]



Obr. 2.5.1: a) Část stínícího vodivého pláště pro indukční pec 120 kW (vlevo, [33]),  
 b) ztráty ve stínícím plášti  $P_3$  procentuelně vzhledem k příkonu pece v závislosti na poměru průměru induktoru  $d_1$  a průměru stínícího pláště  $d_3$  pro měď a dural (uprostřed, [22]),  
 c) řez kelímkové pece se stíněním feromagnetickým jádrem (vpravo, [36]).



## Stínění feromagnetickým jádrem

Stínění indukční pece pomocí železného jádra se používá spíše pro pece středních a velkých objemů vsázky, zhruba stovky kg a více. Po vnějším obvodu induktoru se umístí železné jádro složené z většího počtu svazků transformátorových plechů. Značná část magnetického toku vytvořeného induktorem se tak uzavírá v železe, celkový tok vytvořený cívkou je tak vyšší než v případě stínění pece jen vodivým pláštěm, a pec tak nemusí mít cívkou s tolika závity. Rozdíl je také v účinnosti indukční pece, oproti stínění vodivým pláštěm má pec s železným jádrem přibližně o 5 % vyšší účinnost, což se projeví hlavně u pecí s dlouhodobým nepřetržitým chodem. Tyto svazky nejen že stíní elektromagnetické vlnění, zároveň také často slouží k fixaci induktoru, aby nedošlo vlivem působení Lorentzovy síly k jeho deformaci a poškození.[22],[36]

### 2.6 Měření teploty uvnitř indukční pece

Teplota roztavené vsázky je při tavení klíčový parametr pro řízení celého procesu, který určuje, že výsledný ingot bude mít požadovanou kvalitu. Pro indukční pece se používají především pyrometry detekující infračervené spektrum vlnění vyzařované povrchem roztavené vsázky. Dnešní typy pyrometrů jsou schopny sledovat velmi rychlé změny teplot vsázky, při zachování dobré přesnosti měření, často na desetiny °C. Nevýhodou měření teploty povrchu taveniny pomocí infračerveného spektra je ovlivnitelnost přesnosti vlivem par či plynů vzniklých při tavení, dále také zpravidla není možné pokrýt celý teplotní rozsah taveniny jedním pyrometrem. Často se tak využívají dva pyrometry, jeden s rozsahem teplot pokrývající teploty blízké již roztavené vsázce, druhý pak pro nižší teploty, kvůli měření teplot vsázky na začátku indukčního ohřevu. Měření tímto způsobem také negativně ovlivňuje změna emisivity povrchu taveniny  $\varepsilon$  ať již vlivem oxidace hladiny vsázky, vířením taveniny a obecně konzistencí povrchu taveniny. Emisivita  $\varepsilon$  je dána vztahem

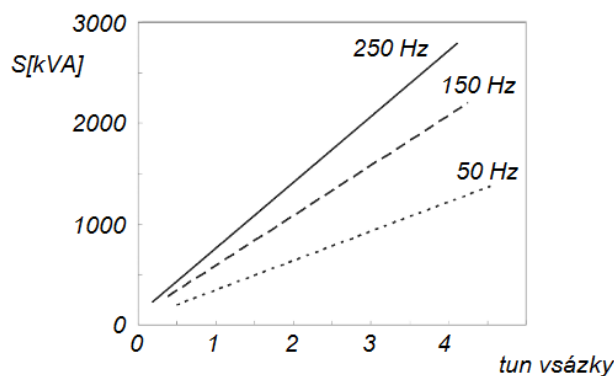
$$\varepsilon + \varphi = 1 \quad (2.6.1)$$

kde  $\varepsilon [-]$  je emisivita šedého tělesa, a  $\varphi [-]$  jeho odrazivost. Emisivita šedého tělesa pak nabývá hodnot  $0 < \varepsilon < 1$ . V praxi je však mnohem snazší měřit odrazivost tělesa, než jeho emisivitu.[4],[37]

## 2.7 Tavení a recyklace hliníku v indukční kelímkové peci

Přestože je procentuální zastoupení hliníku v zemské kůře relativně velké, přibližně 8 %, v přírodě se jako surový kov nevyskytuje, pouze ve formě sloučenin. Pro výrobu surového hliníku se používá bauxit, což je směs hydroxidů hliníku, oxidů železa, křemíku, apod. Bauxit obsahuje v závislosti na kvalitě až 45 – 60 % oxidů hliníku, přičemž se udává, že na výrobu 1 kg čistého hliníku je potřeba přibližně 4 kg vytěženého bauxitu. Samotná výroba je pak relativně náročný proces, který probíhá ve dvou fázích. V první fázi, označované jako Bayerův proces, je bauxit rozdrčen a zpracován, a vznikají oxidy hliníku. V druhé fázi, Hall-Heroultově procesu, jsou tyto oxidy přetaveny na čistý hliník. Proces výroby hliníku z bauxitu je však energeticky náročný, na 1 kg hliníku je potřeba zhruba 15 kWh elektrické energie, nemluvě o velkém množství odpadu z bauxitu ve formě oxidů ostatních prvků, které ale téměř nelze z ekonomického hlediska využít.[47]

Recyklace hliníkového šrotu je známa už řadu let, a také se hojně využívá. Oproti výrobě hliníku z bauxitové rudy spotřebuje recyklace hliníkového šrotu pro stejný hliníkový ingot pouze 3-4 % elektrické energie, navíc recyklace má samozřejmě podstatně menší ekologické dopady na životní prostředí. V roce 2007 bylo recyklací vyrobeno celosvětově 18 milionů tun hliníku, přičemž 38 milionů tun bylo vyrobeno klasickým způsobem z bauxitové rudy.[48],[49]



Obr. 2.7.1: Použití napájení o vyšších frekvencích umožní použít větších výkonů z důvodů nižšího víření a vzdunutí hladiny roztavené vsázky.[50]

Pro recyklaci hliníkového šrotu jsou často použity právě indukční kelímkové pece. Pro tavení velkých kusů hliníkového šrotu se používají indukční pece síťové frekvence. U těchto pecí však nízká napájecí frekvence způsobuje nejen problémy s hloubkou vniku elektromagnetického vlnění do vsázky, ale také velké víření taveniny, což má za negativní následek velké vzdunutí hladiny taveniny, ale i nadměrnou erozi stěny kelímku indukční pece

a následnou možnost ovlivnění kvality vsázky. Nejen s rozvojem polovodičových zdrojů napájení došlo také k rozšíření středofrekvenčních indukčních kelímkových pecí pro recyklaci hliníku, často s napájecí frekvencí do 600 Hz. Vyšší frekvence snižuje víření, v důsledku čehož klesá i vzednutí hladiny taveniny, a je možno použít při tavení hliníkového šrotu větších výkonů při stejném objemu pece. Indukční kelímkové pece mohou v dnešní době zpracovat několik tun hliníku za hodinu provozu, při spotřebě asi 500 - 600 kWh elektrické energie.[49],[50]

Efektivita recyklace hliníku v kelímkové indukční peci bude také záviset na ztrátách taveniny během tavení. Ty jsou určeny především:

- Čistotou šrotu, resp. mírou nežádoucích přísad, jako jsou například zbytky oleje, plastů, špíny, nátěrů, apod.
- Vypařováním a oxidací hladiny taveniny během procesu – to navíc také negativně ovlivňuje kvalitu výsledného ingotu
- Usazováním  $Al_2O_3$  na stěně kelímku indukční pece. Tato struska se musí po určité době odstranit, zpravidla pneumaticky, aby nedocházelo k zanášení pece.

V případě čistého šrotu se návratnost hliníku pohybuje zhruba okolo 99,0 – 99,5 % hmotnosti. Jedná se především o šrot vzniklý při zpracování surového hliníku, kde je míra kontaminace nízká. Naproti tomu, při zpracování znečištěného šrotu, se může návratnost hliníku pohybovat okolo 80 %, vlivem povrchových nátěrů, oxidace, plastů, či obecně znečištění. Přesto zejména pro znečištěný šrot se jedná o procentuelní hodnoty návratnosti hliníku jen přibližné, protože zpravidla v praxi nejde přesně změřit obsah hliníku v tomto šrotu před začátkem tavení. Organické znečištění, již zmíněné plasty a oleje, je navíc ovlivněno jejich pyrolýzou během tavicího cyklu, a dochází tak k emisi zdraví škodlivých výparů.[49]

Při průmyslovém opracování hliníkových odlitků ve výrobě vzniká velké množství hliníkového odpadu ve formě třísek, vzniklých frézováním, vrtáním, řezáním, apod. Tyto hliníkové třísky jsou pokryté slabou vrstvou oxidu  $Al_2O_3$  i kapalinami pro jejich strojové opracování. Tavení třísek v takovémto stavu v indukční peci by bylo neefektivní – byla by malá návratnost hliníku z tohoto šrotu, zbytečně velká spotřeba energie na jejich přetavení, velká produkce odpadních plynů a kouře, neúměrné usazování strusky a ani výsledná čistota ingotu z hliníkového šrotu takovéto kvality by nebyla uspokojivá.[52]

Odpadní hliníkové třísky se před tavením v indukční musí náležitě zpracovat. Nejprve je třeba odstranit vlhkost a kapaliny usazené na povrchu. To se provádí např. za

pomoci centrifugy nebo oddělováním kapaliny od šrotu přes síta. Následně hliníkový šrot, který je z velké části zbaven vlhkosti (v objemu šrotu zůstane maximálně několik jednotek % vlhkosti), je slisován do briket.[52]



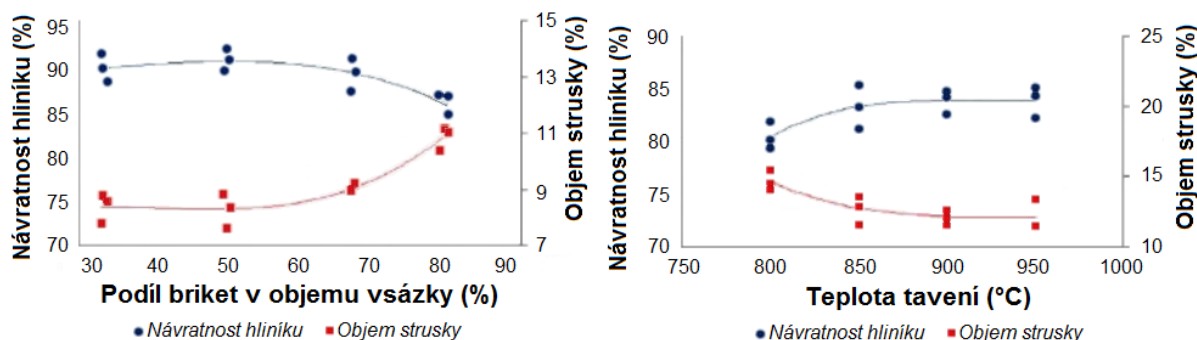
*Obr. 2.7.2: Nadrcené hliníkové třísky, v tomto případě jde o tzv. čistý šrot (vlevo,[54]), Brikety ze slisovaných třísek, velikost je určena výrobními možnostmi indukční pece, velikost briket je tedy variabilní v závislosti na velikosti třísek, typu lisu, apod. (vpravo, [53])*

Velikost briket je přibližně úměrná velikosti a možnostem napájení indukční pece. Používání briket namísto použití drceného šrotu ve formě třísek má tyto důvody:

- V případě započetí tavicího procesu v indukční peci lze použít pro tavení briket nižších frekvencí napájení, než by vyžadovala vsázka nasypaná čistě z drceného šrotu
- Z důvodu větší měrné hustoty briket oproti hliníkovým třískám lze tavit větší objemy vsázky
- Drcený šrot je více náchylný k povrchové oxidaci, což negativně ovlivňuje tavicí proces
- Brikety z hliníkového šrotu mají jednotný tvar, rozměry i hmotnost, což usnadňuje skladování i jejich manipulaci před tavicím procesem
- Během lisování briket ze šrotu navíc dochází k odstranění vlhkosti, maziv či chladicích kapalin, lisovací tlak se pohybuje řádově ve stovkách barů (nejčastěji do 500 bar)

Použití hliníkového šrotu ve formě drti s sebou navíc nese jednu negativní vlastnost. Po přidání třísek během tavicího procesu do kelímku s roztavenou vsázkou mohou tyto hliníkové třísky zůstat na hladině taveniny, a hrozí tak vytvoření krusty na hladině roztavené vsázky. Následné další přidání relativně jemné drti na hladinu taveniny může

způsobit tzv. „bridging“ efekt, kdy dochází pod touto krustou k přehřátí vsázky a k akumulaci přehřátých plynů mezi kapalnou vsázkou a touto krustou, a následnému poškození indukční kelímkové pece. Tento jev lze mimo jiné za provozu pece rozpoznat tak, že tavení vsázky trvá delší dobu, než je obvyklé, a dochází ke změně odpadních plynů při tavicím procesu. [18],[52],[55],[56]



Obr. 2.7.3: Vliv podílu objemu briket v celém objemu vsázky uvnitř kelímkové pece (vlevo, [56]), závislost poklesu objemu strusky a v tavenině s narůstající teplotou tavení (vpravo, [56]).

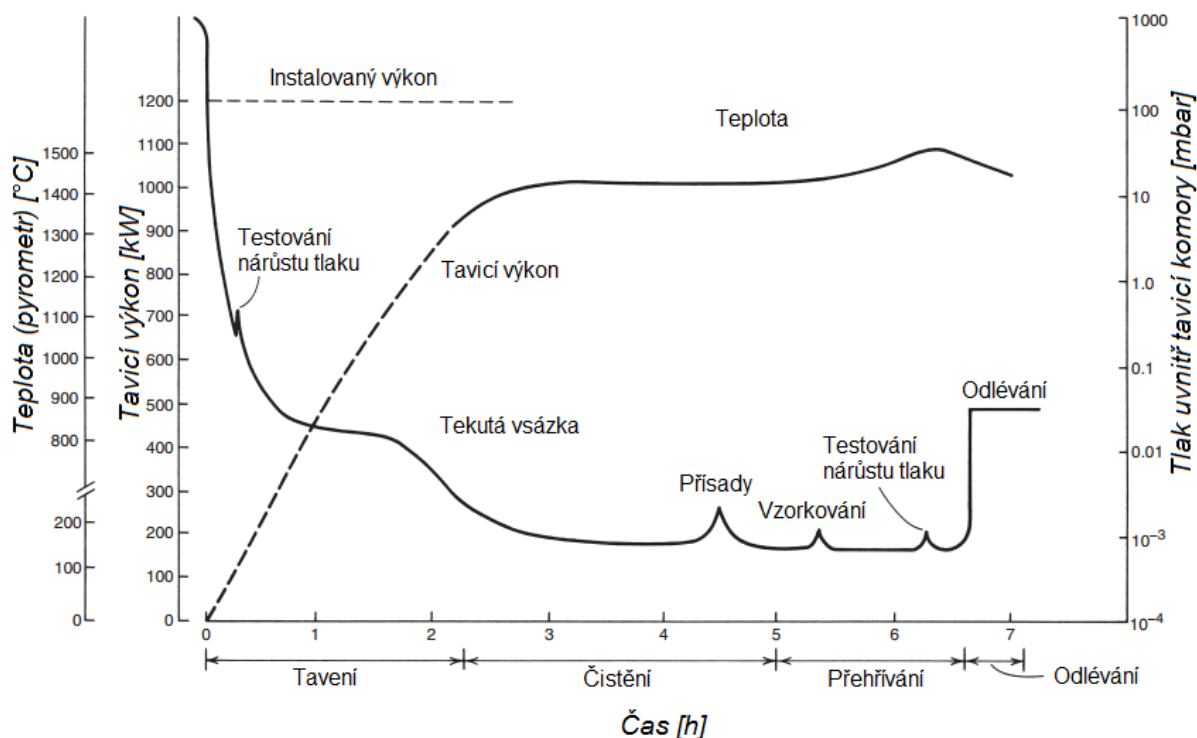
Klíčovým parametrem, který ovlivňuje procentuální návratnost hliníku při jeho recyklaci ze zpracovaného šrotu, je teplota taveniny. Pro teplotu taveniny přibližně nad 850 °C platí, že množství vzniklé strusky je minimální, a celková efektivita celého procesu je vysoká. Naopak pro teploty nižší je tvorba strusky zvýšená, a tedy klesá procentuelní návratnost recyklovaného hliníku. Vliv na návratnost hliníku má také podíl objemu hliníkových briket a volných hliníkových třísek. Zde záleží na typu provozu, pece, i dostupném šrotu v konkrétní okamžik. Použití pouze třísek a relativně jemné drti hliníkového šrotu povede k neefektivnímu tavení – vlivem malé hustoty tohoto šrotu, větší povrchové oxidaci, vlhkosti, i pomalejšímu započetí tavicího procesu. Navíc je zde možnost, že se takováto vsázka bude chovat jako elektromagneticky průzračná, a dojde jen k minimálnímu ohřevu. Oproti tomu použití pouze briket z hliníkového šrotu nedovolí naplno využít aktivní objem indukční pece. Není tedy přesně určený nejlepší poměr objemu briket ve vsázce, často se však volí blízký 50 %. Dále také v případě briket záleží na tlaku, za kterého jsou lisovány. Se zvyšujícím se tlakem klesá poréznost povrchu těchto briket, což je sice činí méně náchylné k povrchové oxidaci, na druhou stranu ale tavení briket slisovaných za použití většího tlaku může trvat delší dobu. Ačkoliv se briketa může vzhledem k elektromagnetickému vlnění chovat jako neprůzračná vsázka, což je jev žádoucí, natavení jejího povrchu již roztavenou kapalnou vsázkou v kelímku pece při

průběžném tavení zabere více času. S tím souvisí také skutečnost, že pro opakovanou recyklaci hliníku je lepší využít průběžné tavení, podobně jako je tomu u indukční kanálkové pece. Nejlepší efektivita procesu se dosáhne, pokud po přetavení hliníku v kelímkové peci zůstane přibližně třetina původního objemu vsázky, do které je posléze doplněn další hliníkový šrot pro přetavení a celý proces tavení je opakován dokola.[52],[56]

## 2.8 Tavení ve vakuové indukční peci (VIM, Vacuum induction melting)

Tavení ve vakuové indukční peci s vodivým i nevodivým kelímkem se používá především pro speciální ocele, slitiny titanu, kobaltu, niklu, a dalších reaktivních kovů, nebo také pro odkysličování mědi. VIM má pak především oproti tavení v nekontrolované atmosféře tyto výhody:

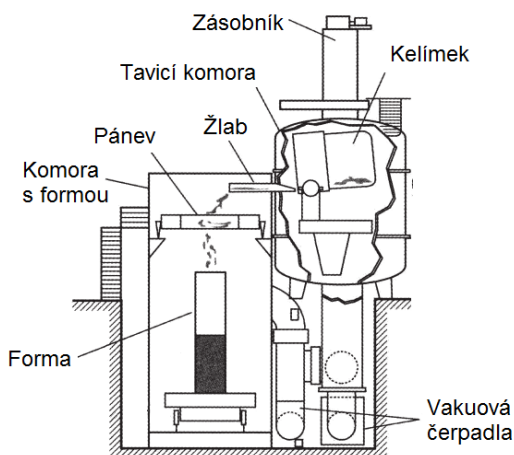
- Malé ztráty legovacích přísad do taveniny v kelímku pece působením oxidace
- Přesnější kontrola teploty vsázky
- Dosažení přesného složení tavené vsázky
- Snazší odstranění nežádoucích stopových prvků z vsázky (olovo, selen, bismut,...)
- Odsávání plynů vzniklých během tavení (vodík, dusík, kyslík,...), aby nedocházelo k negativnímu ovlivnění složení a struktury ingotu.[57]



Obr. 2.8.1: Typický průběh VIM tavení pro speciální slitiny na bázi niklu a kobaltu.[57]

Na začátku tavicího procesu je indukční pec uzavřena, a pomocí výkonných čerpadel je vytvořeno vakuum. V případě slitin na bázi niklu či kobaltu může tlak uvnitř tavicí komory klesnout až k setinám  $Pa$  ( $10^{-4}$  mbar), přičemž reálná hodnota tohoto tlaku pro VIM se u pecí o objemech nad jednu tunu vsázky pohybuje okolo jednotek  $Pa$ . Takto nízkého tlaku v tavicí komoře lze dosáhnout přibližně do jedné minuty. Po dosažení optimálního tlaku uvnitř pece je přes vibrační dávkovač oddělený od okolí pece vakuovým ventilem přidána do kelímku první dávka vsázky. Tato prvotní vsázka je následně roztavena, napájecí frekvence induktoru je zvýšena pro urychlení tavení a dochází k reakci sloučenin obsažených v tavenině a následnému úniku takto vzniklých plynů. Navíc je nutné, aby bylo odplynění taveniny pečlivě monitorováno, k zajištění odpovídající kvality vsázky.[57],[58],[59]

Následně je do kelímku přidána i reaktivní složka, která má za úkol spojit se s prvotní vsázkou, a upravit její vlastnosti. Napájecí frekvence induktoru je snížena, aby nastalo větší víření taveniny a rychlejší homogenizace taveniny. Po této fázi dochází k metalurgické zkoušce vsázky, kdy je testováno složení, a případně k úpravě objemu přísad k objemu základního materiálu. Pokud složení vsázky vyhovuje požadavkům slitiny, zvýší se teplota vsázky a započne odlévání. Přestože celý proces probíhá bez atmosféry, stále zde dochází k tvorbě strusky při použití vyzdívky kelímku z materiálu na bázi oxidů, nejčastěji z kombinace oxidů  $MgO$  a  $Al_2O_3$ . [57]



Obr. 2.8.2: Schéma dvoukomorové indukční vakuové pece.[57]

V dřívějších dobách byly v provozu především jednokomorové VIM pece, kde byla forma pro odlévání taveniny umístěna uvnitř tavicí komory a tyto pece musely být otevřeny pokaždé, když proběhlo odlévání do formy. V případě modernějších, dvoukomorových, VIM pecí je forma umístěna v oddělené komoře než je komora



s kelímkem s taveninou. Při odlévání v dvoukomorové peci je tavenina vedena z kelímku pomocí vyzdívaných ocelových žlabů do tzv. pánve, kde je roztavený kov koncentrován, je oddělena struska, a následně probíhá odlití do formy.[57]

Vakuová indukční pec se využívá například i pro tavení mědi. Díky VIM lze vytvořit ingot téměř čisté mědi s minimálním obsahem kyslíku (Oxygen-free copper, až 2 ppm O<sub>2</sub>, tedy z praktického hlediska čistá měď). Snížením obsahu kyslíku se dosahuje vyšších hodnot elektrické vodivosti, čehož se využívá v širokém spektru oborů – od supravodičů po audiotechniku. Pro tyto účely je však nevhodné využít kelímek indukční pece na bázi oxidů, došlo by k nežádoucímu ovlivnění taveniny kyslíkem. Proto se využívá elektricky vodivého grafitového kelímku.[57],[60]

Ve vakuu se také taví speciální slitiny hliníku, kupříkladu CrAl, AlLi, TiAlV, a další. Poslední zmíněná slitina patří do skupiny souhrnně označované jako Ti-Al slitiny, které vynikají nízkou měrnou hustotou při velmi dobrých mechanických vlastnostech, a hojně se využívají v leteckém průmyslu. Pro tyto slitiny se používá VIM z důvodu reakce taveniny jak s atmosférou, tak i se samotným kelímkem. Největší obtíž při tavení pak tvoří vypařování hliníku z tavené směsi, což je závislé především na:

- Teplotě roztavené vsázky
- Atmosféře, resp. tlaku uvnitř tavicí komory
- Přesném složení vsázky pro výrobu konkrétní slitiny
- Působení hydrodynamických sil v tavenině během tavicího procesu.[57],[61],[62]

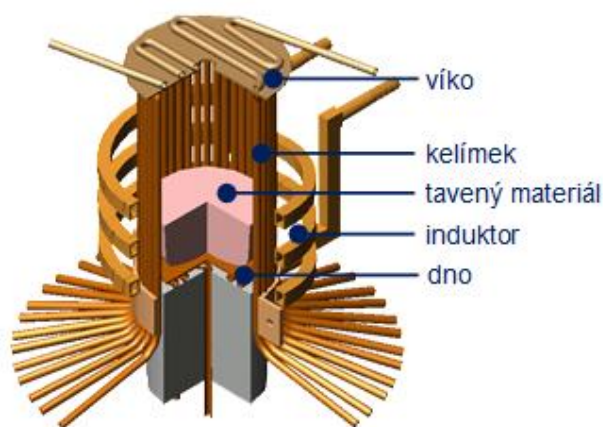


### 3 Studený kelímek

#### 3.1 Technologie studeného kelímku

Studený kelímek je, podobně jako indukční kelímková pec, zařízení pro tavení materiálů elektricky vodivých, v případě studeného kelímku hlavně kovů a slitin s vyšší teplotou tavení, než v případě indukčních pecí, např. titanu, niobu, molybdenu, vanadu, a jiných. Tavení elektricky dobře vodivých kovů a slitin však probíhá s malou účinností, v rozsahu 10 – 20 %, dle materiálových parametrů vsázky. Na rozdíl od indukční kelímkové pece nalézá studený kelímek uplatnění i pro tavení oxidů a skel, či speciálních keramik jiným způsobem jen obtížně tavitelných. Zde se naopak účinnost studeného kelímku pohybuje okolo 70 – 80 %.[5],[46]

Zásadním rozdílem mezi kelímkovou indukční pecí, u které je vyzdívka kelímku tvořena oxidy křemíku či hliníku, nebo v případě vodivého kelímku litinou nebo grafitem, je studený kelímek vyroben téměř vždy z mědi, a je vnitřně intenzivně chlazen. Výjimečně může být studený kelímek vyroben z materiálů, jako je např. stříbro, hliník, nebo nerezová ocel. Jedná se spíše o unikátní případy, kdy je z důvodu reaktivního materiálu vsázky nevhodné použít kelímek měděný, kupříkladu speciální skla používaná pro optické účely. Vlivem velmi intenzivního chlazení kelímku vzniká na vnějším povrchu taveného materiálu krusta o tloušťce několika málo milimetrů (ISM, Induction skull melting, tavení ve vrstvě „skull“), což má za následek že se roztavená vsázka nedotýká stěny kelímku a tavení tohoto materiálu tak probíhá uvnitř sebe sama. Další výhodou je, že vhodnou volbou kmitočtu zdroje lze měnit rozložení tepla v objemu vsázky, a s tím související možnost dobré kontroly nejen tavení, ale také možnost kontrolovaného chladnutí vsázky.[5],[38]



Obr. 3.1.1: Schéma studeného kelímku, segmentové provedení. Mezi klíčové součásti patří segmenty kelímku, dno kelímku, a induktor.[38]

Existují dva druhy provedení studeného kelímku. Buď je kelímek a induktor od sebe oddělen a jedná se tedy o tzv. segmentový kelímek, anebo je kelímek induktorový, kdy induktor zároveň tvoří stěnu kelímku. Obě tato provedení umožňují dosahovat výborné homogenity výsledného ingotu, podobně jako u indukčních pecí, avšak s tím rozdílem, že je možno dosahovat mnohem vyšších teplot taveniny, přes 3000 °C. V dnešní době se příkony pro studený kelímek pohybují v řádech stovek kW a napájecích frekvencích induktoru až několika desítek MHz, v závislosti na plánovaném použití. Nejčastěji používané vnitřní průměry kelímku jsou řádově desítky až stovky milimetrů, největší ze studených kelímků se pak pohybují o vnitřním průměru kelímku až jeden metr. Hmotnosti vsázky při tavení jsou nejčastěji jednotky až desítky kilogramů.[5],[39]

Studený kelímek jako technologie byl objeven ve třicátých letech dvacátého století, k většímu rozvoji pak začalo docházet s nástupem vysokofrekvenčních polovodičových napájecích zdrojů. Studený kelímek se využívá pro výzkum a zpracování širokého spektra speciálních materiálů, od titanových slitin přes izolační keramiky až po vitrifikaci radioaktivního odpadu.[5]

### 3.2 Induktorový studený kelímek



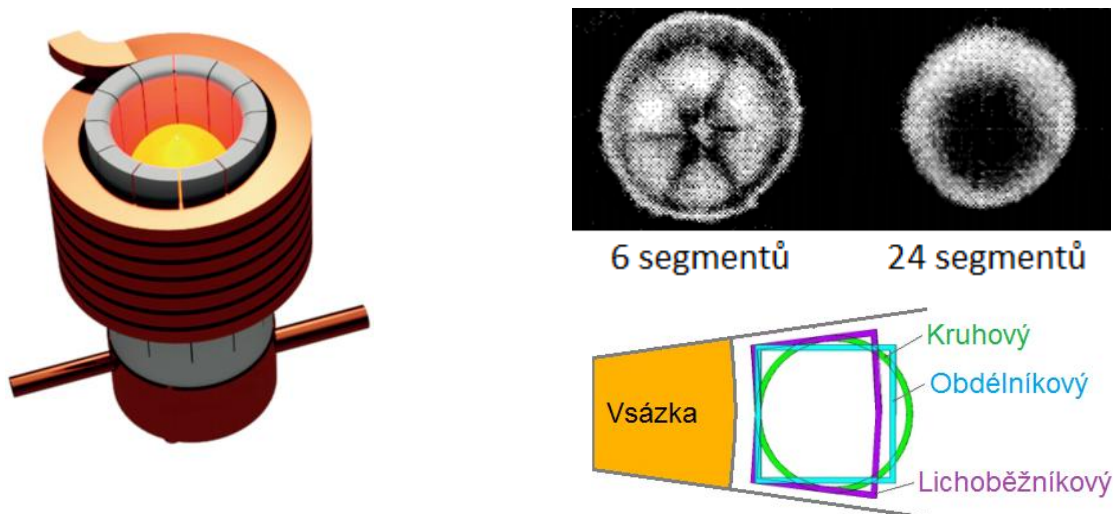
Obr. 3.2.1: Řez induktorovým studeným kelímkem, tento řez však nezohledňuje nutné chladičí kanálky stěny kelímku (vlevo, [39]), Induktorový studený kelímek po tavení skla (vpravo, [39]).

Méně využívaná varianta studeného kelímku, kdy je stěna kelímku vytvořena z induktoru, který je zhotoven z dutého měděného pásu obdélníkového průřezu. Protože nedochází ke ztrátám vířivými proudy v jednotlivých lamelách stěny studeného kelímku jako u segmentového provedení, je u této konstrukce studeného kelímku vyšší účinnost a

umožňuje tak dosahovat vyšších teplot taveniny, což se využívá hlavně pro oxidy s velmi vysokou teplotou tavení, jako např.  $ZrO_2$ , YBCO, apod. Nevýhodou však může tvořit horší možnost regulace a řízení krystalizace vsázky, dále jsou mnohem vyšší nároky na chlazení oproti segmentovému typu studeného kelímku z důvodu dotyku vsázky se stěnou kelímku-induktoru, a v neposlední řadě také větší složitost výroby tohoto provedení, kdy ve stěně zpravidla bývá několik chladicích kanálků obdélníkového průřezu.[5],[39]

### 3.3 Segmentové provedení studeného kelímku

V praxi se mnohem častěji využívá segmentového provedení studeného kelímku, kdy stěna kelímku a induktor tvoří dva oddělené prvky. Segmenty jsou měděné a vzájemně izolované rozestupy přibližně 0,5 - 1 mm. Radiální tloušťka stěny tohoto segmentu je ideálně co nejmenší, z konstrukčních a provozních důvodů 1 až 2 mm. Počet lamel bývá určen průměrem studeného kelímku, zpravidla 6 a více. S vyšším počtem segmentů studeného kelímku se snižuje nežádoucí ohřev jednotlivých segmentů, a zároveň se dosahuje lepšího rozložení elektromagnetického vlnění pronikajícího do tavené vsázky a tím i lepšího rozložení teplotního pole.[5],[42],[43]



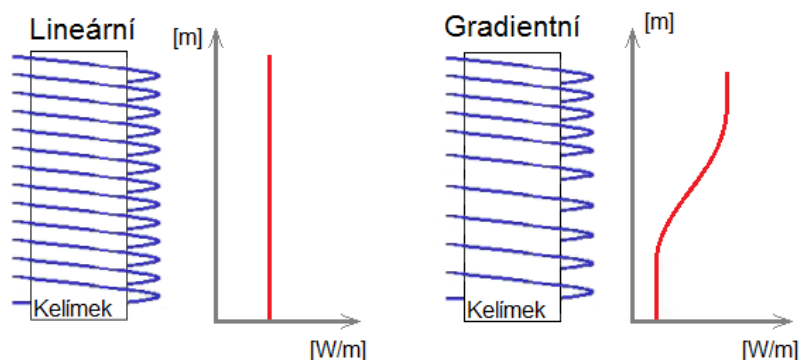
Obr. 3.3.1: a) Segmentový studený kelímek, lichoběžníkový průřez segmentu (vlevo, [44]), b) srovnání rozložení teplotního pole pro dva studené kelímky o 6 a 24 segmentech (vpravo nahoře, [77]), c) zobrazení používaných průřezů segmentů studeného kelímku (vpravo dole, [40]).

Na účinnost segmentového kelímku má také vliv tvar jednotlivých lamel. Mezi nejčastěji používané tvary průřezů segmentů patří kruhový, obdélníkový a lichoběžníkový

průřez. V závislosti na použitém tvaru se mění i velikost Joulových ztrát přímo v segmentu. Pro kruhový průřez platí, že Joulovy ztráty uvnitř segmentu činí o zhruba 8 až 9 % méně, než při použití obdélníkového nebo lichoběžníkového průřezu segmentu. Kruhový průřez segmentu se vyrábí tvarováním měděných trubek, což je levnější varianta oproti výrobě jiného tvaru průřezu frézováním.[5],[40],[45]

### 3.4 Induktor a chlazení studeného kelímku

Z hlediska konstrukčního provedení se induktor studeného kelímku segmentového typu od induktoru kelímkové pece neliší. Pro menší průměry studených kelímků a menší výkony se v praxi většinou využívá kruhového průřezu induktoru, což se opět nijak neliší od indukčních kelímkových pecí. V případě induktoru segmentového studeného kelímku se konstrukční provedení (průměr a tloušťka závitů induktoru, počet závitů a vzdálenost mezi závity) odvíjí od fyzických rozměrů studeného kelímku, výkonu napájecího generátoru, a objemu vsázky a jejích parametrů, zejména elektrické vodivosti. Induktory větších rozměrů a hmotností také vyžadují mechanickou podporu, aby nedošlo ke změně geometrie. V praxi má většina indukčních zařízení, ať se již jedná o kelímkovou pec nebo studený kelímek, induktor s rovnoměrně lineárně rozloženými závity, všechny závity tedy mají konstantní průměr i vzdálenosti mezi závity. Výhodou je především snazší výrobu takového induktoru, dále rovnoměrně rozložené elektromagnetické pole, méně náročné numerické výpočty a modelování tohoto pole, a nižší tepelné ztráty.[5],[63]



Obr. 3.4.1: Geometrie induktoru segmentového studeného kelímku, závislost provedení (lineární a gradientní induktor) a indukovaného výkonu do vsázky.[63]

Pro studený kelímek je však zapotřebí mnohem intenzivnější chlazení z důvodu chlazení jak induktoru, tak jednotlivých segmentů kelímku, který drží roztavenou vsázku.

Z tohoto důvodu se také využívá výhradně uzavřené smyčky chladicího okruhu, otevřený okruh chlazení by pro studený kelímek nebyl technicky realizovatelný, a jako chladicí medium je použita deionizovaná a demineralizovaná voda. Uzavřený chladicí okruh u studeného kelímku zahrnuje primární okruh, sekundární okruh, a nouzový okruh. Primární okruh chlazení obhospodařuje stěnu studeného kelímku, induktor, vysokofrekvenční napájecí zdroj, je-li chlazen vodou. Sekundární okruh, pokud je instalován, odebírá teplo z chladicí vody okruhu primárního výměníkem voda-voda, a dále vede svoji chladicí vodu do výměníků voda-vzduch. Pokud sekundární chladicí systém chybí, je tento tepelný výměník voda-vzduch umístěn již v primárním okruhu, často tomu tak je u studených kelímků menších výkonů. Nouzový okruh pak slouží k chlazení kelímku, induktoru, i zdroje napájení, pokud primární chladicí okruh selže, a bývá dimenzován na provoz jednotek až desítek minut provozu. Celková kapacita chladicího systému se pro studený kelímek o výkonech stovek kW pohybuje v tisících litrech chladicí vody.[64],[65]

### **3.5 Tavicí komora a stínění studeného kelímku**

Stejně jako indukční pece musí být i studený kelímek elektromagneticky stíněný. Stínění je nejčastěji realizováno stěnou tavicí komory, ve které je celé zařízení umístěno. Tavicí komora tedy zajišťuje stínění elektromagnetického vlnění, ale i kontrolu atmosféry pro tavení, stejně jako odvod odpadních částic a plynů během tavení, nebo i ochranu před případným únikem taveniny. Časté materiály pro tuto komoru jsou nemagnetická ocel či dural, pro dobrý poměr efektivity a pořizovacích nákladů a z důvodu snadné vyrobitelnosti komory.[66]

Protože ztráty ve stínění jsou v jednotkách procent příkonu studeného kelímku, je zapotřebí, aby byla stěna kelímku chlazená. Stěna tavicí komory tedy bývá dvojitá, s vnitřním chlazením napojeným na vodní hospodářství celého zařízení. Tavicí komory jsou dvojdílné nebo třídílné, přičemž v případě dvoudílné komory je celá soustava složena z hlavního dílu, který drží měřicí přístroje a studený kelímek, a poklopu, který zajišťuje vzduchotěsnost celého systému.[66],[67]

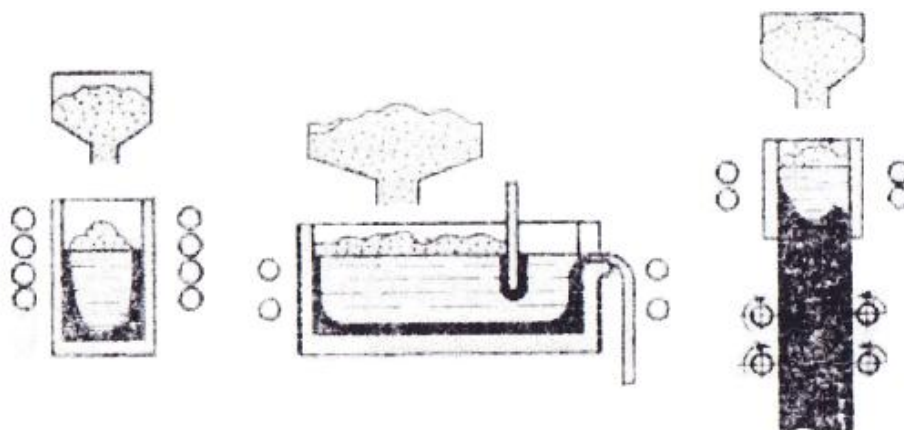
Pro tavení většiny materiálů ve studeném kelímku platí, že je třeba kontrolovat atmosféru během tavicího procesu a zároveň odsávat vzniklé výpary. Výpary jsou složeny z vodní páry, oxidů, stopových zbytků těžkých kovů nebo radioaktivních prvků, v závislosti na taveném materiálu a teplotě této taveniny.[5]



Obr. 3.5.1: Třídílná tavicí komora studeného kelímku: zadní část se studeným kelímkem, prostřední část komory se systémy kontroly atmosféry a měřicími přístroji, a přední víko.[67]

### 3.6 Zpracování taveniny

Při tavení ve studeném kelímku existuje několik základních způsobů zpracování taveniny, v závislosti na plánovaném využití studeného kelímku, konstrukčním provedení tavicí komory i studeného kelímku, dále na požadovaných vlastnostech vsázky z hlediska produktivity celého zařízení i možnosti krystalizace ingotu. Existují však tři základní možnosti tavení – jednorázové tavení, průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny, a průběžné tavení s odebráním ingotu z kelímku.[2],[5]



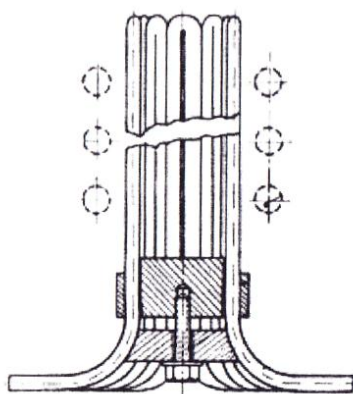
Obr. 3.6.1: Tavení vsázky ve studeném kelímku, řazeno zleva – a) jednorázové tavení na ingot, b) průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny, c) průběžné tavení s odebráním ingotu ze dna studeného kelímku.[2]

První možnost je jednorázové tavení vsázky. Před začátkem procesu je studený kelímek buďto naplněn materiálem k tavení, ať již elektricky vodivým nebo nevodivým včetně startovacího prvku, a proběhne roztavení celého objemu. Druhá možnost je roztavit



pouze zlomek z celkového objemu vsázky, a následně materiál přidávat do taveniny až v první fázi tavení. Tavení probíhá, dokud nedojde k homogenizaci taveniny, poté nastává fáze chladnutí vsázky. Pokud je chladnutí vsázky nekontrolované, dojde k vypnutí napájecího generátoru, přičemž chlazení funguje nadále. Nekontrolované chladnutí má výhodu především v nízkých nárocích na řízení procesu, a relativní rychlosti. Naopak v případě řízeného chladnutí ingotu je výkon generátoru postupně snižován, a tím je umožněno řídit krystalizaci vsázky a změnu materiálových vlastností takto vzniklého ingotu. Jednorázové tavení bývá mimo jiné často využité pro experimentální výzkum krystalizace, či pro výrobu monokrystalů velkých rozměrů.[2],[5]

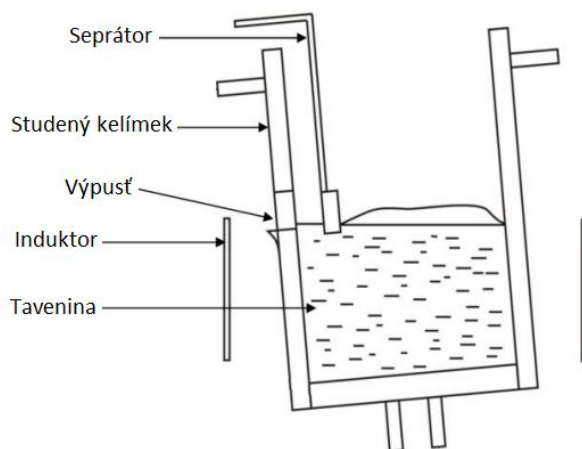
Hlavní výhodou jednorázového tavení představuje jednoduchá praktická realizace, a snadné řízení celého tavicího procesu vzhledem k ostatním způsobům tavení, a také možnost produkovat ingoty o velkých průměrech. Mezi zásadní nevýhody tavení tímto způsobem však patří nízká produktivita, která je způsobená kusovou produkcí ingotů a nutností po zchladnutí ingotu kelímek demontovat. To navíc způsobuje také vyšší náklady na tavení. Mezi další nevýhody tohoto způsobu patří větší náchylnost k lokálnímu přehřívání vsázky ve studeném kelímku menších průměrů.[2],[5]



*Obr. 3.6.2: Segmentový studený kelímek pro jednorázové tavení na ingot. Po demontování vnější bandáže, která drží segmenty kelímku a dno u sebe, lze kelímek rozebrat a vyjmout ingot z kelímku.[2]*

Druhou možností, jak tavit materiály ve studeném kelímku, je průběžné tavení s postupným uvolňováním taveniny. Cílem tohoto způsobu je uvolňovat z kelímku, ať již nárazově či průběžně, proud přehřáté taveniny do formy. Postupné uvolňování taveniny je využíváno především pro tavení skel. V dnešní době je toto průběžné tavení dosahováno třemi způsoby – umístěním výpusti ve dně studeného kelímku, kudy je odváděna tavenina, dále použitím hydraulicky naklápěného kelímku, anebo použitím kelímku se separátorem,

jenž umožní lití taveniny současně s doplňováním další vsázky do kelímku. Hlavní výhodou těchto způsobů tavení představuje vyšší produktivita v porovnání s jednorázovým tavením, nevýhodou je naopak složitější řízení celého procesu.[2],[68],[70]



*Obr. 3.6.3: Studený kelímek pro průběžné tavení s postupným uvolňováním vsázky částečným naklopením kelímku. Separátor je stejně jako studený kelímek vnitřně chlazený a odděluje hladinu taveniny u výpusti od hladiny, kam je přidáván další materiál vsázky.[70]*

Třetím způsobem, jak lze tavit vsázku ve studeném kelímku, je průběžné tavení s odebráním ingotu ze dna kelímku. Při tomto způsobu je vsázka roztavena, a následně je hydraulicky ovládané dno kelímku vysouváno spodem, a tím je vytahován ztuhlý ingot. Takto vzniklý ingot je posléze lámán na požadovanou délku, aby bylo možné neustále odebrat další a další přetavenou vsázku. Jiná možnost, jak z kelímku vytahovat ingot, je Czochralského technika, při které je ingot odebrán z hladiny taveniny namísto dnem. Tato technika se používá především pro výrobu krystalů křemíku.[2],[5]

Velkou výhodou tohoto způsobu představuje přesné řízení krystalizace ingotu, přičemž krystalizace (velikost, a typ krystalů) je dána především teplotou, časem a průběhem chladnutí – to je ovlivněno rychlostí odebrání ingotu z kelímku. Tato rychlost se v praxi může pohybovat v řádech desetin až desítek milimetrů ingotu za minutu. Ve srovnání s jinými způsoby tavení (kupříkladu pomocí VAR, tavení elektrickým obloukem) je řízení krystalizace ve studeném kelímku mnohem jednodušší.[2],[69]

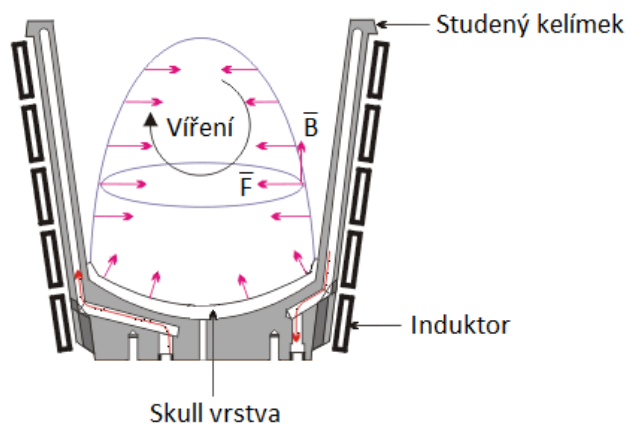


## 4 Tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku

### 4.1 Speciální slitiny, reaktivní kovy, a jejich tavení ve studeném kelímku

V posledních desetiletích se v mnoha oborech stále zvyšuje poptávka po pokročilých slitinách kovů – titanu, hliníku, hořčíku, apod., po vysoce čistých reaktivních kovech – titan, kobalt, či nikl. V případě běžných indukčních pecí u tavení takovýchto materiálů vzniká celá řada problémů. Jedná se především o chemickou reakci mezi taveninou a vyzdívkou pece, o erozi vyzdívkou pece vířením taveniny, která je značná u indukčních pecí pracujících se sít'ovou frekvencí, dále je zde také limit maximální pracovní teploty daný materiálem vyzdívkou indukční pece.[5]

Tyto zásadní nedostatky při tavení těchto materiálů eliminuje použití studeného kelímku. Při tavení ve vakuu ve studeném kelímku lze dosáhnout čistoty kovů až 4N (99,99%). Hodnota tlaku při takovéto aplikaci může dosahovat hodnot až  $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ . Pro vyšší hodnoty čistoty výsledného ingotu je nutno využít UHV (Ultra-High Vacuum) tavicí komory, které umožňují udržovat tlak menší než  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ , a dosahovat čistoty kovového ingotu 6N. Takováto hodnota čistoty, resp. znečištění, je již na hranici reálné měřitelnosti.[71],[82]



Obr. 4.1.1: Tavení elektricky vodivé vsázky ve studeném kelímku. Vrstva skull je při tavení jen ve spodní části z důvodu velkého vzedmutí hladiny taveniny.[73]

I přes vynikající kvality výsledných ingotů má studený kelímek pro tavení elektricky vodivých vsázek nevýhody. Nejzásadnější nevýhodou je nízká účinnost, která je určena především elektrickou a tepelnou vodivostí vsázky, a je tedy snaha co nejvíce omezit kontakt taveniny se stěnou studeného kelímku, tzv. semilevitačním tavení, při kterém je kontakt se stěnou kelímku minimální, nebo pak i přímo levitačním způsobem

tavení (CCLM, cold crucible levitation melting). Reálně se tak účinnost celého zařízení pro tyto materiály pohybuje přibližně do 20 %.[5]

## 4.2 Tavení titanu a jeho slitin

Titan představuje desátý nejrozšířenější prvek na Zemi, přesto k většímu průmyslovému rozmachu titanu a jeho slitin bránilo v minulém století jeho obtížné zpracování a tedy i jejich vysoká cena. Náklady na výrobu surového titanu jsou značně vyšší oproti oceli, nemluvě o mnohem složitějším opracování. Na rozdíl od např. železa, oceli či hliníku však nelze titan zpracovávat běžnými hutními metodami.[5],[74]

Mezi hlavní přednosti titanu patří velmi dobrá odolnost vůči okolí, titan si za běžných podmínek na svém povrchu vytváří velmi slabou vrstvu oxidů, což zabraňuje korozi ve většině plynů, i kyselin a solí. Naopak při vyšších teplotách během tavení, odlévání a chlazení reaguje s kyslíkem a dusíkem, a je tedy nutné titan zpracovávat ve vakuu či atmosféře inertního plynu, například argonu. Nesprávný procentuelní objem kyslíku ve vsázce by ve výsledku ovlivnil pevnost celého titanového odlitku, z tohoto důvodu nelze tavit titan ani žádnou jeho slitinu v klasické indukční peci s běžným keramickým či grafitovým kelímkem. Titan se tedy přetavuje i odlévá ve vakuových obloukových nebo právě ve studeném kelímku s kontrolovanou atmosférou.[5],[74],[75]

*Tab. 4.2.1: Přehled materiálů nejméně náchylných k reakci s taveninou titanu. Zejména tyto oxidové keramiky jsou využívány jako materiál formy na odlévání titanu.[76]*

Oxidy	$Y_2O_3$ , ThO, $Gd_2O_3$ , $ZrO_2$ , $Nd_2O_3$ , $Al_2Zr_3O_9$ , $CaZrO_3$
Fluoridy	$CaF_2$
Karbidy a nitridy	ZrC, NbC, $B_4C$ , BN
Kovy	Mo, Ta, W

Titan má vysokou teplotu tání, 1668 °C. Tato skutečnost je jak výhodou, kdy titan lze použít v aplikacích, kde je požadavek na vysokou teplotní odolnost a stálost, avšak také to ztěžuje možnosti odlévání. Navíc kvůli reakci taveniny s většinou oxidů je nutné použít speciální odlévací formy z nereaktivních sloučenin, často například na bázi zirkonia,

viz Tab. 4.2.1. Takovéto formy jsou ve srovnání s běžnými formami pro lití kupříkladu oceli podstatně dražší.[5],[75],[76]

Jak již bylo zmíněno, studený kelímek při tavení vytváří vrstvu „skull“ (ISM, Induction skull melting) která zabraňuje kontaktu tekuté taveniny se stěnou a dnem kelímku. Na rozdíl od VAR tavení tvoří ISM výhodu především v nulové kontaminaci titanové taveniny materiálem stěny kelímku, a zvláště výhodná je pak možnost recyklace titanového šrotu, což umožní zlepšit ekonomickou výhodnost celého procesu tavení titanu. Studený kelímek pak lze využít i pro přečištění titanu, kdy jsou extrahovány z taveniny ostatní nežádoucí prvky a sloučeniny ve formě výparů. Obecně lze uvést jako hlavní výhody tavení ISM následující: [5],[75]

- Možnost tavení širokého spektra speciálních slitin i reaktivních kovů
- Vrstva „skull“ navíc kromě znečištění aktuálně tavené vsázky způsobí, že lze tavit po sobě složením různé typy vsázek, bez jejich vzájemného ovlivnění
- Výborná kvalita odlitku nebo ingotu vlivem působení proměnného elektromagnetického pole, které způsobuje víření taveniny během ohřevu
- Hmotnosti vsázky až 100 kg
- Trvanlivost stěny studeného kelímku – až deset tisíc tavicích cyklů.

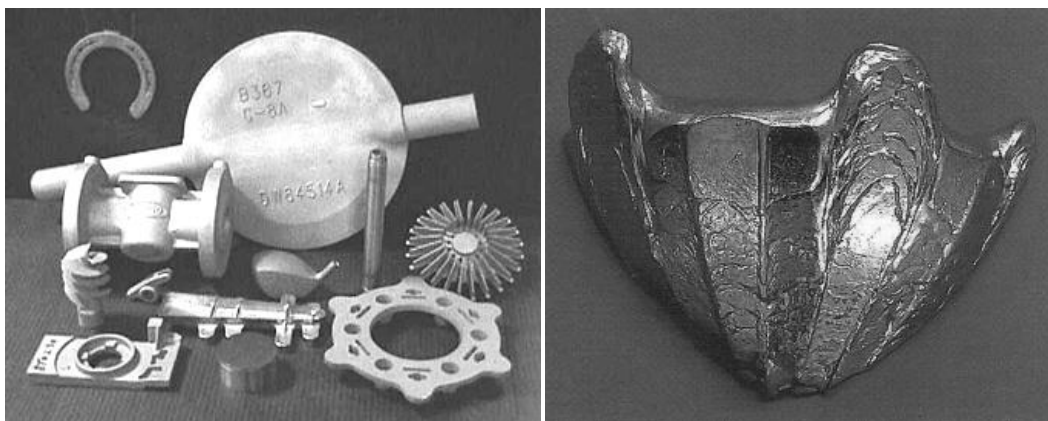
Tab. 4.2.2: Často tavené kovy a slitiny ve studeném kelímku (ISM):[75]

<b>Základ slitiny vyráběných ISM</b>				
<b>Ti</b>	<b>Ti-Al</b>	<b>Ni</b>	<b>Zr</b>	<b>Ostatní</b>
Ti (čistý)	Ti-Al- $\gamma$	Ni (čistý)	Zr (čistý)	Cu slitiny
Ti-Ta	Ti-3Al- $\alpha$ -2	NiAl	Zr-2,5Nb	Co slitiny
Ti-6Al-4V	TiAlNb	IN718	Zircaloy	Sb slitiny
Ti-6-2-4-2		IN713		Nb slitiny
Ti-5S-Ni				

V dnešní době při ISM lze produkovat titanové odlitky vysoké kvality. To je důležité zejména z ekonomického hlediska, protože kvalita titanového odlitku je v některých parametrech podobná kvalitě ingotu opracovaného kováním, avšak při mnohem příznivější ceně. Naopak tvářením titanu lze dosáhnout vyšší mechanické pevnosti, což se v některých případech může jevit jako výhodná vlastnost (např. tlakové nádoby) a titan obecně má horší obrobiteľnosť než většina jemu podobných kovů. Avšak odolnosti vůči mechanickému namáhání je v případě titanových odlitků lepší jak u výrobků

vyrobených kováním. Při srovnání VAR a studeného kelímku pro stejné objemy vsázky a stejný materiál vsázky při dlouhodobém provozu je studený kelímek ekonomičtější řešení.[75]

V případě titanových slitin patří mezi nejčastěji používanou slitina Ti-6Al-4V, udává se, že právě Ti-6Al-4V tvoří až 70 % všech titanových slitin. Důvod takového rozšíření právě této slitiny je následující – nízká měrná hustota při srovnatelné mechanické pevnosti ve srovnání s ocelí, vysoká odolnost proti korozivním vlivům, odolnost vůči abrazivním vlivům, vysoká mez kluzu, dobrá biomechanická kompatibilita. Z důvodu využití těchto slitin v medicíně v posledních desetiletí dochází k výzkumu i jiných slitin na bázi titanu, které neobsahují toxické prvky jako vanad a hliník – např. Ti-Ta, Ti-Ta-Nb.[74],[75],[79]



Obr. 4.2.1: a) Odlitky titanu (slitin) z ISM pomocí studeného kelímku. (vlevo, [75), b) Ingot Ti-30Ta vyrobený levitačním tavením ve studeném kelímku (vpravo, [79]).

Druhou možností, jak produkovat pomocí studeného kelímku titanové ingoty ve větších množstvích je odebrání ingotu dnem kelímku. Na kvalitu takto vyrobených ingotů ve studeném kelímku má vliv:

- Tavicí výkon studeného kelímku
- Rychlost vysouvání ingotu z kelímku
- Počet závitů induktoru studeného kelímku
- Tloušťka dna kelímku

Tavicí výkon ovlivňuje vzednutí roztavené vsázky a velikost elektromagnetického tlaku. Tento tlak mimo jiné má zásadní vliv na vnitřní pnutí materiálu a následné tvoření prasklin uvnitř objemu ingotu během vysouvání. Vznik prasklin a nehomogenit v ingotu ovlivní i rychlost vysouvání, intenzita a doba jeho chlazení, směr vysouvání ingotu pak určuje směr

růstu krystalů a jejich velikost. V případě pomalejšího vysouvání ingotu z kelímku je dost času k přestupu tepla v ose válcového ingotu.[80]



Rychlost vysunutí [mm/min]	5	3	3	3	5
Tavicí výkon [kW]	50	50	55	60	55
Závitů induktoru	4	3	4	5	5

*Obr. 4.2.2: Ingot Ti6Al4V o průměru 3 cm vyrobený průběžným tavením ve studeném kelímku a vliv parametrů na strukturu jeho povrchu; směr vysouvání ingotu shora dolů.[80]*

Na vznik nerovností na povrchu ingotu má především vliv rychlost jeho vysouvání z kelímku a tavicí výkon. Při nízké rychlosti bude mít povrch vytahovaného ingotu tendenci zůstat hladký s minimem nerovností, s nárůstem rychlosti vytahování se bude zvyšovat šance na vznik povrchových prasklin v řádu až jednotek mm hloubky. Při nesprávném výkonu induktoru při tomto způsobu tavení nebude vrstva skull rovnoměrně po celé ploše dna a ani poblíž rozhraní dno-spodní část stěny kelímku. [81]

### 4.3 Proces čištění titanu od nežádoucích příměsí

Za čistý titan lze považovat jakýkoliv ingot o kvalitě 3N a vyšší (99,999% titanu v celém objemu ingotu). Při tomto procesu je nutné použít atmosféru z inertních plynů nebo vakua, podobně jako při běžném tavení vakua, pro vyšší hodnoty čistoty než 3N lze využít studený kelímek s UHV, a dosahovat čistoty ingotu až 5N pro kovy obecně, nejen pouze titan.[5],[82]

Hlavní plynné nečistoty v objemu taveniny představuje kyslík, dusík, síra. Během tavicího procesu s UHV kontrolou atmosféry dochází nejprve k vytvoření vakua, roztavení

vsázky a následně jsou tyto výpary odsávány. Díky UHV lze pracovat s hodnotou tlaku v řádech  $10^{-8}$  Pa, což umožní odstranit většinu prvků i z titanového ingotu čistoty 5N, jak prokázal experiment v The Japan Institute of Metals. Extrakce nežádoucích prvků z titanu tímto způsobem (ICCM UHV) však v praxi není rozšířená.[82]

*Tab. 4.3.1: Změna podílu pevných nečistot při přetavení čistého titanu (5N) ve studeném kelímku s UHV kontrolou atmosféry. Při použití UHV lze poměrně dobře eliminovat některé obsažené prvky.[82]*

	<b>Al</b> [ppm]	<b>Cl</b> [ppm]	<b>Cr</b> [ppm]	<b>Cu</b> [ppm]	<b>Fe</b> [ppm]	<b>Na</b> [ppm]	<b>S</b> [ppm]	<b>Zr</b> [ppm]
<b>Titan</b> (výchozí, 5N)	0,16	0,06	0,45	0,62	0,08	0,06	0,66	0,75
<b>Titan</b> (ICCM UHV)	0,07	< 0,01	0,23	0,74	0,03	0,01	0,05	0,61

## 5 Tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku

### 5.1 Startovací proces pro tavení

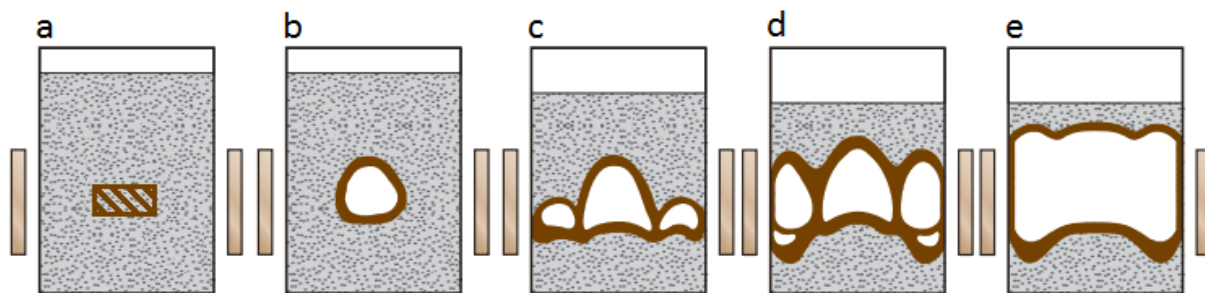
Studený kelímek našel uplatnění pro tavení a syntézu sloučenin s nízkou měrnou elektrickou i tepelnou vodivostí. Ať se již jedná o speciální skla, oxidy, nebo třeba termoizolační keramiky. Protože takové materiály nelze tavit v běžných kelímkových pecích z důvodu relativně vysokých bodů tání těchto materiálů a chemické reakce s vyzdívkou kelímku, jsou tyto materiály taveny ve studeném kelímku. Stejně jako u tavení elektricky vodivých materiálu zde vzniká vrstva skull.[5]

V případě tavení elektricky nevodivých materiálů je však tato vrstva také elektricky a většinou i tepelně nevodivá, zatímco tekutá tavenina při tavení elektricky vodivá je. To má za následek, že nedochází k tak velkým tepelným ztrátám konvekcí na rozhraní vsázka-kelímek, a razantně se zvyšuje v porovnání s běžně vodivou vsázkou účinnost celého zařízení, která může dosahovat až 90 %.[2],[5]

Elektricky nevodivé materiály nelze reálně roztavit pomocí elektromagnetické indukce. Aby došlo ke zvýšení elektrické vodivosti, je nutno tuto vsázku nějakým způsobem předehřát. Předehřívací nebo také startovací proces se označuje jako „set-up“ nebo „start-up“, a existují následující způsoby, jak jej provést:

- Ohřevem vsázky plynovým hořákem
- Ohřevem vsázky elektrickým obloukem
- Ohřevem vsázky plazmou
- Ohřevem vsázky exotermickou oxidací kovu, jehož oxid je taven
- Ohřevem vsázky pomocí konvekce z elektricky vodivého materiálu umístěného do vsázky.[2],[5]

Nejčastější metodou, jak předehřát elektricky nevodivou vsázku, je právě využití exotermické oxidace kovů. Do oxidové vsázky se umístí kovové částice ve formě drti či třísek, které po ohřevu elektromagnetickou indukcí předávají teplo do elektricky nevodivé vsázky konvekcí a sáláním. Výhodou tohoto způsobu je nulová kontaminace oxidové vsázky, protože pro jejich předehřátí jsou použity kovy, na jejichž bázi tyto tavené oxidy jsou – pro  $\text{Al}_2\text{O}_3$  právě hliník, apod. Tento startovací materiál se umísťuje do objemu vsázky, aby se minimalizovaly tepelné ztráty.[2]



Obr. 5.1.1: Startovací proces pro tavení oxidové vsázky ve studeném kelímku. Vložení kovové části do objemu vsázky (a), natavení elektromagnetickou indukcí (b), postupný ohřev objemu vsázky (c,d,e).[85]

Další z možností, jak zahájit tavení elektricky nevodivé vsázky, je použití prstence nejčastěji grafitu, případně i karbidu křemíku, molybdenu či žíhané oceli, který je vložen do objemu této vsázky několik centimetrů pod hladinu. Elektromagnetická indukce způsobí ohřev grafitu, který se chová jako závit nakrátko a následně předává teplo vedením zbytku nevodivé vsázky. Z hlediska samotné vsázky se tedy jedná o přímý odporový ohřev. Tohoto způsobu startovacího procesu lze využít v případě tavení vsázek s nižší teplotou tání vzhledem k tomuto prstenci, nebo pokud není vyžadována velká čistota ingotu. Tento způsob je využíván kupříkladu pro vitifikaci radioaktivního odpadu ve studeném kelímku, kde nevádí přítomnost tohoto grafitového prstence.[2],[5]

Na efektivitu startovacího procesu předchozích dvou způsobů má vliv několik faktorů. Vliv má objem tohoto startovacího prvku, kdy při jeho malém objemu (nebo i špatném tvaru) je riziko jevu elektromagnetické průžažnosti, a tedy přehřátí vsázky by zabralo neúměrně dlouhou dobu, nebo by vůbec nemuselo nastat. Dále má také vliv místo umístění startovacího prvku do nevodivé vsázky - umísťuje se pod hladinu do objemu vsázky, avšak pokud by byl tento prvek vložen hluboko do vsázky, blízko dnu studeného kelímku, mohl by se v případě sypké ještě neroztavené vsázky propadnout až na chlazené dno, což by také negativně ovlivnilo celý přehřívací proces.[5],[83]

Pro ohřev elektricky nevodivé vsázky je možné také použít plynových hořáků, které nataví povrch vsázky. Přestože se jedná o relativně snadný způsob, jak docílit ohřevu vsázky, jsou zde dvě negativa. Prvním je ovlivnění chemického složení spalinami plynového hořáku, a tedy nelze tento způsob využít pro výrobu ingotů o vysoké čistotě. Druhým je pak odふうávání sypkého materiálu vsázky ven ze studeného kelímku, což tento způsob předurčuje spíše na tavení vsázky z několika málo kusů či hrubé drti. V praxi se tento způsob přehřívání používá jen v malém rozsahu. Tyto plynové hořáky lze mimo



jiné využít nejen ke spuštění tavení vsázky, ale i k jejímu přehřívání během odlévání.[2],[5]

## 5.2 Chladnutí přetavené vsázky a její krystalizace

Výroba krystalů z taveniny oxidů a skel pomocí studeného kelímku probíhá při chladnutí přetavené vsázky. Tyto krystaly se po opracování využívají v širokém spektru aplikací – optika, laserová zařízení, mikroelektronika, a dalších. Krystalizace taveniny lze ve studeném kelímku dosáhnout pomocí následujících způsobů:

- Vypnutí napájení induktoru studeného kelímku.
- Litím vsázky do vody
- Chlazením vsázky prouděním vzduchu
- Přímou krystalizací
- Czochralského metodou

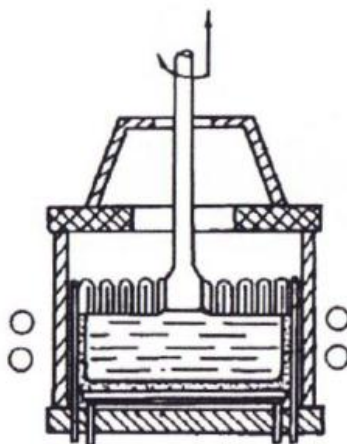
V případě nárazového vypnutí napájení induktoru dochází k rychlé krystalizaci celého objemu vsázky, podobně tomu je i u lití vsázky do vody, což vede k rychlému chladnutí. Chlazení proudem vzduchu se využívá zejména při vytahování ingotu z kelímku při průběžném tavení, přičemž množstvím vzduchu, který ochlazuje ingot, lze ovlivnit jeho krystalizaci. Pro lepší řízení krystalizace je potřeba postupně měnit a snižovat výkon induktoru, nebo vzájemně posouvat studený kelímek a induktor, aby bylo dosaženo správného rozložení teplotního pole uvnitř objemu vsázky. Často využívanou metodou je Czochralského metoda krystalizace, kdy je z hladiny taveniny vytahován monokrystal.[2],[5]

Pokud krystalizace taveniny probíhá přímo v kelímku, je po ukončení krystalizace nutno zchladit ingot na teploty v rozsahu přibližně 50 – 80 °C, aby mohl být vyjmut z kelímku. Po odčerpání chladicí vody ze stěny resp. segmentů studeného kelímku lze kelímek demontovat na jednotlivé prvky, a ingot vyjmout.[2]

## 5.3 Czochralského metoda růstu krystalů

Významnou metodou pro vytvoření syntetických monokrystalů ve studeném kelímku je Czochralského metoda - v posledních desetiletích bylo touto metodou vyrobeno více než 95 % všech monokrystalů křemíku (celkem, ne jen ve studeném kelímku). Princip spočívá ve vytahování krystalu z hladiny taveniny uvnitř kelímku na tzv. „zárodek“. Po

roztavení vsázky je shora na taveninu spuštěna tyč, na jejímž konci je tento zárodek. Po kontaktu studeného zárodka a přehřáté hladiny taveniny dochází k teplotnímu šoku a spojení těchto dvou prvků. Průměr takto vyráběného krystalu je nejvíce ovlivněn teplotou vsázky, a rychlostí vytahováním této tyče i její rotace. V praxi lze touto metodou vyrobit monokrystal o průměru až 400 mm, což by u jiných metod krystalizace nebylo možné.[2],[84]



Obr. 5.3.1: Segmentový studený kelímek pro Czochralského metodu výroby krystalů.[2]

Czochralského metoda krystalizace je závislá na víření taveniny, a specifickém rozložení tepla v jejím objemu. Teplota taveniny musí být měřena a regulována tak, aby byla zahájena krystalizace. Tato metoda je náročná na regulaci celého procesu, zejména z důvodu:

- Obtížné přesné regulace teplot taveniny
- Víření taveniny
- Regulace otáčení ingotu k studenému kelímku
- Nerovnoměrného rozložení teploty uvnitř taveniny i na jejím povrchu.[2]

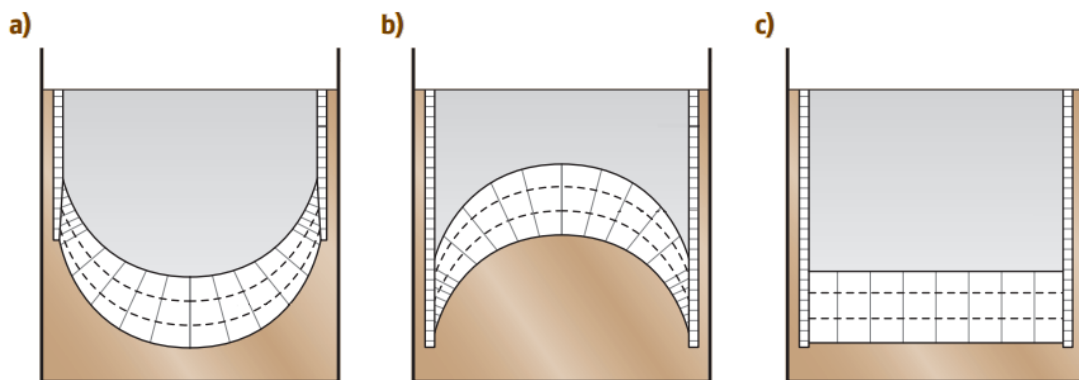
Teplotní gradient uvnitř vsázky ovlivňují především konstrukční a provozní parametry studeného kelímku, jako např. rozměry kelímku, tvar a pozice induktoru vzhledem ke hladině taveniny, parametry napájení vysokofrekvenčním generátorem, nebo i přídatné zdroje ohřevu vsázky. Aby nedocházelo k negativnímu ovlivnění krystalu atmosférou v tavicí komoře, je nutné celý tento proces provádět ve vakuu nebo v inertních plynech (Argon). Rychlost vytahování krystalu se v závislosti na průměru požadovaného krystalu pohybuje od setin až po jednotky milimetrů krystalu za minutu. Rychlost otáčení tohoto krystalu je opět určena jeho požadovaným průměrem, otáčky jsou v řádu jednotek až desítek *ot/min*. [2],[84]

## 5.4 Metoda přímé krystalizace

Metoda přímé krystalizace ve studeném kelímku je další způsob, jak nechat vsázku cíleně krystalizovat. Tento způsob se vyznačuje především jednoduchostí řízení celého procesu, kdy působení elektromagnetického pole na vsázku je regulováno vzájemnou pozicí induktoru a studeného kelímku, který je během přímé krystalizace vysouván spodem z induktoru, a tím je řízeno chladnutí taveniny a krystalizace. Stejného efektu na tavenou vsázku lze dosáhnout též snižováním výkonu napájecího generátoru, avšak generátor musí být pro takovou operaci konstruován z hlediska změny dodávaného výkonu.[2],[5]

Ve srovnání s Czochralského metodou popsanou v předchozí kapitole má přímá krystalizace ve studeném kelímku tyto zásadní výhody:

- Přímá krystalizace není ovlivněna atmosférou v tavicí komoře studeného kelímku, lze tedy tavit bez potřeby inertních plynů či vakua
- Snazší přidávání legovacích přísad do taveniny
- Ve vsázkách větších objemů probíhá míchání taveniny vířením, což snižuje obsah nečistot ve směru růstu krystalů.[2]



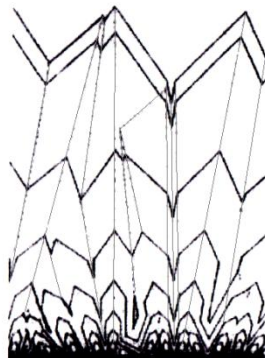
Obr. 5.4.1: Tvary krystalů a směr jejich růstu při přímé krystalizaci ve studeném kelímku:

a) konkávní, b) konvexní, c) vodorovný směr.[85]

Průběh krystalizace a velikost těchto krystalů je ovlivněna celkovým objemem vsázky ve studeném kelímku, směrem růstu krystalů, a rychlostí chladnutí vsázky, tedy změnou elektromagnetického pole ať již posunem kelímku, nebo snižováním výkonu generátoru. Směr krystalizace a velikost finálních krystalů bude určeno zejména teplotou taveniny a její elektrickou vodivostí. Tyto dva parametry budou ovlivňovat tvar hladiny, a tedy i podobu krystalu.[2],[85]

Pro růst krystalů jsou preferovány konvexní nebo vodorovný směr (viz Obr. 5.4.1),

protože umožňují produkci sice menšího počtu krystalů, avšak při zvýšení jejich velikosti. Dále také tyto směry krystalizace poskytují vyšší čistotu a menší tepelné namáhání krystalů během růstu. Konkávní směr krystalizace umožní produkci většího množství krystalů při přímé krystalizaci, ale za cenu jejich menších rozměrů.[85]



Obr. 5.4.2: Fáze růstu krystalů při přímé krystalizaci ve studeném kelímku.[2]

Tab. 5.4.1: V praxi používané metody krystalizace pro oxidy a karbidy:[2]

Materiál vsázky	Bod tání sloučeniny [°C]	Metoda krystalizace
MgO <sub>2</sub>	2800	Přímá
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2046	Czochralského
TiO <sub>2</sub>	1855	Přímá
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1560	Přímá
ThO <sub>2</sub>	3400	Přímá
UO <sub>2</sub>	2878	Přímá
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2400	Czochralského
ZrO <sub>2</sub>	2400	Přímá
B <sub>4</sub> C	2500	Přímá
SrTiO <sub>3</sub>	1910	Czochralského

## 5.5 Vysokoteplotní syntéza oxidů, tavení keramik a skel ve studeném kelímku

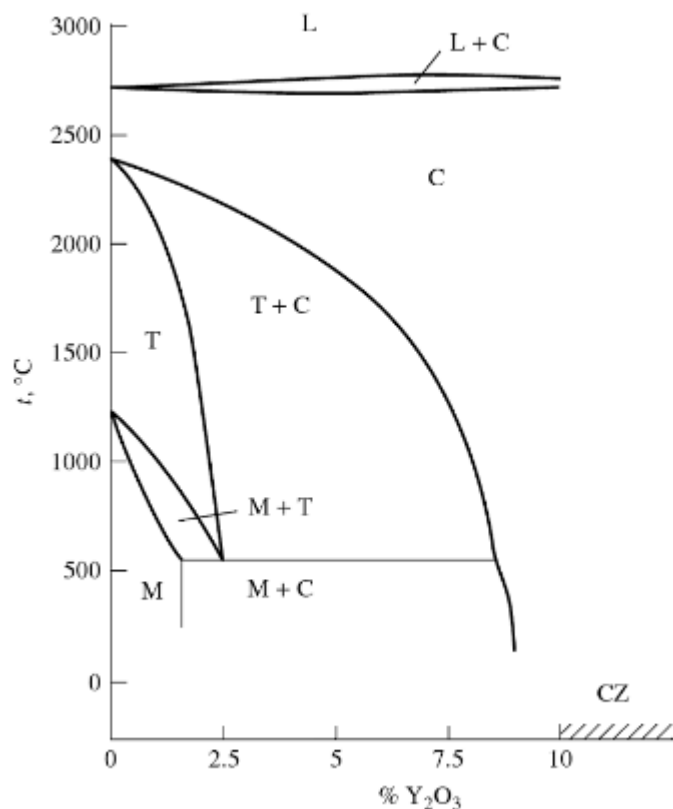
Pro výrobu většiny materiálů s vysokým bodem tání, ať již speciálních skel, krystalů, nebo keramik, platí, že je potřeba nejprve provést syntézu základních sloučenin. Normálně toho bývá dosaženo syntézou v pevném stavu sloučenin při spékání drcené vsázky na přibližně 60 – 80 % její teploty tavení, zejména kvůli problémům dosahovat tak vysokých teplot v tavenině u jiných zařízení.[2]

Při tavení těchto sloučenin ve studeném kelímku lze vysokoteplotní syntézu sloučenin provádět při kapalném stavu vsázky. To umožní celý proces více než stonásobně urychlit, navíc dosahovat vyšší čistoty i lepší struktury takto zpracované vsázky. Proces syntézy oxidů bývá prováděn bez použití kontrolované atmosféry při tavení, protože kyslík obsažený ve vzduchu tvoří jednu ze složek pro požadovanou reakci oxidové taveniny. V závislosti na viskozitě taveniny a rozpustnosti obsažených plynných sloučeninách může nastat například rychlé vyhoření jedné ze součástí sloučeniny vsázky a tím je snížena výsledná kvalita vsázky. Navíc absorpce nadměrného množství kyslíku ze vzduchu může způsobit poruchy během chladnutí ingotu této sloučeniny po syntéze.[2],[5]

Nevýhodou použití studeného kelímku s měděnými segmenty nebo stěnou induktoru, která tvoří stěnu kelímku, je skutečnost, že dochází k nárůstu podílu mědi ve finálním ingotu. Tento jev je způsoben reakcí síry a chlóru obsažených ve vsázce s povrchem měděného kelímku. Proto se pro tavení kupříkladu některých skel používá nerezový či hliníkový studený kelímek, který přestože má jako celé zařízení nepatrně nižší účinnost, tak stěna kelímku chemicky neovlivní takovouto vsázku.[2]

Syntézou oxidů ve studeném kelímku lze také vyrobit materiály na bázi např.  $ZrO_2$  a  $Y_2O_3$ . Tyto materiály se pak využívají pro výrobu termoizolačních žárupevných keramik, kde tyto keramiky dosahují velmi nízkých hodnot tepelné vodivosti v jednotkách  $W/mK$ , velmi nízkých hodnot smršťování působením tepla i minimálních deformací při výrobě. Kupříkladu právě oxid zirkoničitý se používá k výrobě termoizolačních keramických vyzdívek, jako složka brusných materiálů, skelných vláken, či krystalů.[2]

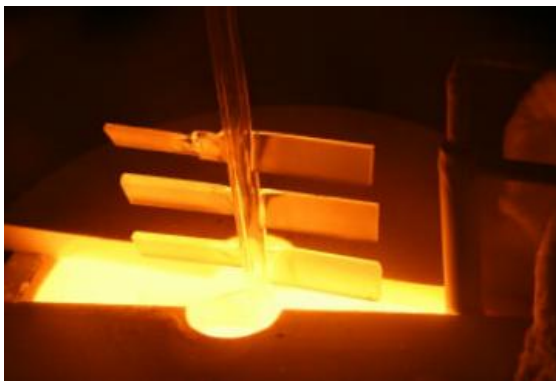
$ZrO_2$  se vyznačuje během tavení, podobně jako ostatní oxidy, změnou své krystalové mřížky. Do teploty vsázky  $1173\text{ }^\circ\text{C}$  má monoklinickou, v rozmezí teplot  $1173 - 2370\text{ }^\circ\text{C}$  tetragonální, a nad  $2370\text{ }^\circ\text{C}$  až k bodu tání krychlovou krystalickou strukturu. Krychlová mřížka zirkonia se dále pomáhá stabilizovat pomocí sloučenin např.  $Y_2O_3$ , přičemž tento oxid yttria může dosahovat až 40 % objemu celé vsázky zirkonia. Ve studeném kelímku se tedy vytvoří ingot zirkonia, který je následně dále zpracováván – rozdrcen a z této granulované drti je spékáním dále vytvářena keramika, připravovány abrazivní materiály, apod. Krychlové zirkonium lze mimo jiné využít i jako náhradu přírodního diamantu díky jeho velmi dobré tvrdosti (8,5 pro  $ZrO_2$  oproti 10 Mohsovy stupnice pro diamant), navíc má i dobrý refraktivní index lomu světla.[86]



Obr. 5.5.1: Graf zobrazující závislost krystalové mřížky  $ZrO_2$  na teplotě této vsázky a procentuelním obsahu oxidu yttria pro stabilizaci krystalové mřížky při výrobě kubického zirkonu (oblast značená CZ). Značení krystalových mřížek: M – monoklinická, T – tetragonální, C – krychlová, L – tekutá tavenina.[86]

Tavení skel ve studeném kelímku je další specifickou oblastí. Běžné metody tavení skel, jako plynové či odporové elektrické pece, jsou limitovány teplotou 1600 °C, a neumožňují vytvořit skla takových parametrů jako právě studený kelímek. Speciální skla, zejména pro aplikaci v oblasti optiky, smí obsahovat jen minimální množství nečistot, a z tohoto důvodu se často využívá studených kelímků z nerezů či platiny, kde nedojde k ovlivnění složení vsázky měděnou stěnou studeného kelímku.[2]

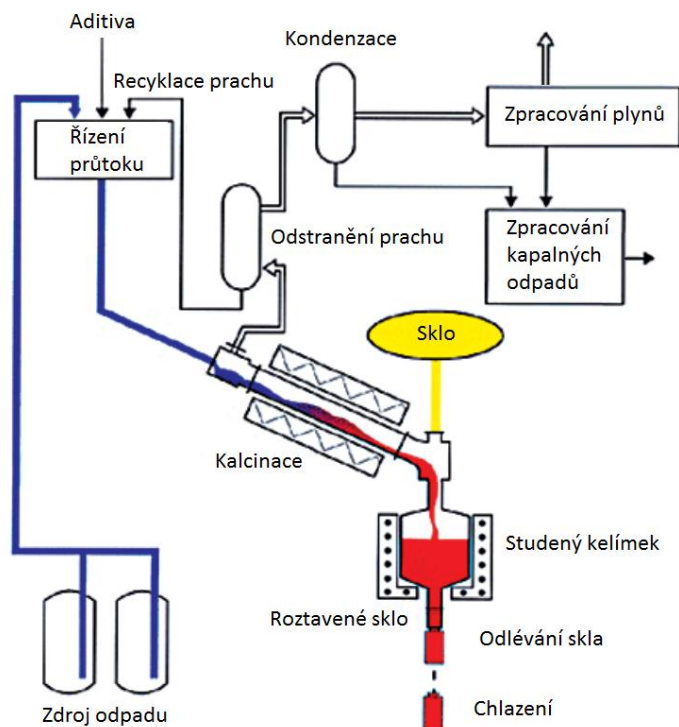
Po roztavení vsázky při výrobě skla je nutné zajistit homogenizaci taveniny. Z celého procesu výroby skel ve studeném kelímku je proces homogenizace nejdélsí, trvá v závislosti na typu a složení taveného skla i několik hodin. Přestože princip studeného kelímku zajistí víření kapalné taveniny, pro skla s větší viskozitou taveniny je nutné zajistit pro požadovanou homogenitu přídatné míchání. Toho je dosaženo pomocí míchacího zařízení zhotoveného ze speciálních žárupevných skel. V poslední fázi probíhá rychlé chlazení vsázky, aby vsázka nestihla krystalizovat a vzniklo tak sklo.[88]



Obr. 5.5.2: Zařízení pro míchání taveniny při produkci skel ve studeném kelímku.[88]

## 5.6 Vitrifikace odpadu ve studeném kelímku

Radioaktivní odpad, především z jaderných elektráren, představuje značné nebezpečí pro životní prostředí jak vysokou toxicitou, tak i radioaktivním zářením. V posledních desetiletích probíhá výzkum použití právě studeného kelímku pro vitrifikaci radioaktivního odpadu zalitím do speciálních skel. Takto zpracovaný odpad tvoří až 50 % objemu celé tavené vsázky. Radioaktivní odpady se dělí podle úrovně radioaktivity do tří skupin: Nízkoradioaktivní, středně radioaktivní a vysoce radioaktivní odpad.[2]



Obr. 5.6.1: Schéma vitrifikace radioaktivních odpadů ve studeném kelímku při průběžném tavení.[91]

Nizkoradioaktivní odpad (LLW, Low level waste) – naprostá většina radioaktivních odpadů celkem (udává se 90 %). Jedná se především o ochranné obleky, laboratorní nebo nemocniční vybavení, nebo jakékoliv předměty vystavené slabší radiaci. Středně radioaktivní odpad (ILW, Intermediate level waste) – například filtry, materiály pro uskladnění palivových článků. Podíl těchto odpadů je přibližně 7 %. Vysoce radioaktivní odpad (HLW, High level waste) – ačkoliv představuje pouhé 3 % všech radioaktivních odpadů, jedná se o nejnebezpečnější odpad s podílem radioaktivní látky až 95 % ve svém objemu. Do HLW se řadí hlavně vyhořelé palivo z jaderných elektráren.[89],[90]

Pro vitrifikaci odpadu ve studeném kelímku jsou nejčastěji použita borosilikátová skla, která se v praxi osvědčila. Tato skla musí být odolná proti teplotnímu působení odpadu, chemickým i radiačním vlivům, a navíc musí být mechanicky stálá. Výhodou těchto materiálů je také relativně nízká tavicí teplota, která se pohybuje v rozsahu 1200 - 1400 °C. Během vitrifikace ve studeném kelímku je nejprve radioaktivní odpad rozdrcen a obohacen aditivou, a následně vysušen v kalcinátoru. Během kalcinace vznikají odpadní plyny, které musí být filtrovány a zpracovány, neboť obsahují radioaktivní prach. Pevné částice jsou recyklovány a vráceny nazpět do vitrifikačního procesu, plyny jsou v kondenzátoru z části přeměněny na kapalný odpad, případně dále filtrovány. Poté je v případě průběžného tavení neustále do studeného kelímku dodávána jak drť radioaktivního odpadu, tak skla. Tavenina této směsi je po přetavení odebrána z kelímku a skladována v kontejnerech.[5],[91],[92]

Tab. 5.6.1: Složení borosilikátových skel pro vitrifikaci HLW odpadu.[92]

	<b>SiO<sub>2</sub></b> [%]	<b>Na<sub>2</sub>O</b> [%]	<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> [%]	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> [%]	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> [%]	<b>MoO<sub>3</sub></b> [%]	<b>Ostatní</b> [%]
<b>SUMo2-12a</b>	35,09	8,55	15,16	6,03	3,70	12,00	19,47
<b>SUMo2-12c</b>	35,99	8,79	12,96	6,18	3,69	12,00	20,39
<b>SUMO1-10a</b>	33,13	12,05	20,08	20,08	3,10	10,00	1,56

V současné době probíhá výzkum nových typů skel pro vitrifikaci především HLW odpadu nejen z hlediska chemického složení, ale i výzkumu jejich chování v dlouhodobém měřítku. Také je snaha navýšit produktivitu těchto zařízení na stovky kilogramů zpracovaného odpadu za hodinu a využití vitrifikace studeným kelímkem ve větším rozsahu.[2],[5]



## 6 Hodnocení studeného kelímku metodou 3E, efektivita tavení a závěry pro praxi

### 6.1 Ekologické hledisko využití studeného kelímku

Ve srovnání s pecí pro spalování fosilních paliv jsou přednosti studeného kelímku z hlediska ekologie zřejmé – při tavení nevznikají spaliny a není potřeba palivo pro roztavení vsázky. Spolu s ostatními typy v praxi využívaných elektricky napájených pecí, jako jsou obloukové, indukční nebo odporové pece, představuje studený kelímek ekologickou formu tavení širokého spektra materiálů, především těch obtížně tavitelných. Právě obloukové pece lze označit za přímé konkurenty studeného kelímku – umožňují tavit obtížně tavitelné materiály elektricky běžně vodivé i nevodivé při dobré čistotě výsledného ingotu, avšak jejich zásadní nevýhodu představují elektrody, které je třeba pravidelně měnit, neboť dochází vlivem provozu k jejich opotřebení oxidací a opalem. Pece s nepřímým ohřevem odporové vsázky jsou sice z hlediska ekologie výhodné, avšak jsou limitovány nižšími maximálními teplotami tavené vsázky. Nižší provozní teploty taveniny dosahují ve srovnání se studeným kelímkem také indukční pece, kelímkové či kanálkové. Ty jsou výhodné kupříkladu pro tavení a recyklaci hliníku z důvodu relativně vysoké účinnosti. Recyklace hliníku, či obecně recyklace kovů s dobrou elektrickou vodivostí, je sice ve studeném kelímku proveditelná, avšak pro nízkou účinnost studeného kelímku nevýhodná.[5]

Studený kelímek se využívá i pro vitrifikaci radioaktivních odpadů zalitím do borosilikátových skel. Jaderný odpad (HLW) představuje vážnou hrozbu pro životní prostředí, a právě studený kelímek představuje ekologický způsob, jak zpracovat vyhořelé palivo z jaderných elektráren a připravit jej pro uskladnění v hlubinném úložišti. Tabulka 6.1.1 srovnává možnosti vitrifikace radioaktivních odpadů v odporové peci a ve studeném kelímku. Ve studeném kelímku lze dosahovat mnohem vyšších teplot, naopak odporové pece mívají zpravidla větší objemy vsázek. [91],[92],[94]

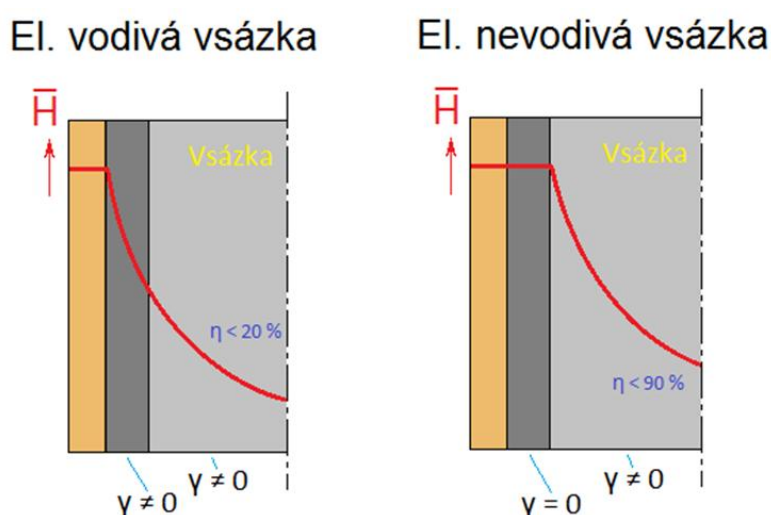
Studené kelímky, resp. jejich tavicí komory, bývají vybavené systémem na odsávání plynů a částic (tzv. Off-gas system) vzniklých při tavení, neboť tyto výpary mohou obsahovat toxické či radioaktivní sloučeniny a představovat nebezpečí pro obsluhu kelímku i životní prostředí.[5]

Tab. 6.1.1: Srovnání možnosti vitrifikace radioaktivních odpadů metodou studeného kelímku a v odporové peci.[94]

	Odporová pec	Studený kelímek
Kapacita tavení [kg/h]	až 25	až 25
Spotřeba energie na tavení vsázky [kWh/kg]	2,5 - 3,2	4,4 - 6,4
Pracovní teplota [°C]	až 1300	až 3000
Hmotnost zařízení včetně vsázky [kg]	přes 1000	do 200
Účinnost zařízení [%]	40 - 50	30 - 60

## 6.2 Efektivní tavení vsázky ve studeném kelímku

Efektivní tavení ve studeném kelímku závisí na několika parametrech. Prvním z těchto parametrů efektivního tavení je typ vsázky – elektricky vodivá a nevodivá. Pro elektricky vodivou vsázku platí, že účinnost tavení se pohybuje v rozsahu asi 10 – 20 %. Důvodem je elektricky a také tepelně vodivá vrstva skull, která se při tavení ve studeném kelímku vytvoří na rozhraní vsázka-kelímek (či vsázka-dno kelímku, z důvodu vzednutí taveniny). Tato vodivá vrstva skull působí z hlediska elektromagnetického vlnění jako stínění, a brání ohřevu tekuté vsázky. Navíc bývá i relativně dobře tepelně vodivá, a dochází tak k zásadním tepelným ztrátám ze vsázky do chlazené stěny studeného kelímku.[5]

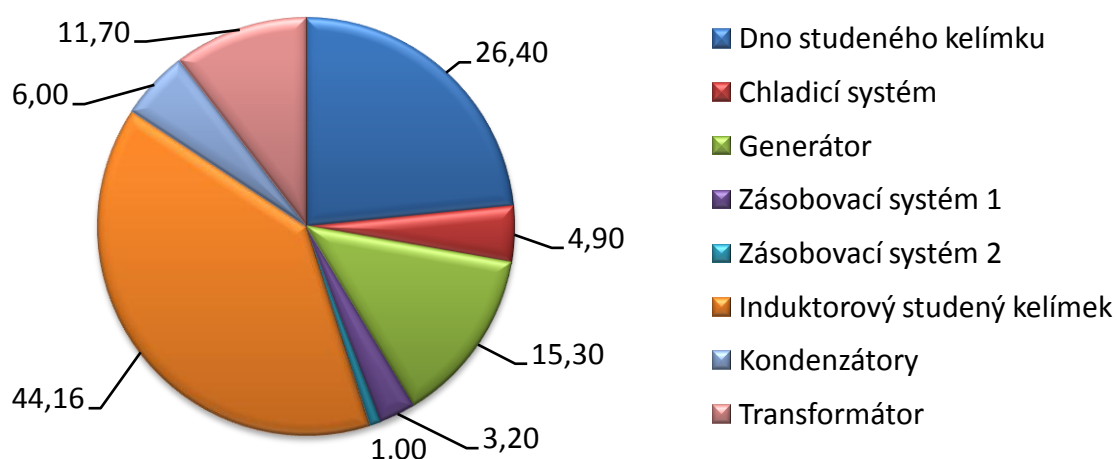


Obr. 6.2.1: Vliv elektrické vodivosti vrstvy skull (tmavě šedá) na pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky ve studeném kelímku.[9]

Pro tavení elektricky běžně nevodivé vsázky má studený kelímek podstatně větší účinnost, lze dosáhnout účinnosti zařízení až 90 %. Tyto materiály, jako např. oxidy, jsou nejen dobré elektrické ale hlavně tepelné izolanty a tepelné ztráty z jejich vrstvy skull jsou tak nízké. Tyto materiály je pro úspěšné tavení potřeba přehřát (viz kapitola 5.1) a elektricky vodivá je tak jen kapalná tavenina, vrstva skull nikoliv. Tato vrstva mezi stěnou kelímku a taveninou je nejen tepelný izolant, ale především je elektromagneticky průzařná, a negeneruje tak neúčinné ztráty.[5]

S jevem elektromagnetické průzařnosti a efektivním tavením souvisí také vhodná volba frekvence napájení induktoru vysokofrekvenčním generátorem. Pro efektivní tavení je naprosto nezbytné dodržet podmínku, aby poloměr tavené vsázky uvnitř kelímku činil asi trojnásobek hloubky vniku elektromagnetického vlnění do vsázky (viz kapitola 1.7). Pokud by byl poloměr vsázky menší než dvojnásobek hloubky vniku, jednalo by se o neefektivní tavení s rizikem elektromagnetické průzařnosti vsázky. Naopak pokud by poloměr vsázky byl neúměrně velký, vsázka sice nebude průzařná, avšak zvolená frekvence napájení bude pro takovýto materiál vsázky zbytečně vysoká.[5]

S elektromagnetickou průzařností souvisí také skutečnost, že se materiálové parametry některých vsázek v průběhu tavení mohou razantně měnit, především relativní permeabilita v oblasti Curieovy teploty, a elektrická vodivost vsázky s její narůstající teplotou. Pro danou frekvenci napájení se tedy vsázka může v průběhu tavicího procesu změnit z elektromagneticky neprůzařné na průzařnou, což je jev nežádoucí.[5]



Obr. 6.2.2: Ztráty ve studeném kelímku induktorového typu o maximálním výkonu 320 kW a o vnitřním průměru 25 cm při tavení skla během homogenizační fáze procesu. Hodnoty grafu jsou v kW.[88]

### 6.3 Ekonomika provozu studeného kelímku

V tabulce 6.3.1 je srovnáván studený kelímek s obloukovou pecí při produkce titanové slitiny Ti-6Al-4V pro výrobu golfových holí. Ačkoliv maximální hmotnost vsázky je u studeného kelímku nižší než u VAR, tavení ve studeném kelímku představuje v dlouhodobém provozu výhodnější řešení, zejména z důvodu rychlejších tavicích cyklů a nižších nákladů na jeden tavicí cyklus. To je způsobeno nutností výměny elektrod u obloukové pece po určitém počtu cyklů.[75]

Tab. 6.3.1: Dlouhodobé srovnání obloukové pece a studeného kelímku pro výrobu Ti-6Al-4V slitiny.[75]

	<b>VAR</b>	<b>Studený kelímek</b>
<b>Dnů v roce v provozu</b>	230	230
<b>Hodin v provozu za den</b>	24	24
<b>Průměrná doba pracovního cyklu [min]</b>	7,75	6
<b>Přibližný počet tavení za den</b>	152,32	196,80
<b>Max. hmotnost vsázky</b>	15,30	7,50
<b>Náklady na tavení 1 kg vsázky [USD/kg]</b>	15,00	8,25
<b>Hmotnost elektrody</b>	129	-
<b>Výdrž elektrody (počet cyklů)</b>	12	-
<b>Hmotnost zpracované taveniny za rok [t]</b>	446,70	423,20
<b>Pořizovací náklady zařízení [\$]</b>	1 290 000	1 100 000
<b>Celkové náklady na jeden tavicí cyklus [\$]</b>	203,48	59,25
<b>Celkové náklady na materiál za rok [\$]</b>	6 432 253	2 087 802

V tabulkách 6.3.2 a 6.3.3 je porovnávána spotřeba energie pro tavení oxidů ve studeném kelímku jak jednorázovým způsobem tavení, tak při průběžném tavení. Jak bylo zmíněno i v kapitole 3.6, průběžné tavení, přestože je mnohem složitější na řízení a regulaci celého procesu, je mnohem výhodnější při sériové výrobě ingotu. Produktivita při

průběžném tavení je mnohem vyšší, při nižší energetické spotřebě. To je způsobeno hlavně eliminací nutnosti pokaždé zahajovat tavbu startovacím procesem, jako je tomu u jednorázového tavení ve studeném kelímku.[2]

Tab. 6.3.2: Produktivita studeného kelímku v praxi při tavení oxidů, jednorázové tavení:[2]

Tavený materiál	Plocha hladiny taveniny [ $cm^2$ ]	Produktivita [ $kg/h$ ]	Energie potřebná pro tavení 1 kg vsázky [ $kWh$ ]
CaO	65	3,5	8,5
ZrO <sub>2</sub>	50	2,0	7,0
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	2,5	5,3
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	4,0	4,1
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	3,1	7,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	2,7	3,6

Tab. 6.3.3: Produktivita studeného kelímku v praxi při tavení oxidů, průběžné tavení:[2]

Tavený materiál	Plocha hladiny taveniny [ $cm^2$ ]	Produktivita [ $kg/h$ ]	Energie potřebná pro tavení 1 kg vsázky [ $kWh$ ]
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95	25,0	2,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80	13,0	2,1
MgO	80	11,5	6,0
CeO <sub>2</sub>	80	9,0	4,5

## 7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést rozbor problematiky indukčních ohřevů v kelímkové peci a ve studeném kelímku. V první kapitole byl uveden teoretický podklad pro elektromagnetické indukční ohřevy reálných zařízení. Byly popsány jevy, které zásadním způsobem ovlivňují účinnost indukčního ohřevu, jako elektromagnetická průžařnost, elektrodynamický tlak a víření, či vztahy pro popsání vzájemného vztahu elektromagnetického pole induktoru a vložené válcové vsázky. Na tento teoretický úvod navazuje druhá kapitola, jež se zabývá indukční kelímkovou pecí. V této kapitole je rozbor v praxi používaných materiálů vyzdívkou takovéto pece, konstrukčního provedení induktoru a chladicího okruhu, a především různých typů napájecích generátorů. V této kapitole je též zmíněno použití indukční kelímkové pece pro recyklaci hliníkového šrotu, což představuje jeden z klíčových směrů využití této pece i v budoucnosti, především z důvodu celosvětového nárůstu spotřeby hliníku v širokém spektru odvětví. Dále byla popsána metoda VIM pro speciální slitiny kovů, nejen na bázi hliníku. Třetí kapitola uvádí studený kelímek obecně jako technologii vysokofrekvenčních ohřevů, přičemž nejvíce prostoru bylo věnováno konstrukčním provedením kelímku, provedení induktoru a tavicí komory. Pomocné systémy, které jsou téměř totožné s indukční kelímkovou pecí popsanou v druhé kapitole, byly zmíněny jen okrajově. Také byly uvedeny postupy tavení a možnosti zpracování taveniny a výsledného ingotu ve studeném kelímku. Čtvrtá kapitola se pak zabývá tavením elektricky běžně vodivých materiálů ve studeném kelímku. V této kapitole je popsána technologie tavení titanových slitin za použití studeného kelímku, zejména pak slitina Ti-6Al-4V při výrobě metodou průběžného tavení. Zmíněna je též technologie čištění titanu pomocí UHV studeného kelímku. Pátá kapitola naopak rozebírá použití studeného kelímku pro tavení elektricky běžně nevodivých materiálů, a problematiku startovacího procesu před samotným tavením. Převážná část této kapitoly pak zmiňuje praktickou realizaci krystalizace taveniny ve studeném kelímku metodou přímé krystalizace a Czochralského metodou. Dále je popsána výroba keramik a speciálních skel ve studeném kelímku, především na bázi oxidu zirkoničitého, a také vitrifikace radioaktivních odpadů do skleněné matrice pro hlubinné uložení těchto odpadů. Poslední kapitola uvádí hodnocení studeného kelímku z hlediska ekologických vlivů, efektivity tavení pro elektricky vodivé i nevodivé vsázky, i ekonomičnosti provozu pro konkrétní tavené vsázky.

Zařízení pro indukční ohřevy, nejen kelímkové pece, ale i studený kelímek, sice

nepředstavují nové technologie, přesto k jejich vývoji dochází neustále. Studený kelímek umožňuje tavit nejen pokročilé slitiny kovů a speciální skla či keramiky, ale lze jej využít pro vitifikaci radioaktivních odpadů. Přesto neustále probíhá výzkum, simulace a modelování konstrukčních prvků studeného kelímku ohledně rozložení elektromagnetického i tepelného pole během startovací fáze, tavení, i krystalizace vsázky, a také možností studeného kelímku pro tavení vsázek s vysokým bodem tání a zlepšení efektivity celého procesu. Výsledky těchto výzkumů najdou uplatnění nejen v průmyslu, ale například i v medicíně.[5],[72]

Pro tuto diplomovou práci byly využity především cizojazyčné odborné zdroje, zejména pak články o výzkumu indukčních ohřevů vsázky ve studeném kelímku i indukčních kelímkových pecích publikované univerzitami a vědeckými ústavami z Německa, USA, Ruska, Francie, Japonska, ale také třeba z Číny, nebo České Republiky. Konkrétně v Plzni byla nedávno dokončena laboratoř studeného kelímku ve spolupráci Ústavu jaderného výzkumu v Řeži se Západočeskou univerzitou v Plzni. Odborná literatura pak byla využita spíše pro teoretický úvod a popsání základních jevů indukčních ohřevů, neboť publikované vědecké články a zprávy z výzkumných institutů po celém světě lépe zachycují nejnovější výzkum a aktuální poznatky v tomto oboru.

## 8 Zdroje a literatura

- [1] MÜHLBAUER, A. *History of induction heating & melting*, Vulkan-Verlag GmbH, 2008, Essen, ISBN 978-3-8027-2946-1.
- [2] KUDRYASH, M. *Experimental investigation of induction melting in cold crucible for high temperature processing of oxides using HF transistor power supply*. Disertační práce. Der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover, 2011, Hannover.
- [3] *Elektrina a magnetismus, Maxwellovy rovnice* [online]. [cit. 21. 9. 2016]. URL: < [https://is.muni.cz/el/1441/podzim2015/FY2MP\\_TF3/Maxwellovy\\_rovnice.pdf](https://is.muni.cz/el/1441/podzim2015/FY2MP_TF3/Maxwellovy_rovnice.pdf) >.
- [4] RUDNEV, V. et al. *Handbook of induction heating*, CRC Press, 2003, New York, ISBN 0-8247-0848-2.
- [5] TOPINKA, J. *Tavení materiálů ve studeném kelímku*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2015, Plzeň.
- [6] *Efficient melting in coreless induction furnaces* [online]. [cit. 27. 9. 2016]. Good practice guide, 2000, Harwell, Oxfordshire. URL: < [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) >
- [7] HRADÍLEK, Z., LÁZNIČKOVÁ, I., KRÁL, V. *Elektrotepelná technika*. ČVUT, 2011, Praha, ISBN 978-80-01-04938-9.
- [8] *Refractories for Coreless Induction Furnace* [online]. [cit. 14. 10. 2016]. URL: < <http://www.insertec.biz/en/refractory-products/steel-foundry/coreless-induction-furnaces> >
- [9] LANGER, E. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Academia, 1979, Praha.
- [10] Field Strength/Intensity [online]. [cit. 14. 10. 2016]. URL: < <http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa05.en.html> >
- [11] *DORIT Prefabricated Crucible for coreless induction furnaces* [online]. [cit. 17. 10. 2016]. URL: < <http://www.doerentrup-feuerfest.de/files/dfp/img/prospekte/2015079-dorit-en.pdf> >
- [12] MAYER, D. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. Kopp, 2012, České Budějovice, ISBN 978-80-7232-436-1.
- [13] *Curieova teplota feromagnetik* [online]. [cit. 5. 11. 2016]. URL: < <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=6> >



- 0096 >
- [14] *High performance lining technology for aluminium foundries* [online]. [cit. 5. 11. 2016]. URL: < [https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/crucibles/brochures/linings\\_nf-e.pdf.downloadasset.pdf](https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/crucibles/brochures/linings_nf-e.pdf.downloadasset.pdf) >
- [15] *Molten Metal Splash and Furnace Refractory Safety (part 2)* [online]. [cit. 5. 11. 2016]. URL: < <http://foundrymag.com/feature/molten-metal-splash-and-furnace-refractory-safety-part-2> >
- [16] *Sintering procedure for Svenska silica in coreless induction furnaces* [online]. [cit. 23. 11. 2016]. Anniston, Chehalis, 1-800-446-8769, URL: < <http://www.pryorgiggey.com/HUS/Svenska%20Sintering%20Procedure.pdf> >
- [17] *Sintering agent* [online]. [cit. 23. 11. 2016]. URL: < <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/sintering-agent-4063/?cHash=adda95d1d2307c02eb76334a5cb3c438> >
- [18] *The Induction Heating and Melting Safety Fundamentals Guide That Might Save Your Life* [online]. [cit. 24. 11. 2016]. INDUCTOTHERM, 2006, URL: < <http://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2575-0107.pdf> >
- [19] *Induction furnace lining guide* [online]. [cit. 27. 11. 2016]. URL: < <https://www.scribd.com/doc/164595819/Induction-furnace-lining-guide> >
- [20] ZUNO-SILVA J. et al. *Laboratory scale study of uncommon degradation SiO<sub>2</sub> refractories used on induction furnaces*. Universidad De La Salle Bajío, 2013, México. ISSN 2007 – 0705. URL: < <http://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v6n11/v6n11a8.pdf> >
- [21] *Induction melting / heating / holding systems* [online]. [cit. 2. 12. 2016]. 5M INDUCTION, URL: < <http://www.5m-induction-systems.com/galeriresim/Catalog.pdf> >
- [22] LANGER, E., KOŽENÝ, J. *Elektrotepelná zařízení indukční: základy teorie, výpočty a konstrukce*. VŠSE, 1982, Plzeň.
- [23] *Mica for induction furnace* [cit. 17. 12. 2016]. URL: < <http://www.okabe-mica.co.jp/en/tape04.html> >
- [24] CIGNETTI N. P, *Maintaining Coreless Induction Furnace Water Systems* [online]. [cit. 18. 12. 2016]. Modern Casting, 2001, USA. URL: < <https://www.thefreelibrary.com/Maintaining+Coreless+Induction+Furnace+Water> >

- r+Systems.-a077198046 >
- [25] *Indukční ohřev* [online]. [cit. 22. 12. 2016]. URL:  
< <http://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/> >
- [26] *Průmyslové elektronky* [online]. [cit. 22. 12. 2016]. URL: < <http://www.electron-tubes.cz/prumyslove-elektronky> >
- [27] *Tyristorové měniče kmitočtu pro indukční ohřev s výstupním kmitočtem 0,2 – 10 kHz* [online]. [cit. 22. 12. 2016]. URL:  
< <http://www.roboterm.cz/produkty/menice-kmitoctu/0-2-10-khz-nad-100kw> >
- [28] ZINN S., SEMIATIN S. L. *Elements of induction heating, Design, Control, and Application*. ASM International, 1988, Ohio, California. ISBN 978-0-87170-308-8.
- [29] KHAN, I. *Analysis and design of a high frequency induction-heating system*. [online]. [cit. 6. 2. 2017]. University of Cape Town, 2003, JAR. URL:  
< [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=24&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiVqdm566nSAhWK1RQKHbqZBMo4ChAWCG8wDQ&url=https%3A%2F%2Fopen.uct.ac.za%2Fbitstream%2Fitem%2F20137%2Fthesis\\_ebe\\_2003\\_khan\\_irshad.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AFQjCNFuom-fNBzbU11COlg47k9IZmsaTQ](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=24&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiVqdm566nSAhWK1RQKHbqZBMo4ChAWCG8wDQ&url=https%3A%2F%2Fopen.uct.ac.za%2Fbitstream%2Fitem%2F20137%2Fthesis_ebe_2003_khan_irshad.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AFQjCNFuom-fNBzbU11COlg47k9IZmsaTQ) >
- [30] TOKUNÇ C. O., *Modeling of a shunt active power filter with EPLL based control method for migration of power quality problems caused by induction furnaces* [online]. [cit. 6. 2. 2017]. ADANA, 2010, Turecko. URL:  
< <http://library.cu.edu.tr/tezler/8111.pdf> >
- [31] *Magnetic Flux Control in Induction Heating* [online]. [cit. 8. 2. 2017]. URL:  
< <http://fluxtrol.com/magnetic-flux-control-in-induction-heating> >
- [32] NOVÁK J., *Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (I)* [online]. [cit. 8. 2. 2017]. URL: < <http://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/1801-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-i> >
- [33] DUGHIERO F., FORZAN M., GREGGIO C. *Shielding of EM fields in induction heating and melting installations* [online]. [cit. 8. 2. 2017]., 2008, Hannover. URL:  
< <http://www.modlab.lv/publications/MEP2008/pdfs/77-82.pdf> >
- [34] *High Frequency Induction Furnace* [online]. [cit. 8. 2. 2017]. URL:  
< <http://www.sinfo-eng.co.jp/eng/induction-furnace/high.html> >
- [35] *Go the safe way, Measuring technology for melting & holding equipment* [online]. [cit. 11. 2. 2017]. URL: < [http://www.saveway-germany.de/wp-content/uploads/Saveway\\_Prosp\\_Det\\_App\\_EN.pdf](http://www.saveway-germany.de/wp-content/uploads/Saveway_Prosp_Det_App_EN.pdf) >

- [36] *Magnetic Shielding Analysis of an Induction Furnace* [online]. [cit. 8. 2. 2017]. 2013, URL: < [https://www.jmag-international.com/catalog/83\\_InductionFurnance\\_MagneticShielding.html](https://www.jmag-international.com/catalog/83_InductionFurnance_MagneticShielding.html) >
- [37] *Basics of non contact temperature measurement* [online]. [cit. 13. 2. 2017]. MICRO-EPSILON, URL: < <http://www.micro-epsilon.com/download/products/data-infrared-basics--en-us.pdf> >
- [38] *Laboratoř studených kelímků* [online]. [cit. 22. 2. 2017]. URL: < <http://susen2020.cz/projekty/infrastruktura/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/> >
- [39] *Induktives Skull-Melting von innovativen Materialien* [online]. [cit. 22. 2. 2017]., Institut für Elektroprozessstechnik Leibniz Universität Hannover, URL: < [https://www.etp.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Broschuere\\_Skull.pdf](https://www.etp.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Broschuere_Skull.pdf) >
- [40] KOŽENÝ, J. et al. *Power losses in induction furnace with cold crucible with different segments shape* [online]. [cit. 24. 2. 2017]., Electroscop, URL: < [http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/Rocnik2014/Cislo1\\_2014/r8c2c4.pdf](http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/Rocnik2014/Cislo1_2014/r8c2c4.pdf) >
- [41] BEHRENS, T. *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters*, Cuvillier Verlag Göttingen, 2007, Hannover. ISBN 9783867274050.
- [42] KAWANO H., TSUDA M., NAKAI Y. *Segmented cold-wall induction melting crucible US 5283805 A* [online]. [cit. 1. 3. 2017]., URL: < <https://www.google.com/patents/US5283805> >
- [43] MATEIKA D. W., LAURIEN R. *Cold crucible system and method for the meeting and crystallization of non-metallic inorganic compounds US 4609425 A* [online]. [cit. 1. 3. 2017]., URL: < <https://www.google.ch/patents/US4609425> >
- [44] WINDSHEIMER H., WAITZ R., WÜBBEN P. *Inductive melting in cold crucible: technology and applications* [online]. [cit. 1. 3. 2017]., HEAT PROCESSING, 2015, URL: < [https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user\\_upload/pages/about\\_us/download/publications/induction\\_heating/Inductive\\_melting\\_in\\_cold\\_wall\\_crucible\\_-\\_technology\\_and\\_applications.pdf](https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/induction_heating/Inductive_melting_in_cold_wall_crucible_-_technology_and_applications.pdf) >
- [45] ROT, D. et al., POZNYAK, I. *Experimental design of the cold crucible* [online]. [cit. 2. 3. 2017]., URL: < [http://www.academia.edu/30072360/Experimental\\_design\\_of\\_the\\_cold\\_cr](http://www.academia.edu/30072360/Experimental_design_of_the_cold_cr)

- ucible >
- [46] SONG J. H. *An electromagnetic and thermal analysis of a cold crucible melting* [online]. [cit. 2. 3. 2017]., 2005, South Korea. URL: < <http://opac.vimaru.edu.vn/edata/E-Journal/2005/International%20communications%20in%20heat%20and%20mass%20transfer/v31-10/article9.pdf> >
- [47] *Aluminium* [online]. [cit. 5. 3. 2017]., URL: < <http://www.madehow.com/Volume-5/Aluminum.html> >
- [48] *Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development* [online]. [cit. 5. 3. 2017]., URL: < [http://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2013/01/15/fl0000181.pdf](http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/fl0000181.pdf) >
- [49] SMITH, L. *The role of coreless induction furnaces for recycling aluminium scrap* [online]. [cit. 5. 3. 2017]. EA Technology, 1994, Chester, UK. URL: < <http://documentslide.com/download/link/the-role-of-coreless-induction-furnaces-for-recycling-aluminium-scrap> >
- [50] SCHLESINGER, M. E. *Aluminum Recycling*, Second Edition, 2013, ISBN 9781466570245
- [51] SCHMITZ, W., TRAUZEDDEL, D. *Latest developments in recycling production residues employing coreless induction furnaces* [online]. [cit. 5. 3. 2017]., Otto Junker GmbH, Germany. URL: < [http://www.amap.de/fileadmin/files/Kolloquium/2.\\_Kolloquium/2013\\_EM\\_C\\_OTTO\\_JUNKER\\_Recycling\\_Production\\_Residues.pdf](http://www.amap.de/fileadmin/files/Kolloquium/2._Kolloquium/2013_EM_C_OTTO_JUNKER_Recycling_Production_Residues.pdf) >
- [52] PUGA, H., BARBOSA, J., RIBIERO, C. S. *Factors Affecting the Metal Recovery Yield During Induction Melting of Aluminium Swarf* [online]. [cit. 7. 3. 2017]., 2013, Portugal. URL: < <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/24846/1/Factors%20affecting%20the%20metal%20recovery%20yield%20during%20induction%20melting%20of%20aluminium%20swarf.pdf> >
- [53] *Aluminium & Non Ferrous Scrap* [online]. [cit. 7. 3. 2017]., URL: < <http://www.jbmi.com/metals/scrap/> >
- [54] *WEIMA shreds metal!* [online]. [cit. 8. 3. 2017]., URL: < <http://weima.com/en/shredding/metal.html> >
- [55] TUCHOLSKI G. *Chips versus briquettes: How the aluminium industry can effectively and efficiently recycle scrap* [online]. [cit. 8. 3. 2017]., ALUMINIUM,

- 2013, USA. URL:  
 < [http://www.rmp.lv/downloads/RUF.Chips\\_versus\\_briquettes.pdf](http://www.rmp.lv/downloads/RUF.Chips_versus_briquettes.pdf) >
- [56] PUGA, H., et al. *Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts* [online]. [cit. 8. 3. 2017]., 2009, Portugal. URL:  
 < [http://www.academia.edu/9008711/Recycling\\_of\\_aluminium\\_swarf\\_by\\_direct\\_incorporation\\_in\\_aluminium\\_melts](http://www.academia.edu/9008711/Recycling_of_aluminium_swarf_by_direct_incorporation_in_aluminium_melts) >
- [57] *Vacuum Induction Melting* [online]. [cit. 12. 3. 2017]., ASM International, 2008. URL: < [http://www.asminternational.org/documents/10192/22533690/05115G\\_Sample\\_BuyNow.pdf/1e9c159d-93ba-48fd-9164-7d8b8479cf6e](http://www.asminternational.org/documents/10192/22533690/05115G_Sample_BuyNow.pdf/1e9c159d-93ba-48fd-9164-7d8b8479cf6e) >
- [58] *The Concept of Success in Vacuum Induction Furnace Technology* [online]. [cit. 12. 3. 2017]., ALD Vacuum Technologies GmbH, Germany. URL:  
 < <http://pdf.directindustry.com/pdf/ald/vacuum-induction-degassing-pouring-furnaces/21806-206897.html> >
- [59] HASENHÜDL, R. *Vacuum Induction Melting – Optimisation of Pressure Dependent Reactions* [online]. [cit. 15. 3. 2017]., LMPC, 2007, Austria. URL:  
 < [https://online.unileoben.ac.at/mu\\_online/voe\\_main2.getVollText?pDocumentNr=9487&pCurrPk=11514](https://online.unileoben.ac.at/mu_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=9487&pCurrPk=11514) >
- [60] *Oxygen Free Copper and its Applications* [online]. [cit. 15. 3. 2017]., 2010, URL:  
 < <https://customcable.ca/oxygen-free-copper-and-its-applications/> >
- [61] *Vacuum induction melting furnace and casting furnace* [online]. [cit. 15. 3. 2017]., URL: < <http://www.gfe.com/en/know-how/production-technology/metallurgical-melting/vacuum-induction-melting/> >
- [62] BLACHA, L., SIWIEC, G., OLEKSIK, B., *Loss of aluminium during the process of Ti-Al-V alloy smelting in a vacuum induction melting (VIM) furnace* [online]. [cit. 19. 3. 2017]., METALURGIJA, 2013, ISSN 0543-5846. URL:  
 < [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=17&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiotPf355\\_TAhUEEpoKHR7JDMc4ChAWCFowBg&url=http%3A%2F%2Fhrca.srce.hr%2Ffile%2F140913&usg=AFQjCNH0ppCctccljwbdMgbbveAY5BaA](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=17&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiotPf355_TAhUEEpoKHR7JDMc4ChAWCFowBg&url=http%3A%2F%2Fhrca.srce.hr%2Ffile%2F140913&usg=AFQjCNH0ppCctccljwbdMgbbveAY5BaA) >
- [63] GOMBERT, D., RICHARDSON, J. G. *Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development* [online]. [cit. 2. 3. 2017]., Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Idaho Falls, 2001, Idaho. URL:  
 < <https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/3024978.pdf> >

- [64] PERICLEOUS, K. et al. *Experimental and numerical study of the cold crucible melting process* [online]. [cit. 19. 3. 2017]., CSIRO, 2003, Melbourne, Australia. URL: < [http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf03/papers/050Per.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf03/papers/050Per.pdf) >
- [65] SUGILAL, G. et al., DEY, G. K. *Development of induction Skull Melting Technology* [online]. [cit. 19. 3. 2017]., BARC NEWSLETTER, 2015. URL: < <http://www.barc.gov.in/publications/nl/2015/2015111211.pdf> >
- [66] JIŘINEC, S., ROT, D. *Cold crucible HFG160* [online]. [cit. 22. 3. 2017]., Electroscop, 2017. URL: < <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/25707/1/Jirinec.pdf> >
- [67] *Cold Crucible Induction Melting and Casting* [online]. [cit. 19. 3. 2017]. URL: < <http://typo3.p223807.webspaceconfig.de/en/products/vacuum-precision-casting/cold-crucible-leicomelt/> >
- [68] SUGILAL, G., SENGAR, P. B. S., MISRA S. D. *Cold crucible induction melter: Technology development for HLW vitrification* [online]. [cit. 19. 3. 2017]. BARC NEWSLETTER, 2007. URL: < <http://www.barc.gov.in/publications/nl/2007/200701-3.pdf> >
- [69] MASAHIRO, S. et al. *Evolution of continuous melting and decontamination for dismantled metal by an induction cold crucible* [online]. [cit. 20. 3. 2017]. WM'00 Conference, 2000, USA. URL: < <http://www.wmsym.org/archives/2000/pdf/11/11-07.pdf> >
- [70] NACKE, B. et al. *Continuous melting and pouring of an aluminum oxide based melt with cold crucible* [online]. [cit. 20. 3. 2017]. 2016, France. URL: < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01331350/document> >
- [71] TAKAKI, S., ABIKO, K. *Ultra-Purification of Electrolytic Iron by Cold-Crucible Induction Melting and Induction-Heating Floating-Zone Melting in Ultra-High Vacuum* [online]. [cit. 20. 3. 2017]. Institute for Materials Research, Tohoku University, 2000, Japan. URL: < <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/41/01/2.pdf> >
- [72] PÁNKOVÁ, A. *Implantáty s novými materiály by mohly vydržet déle*. Plzeňský deník, [cit. 6. 5. 2017].
- [73] *New Spin on Titanium Casting Technology* [online]. [cit. 24. 3. 2017]. URL: < <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=286> >
- [74] VNOUČEK, M. *Nikl a jeho slitiny, Titan a jeho slitiny* [online]. [cit. 24. 3. 2017]. URL: < [https://www.opi.zcu.cz/download/nikl-titan-09\\_10.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf) >
- [75] *Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits* [online]. [cit. 24. 3.

- 2017]. 2001. URL: < <http://www.industrialheating.com/articles/83906-induction-skull-melting-offers-ti-investment-casting-benefits> >
- [76] SAHA, R. L., JACOB, K. T. *Casting of Titanium and its Alloys* [online]. [cit. 25. 3. 2017]. URL: < <https://www.scribd.com/document/139286572/Casting-of-Ti-and-Its-Alloy> >
- [77] TADANO, H. et al. *Levitational melting of several kilograms of metal with a cold crucible* [online]. [cit. 25. 3. 2017]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 1994, Japan. URL: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=334207> >
- [78] *Melting and Pouring of the Reactive Metals* [online]. [cit. 25. 3. 2017]. URL: < <http://www.totalmateria.com/Article145.htm> >
- [79] FUKUI, H., YANG, W., YAMADA, S. *Cold Crucible Levitation Melting of Biomedical Ti-30 wt%Ta Alloy* [online]. [cit. 26. 3. 2017]. Dental Materials Journal, 2001. URL: < [https://www.jstage.jst.go.jp/article/dmj1982/20/2/20\\_2\\_156/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/dmj1982/20/2/20_2_156/_pdf) >
- [80] CHEN, R. et al. *Process on cold crucible electromagnetic casting for titanium alloy* [online]. [cit. 26. 3. 2017]. Harbin Institute of Technology, 2007, China. URL: < <http://www.foundryworld.com/uploadfile/2008111841244109.pdf> >
- [81] TANAKA, T., KURODA, A., KURITA, K. *Continuous Casting of Titanium Alloy by an Induction Cold Crucible* [online]. [cit. 28. 3. 2017]. Sumitomo Metal Industries, 1992, Japan. URL: < [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/32/5/32\\_5\\_575/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/32/5/32_5_575/_pdf) >
- [82] TAKAKI, S., ABIKO, K. *Purification of Cobalt, Nickel, and Titanium by Cold-Crucible Induction Melting in Ultrahigh Vacuum* [online]. [cit. 20. 3. 2017]. Institute for Materials Research, Tohoku University, 2006, Japan. URL: < <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/01/156.pdf> >
- [83] ROT, D., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J., KŘESINA, M. *The influence of the position of the starting material during melting by the electromagnetic induction in a cold crucible* [online]. [cit. 28. 3. 2017]. Západočeská univerzita v Plzni, 2014, Česká Republika. URL: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6839489> >
- [84] LORENC, M., ŠIK, J., VÁLEK, L. *Technologie růstu monokrystalů křemíku Czochralskiho metodou* [online]. [cit. 1. 4. 2017]. 2004. URL: < [http://silicon.euweb.cz/LORENC\\_CZSi.pdf](http://silicon.euweb.cz/LORENC_CZSi.pdf) >
- [85] OSIKO, V. V., BORIK, M., LOMONOVA, E. E. *Synthesis of Refractory Materials*

- by *Skull Melting Technique* [online]. [cit. 1. 4. 2017]. Russian Academy of Sciences, 2010, Russia. URL:  
< [https://www.researchgate.net/profile/E\\_Lomonova/publication/226166782\\_Synthesis\\_of\\_Refractory\\_Materials\\_by\\_Skull\\_Melting\\_Technique/links/0f317530b0197230cb000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/E_Lomonova/publication/226166782_Synthesis_of_Refractory_Materials_by_Skull_Melting_Technique/links/0f317530b0197230cb000000.pdf) >
- [86] SCHEEL, H. J., FUKUDA, T. *Crystal Growth Technology*. John Wiley & Sons, 2003, ISBN 0471490598.
- [87] BEHRENS T. *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters*, Cuvillier Verlag, 2007, ISBN 9783867274050.
- [88] NIEMANN, B., NACKE, B., KUDRYASH, M. *New innovative induction system for the production of pure high temperature glasses* [online]. [cit. 5. 4. 2017]. Leibniz Universität Hannover, 2008, Germany. URL: < <http://www.leonardo-energy.info/sites/leonardo-energy/files/root/uie2008/o27.pdf> >
- [89] *Radioactive Waste* [online]. [cit. 5. 4. 2017]. U.S.NRC, 2016. URL:  
< <https://www.nrc.gov/waste.html> >
- [90] *What are nuclear wastes and how are they managed?* [online]. [cit. 5. 4. 2017]. URL:  
< <http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/what-are-nuclear-wastes.aspx> >
- [91] GRAMBOW, B. *Nuclear Waste Glasses – How Durable?* [online]. [cit. 14. 4. 2017]. Institut National de Physique Nucléaire de Physique des Particles, 2006, France. URL:  
< [https://www.researchgate.net/profile/Bernd\\_Grambow/publication/250085809\\_Nuclear\\_Waste\\_Glasses\\_-\\_How\\_Durable/links/00b7d523563724253b000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bernd_Grambow/publication/250085809_Nuclear_Waste_Glasses_-_How_Durable/links/00b7d523563724253b000000.pdf) >
- [92] DO QUANG, R. et al. *Vitrification of HLW produced by uranium/molybdenum fuel reprocessing in Cogema's cold crucible melter* [online]. [cit. 18. 4. 2017]. 2003. URL: < <http://www.wmsym.org/archives/2003/pdfs/92.pdf> >
- [93] VAN ARKEL, A. E. et al. *The electrical conductivity of molten oxides* [online]. [cit. 28. 4. 2017]. 1953. URL:  
< <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/v53-133> >
- [94] SOBOLEV, I. et al. *Cold crucible vitrification of radioactive waste* [online]. [cit. 3. 5. 2017]. 1997. URL: < <http://www.wmsym.org/archives/1997/sess13/13-18.htm> >