

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektrotechniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Technologie tavení materiálů elektromagnetickou indukcí
ve studeném kelímku**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan LOUDA**

Osobní číslo: **E14B0036P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Technologie tavení materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte stručně teoretické základy vzniku tepla elektromagnetickou indukcí.
2. Objasněte princip tavení materiálů ve studeném kelímku.
3. Stanovte podmínky pro efektivní tavení materiálů ve studeném kelímku.
4. Uveďte výhody a nevýhody.
5. Uveďte závěry a doporučení pro praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. Literaturu určí vedoucí práce při první konzultaci.

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

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na objasnění technologie tavení materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. V první kapitole jsou popsány základy elektromagnetického pole popsáním Maxwellových rovnic v integrálním a diferenciálním tvaru. Následuje odvození obecných rovnic pro šíření elektromagnetického pole. Je uveden Poyntingův zářivý vektor a hloubka vniku spolu s pojmem elektromagnetické průzařnosti. Ve druhé kapitole je popsán princip tavení materiálů ve studeném kelímku. Následuje popsání celého systému včetně jeho základních částí. Dále jsou uvedeny rozdíly mezi tavením elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů, popsány možnosti startování tavby elektricky nevodivých materiálů. Ve třetí kapitole je stanovena účinnost studeného kelímku a možnost jejího ovlivnění konstrukcí studeného kelímku. Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny základní výhody a nevýhody studeného kelímku. V závěru bylo provedeno celkové zhodnocení a doporučení pro praxi.

Klíčová slova

Maxwellovy rovnice, Poyntingův zářivý vektor, hloubka vniku, elektromagnetická průzařnost, studený kelímek, tavení elektricky vodivých materiálů, tavení elektricky nevodivých materiálů, vitifikace, účinnost studeného kelímku, elektrické ztráty, tepelné ztráty, výhody studeného kelímku, nevýhody studeného kelímku.

Abstract

This bachelor thesis is focused on explanation of the electromagnetic induction melting technology in the cold crucible. The first chapter describes the basics of the electromagnetic field beginning with the description of Maxwell equations in integral and differential form. Deduce of the general equations for spreading of the electromagnetic field. Poynting vector, depth of penetration and electromagnetic transparency effect are shown. The second chapter describes the principle of melting materials in a cold crucible. The entire system is described, including its basic parts. The differences between the melting of electrically conductive and electrically non-conductive materials are shown next. There are described the possibilities of starting the melting of electrically non-conductive materials. In the third charter there are described the efficiency of the cold crucible and the possibility of its influence on the structure of the cold crucible. In the fourth chapter are shown the basic advantages and disadvantages of the cold crucible. In conclusion are overall evaluation and suggestion for practise.

Keywords

Maxwell equations, Poynting vector, depth of penetration, electromagnetic transparency effect, cold crucible, melting of electrically conductive materials, melting of electrically non-conductive materials, vitrification, cold crucible efficiency, electrical losses, heat losses, cold crucible advantages, cold crucible disadvantages.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2018

Jan Louda

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji doc. Ing. Igoru Poznyakovi, CSc za rady a informace získané během konzultací.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK	12
ÚVOD	14
1 ZÁKLADY VZNIKU TEPLA ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ	15
1.1 MAXWELLOVY ROVNICE	15
1.2 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR	19
1.3 HLOUBKA VNIKU	20
1.4 ELEKTROMAGNETICKÁ PRŮZAŘNOST	22
2 PRINCIP TAVENÍ MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU	25
2.1 PRINCIP TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU.....	25
2.1.1 <i>Průnik elektromagnetického pole</i>	26
2.2 PROVEDENÍ STUDENÉHO KELÍMKU.....	27
2.2.1 <i>Induktorový kelímek</i>	27
2.2.2 <i>Segmentový kelímek</i>	28
2.2.3 <i>Induktor</i>	29
2.2.4 <i>Chladicí systém</i>	31
2.2.5 <i>Zdroj energie</i>	32
2.2.5.1 <i>Vysokofrekvenční elektronkový generátor</i>	33
2.2.5.2 <i>Tyristorový měnič kmitočtu</i>	33
2.2.6 <i>Stínění a pracovní komora studeného kelímku</i>	34
2.3 TAVENÍ MATERIÁLŮ	36
2.3.1 <i>Tavení elektricky vodivých materiálů</i>	36
2.3.1.1 <i>Tavba titanu ve studeném kelímku</i>	36
2.3.2 <i>Tavení elektricky nevodivých materiálů</i>	39
2.3.2.1 <i>Startovací proces a fáze tavby</i>	40
2.3.2.1.1 <i>Start tavby startovacím kovovým materiálem</i>	42
2.3.2.1.2 <i>Start tavby startovacím tělesem</i>	42
2.3.2.1.3 <i>Start tavby pomocí elektrického oblouku</i>	43
2.3.2.1.4 <i>Start tavby pomocí laseru a plynového a plazmového hořáku</i>	44
2.3.2.2 <i>Tavení ZrO₂ ve studeném kelímku</i>	44
2.3.2.3 <i>Vitifikace jaderného odpadu za pomoci studeného kelímku</i>	45
3 PODMÍNKY PRO EFEKTIVNÍ TAVENÍ MATERIÁLU VE STUDENÉM KELÍMKU	46
3.1.1 <i>Elektrické ztráty</i>	48
3.1.2 <i>Tepelné ztráty</i>	49

3.1.2.1	Tepelné ztráty vedením stěnou a dnem studeného kelímku.....	50
3.1.2.2	Tepelné ztráty sáláním z hladiny vsázky	52
3.1.3	<i>Vliv konstrukce studeného kelímku na účinnost</i>	53
3.1.3.1	Tvar a počet segmentů studeného kelímku	53
3.1.3.2	Uspořádání stěny a dna studeného kelímku	55
4	VÝHODY A NEVÝHODY STUDENÉHO KELÍMKU	57
4.1	VÝHODY	57
4.2	NEVÝHODY	59
5	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ PRO PRAXI	61
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64

Seznam symbolů a zkratk

Název	Značka	Rozměr
Argument	x_2	-
Čas	t	S
Efektivní hodnota elektrického proudu	I_{ef}	A
Elektrická konduktivita	γ	$S \cdot m^{-1}$
Elektrická proudová hustota	J	$A \cdot m^{-2}$
Elektrické ztráty v induktoru	P_1	W
Elektrické ztráty ve studném kelímku	P_3	W
Elektrický proud	I	A
Emisivita tělesa	ε_s	-
Frekvence	f	Hz
Hliník	Al	-
Hloubka vniku	δ	m
Intenzita magnetického pole	H	$A \cdot m^{-1}$
Magnetický indukční tok	ϕ	Wb
Měď	Cu	-
Měrná/Rezistivita induktoru	R_1	Ω
Měrná/Rezistivita studného kelímku	R_3	Ω
Měrná/Rezistivita vsázky	R_2	Ω
Objemová hustota elektrického náboje	ρ_0	$C \cdot m^{-3}$
Oxid hlinitý	Al_2O_3	-
Oxid zirkoničitý	ZrO_2	-
Permeabilita vakua	μ_0	$H \cdot m^{-1}$
Permitivita vakua	ε_0	$F \cdot m^{-1}$
Poloměr vsázky	r_2	m
Poyntingův zářivý vektor	S	$W \cdot m^{-2}$
Relativní permeabilita	μ_r	-

Název	Značka	Rozměr
Relativní permitivita	ϵ_r	-
Rychlost	v	$m \cdot s^{-1}$
Slitina titanu	Ti-6Al-4V	-
Slitina titanu a hliníku	TiAl	-
Stefan-Boltzmannova konstanta	σ	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
Tepelná vodivost	λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Tepelné ztráty celkové	P_{2C}	W
Tepelné ztráty sáláním	P_S	W
Tepelné ztráty ve vsázce	P_2	W
Tepelné ztráty vedením dnem studeného kelímku	P_D	W
Tepelné ztráty vedením stěnou studeného kelímku	P_V	W
Teplota	T	K
Tloušťka vrstvy krusty	l	m
Elektrický indukční tok	ψ	C
Účinnost elektrická	η_E	-
Účinnost tepelná	η_T	-
Úhlová frekvence	ω	$rad \cdot s^{-1}$
Vektor elektrické indukce	D	$C \cdot m^{-2}$
Vektor elektrické proudové hustoty	J	$A \cdot m^{-2}$
Vektor intenzity elektrického pole	E	$V \cdot m^{-1}$
Vektor intenzity magnetického pole	H	$A \cdot m^{-1}$
Vektor magnetické indukce	B	T
Výkon potřebný k tavně	P_T	W
Výška vsázky	h_2	m

Seznam použitých obrázků a tabulek

Obr. 1.1 Poyntingův vektor \mathbf{S} [Autor dle 8]	19
Obr. 1.2 Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu válcového vodiče o průměru d [1]	20
Obr. 1.3 Závislost hloubky vniku na frekvenci pro určité materiály [9]	21
Obr. 1.4 Rozložení proudové hustoty ve válcové vsázce v závislosti na argumentu x_2 při indukčním ohřevu [Autor dle 2];	22
Obr. 1.5 Rozložení intenzity magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti na argumentu x_2 při indukčním ohřevu [Autor dle 2];	22
Obr. 1.6 Závislost poměru tepla přeměněného ve vsázce na argumentu x_2 [10].....	23
Obr. 1.7 Schéma vsázky s malým argumentem x_2 [Autor dle 10].....	24
Obr. 1.8 Schéma vsázky s optimálním argumentem x_2 [Autor dle 10]	24
Obr. 2.1 Princip indukčního ohřevu ve studeném kelímku [12].....	26
Obr. 2.2 Průnik elektromagnetického pole segmenty: [Autor dle 7].....	26
Obr. 2.3 Průnik elektromagnetické energie ve směru Poyntingova vektoru \mathbf{S} mezi segmenty do vsázky [7].....	27
Obr. 2.4 Reálný induktorový kelímek pro tavení skla a oxidů [14]	28
Obr. 2.5 Induktorový kelímek [Autor dle 14].....	28
Obr. 2.6 Různé tvary segmentů studeného kelímku [Autor dle 17]	29
Obr. 2.7 Studený kelímek tvořený lichoběžníkovými segmenty[15]	29
Obr. 2.8 Studený kelímek tvořený válcovými segmenty[16]	29
Obr. 2.9 Geometrie induktoru, závislost provedení induktoru na výkonu do vsázky	30
Obr. 2.10 Lineárně kuželovité a symetrické provedení induktoru[Autor dle 22].....	30
Obr. 2.11 Schéma chlazení různých typů segmentů studeného kelímku [Autor dle 21].....	32
Obr. 2.12 Praktické napojení vodního chlazení na studený kelímek[Autor].....	32
Obr. 2.13 Schéma zapojení vysokofrekvenčního elektronkového generátoru nad 50kHz [Autor dle 1].....	33
Obr. 2.14 Zapojení tyristorového měniče [Autor dle 1]	34
Obr. 2.15 Vliv použití stínění induktoru studeného kelímku oproti induktoru bez stínění[28]35	
Obr. 2.16 Pracovní komora studeného kelímku[Autor]	35
Obr. 2.17 Umístění studeného kelímku v pracovní komoře[Autor]	35
Obr. 2.18 Studený kelímek pro 10kg vsázky a lití taveniny to formy [29]	37
Obr. 2.19 Titanové výrobky společnosti Lionse LTD. Gr.2, Gr.5 apod [32]	38
Obr. 2.20 Naklápěné lití titanu se studeným kelímek[33].....	39

Obr. 2.21 Naklápěné lití titanu. Uspořádání v pracovní komoře[33]	39
Obr. 2.22 Závislost měrného odporu různých materiálů na teplotě [7].....	40
Obr. 2.23 Postupné rozšíření roztaveného materiálu ve vsázce [35].....	41
Obr. 2.24 Proces tavby [37]	41
Obr. 2.25 Různé druhy růstu krystalů ve studeném kelímku[Autor dle 35].....	41
Obr. 2.26 Startovací materiál ve formě kovových fragmentů[7].....	42
Obr. 2.27 Startovací proces tělesem z grafitového kroužku[7]	43
Obr. 2.28 Start tavby pomocí elektrického oblouku[Autor dle 21]	43
Obr. 2.29 Hotový kubický zirkon po vyjmutí ze studeného kelímku a rozbit[39]	44
Obr. 2.30 Vitifikace radioaktivního odpadu v průběžném tavení studeného kelímku[20]	45
Obr. 2.31 Ingot vitifikovaného radioaktivního odpadu v nerezovém obalu v řezu [42]	45
Obr. 3.1 Porovnání pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky při el. vodivé a nevodivé krustě [Autor dle 20].....	48
Obr. 3.2 Vzduť vsázky se spodním dotykem přes krustu [Autor dle 45].....	48
Obr. 3.3 Tepelné ztráty vsázky[Autor dle 43]	49
Obr. 3.4 Situace teplených ztrát vsázky ve studeném kelímku [Autor dle 43].....	50
Obr. 3.5 Tepelné ztráty vedením stěnou a dnem studeného kelímku [Autor dle 21]	51
Obr. 3.6 Závislost účinnosti na počtu segmentů [Autor dle 21]	53
Obr. 3.7 Závislost účinnosti na počtu segmentů [Autor dle 47]	54
Obr. 3.8 Závislost celkových Jouleových ztrát na tvaru segmentu [Autor dle 17].....	54
Obr. 3.9 Znázornění velikosti obdélníkového segmentu a řešené oblasti [Autor dle 46].....	55
Obr. 3.10 Účinnost v závislosti na poměru b/a [Autor dle 46].....	55
Obr. 3.11 Různé uspořádání stěny a dna studeného kelímku [Autor dle 48]	56
Obr. 3.12 Elektrická účinnost závislá na uspořádání studeného kelímku [Autor dle 48].....	56
Tab. 1 Závislost hloubky vniku na kmitočtu [1].....	20
Tab. 2 Bod tavení žárupevných kovů a jejich chemických sloučenin (°C)[7]	36
Tab. 3 Výsledky zkoumání závislosti Jouleových ztrát na počtu segmentů[47]	54
Tab. 4 Výsledky zkoumání závislosti Jouleových ztrát na tvaru segmentů[17].....	54
Tab. 5 Výsledky zkoumání závislosti ztrát na tloušťce obdélníkových segmentů (v 2mm řezu v řešené oblasti modelu)[46].....	55

Úvod

Tato bakalářská práce rešeršního charakteru je zaměřena na technologie tavení materiálů ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce. Tento „studený“ kelímek, který je chlazený vodou znamená velký úspěch v odvětví zpracování vysoce čistých materiálů. Použití studeného kelímku znamená možnost tavit materiály při teplotách až 3000°C. V mnoha odvětvích průmyslu se vyžadují velmi kvalitní materiály. Některé materiály vyžadované pro užití za speciálních podmínek se právě vytvářejí za pomocí studeného kelímku.

V první kapitole bakalářské práce uvádím Maxwellovy rovnice v integrálním a diferenciálním tvaru, Poyntingův zářivý vektor, elektromagnetickou průzračnost za pomocí hloubky vniku a argumentu x_2 .

Ve druhé kapitole objasňuji princip tavení ve studeném kelímku, provedení studeného kelímku jako induktorový kelímek a segmentový kelímek, induktor a chladicí systém jako nezbytnou součást celého zařízení, pracovní komora pro bezpečnost okolí a zdroj pro napájení.

Pokračuji popisem tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů. Jejich hlavní rozdíly mezi způsoby užití ve studeném kelímku. K tomuto tématu jsou popsány základní metody pro tzv. startování tavby. Postupy výroby krystalizace. Vitřifikace jaderného odpadu a také výroba krystalů známých jako Zirkony.

V další části popisují podmínky pro efektivní tavení materiálů ve studeném kelímku. Popsány jsou tepelné a elektrické účinnosti s uvedením jednotlivých ztrát. Poté pak shrnuji závislost účinnosti na konstrukci studeného kelímku z výzkumu vybraných pracovišť ze světa.

V poslední části jsou pak uvedeny výhody a nevýhody použití studeného kelímku.

V závěru práce je zhodnocení tavení ve studeném kelímku a doporučení pro praxi.

1 Základy vzniku tepla elektromagnetickou indukcí

Ohřev elektromagnetickou indukcí neboli také indukční ohřev, je možné použít pouze u elektricky vodivých materiálů. Základní uspořádání zařízení pro ohřev elektromagnetickou indukcí se sestává z induktoru a vsázky. Vsázka představuje ohříváný elektricky vodivý materiál. Protéká-li induktorem střídavý proud, vzniká v jeho okolí elektromagnetické pole. V tomto poli se nachází vsázka. Vlivem elektromagnetické indukce se ve vsázce indukují vířivé proudy, které ohřívají vsázku. Toto uspořádání se dá přirovnat k transformátoru, kde primární vinutí je induktor a sekundární vinutí, představující vsázku, je závit spojený na krátko neboli do zkratu. Teoretický základ popisují Maxwellovy rovnice (1.1.1-1.1.4) [1] [2]

1.1 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice vysvětlují všechny elektromagnetické jevy v každém bodě prostoru a jsou časově závislé. Z odvození Maxwellových rovnic získáme rovnice popisující magnetické, elektrické a elektromagnetické pole. Elektromagnetické pole má vlnový charakter. Toto určují právě Maxwellovy rovnice (1.1.1-1.1.4). Je zde předpoklad, že vlnové jevy mají konečnou rychlost šíření. Jinak by byl vlnový jev okamžitě v celém prostoru a šíření elektromagnetických vln by tak nebylo postupné. [1]

Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru:

- Ampérův zákon celkového proudu (1.1.1) vyjadřuje cirkulaci vektoru \mathbf{H} po uzavřené libovolné křivce c , která je rovna součtu spřažených proudů I_c a posuvného proudu $\frac{d\psi}{dt}$, kde ψ je elektrický indukční tok plochou S , kterou obepíná křivka c . Plocha S a křivka c jsou orientovány pravotočivě. [1] [4]

$$\oint_c \mathbf{H} dl = I_c + \frac{d\psi}{dt} \quad (1.1.1)$$

- Faradayův indukční zákon (1.1.2) neboli zákon elektromagnetické indukce, vyjadřuje cirkulaci vektoru \mathbf{E} , po uzavřené libovolné křivky c , která je rovna $-\frac{d\phi}{dt}$, což je záporná časová derivace magnetického indukčního toku ϕ plochou S , kterou obepíná křivka c . Opět jsou plocha S a křivka c orientovány pravotočivě jako v předchozím případě. [1] [4]

$$\oint_c \mathbf{E} dl = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1.1.2)$$

- Gaussova věta elektrostatiky (1.1.3) nám říká, že tok elektrické indukce \mathbf{D} libovolnou uzavřenou plochou S je roven volnému celkovému náboji Q v prostoru V , který je právě ohraničen plochou S . [4][5]

$$\oint_S \mathbf{D} dS = Q \quad (1.1.3)$$

- Zákon spojitosti indukčního toku (1.1.4) neboli zákon spojitosti indukčních čar, říká, že součet toků magnetické indukce \mathbf{B} , které vtékají do prostoru uzavřené plochou S , je roven součtu magnetických indukčních toků, které z tohoto prostoru vytékají. Všechny indukční čáry tvoří vždy uzavřené křivky. [5][6]

$$\oint_S \mathbf{B} dS = 0 \quad (1.1.4)$$

Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru mají obecnou vlastnost pro elektromagnetické pole a tak se při hledání časového nebo prostorového rozložení indukcí či intenzit pole zavádějí Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, které se získají za použití Gauss-Ostrogradského a Stokesovy věty. Tyto rovnice (1.1.5-1.1.8) jsou diferenciální rovnice elektromagnetického pole. Tyto rovnice platí jen v bodech, kde jsou vektory \mathbf{E} a \mathbf{H} spojitě. Vidíme, že z uvedených Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru vyplývá, z jakých příčin

vznikají vírová pole (rotace) a zřídlové pole (divergence). [1][7]

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \gamma\mathbf{E} + \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.1.5)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.1.6)$$

$$\operatorname{div}\varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E} = \rho_0 \quad (1.1.7)$$

$$\operatorname{div}\mu_0\mu_r\mathbf{H} = 0 \quad (1.1.8)$$

V konstantních a po částech konstantních prostředích platí pro vektory \mathbf{E} a \mathbf{H} spolu s materiálovými konstantami permitivity, permeability a konduktivity, tyto vektory elektrické indukce \mathbf{D} , magnetické indukce \mathbf{B} a proudové hustoty \mathbf{J} : [1]

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E} \quad (1.1.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} \quad (1.1.10)$$

$$\mathbf{J} = \gamma\mathbf{E} \quad (1.1.11)$$

Pomocí Maxwellových rovnic lze odvodit obecné rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění ve tvarech magnetické a elektrické složky (1.1.12 a 1.1.13) a z nich i rychlost šíření vlnění v daném prostředí (1.1.20) s materiálovými konstantami γ , ε_r , μ_r . Z těchto konstant můžeme zanedbat relativní permitivitu ε_r pro elektricky vodivá prostředí a konduktivitu γ pro elektricky nevodivá prostředí. [1][7]

$$\nabla^2\mathbf{H} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} + \mu_0\mu_r\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.1.12)$$

$$\nabla^2\mathbf{E} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0\mu_r\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} + \operatorname{grad} \frac{\rho_0}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (1.1.13)$$

Pokud tedy zanedbáme ε_r a ρ_0 , získáme z předchozích vlnových rovnic (1.1.12 a 1.1.13) rovnice pro prostředí elektricky vodivé: [7]

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.1.14)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.1.15)$$

Nyní zanedbáme γ a volné náboj ρ_0 , získáme tím opět z předchozích vlnových rovnic (1.1.12 a 1.1.13) tyto rovnice pro prostředí elektricky nevodivé: [7]

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.1.16)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.1.17)$$

Nyní upravíme rovnice pro elektricky nevodivá prostředí (1.1.16 a 1.1.17) na následující tvar: [7]

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.1.18)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.1.19)$$

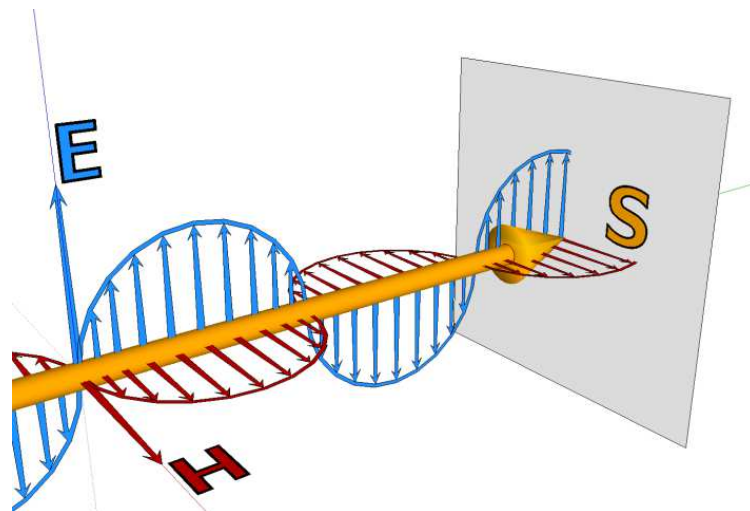
Dle definice vlnové rovnice v 3D prostoru je $\nabla^2 \mathbf{H}$ a $\nabla^2 \mathbf{E}$ roven rychlosti šíření v daném prostředí v^2 a to tedy: [7]

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad (m \cdot s^{-1}) \quad (1.1.20)$$

1.2 Poyntingův zářivý vektor

Poyntingův zářivý vektor \mathbf{S} ($W \cdot m^{-2}$) udává hustotu a směr elektromagnetického výkonu v prostoru. Používá se při výpočtech elektromagnetického pole např. při indukčních ohřevech. Je to vektorový součin vektorů intenzity elektrického pole a intenzity magnetického pole. Tyto vektory jsou na sebe vzájemně kolmé a kolmé i ke směru šíření elektromagnetické vlny. Jeho směr je tak totožný se směrem elektromagnetického vlnění a jeho velikost má význam plošné hustoty elektromagnetického výkonu, nesené právě elektromagnetickou vlnou. Velikost Poyntingova vektoru $|\mathbf{S}|$ udává výkon na jednotku plochy ve směru normály vektoru \mathbf{S} . Grafická interpretace je na Obr. 1.1[1][6][7][8]

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (1.2.1)$$



Obr. 1.1 Poyntingův vektor \mathbf{S} [Autor dle 8]

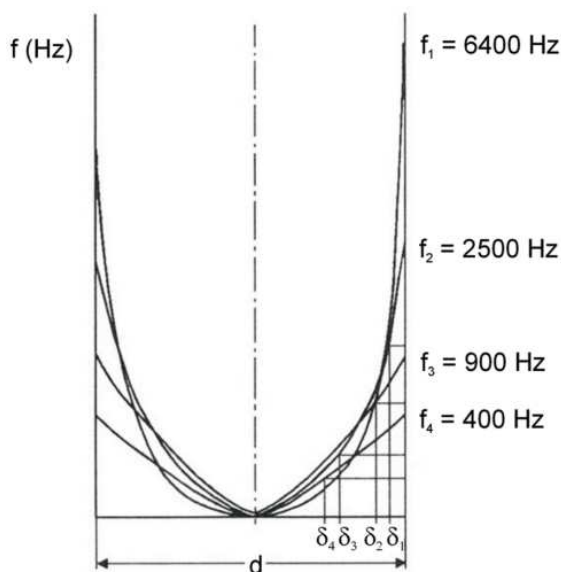
1.3 Hloubka vniku

Hloubka vniku je pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivého prostředí. Jedna z definicí je taková, že hloubka vniku je vzdálenost od povrchu, kde např. hodnota proudové hustoty klesne na $1/e$, kde e je Eulerovo číslo. To je přibližně 36,8% z celkové hodnoty proudové hustoty \mathbf{J} na povrchu. Pronikající elektromagnetické vlnění je utlumováno a jeho energie se mění na tepelnou energii. [1][7][8]

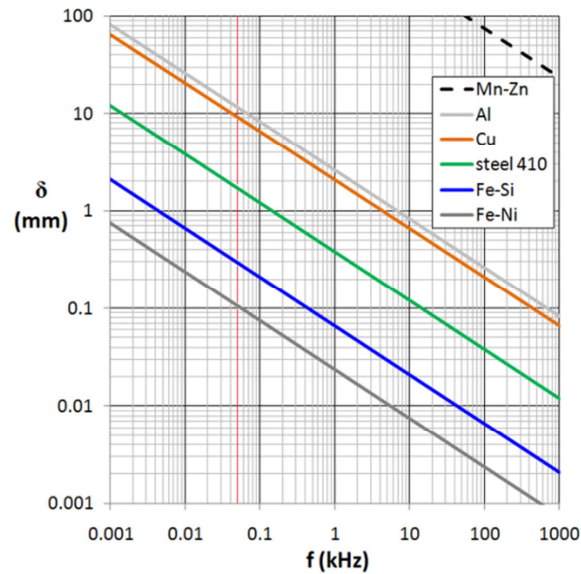
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu_r\gamma}} \quad (m) \quad (1.3.1)$$

Tab. 1 Závislost hloubky vniku na kmitočtu [1]

Frekvence (Hz)	Hloubka vniku (mm)					
	Cu		Al		Ocel	
	20°C	1100°C	20°C	660°C	20°C	800°C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8	71,2
1 000	2,1	7,1	2,7	7	1,8	15,9
10 000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5
1 000 000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5



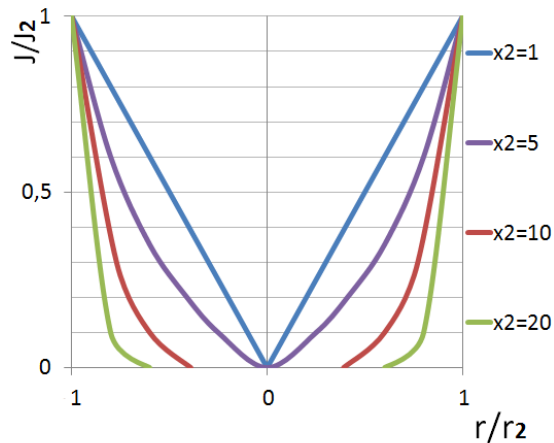
Obr. 1.2 Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu válcového vodiče o průměru d [1]



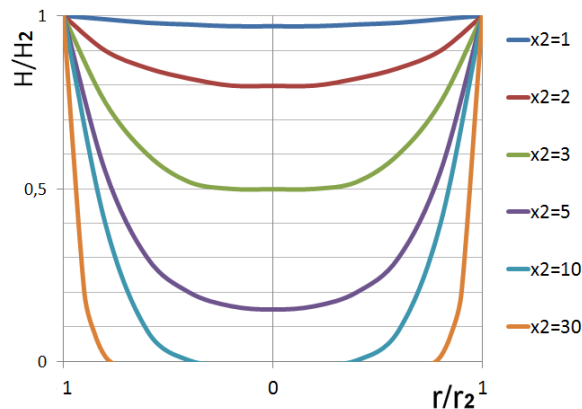
Obr. 1.3 Závislost hloubky vniku na frekvenci pro určité materiály [9]

Na diagramu (Obr. 1.4) vidíme rozložení proudové hustoty J/J_2 válcové vsázky a na diagramu (Obr. 1.5) vidíme rozložení intenzity magnetického pole H/H_2 v závislosti na argumentu x_2 , který je definován vztahem (1.3.2). Ze vztahu (1.3.1) vidíme, že s rostoucí hodnotou frekvence hloubka vniku δ klesá a tím ze vztahu (1.3.2) plyne, že je argument x_2 narůstá. Intenzita magnetického pole H_2 a proudová hustota J_2 jsou maximální na povrchu vsázky, to je ve vzdálenosti r_2 od osy souměrnosti válcové vsázky. Z grafu (Obr. 1.5) vidíme, že pro malé hodnoty frekvence (tj. pro malé hodnoty argumentu x_2) je průběh intenzity magnetického pole H_2 téměř konstantní s poloměrem r_2 . A zároveň z grafu (Obr. 1.4 a Obr. 1.5) vidíme, že pro malé hodnoty argumentu x_2 proudová hustota J_2 roste lineárně s rostoucím poloměrem r_2 . Pro vysoké frekvence (tj. velké hodnoty argumentu x_2) vidíme, že hodnoty H_2 a J_2 mají téměř přibližně exponenciální průběh spolu s poloměrem r_2 . [7][11]

$$x_2 = \frac{r_2 \sqrt{2}}{\delta} \quad (-) \quad (1.3.2)$$



Obr. 1.4 Rozložení proudové hustoty ve válcové vsázce v závislosti na argumentu x_2 při indukčním ohřevu [Autor dle 2];
 J/J_2 -poměr hustoty proudu, r/r_2 - poměr vzdálenosti od středu

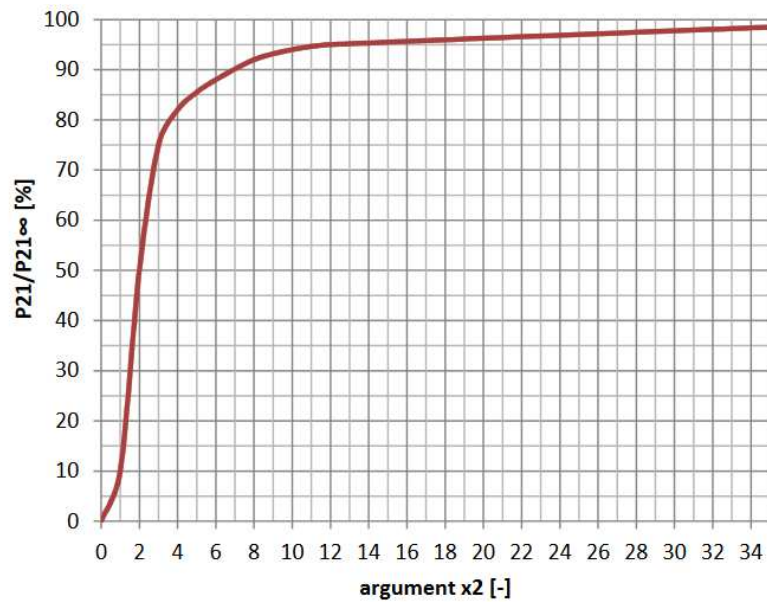


Obr. 1.5 Rozložení intenzity magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti na argumentu x_2 při indukčním ohřevu [Autor dle 2];
 H/H_2 - poměr intenzity magnetického pole, r/r_2 poměr vzdálenosti od středu

1.4 Elektromagnetická průzařnost

Elektromagnetická průzařnost je nežádoucí jev při indukčních ohřevech. Vzniká při nevhodně nastavených parametrech pro indukční ohřev a to zejména při nevhodném zvolení frekvence pro danou vsázku. Poté dochází k jevu, elektromagnetické průzračnosti, kdy elektromagnetické vlnění prochází vsázkou a ve vsázce nevzniká dostatečné teplo potřebné k ohřevu. Jak je uvedeno v předchozím odstavci v podkapitole 1.3, když je hodnota frekvence malá, tak je argument x_2 (1.3.2) malý, v závislosti na poloměru dané vsázky. Takže při zvolení malé hodnoty frekvence a tedy velké hodnotě hloubky vniku bude hodnota argumentu x_2 malá, vsázka se stane průzařnou a nebude se v ní vytvářet teplo, protože složky postupné a odražené, a to konkrétně proudové hustoty \mathbf{J}' a \mathbf{J}'' z naindukovaných proudů od Poyntingových zářivých vektorů \mathbf{S}' a \mathbf{S}'' elektromagnetického vlnění, se vzájemně vyruší, protože se ve vsázce nestačí dostatečně utlumit. Teplo tedy vzniká jen na povrchu vsázky.

Toto lze řešit volbou vhodné hodnoty frekvence tak, aby byl při nejlepším argument $x_2 \geq 6$ [prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.]. Lze tuto hodnotu argumentu x_2 určit ze závislosti poměru tepla přeměněného ve vsázce na argumentu x_2 (Obr. 1.6). Výše uvedené situace zvolení argumentu x_2 popisují Obr. 1.7 a Obr. 1.8. [5][10]

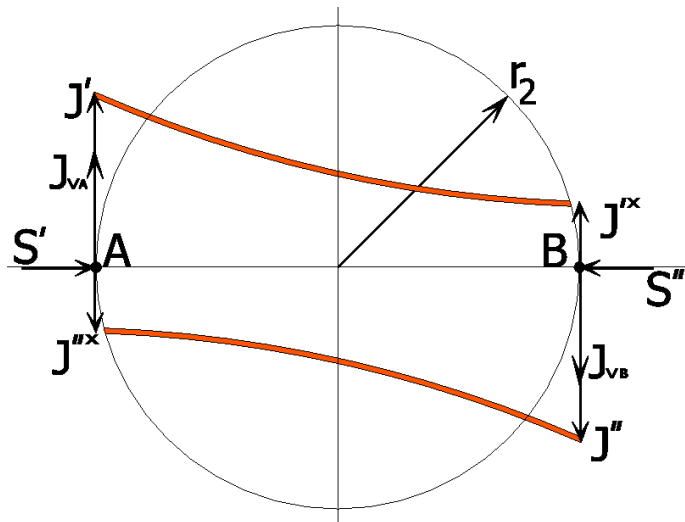


Obr. 1.6 Závislost poměru tepla přeměněného ve vsázce na argumentu x_2 [10]

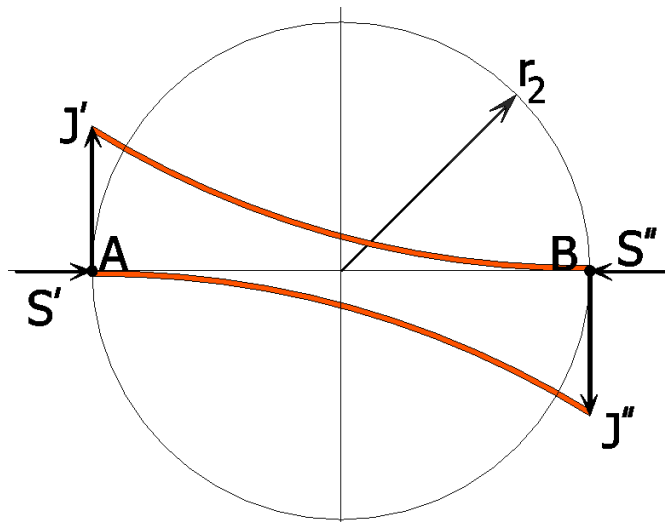
Jak vidíme na diagramu (Obr. 1.7), pokud je vsázka průzařná hodnota proudové hustoty J se neutlumí a v bodech A a B se odečtou složky proudových hustot dle následujících rovnic (1.4.1 a 1.4.2). Dle teorie velké tloušťky stěny, se hodnota intenzity magnetického pole utlumí ve vzdálenosti $2\pi\delta$ od povrchu. Takže pokud chceme, aby se proudová hustota J utlumila z bodu A do bodu B (Obr. 1.8) musí být poloměr vsázky r_2 roven $\pi\delta$. Pro optimální ohřev volíme tedy poloměr vsázky $r_2=(2,5\div 3)\delta$.

$$A: \quad J_{VA} = J^I - J^{IX} \quad (1.4.1)$$

$$B: \quad J_{VB} = J^{II} - J^{IX} \quad (1.4.2)$$



Obr. 1.7 Schéma vsázky s malým argumentem x_2 [Autor dle 10]



Obr. 1.8 Schéma vsázky s optimálním argumentem x_2 [Autor dle 10]

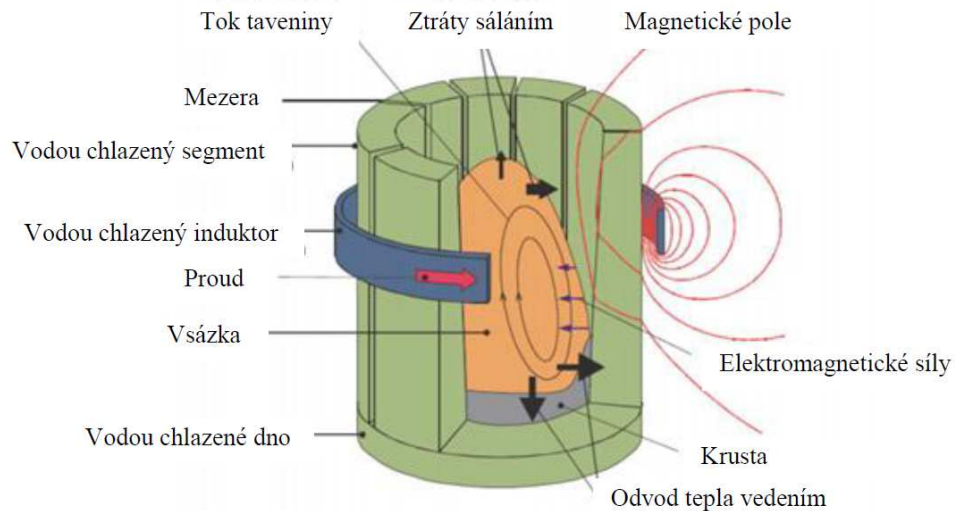
2 Princip tavení materiálů ve studeném kelímku

V této kapitole popisují princip studeného kelímku v návaznosti na teoretický rozbor v předešlé kapitole 1. V posledních dekádách se technologie tavení studeným kelímkem stále více uplatňuje po celém světě. Tato technologie, anglicky se převážně označuje jako IFCC (Induction Furnace Cold Crucible), nabízí rozmanité technologické možnosti a ekonomické výhody. Používají se v menších měřítcích o hmotnostech vsázky v řádech až desítky kilogramů. Je zde možnost tavit při vysokých teplotách, připravovat vysoce čisté taveniny, možnost tavit slitiny různých materiálů a také možnost kontinuální tavby.[3]

Tato myšlenka předcházení jakékoliv kontaminace vysoce reaktivních tavenin za použití vodou chlazeného kovového kelímku není příliš nová. Technologie indukčního tavení bez použití konvenčních keramických kelímků byla patentována v roce 1931 firmou Siemens a Halske v Německu. V průběhu let se technologie indukčního tavení ve studeném kelímku vyvíjela i pro úpravu křemíku pro solární články, tavení žárupevných kovů a polovodičů, vysoce čisté krystaly křemíku, kontinuální tavba křemíku do ingotu pro solární články a pro úpravu dalších kovů. [7][13]

2.1 Princip tavení ve studeném kelímku

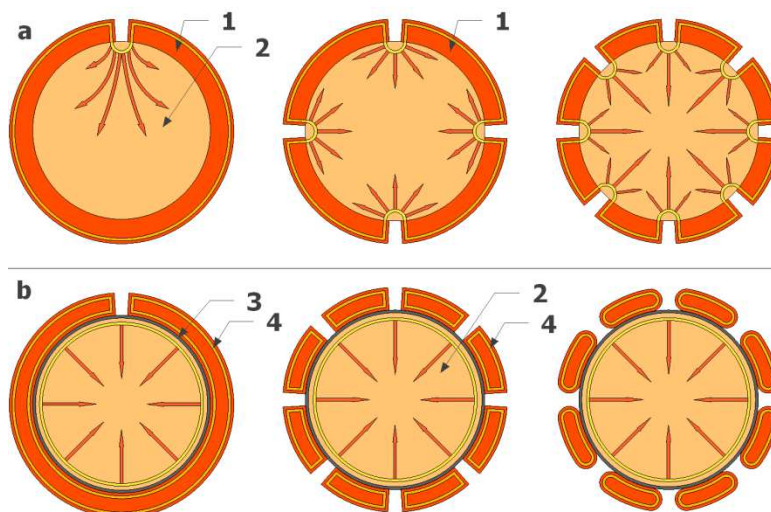
System studeného kelímku obsahuje především induktor a studený kelímk tvořený segmenty. Tato technologie tavení materiálů ve studeném kelímku je metoda, kdy je „studený“ kelímk nejčastěji tvořen intenzivně vodou chlazenými měděnými segmenty a dnem. Tento studený kelímk je umístěn uvnitř závitů vinutí chlazeného induktoru. Tato sestava je pak umístěna v nejčastěji v pracovní komoře, kde může být technické vakuum nebo prostředí s řízenou atmosférou. Segmenty tohoto kelímku jsou vzájemně odděleny a dovolují tak průnik elektromagnetického pole do vsázky jak je znázorněno na Obr. 2.2. Naindukované proudy vyvolané elektromagnetickým polem vytvářejí ve vsázce teplo na principu Jouleových ztrát. Stěny studeného kelímku a dno jsou intenzivně chlazené vodou, aby nedošlo k samotnému roztavení nebo poničení studeného kelímku. V důsledku toho se vytvoří kolem taveného materiálu takzvaná krusta (skull), to je materiál v pevném stavu. Tato krusta zabraňuje kontaktu mezi taveninou a stěnami studeného kelímku. To zabrání kontaminaci taveniny materiálem studeného kelímku. [3][7][13][16][21]



Obr. 2.1 Princip indukčního ohřevu ve studeném kelímku [12]

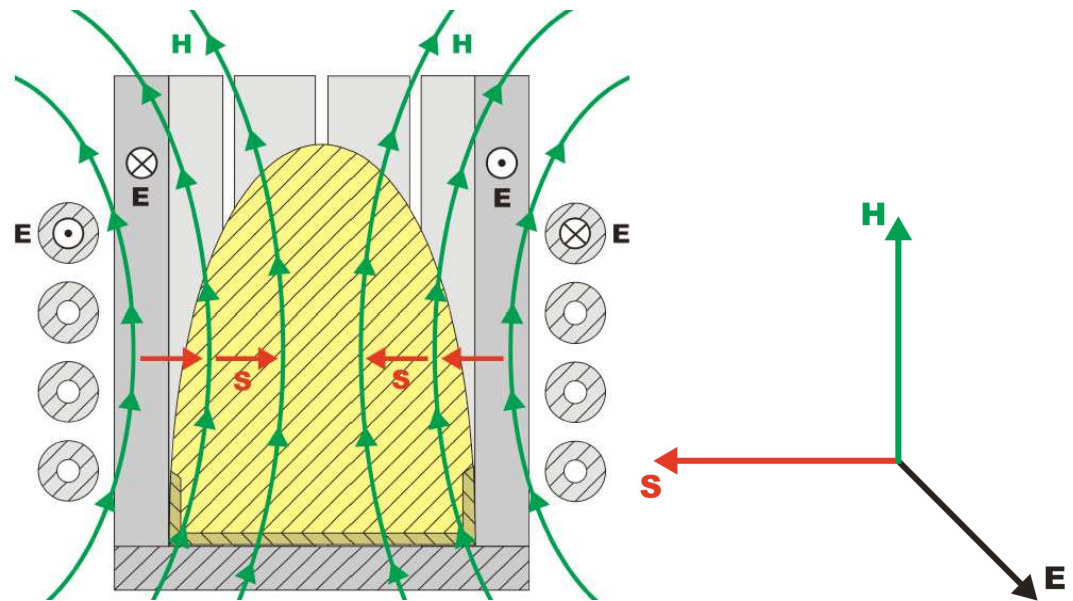
2.1.1 Průnik elektromagnetického pole

Elektromagnetické pole prochází mezi segmenty a ve vsázce se tím indukují vířivé proudy. Tyto proudy se mohou uzavírat i přes segmenty studeného kelímku v případě kovové vsázky. V případě tavby elektricky nevodivých oxidů se vířivé proudy uzavírají odděleně v tavenině a v jednotlivých segmentech. Na Obr. 2.2 vidíme, že pronikání elektromagnetického vlnění je rovnoměrné při odizolování vsázky od stěn studeného kelímku. Tím se dosáhne rovnoměrného ohřevu. Dle Poyntingova vektoru Obr. 1.1 a rovnice 1.2.1 lze vysvětlit tok elektromagnetického pole z cívky do vsázky. Mezerami mezi segmenty se šíří tok elektromagnetického pole, který vstupuje do vsázky v radiálním směru (Obr. 2.2). [7][21]



Obr. 2.2 Průnik elektromagnetického pole segmenty: [Autor dle 7]

a) Bez izolace mezi vsázkou a segmenty, b) s izolací; 1-segment kelímku, 2-vsázka, 3- izolace, krusta, 4- vířivé proudy v segmentech



Obr. 2.3 Průnik elektromagnetické energie ve směru Poyntingova vektoru S mezi segmenty do vsázky [7]

2.2 Provedení studeného kelímku

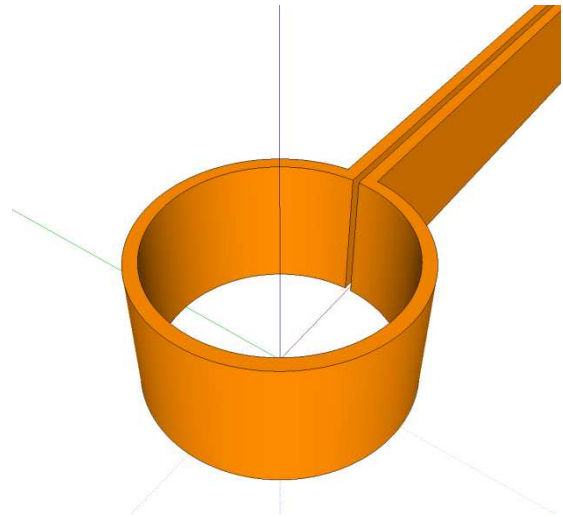
2.2.1 Induktorový kelímek

Induktorový kelímek tvoří cívka z jednoho závitu, popřípadě více závitů této cívky nad sebou. Toto uspořádání se používá převážně pro tavení špatně elektricky vodivých materiálů, jako jsou například oxidy, keramika a sklo. Tyto materiály mají teplotu tání vyšší než 2000°C . Výhodou tohoto uspořádání studeného kelímku, je vyšší elektrická účinnost a nižší ztráty, protože na rozdíl od segmentového studeného kelímku, nejsou zde ztráty v segmentech. Nevýhodou je však složitější konstrukce a přímý styk taveniny přes krustu s induktorem. [7][14][18]

Induktorový kelímek (Obr. 2.4) používaný pro tavbu velmi kvalitních skel pro optická vlákna, tvoří čtyři měděné, ohýbané, obdélníkové a duté uzavřené profily svařené k sobě. Každý tento uzavřený profil, má samostatně připojené vodní chlazení. Vodou chlazené dno tohoto induktorového kelímku je z nitridu hlinitého (keramika). Tento materiál je použit právě proto, že má podobnou tepelnou vodivost jako kovy. Takto chlazené dno spolu s chlazenou stěnou vytvoří nevodivou krustu. Tato krusta je po celém povrchu a hlavně se vytvoří v mezeře u přívodu induktoru a tím zabrání zkratu mezi vodiči induktoru. [7][14][18][19][20]



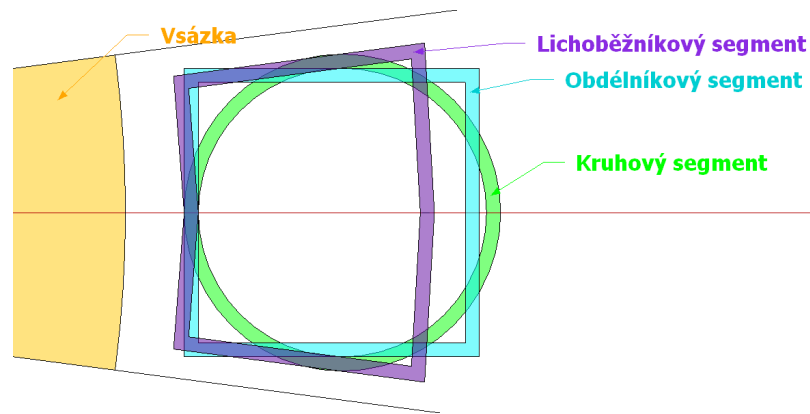
Obr. 2.4 Reálný induktorový kelímek pro tavení skla a oxidů [14]



Obr. 2.5 Induktorový kelímek [Autor dle 14]

2.2.2 Segmentový kelímek

V praxi se častěji používá studeného kelímku se segmenty, znázornění na Obr. 2.7 a Obr. 2.8. Tento typ je koncipován tak, že studený kelímek je vytvořen ze segmentů. Segmenty jsou především měděné uzavřené profily různých tvarů (Obr. 2.6), umístěné uvnitř induktoru. Jednotlivé segmenty i induktor jsou opět intenzivně chlazeny vodou. To umožní opět vytvoření krusty uvnitř studeného kelímku. Rozměry segmentů a mezer mezi nimi jsou limitovány. Mezi segmenty je zapotřebí mít minimální mezeru tak, aby tavenina zůstala uvnitř. A minimální tloušťka stěn segmentů se volí tak, aby segment vydržel tlak chladicí vody uvnitř segmentu. Počet segmentů je určen zpravidla velikostí studeného kelímku, ale s rostoucím počtem se snižuje nežádoucí ohřev segmentů a zároveň se zlepší rozložení elektromagnetického vlnění pronikající mezi segmenty do vsázky. Tím se zlepší i rozložení teplotního pole. Na tvaru a počtu segmentů také závisí i účinnost studeného kelímku, to je popsáno v následující kapitole. Provedení kelímku z kruhových segmentů je nejvýhodnější (z hlediska účinnosti) a nejjednodušší na výrobu než provedení studeného kelímku z kvádrových, či lichoběžníkových segmentů. Jak vidíme na Obr. 2.8 z jednoho kruhového profilu můžeme ohýbat dva segmenty zároveň. [7][17][18][19][20][21]



Obr. 2.6 Různé tvary segmentů studeného kelímku [Autor dle 17]



Obr. 2.7 Studený kelímek tvořený lichoběžníkovými segmenty[15]



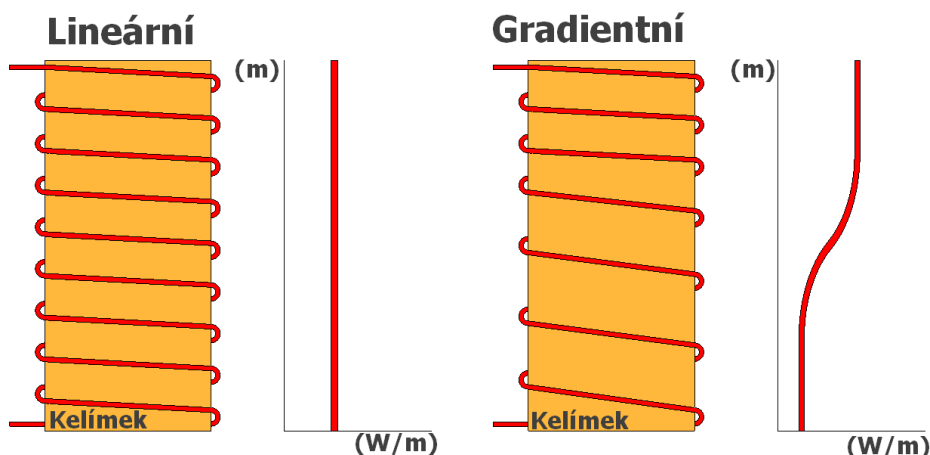
Obr. 2.8 Studený kelímek tvořený válcovými segmenty[16]

zleva: Připraveno k tavení, samotný studený kelímek, poloviční model studeného kelímku

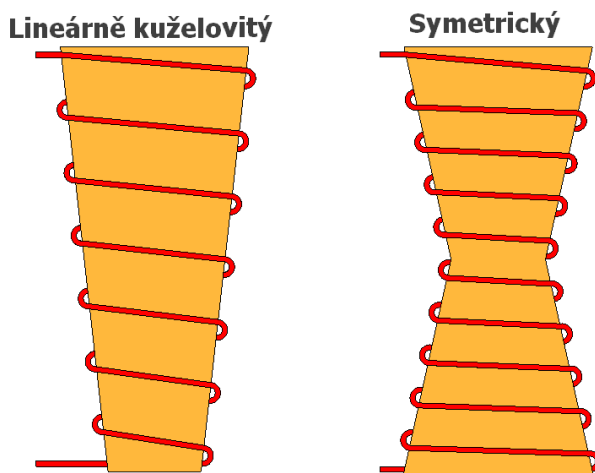
2.2.3 Induktor

Jak bylo řečeno dříve, induktor je umístěn kolem studeného kelímku. Jeho úkolem je přeměnit vysokofrekvenční napájení zdroje na proměnné elektromagnetické pole. Návrh induktoru musí být optimalizován tak, aby systém měl co největší účinnost při přenosu energie ze zdroje do vsázky. Návrh induktoru, a to především počet závitů, vzdálenost mezi závitů, průměr závitů apod., vychází z fyzických rozměrů studeného kelímku, parametrů zdroje a množství a vlastnosti vsázky. Rovněž je zapotřebí u velkých induktorů zajistit jejich mechanickou podporu, aby nedošlo k deformaci induktoru. Provedení induktoru může být v případě malých studených kelímků vytvořeno z měděné trubky (uvnitř proudí chladicí voda). Pro větší studené kelímky a tím i větší výkony se používá obdélníkového průřezu, kde část průřezu vede elektrický proud a druhá část průřezu je dutá, kde proudí chladicí voda. Tyto druhy průřezů se příliš neliší od indukčních kelímkových pecí. Induktory se používají především válcového tvaru a to z důvodu, že válec má malý poměr plochy k objemu (snížení

tepelných ztrát). Dalším důvodem, možná důležitějším, je to, že válcový tvar induktoru zjednodušuje výpočty a nejlépe tato geometrie induktoru byla již dobře teoreticky popsána. Co se týče axiálního tvaru induktoru, zde můžeme brát v potaz konečné rozložení elektromagnetického pole. Nejčastěji se používají lineárně rozložené závity, kde všechny závity induktoru mají konstantní průřez a mají konstantní mezery mezi sebou (Obr. 2.9). Výroba tohoto uspořádání je jednoduchá a tím, že je elektromagnetické pole rovnoměrně rozložené, jsou numerické výpočty a modelování tohoto pole jednoduché. Pro potřebu se mohou používat i gradientní tvar induktoru, který má závity stejného průřezu avšak postupnou velikost mezery mezi nimi (Obr. 2.9). Dále je možno upravit induktor v radiálním směru a to do lineárního, lineárně kuželovitého či symetrického provedení (Obr. 2.10). Tímto můžeme různě modifikovat výsledné rozložení magnetického pole.[5][20][21][22]



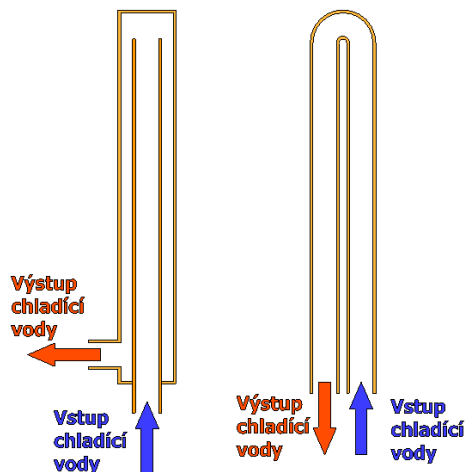
Obr. 2.9 Geometrie induktoru, závislost provedení induktoru na výkonu do vsázky [Autor dle 22]



Obr. 2.10 Lineárně kuželovité a symetrické provedení induktoru [Autor dle 22]

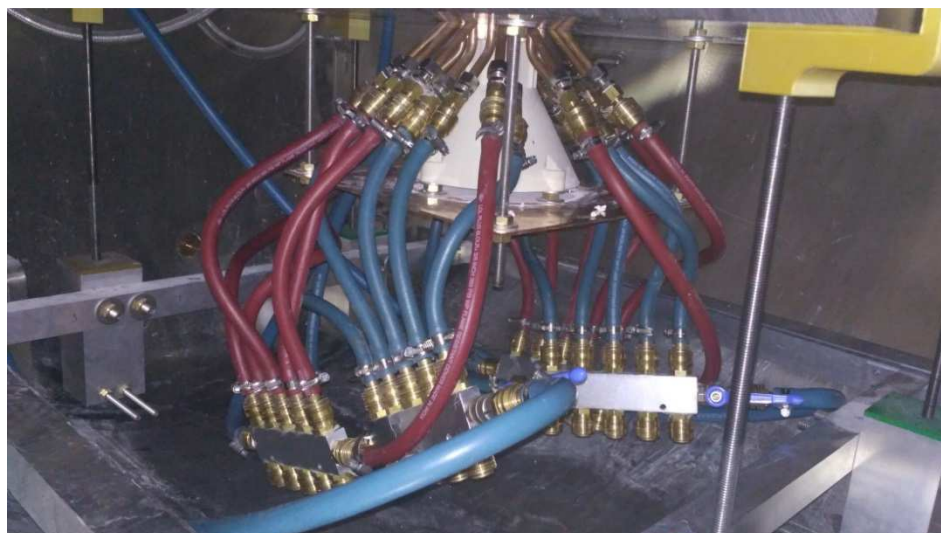
2.2.4 Chladicí systém

Pro správné fungování studeného kelímku je zapotřebí chladicí systém. Je potřeba intenzivně chladit studený kelímek (jednotlivé segmenty i popřípadě dno studeného kelímku) a induktor. Jako chladicí médium je použita deionizovaná a demineralizovaná voda. S takto upravenou vodou nedochází k oxidaci nebo zanášení celého systému chlazení. Studený kelímek je nutno chladit mnohem intenzivněji než induktor, protože dochází ke styku mezi roztavenou vsázkou (přes vrstvu krusty) a stěny studeného kelímku. V chladicím systému se využívá uzavřeného chladicího okruhu. Ten zahrnuje primární okruh, sekundární okruh a nouzový okruh. Primární okruh chlazení chladí studený kelímek, induktor a popřípadě zdroj napájení. Sekundární okruh ochlazuje chladicí vodu primárního okruhu. Ten je spojen s primárním okruhem přes tepelný výměník voda-voda, svoji vodu sekundární okruh poté ochlazuje výměníkem voda-vzduch. Pokud sekundární okruh v systému chlazení není, pak výměník voda-vzduch je přímo v primárním okruhu. Oba sekundární okruhy obsahují zásobníky vody, které mají i objem tisíce litrů chladicí vody pro studené kelímky o výkonech stovek kilowatt. Někdy není zapotřebí ani sekundární okruh, ani výměník v primárním okruhu, pokud je dostatek chladicí vody v zásobníku, či v zásobnících, které je možno mezi sebou přepínat, tak aby nebyla překročena provozní teplota. Nouzový chladicí systém slouží ke chlazení v případě, kdy hlavní chladicí systém selže. Ten je opatřen zásobníkem vody, umístěným na vyvýšeném místě nad systémem studeného kelímku, aby mohl i bez použití čerpadel zasáhnout. Bývá dimenzován na provoz v řádu desítek minut. Při poruše hlavního chladicího systému, zdroj napájení se vypne a tavenina ve studeném kelímku stačí vychladnout na bezpečnou teplotu, při které není ohrožena konstrukce studeného kelímku. Celý systém chlazení pak obsahuje především čidla teploty a průtoku chladicí kapaliny, sloužící k získávání údajů během procesu tavení. Schéma chlazení lichoběžníkového profilu (Obr. 2.11) lze porovnat s 3D modelem studeného kelímku na Obr. 2.7, kde jsou vidět vnitřní trubičky v jednotlivých segmentech. Chladicí voda v systému nesmí v žádném případě přesáhnout bod varu vody, došlo by k vytvoření páry a tím k narušení procesu chlazení. Dále je potřebné, aby proudění chladicí vody bylo turbulentní. Tak se docílí efektivního chlazení.[5][21][22][23][24][25]



Obr. 2.11 Schéma chlazení různých typů segmentů studeného kelímku [Autor dle 21]

Zleva: Lichoběžníkový profil segmentu. Kruhový ohýbaný profil segmentu



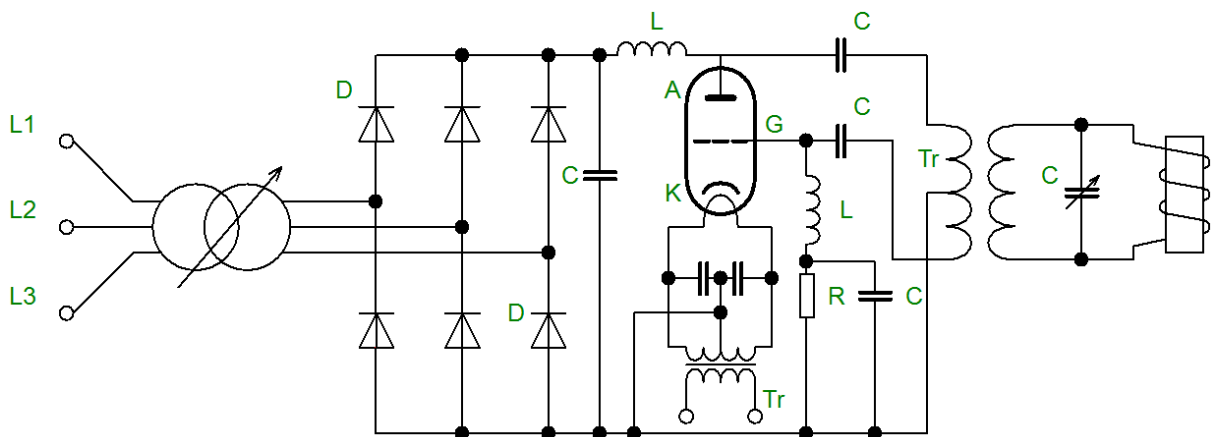
Obr. 2.12 Praktické napojení vodního chlazení na studený kelímek [Autor]

2.2.5 Zdroj energie

Pro indukční ohřev je nutné z několika důvodů použít frekvenční měniče, protože dodávaná elektrická energie z rozvodné sítě má frekvenci 50Hz a není vhodná pro účely ohřevu elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Celá elektrická napájecí soustava studeného kelímku sestává z vysokofrekvenčního generátoru a transformátoru k napájení induktoru. Typické frekvence pro systémy studeného kelímku se pohybují od 100kHz až do 5Mhz s výkony od desítek kilowatt až do stovek kilowatt. Pro tyto výkony a frekvence se používají především polovodičové součástky (tyristory, tranzistory IGBT, MOSFET). Opět je nutné chladit vysokofrekvenční generátor, neboť se pracuje s velkými výkony. Dříve se používaly rotační měniče. Avšak polovodičové měniče pracují s vyšší účinností a spolehlivostí a vykazují možnosti frekvenční i výkonné regulace. [5][22][27]

2.2.5.1 Vysokofrekvenční elektronkový generátor

Vysokofrekvenční elektronkový generátor využívá elektronky jako zdroj vysokého střídavého napětí, které kmitá s připojeným oscilátorem, složený z indukčností, vzájemných indukčností a proměnným kondenzátorem. Tento oscilační obvod pracuje na požadované frekvenci. Vysokofrekvenční elektronkový generátor se používá pro frekvence vyšší než 50kHz. Je napájen z rozvodné sítě 50Hz přes auto transformátor. Celé zapojení (Obr. 2.13) tvoří vstupní regulační transformátor, usměrňovač, vyhlazovací kondenzátor, oddělovací tlumivka, elektronka, žhavicí transformátor a vysokofrekvenční transformátor. Účinnost tohoto generátoru může dosahovat až 80%, v závislosti na použitém druhu elektronky. Průměrná životnost v provozu dosahuje řádově desetitisíce hodin. Existují i takzvané triodové a tetrodové zdroje, které používají jiný počet elektrod pro vnitřní kontrolu elektrického pole na mřížce. Tetrodové zdroje pak mohou mít až o 40 % větší životnost než triodové zdroje o stejném výkonu. [1][5][21][27]

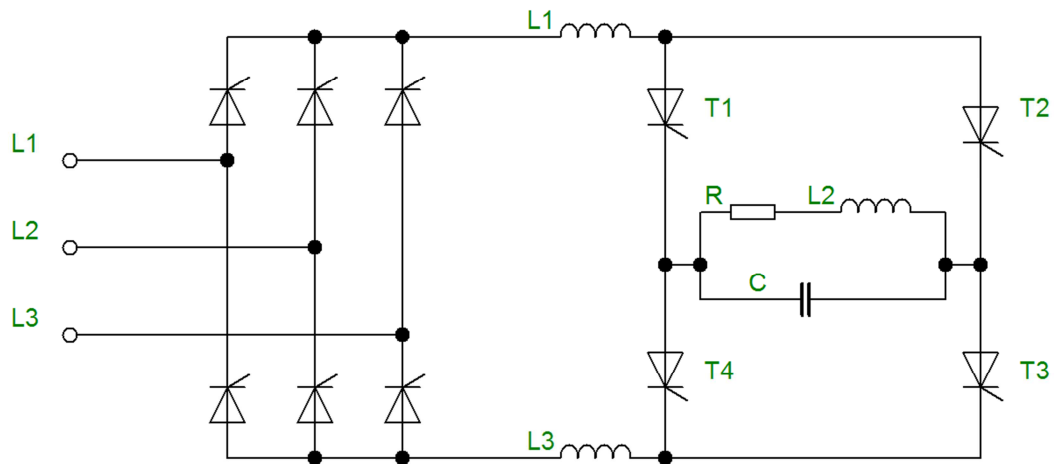


Obr. 2.13 Schéma zapojení vysokofrekvenčního elektronkového generátoru nad 50kHz [Autor dle 1]

2.2.5.2 Tyristorový měnič kmitočtu

Hlavním důvodem používání tyristorových měničů je jejich poměrně vysoká účinnost (více než 90%) bez ohledu na použitý výkon. Mají lepší průběh křivky účinnosti v závislosti na zatížení. Dobrá je i spolehlivost celého zařízení oproti rotačním měničům. Tyristorové měniče oproti rotačním mají i další výhody, jako jsou: hlučnost, hmotnost, není potřeba robustních stavebních základů, okamžité vypnutí a zapnutí apod. Proto tyto výhody nahrazují rotační měniče. Mezi požadované vlastnosti použitých tyristorů patří: krátká vypínací doba, vysoké blokovací a závěrné napětí, velký propustný proud. Tyristorový měnič kmitočtu sestává z vstupního řízeného usměrňovače, meziobvodové tlumivky a střídače. Dále jsou zde

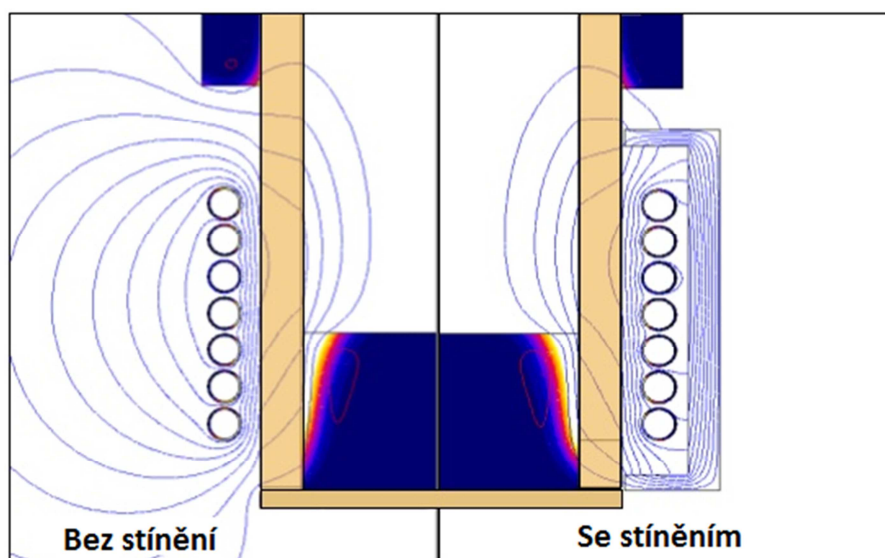
přítomny i přepětové a proudové ochrany. Jelikož se zde pracuje s velkými výkony je opět zapotřebí takovýto zdroj chladit vodou. Nevýhodou těchto měničů kmitočtu je nižší frekvenční rozsah přibližně do 20kHz. [1][5][21][26][27]



Obr. 2.14 Zapojení tyristorového měniče [Autor dle 1]

2.2.6 Stínění a pracovní komora studeného kelímku

Pracovní komora má současně několik funkcí v systémech indukčního tavení se studeným kelímkem. V první řadě funguje jako stínění elektromagnetického pole (Obr. 2.15), jako ochrana ostatních elektrických zařízení, elektricky vodivých konstrukcí a osob. Také ochraňuje osoby před neočekávaným únikem taveniny. Materiál těchto pracovních komor je často nemagnetická ocel či hliníkové slitiny (dural). Ztráty ve stínění dosahují jednotky procent, takže při velkých výkonech je nutné pracovní komoru chladit. Stěny pracovní komory tedy bývají dvojité s napojením na chladicí systém. Pracovní komora sestává z několika dílů, kdy hlavní část obsahuje studený kelímek a vedlejší části pak tvoří vzduchotěsné poklopy. Také obsahuje průhledy ze speciálních skel a případné otvory pro manipulaci se vsázkou či zařízením uvnitř pracovní komory. Je také napojena na takzvaný off-gas systém, který umožňuje vytvořit speciální pracovní podmínky pro tavbu ve studeném kelímku, jako je například vytvoření technického vakua, či speciálních atmosfér s různým složením plynů uvnitř (argon). Zároveň tento systém odsává nebezpečné horké výpary z taveniny. Tyto plyny mohou obsahovat mnohé látky jako je vodní pára, oxidy, radioaktivní prvky a těžké kovy. Bez pracovní komory by takřka nebylo možné bezpečně používat studený kelímek. [5][20][22][25]



Obr. 2.15 Vliv použití stínění induktoru studeného kelímku oproti induktoru bez stínění[28]



Obr. 2.16 Pracovní komora studeného kelímku[Autor]



Obr. 2.17 Umístění studeného kelímku v pracovní komoře[Autor]

2.3 Tavení materiálů

2.3.1 Tavení elektricky vodivých materiálů

Tavení materiálů ve studeném kelímku je zejména vhodné pro materiály se špatnou elektrickou vodivostí. Ale v poslední době je zájem o tavení žárupevných často elektricky vodivých materiálů. A to zejména titanu, popřípadě jeho slitiny. Konvenční pece s keramickým kelímkem, či vyzdívanou pecí při tomto úkolu selhávají, neboť dochází k chemickým reakcím mezi taveninou a keramickým kelímkem nebo vyzdívkou pece. Popřípadě dochází k erozi vyzdívky pece vířením taveniny. Což kontaminuje taveninu a tím se zhoršují její vlastnosti. Tyto způsoby jsou také omezeny maximální teplotou tavení daným materiálem keramického kelímku, či vyzdívané pece. Studený kelímek je tak řešením pro tyto nedostatky. Při tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku není zapotřebí takzvaný startovací proces (popsán v následující kapitole 2.3.2) jako u elektricky nevodivých materiálů. V elektricky vodivých materiálech se indukují proudy vyvolané elektromagnetickým polem a ty vytvářejí ve vsázce teplo na principu Jouleových ztrát. Při použití technologie studeného kelímku je tak možné dosáhnout až 99,9999% čistoty látky. Při indukčním tavení dochází také ve vsázce k víření taveniny způsobené elektromagnetickými silami, to napomáhá k homogenizaci teplotní i materiálové. Nicméně jsou zde i nedostatky v použití studeného kelímku, a tím je zejména nízká účinnost tavení materiálů elektricky vodivých. Dosahuje přibližně 20%. [5][7][20][29][30][31]

Tab. 2 Bod tavení žárupevných kovů a jejich chemických sloučenin (°C)[7]

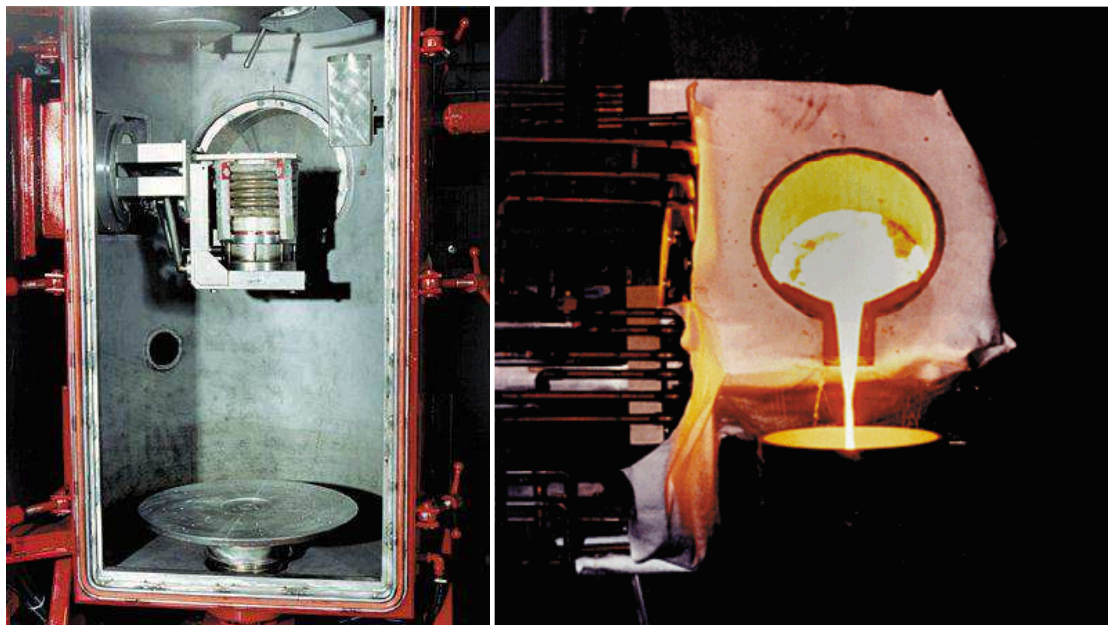
Materiál	Bod tavení	Oxidy	Karbidy	Boridy	Nitridy	Silicidy	Sulfidy
Titan	1725°C	1840°C	3140°C	2980°C	2950°C	1540°C	2000°C
Křemík	1414°C	1728°C	2400°C	-	1900°C	-	1000°C
Wolfram	3410°C	1470°C	2870°C	2600°C	-	2165°C	1100°C
Molybden	2625°C	-	2690°C	2100°C	-	2100°C	1180°C
Zirkonium	1830°C	2700°C	3530°C	3000°C	2980°C	1700°C	2050°C

2.3.1.1 Tavba titanu ve studeném kelímku

Titan je v pevném skupenství mimořádně odolný (ochranná vrstva oxidu titanu na povrchu), lehký a přitom pevný materiál. Používá se všude tam, kde jsou vysoké nároky na chemickou a teplotní odolnost a pevnost. Například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, vesmírném inženýrství a v lékařství. Titan je velmi reaktivní s kyslíkem nebo

dusíkem při jeho tavně a odlévání. Proto je nutné provádět tyto činnosti v technickém vakuu nebo v inertní atmosféře, například v plynu argonu. Titanové odlitky jsou bohužel několikanásobně dražší než z nerezové oceli. Cenu ovlivňuje právě složitější zpracování. Jak bylo již řečeno, musí se tavit i odlévat ve vakuu či v inertní atmosféře, musí se odlévat do nereaktivních, teplu odolných forem (sloučeniny zirkonia, thoria a yttria). S odléváním souvisí náročné opravy odlitků (nedokonalosti, přetoky, špatný povrch apod). A jelikož je titan velmi mechanicky odolný, je i jeho recyklace obtížná. [7][29][30]

Díky tomu, že je titan v roztaveném stavu velmi reaktivní s kyslíkem, nemohou se použít k odlévání formy z reaktivních materiálů. Použití forem s obsahem různých oxidů jako u forem pro železo vede k narušení povrchu výsledného odlitku. Proto se používají formy ze žárupevných materiálů na bázi zirkonia, thoria a yttria (Pro některé aplikace se mohou použít i jiné formy, ale ty musí mít ochranný povlak na bázi těchto látek). Obsah kyslíku v titanu souvisí s jeho výslednou pevností. Vyšší obsah kyslíku způsobuje vyšší pevnost. Přidáváním kyslíku ve formě oxidu titaničitého vede k uzpůsobení výsledného produktu. Tavení ve studeném kelímku umožňuje také během procesu tavení přidávat různé příměsi do vsázky, které se působením víření elektromagnetickými silami homogenizují. Zároveň je umožněno rychlé opakovaní tavby díky tomu, že ve studeném kelímku zůstane tenká vrstva ztuhlé taveniny, která může být rychle odstraněna. Tím se zkracují licí časy. Tato metoda je celkově výhodnější než použití technologie přetavování obloukem ve vakuu.[7][29][33]



Obr. 2.18 Studený kelímek pro 10kg vsázky a lití taveniny to formy [29]

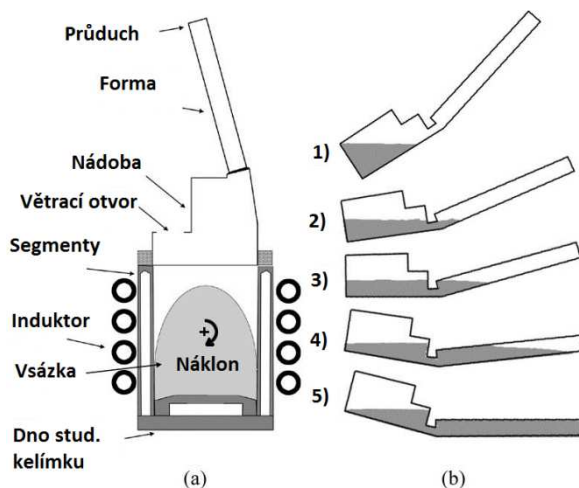
Z průmyslového hlediska se titanové slitiny a čistý titan dělí do několika čistotných tříd, anglicky jako Grade (třída či stupeň). Gr. 1, Gr. 2, Gr. 7 apod. Tyto třídy určují jejich celkové vlastnosti a zároveň jejich oblast použití. Různé příměsi prvků (slitiny) mají vliv na vlastnosti jako je tvarovatelnost za tepla či studena, tažnost, dobrá svařovatelnost, chemická odolnost (lékařství). Například Gr.5 je slitina Ti-6Al-4V používaná nejčastěji (více než 50% všech titanových slitin). Široké používání této slitiny spočívá v jejích mnohých výhodách. Slitina Ti-6Al-4V je kalitelná, což vede ke zvýšení pevnosti. Obsahuje různé příměsi uhlíku, železa, dusíku, kyslíku, hliníku. Může být použita ve svařovaných (obloukové svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře argonu) konstrukcích v provozních prostředích o teplotách až do 315°C. A zároveň nabízí vysokou pevnost při nízké hmotnosti, užitečné tvarovatelnosti a vysoké chemické odolnosti. Používá se při výrobě letadlových turbín, komponentů motorů, strukturální komponenty letadel, v kosmonautice, ve vysokovýkonných aplikacích, námořním průmyslu. Gr.23 je čistější verze Gr.5. a používá se především ve zdravotnictví a to jako ortopedické čepy, šrouby, skalpely, kloubní náhrady, kryogenická zařízení apod.[32][34]



Obr. 2.19 Titanové výrobky společnosti Lionse LTD. Gr.2, Gr.5 apod [32]

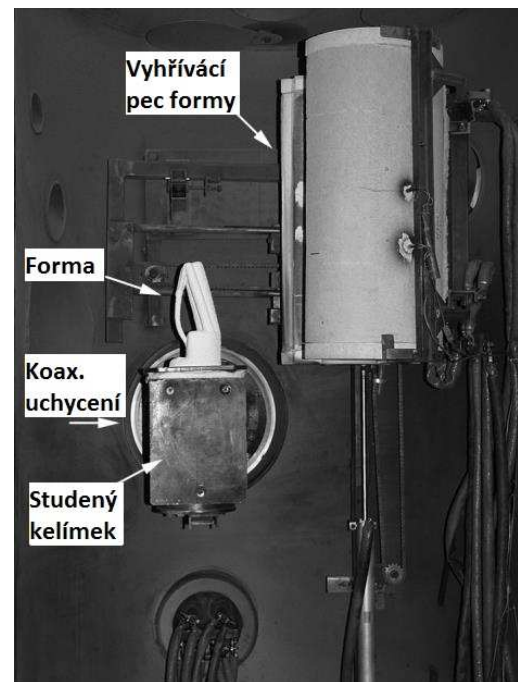
Slitiny Ti-Al odlitky jsou náchylné na různé defekty, jako jsou například bubliny (nechtěná porozita) vytvořené během turbulentního proudění během rychlého odlévání do forem a rychlejšího chladnutí taveniny. Metoda vysokotlakého lisování za stálého tlaku a vysoké teploty (metoda pro odstraňování interní porozity) je ovšem neúčinná při lití v ochranné atmosféře argonu neboť bubliny jsou právě naplněny argonem. Proto se vyvinulo takzvaná technika naklápěcího lití titanu (anglicky Tilt casting technique). Proces opět probíhá v technickém vakuu, či v inertní atmosféře argonu, spolu s řízeným postupným naklápěním celého studeného kelímku i s vyhříváním formou. Schéma s postupnými fázemi

naklápění je na Obr. 2.20. Princip tohoto lití spočívá v tom, že nejprve se ve studeném kelímku roztaví slitina Ti-Al v ochranné atmosféře argonu a potom se roztavená slitina pomalu lije do předem ohřáté formy. K ohřátí formy se může použít například přídavná elektrická pec, která umožňuje ohřátí formy až na 1200°C. Průduch na konci formy poté umožňuje únik plynu během lití. Tato technologie zlepšila kvalitu odlitků z Ti-Al, používaných např. pro odlitky lopatek turbín.[33]



Obr. 2.20 Naklápěné lití titanu se studeným kelímkem[33]

a) studený kelímkem s formou, b) naklápění.



Obr. 2.21 Naklápěné lití titanu. Uspořádání v pracovní komoře[33]

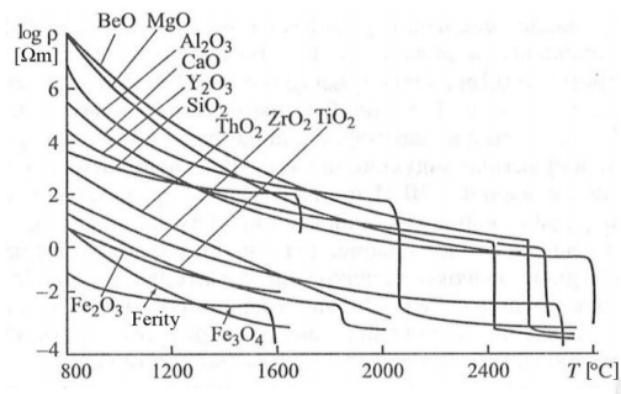
2.3.2 Tavení elektricky nevodivých materiálů

Následující podkapitola 2.3.2 „Tavení elektricky nevodivých materiálů“ je zpracována z následujících zdrojů: [5][7][20][21][35][36][37][38][40][41]

Tavení ve studeném kelímku se nejčastěji používá pro tavbu elektricky nevodivých materiálů. Tím je myšleno materiály, které za normálních (v pevném skupenství) podmínek mají velmi malou konduktivitu ($10^{-12} - 10^{-2} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$). Ovšem v kapalném skupenství (nebo v roztocích jako elektrolyty) mají tyto materiály mnohem větší konduktivitu. Se vzrůstající teplotou klesá měrný odpor (Obr. 2.22). V těchto vodičích už nepřenáší elektrický proud volné elektrony, ale elektrický proud přenáší elektricky nabitě částice ionty. Tyto materiály jsou například skla, oxidy, keramiky a soli. Při tavně nevodivých materiálů ve studeném kelímku opět vzniká krusta neroztaveného materiálu mezi vsázkou a stěnou studeného kelímku. Takto můžeme vyrábět materiály s vysokou čistotou. Účinnost tavení elektricky

nevodivých materiálů ve studeném kelímku dosahuje až 90%.

Touto metodou studeného kelímku můžeme vyrobit kvalitní a čisté krystaly různých oxidů určené pro průmysl. Používají se v optice, mikroelektrotechnice, energetice apod. Nejznámější metody pro růst krystalů je metoda Czochralského a metoda směrového tuhnutí. Czochralského metoda je metoda přípravy monokrystalů z vlastní taveniny. Nejprve se připraví tavenina např. polykrystalického křemíku. Poté se spustí na hladinu taveniny tyč, na které ztuhne tavenina. Postupně se tato tyč začne vytahovat z taveniny a na jejím konci se začne postupně vytvářet krystal. Tato zařízení se nazývají Czochralského tažičky. Metoda směrového tuhnutí je pro získání také vysoce kvalitních krystalů. Spočívá na postupném chladnutí taveniny a následné její krystalizaci. Velikost a vlastnosti výsledného produktu jsou závislé především na rychlosti chladnutí taveniny a tak se mohou využít další zdroje tepla. Obecně tyto metody mají právě své nevýhody a to především v obtížné regulaci teploty uvnitř a na povrchu vsázky.

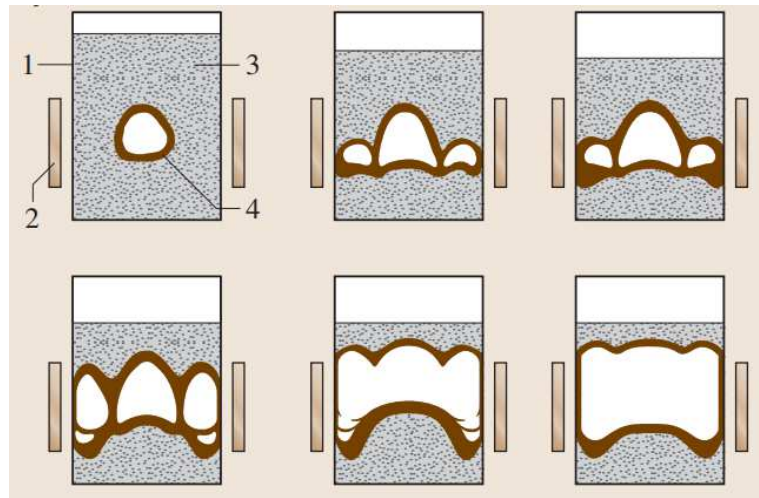


Obr. 2.22 Závislost měrného odporu různých materiálů na teplotě [7]

2.3.2.1 Startovací proces a fáze tavby

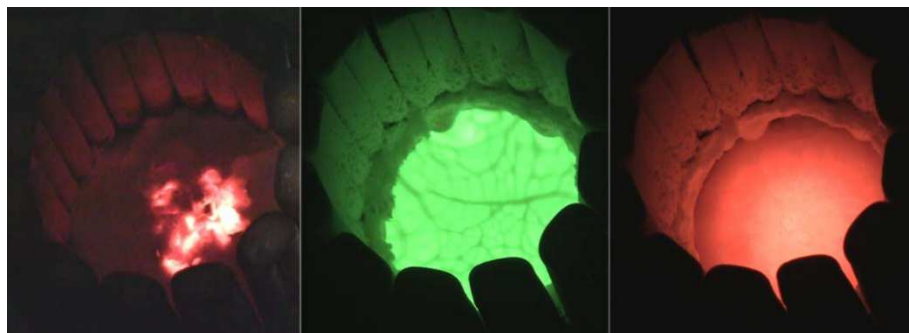
V případě tavení elektricky nevodivých materiálů je zapotřebí přizpůsobit jejich stav pro indukční tavení ve studeném kelímku. Tento proces, nazýván jako startovací proces, který v podstatě uvede daný materiál do elektricky vodivého stavu tak, aby se mohly naindukovat dostatečně velké vířivé proudy, kterými vznikne teplo ve vsázce. Tento startovací proces má několik fází. V první fázi se nataví potřebné množství samotného materiálu vsázky. Ve druhé fázi, takzvaná formovací fáze, se vytvoří malá tavící lázeň, která přenosem tepla postupně roztaví celý objem vsázky (Obr. 2.23). Po tomto startovacím procesu nastává stabilní fáze, kdy vsázka se udržuje po nezbytně nutnou dobu v požadovaném stavu. Posledním stavem je stav chladnutí. V tomto stavu je možné upravovat tepelné podmínky vsázky pro požadovaný

výsledek. Tím je například růst krystalů v ingotu, kdy se postupně snižuje výkon zdroje, či velikost odvodu tepla chlazením ve studeném kelímku (Obr. 2.25).



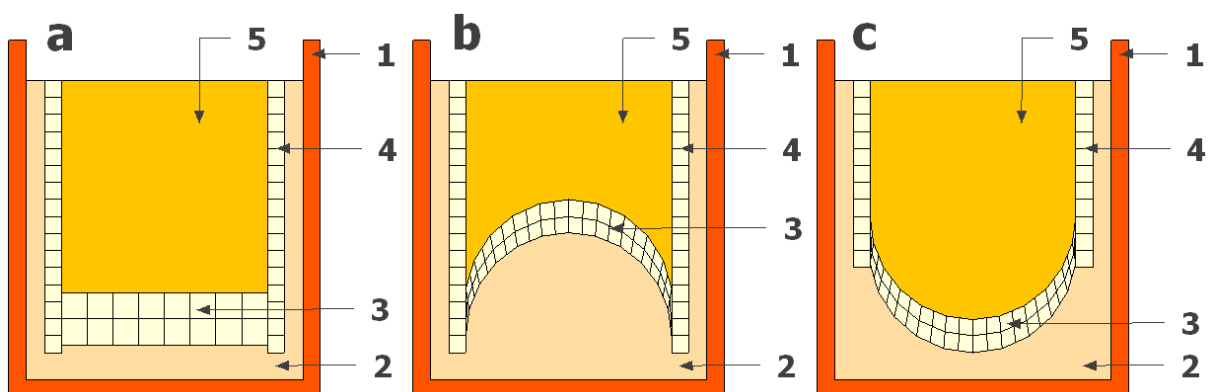
Obr. 2.23 Postupné rozšíření roztaveného materiálu ve vsázce [35]

1-Stěna studeného kelímku, 2-induktor, 3-materiál vsázky, 4-počáteční tavící lázeň



Obr. 2.24 Proces tavby [37]

Zleva: startovací fáze, stabilní fáze, chlazení

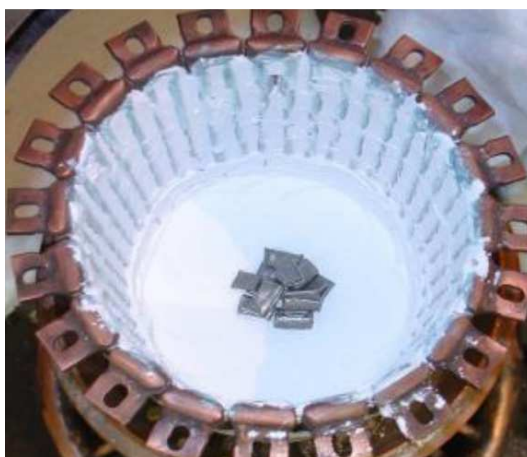


Obr. 2.25 Různé druhy růstu krystalů ve studeném kelímku[Autor dle 35]

1-studený kelímek,2-krusta,3-krystaly rostoucí zespona,4-krystaly rostoucí ze stran,5-tavenina
a) plochá krystalizace; b)konvexní krystalizace; c) konkávní krystalizace

2.3.2.1.1 Start tavby startovacím kovovým materiálem

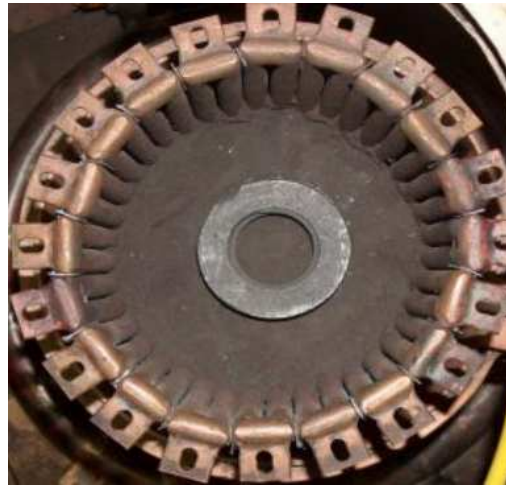
Existuje několik možností jak startovací proces zahájit. Přitom celkově záleží na výsledné čistotě materiálu. Prvním způsobem pro vysokou čistotu výsledného ingotu je použití startovacího materiálu, kovu, který je elektricky vodivý za běžných podmínek. Volba tohoto kovu se volí zásadně v závislosti na chemických vlastnostech dle druhu původního materiálu. Například pro tavbu Al_2O_3 se volí čistý hliník a pro ZrO_2 se volí čisté zirkonium. Tento kov se ve formě malých kousků vloží do studené vsázky (Obr. 2.26), která je většinou v práškové formě. Jelikož je tento startovací materiál elektricky vodivý, naindukované proudy vyvolané elektromagnetickým polem ohřívají tento materiál až do bodu, kdy začne exotermická reakce tohoto materiálu s kyslíkem. Vznikne tak roztavený materiál shodný s materiálem, který je již dostatečně elektricky vodivý pro ohřev elektromagnetickou indukcí. Jak zde vyplynulo, je potřebné uzpůsobit složení atmosféry v pracovní komoře, aby exotermická reakce byla možná. Jak jsem uvedl dříve, například pro tavbu Al_2O_3 a ZrO_2 je zapotřebí v pracovní komoře kyslík.



Obr. 2.26 Startovací materiál ve formě kovových fragmentů[7]

2.3.2.1.2 Start tavby startovacím tělesem

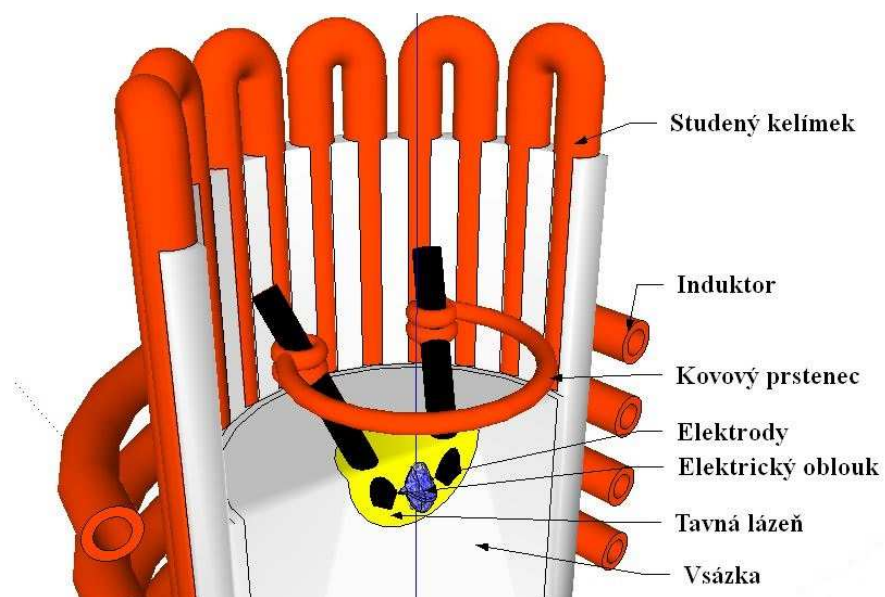
Dalším způsobem nastartování tavby je vložení elektricky vodivého a žárovevního tělesa do vsázky (Obr. 2.27). Toto těleso se opět zahřeje působením vířivých proudů a tím roztaví potřebný materiál vsázky. Těleso se poté odstraní. Tento způsob má svoje nevýhody a to především to, že v pracovní komoře musí být pohybový mechanismus k vyndání tohoto startovacího tělesa. Dále je nevýhodou možné znečištění vsázky materiálem startovacího tělesa, proto se musí používat materiál startovacího tělesa s vyšší teplotou tání, než teplota tání vsázky. Startovací těleso bývá vytvořeno jako kroužek z grafitu, iridia, wolframu, molybdenu a dalších žárovevných kovů.



Obr. 2.27 Startovací proces tělesem z grafitového kroužku[7]

2.3.2.1.3 Start tavby pomocí elektrického oblouku

Dalším způsobem nastartování tavby je využití vysoké teploty elektrického oblouku (Obr. 2.28). Využije se otevřeného elektricky vodivého prstence s mezerou a s elektrodami. Při vložení tohoto prstence do proměnného elektromagnetického pole induktoru naindukují se v něm vířivé proudy, které vyvolají elektrický oblouk mezi elektrodami. Tento elektrický oblouk může být zapálen pomocnou elektrodou vloženou mezi dvěma elektrodami. Tento prstavec s elektrodami může být umístěn uvnitř vsázky nebo na jejím povrchu. Následně se vlivem elektrického oblouku roztaví potřebný materiál vsázky. Poté se celý prstavec s elektrodami vyjme ze vsázky. Opět je zde problém s manipulací uvnitř pracovní komory. Dále může dojít k znečištění taveniny opáleným materiálem z elektrod.



Obr. 2.28 Start tavby pomocí elektrického oblouku[Autor dle 21]

2.3.2.1.4 Start tavby pomocí laseru a plynového a plazmového hořáku

Dalším způsobem jak nastartovat tavbu elektrických materiálů ve studeném kelímku je použití laseru a plynových a plazmových hořáků. Jedná se o povrchový ohřev materiálu. Tímto způsobem se roztaví povrchová vrstva vsázky, která se tím stane elektricky vodivou. Pro nastartování tavby skel se používá nejčastěji plazmového hořáku. Plazmový hořák je zařízení, které tvoří vysokoteplotní plazmu což je vodivý plyn složený z iontů a elektronů. Tato plazma pak roztaví část vsázky. Podobně ohřejí vsázku i plynové hořáky, ale ty mohou spaliny ovlivnit složení taveniny. Navíc u hořáků zde hrozí odfouknutí práškové vsázky. U použití laserových paprsku kontaminace nehrozí. Laserový paprsek je úzký svazek světla. Tento paprsek lze soustředit na malou plochu, kde předá velké množství energie. Laser navíc může být umístěn mimo pracovní komoru, to může zlepšit pracovní podmínky. Laserový paprsek by v takovém případě procházel průzorem v pracovní komoře.

2.3.2.2 Tavení ZrO_2 ve studeném kelímku

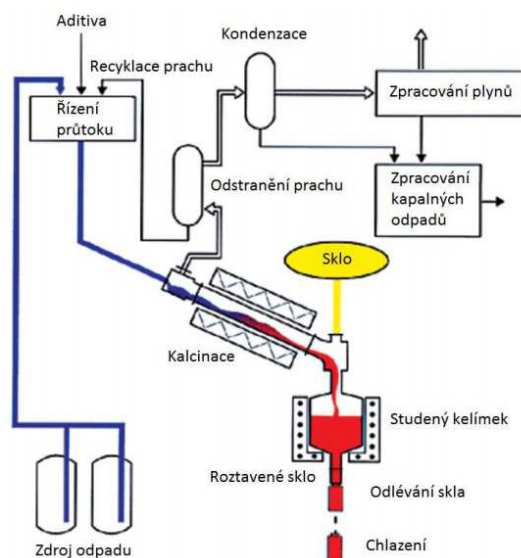
Kubické zirkonium (oxid zirkoničitý) ZrO_2 má bod tavení $2750^\circ C$, tudíž není jiná možnost jeho tavení než ve studeném kelímku. Jiné metody tavby s konvenčními kelímky tuto teplotu nevydrží. Tavba opět probíhá v krustě, tudíž se jedná o vysoko čistotní proces. Počáteční vsázka je tvořena práškovým ZrO_2 , stabilizátorem (ytrium, oxidem vápenatým) a startovacím materiálem tvořeným kovovým zirkoniem. Po zahřátí tohoto kovového zirkonia dojde k exotermické reakci a tím uvedení nevodivého ZrO_2 do vodivého stavu. Jakmile je celý objem (až na krustu) roztaven, snižuje se dodávaný výkon do vsázky a tím začne vsázka chladnout. To vede k následné krystalizaci. Stabilizátor slouží k podpoření růstu kubických krystalů. Zároveň se mohou krystaly i obarvit dalšími příměsemi. Tímto způsobem získáme produkt zvaný Zirkon, což je náhražka diamantu a proto se využívá především ve šperkařství, kde se dělí do pěti kvalit dle odolnosti a křišťálovosti.



Obr. 2.29 Hotový kubický zirkon po vyjmutí ze studeného kelímku a rozbit[39]

2.3.2.3 Vitřifikace jaderného odpadu za pomoci studeného kelímku

Radioaktivní odpad představuje značné nebezpečí pro životní prostředí. Tento odpad především pochází z jaderných elektráren, kde vystupuje jako již vyhořelé palivo. Po celém světě energetické společnosti řeší, jak s takovýmto radioaktivním odpadem bezpečně naložit. Tyto materiály se dělí na nízkoaktivní, středně aktivní a vysoce aktivní (vyhořelé jaderné palivo). Doba poločasu rozpadu těchto radioaktivních materiálů může být i více než sto tisíc let. V poslední době probíhá výzkum právě na použití studeného kelímku pro vitřifikaci (Obr. 2.30) radioaktivního odpadu a to tak, že se zalije do skleněných matric, kde sklo představuje až 50% celkového objemu celé matrice. Pro tyto matrice se používají borosilikátová skla. Tento typ skla je odolný vůči teplotnímu působení, chemickým reakcím i radiačním vlivům od radioaktivního odpadu. Celý proces vitřifikace začíná tak, že radioaktivní odpad je vysušen v kalcinátoru. Během kalcinace se uvolňují odpadní plyny, které se následně z části přemění v kondenzátoru na kapalný odpad. Zbytek plynu i tento kapalný odpad se dále zpracovávají. Pevné částice z procesu kalcinace se filtrují a vracejí se zpět do vstupu vitřifikačního procesu. Poté vysušený odpad z kalcinátoru spolu se sklem se sype do studeného kelímku, kde se v průběžném tavení taví na ingot. Takto upravený radioaktivní materiál se skladuje v kontejnerech. Tyto výsledné skleněné matrice mohou odolávat okolním podmínkám bez problému. Například se odhaduje, že v případě vyluhování vodou by trvalo milióny let, než by došlo k vystavení okolí částicím radioaktivnímu odpadu (v tuto dobu by šlo již pravděpodobně o slabě radioaktivní materiál). Tento fakt podporuje geologický výzkum skel.



Obr. 2.30 Vitřifikace radioaktivního odpadu v průběžném tavení studeného kelímku [20]



Obr. 2.31 Ingot vitřifikovaného radioaktivního odpadu v nerezovém obalu v řezu [42]

3 Podmínky pro efektivní tavení materiálu ve studeném kelímku

Následující kapitola 3 „Podmínky pro efektivní tavení materiálů ve studeném kelímku“ je zpracována z následujících zdrojů:[1][2][7][20][21][43][44]

Tavení materiálů ve studeném kelímku je proces energeticky náročný, proto je nutné minimalizovat tepelné i elektrické ztráty. To znamená, že musíme zvyšovat účinnost celého zařízení. Při ohřevu vsázky dochází k úniku tepla ze vsázky vedením tepla stěnami, popřípadě i dnem studeného kelímku a sáláním tepla z hladiny vsázky. Další ztráty jsou ztráty elektrické. Pro zjednodušení uvažujeme ustálený stav. Následuje vztah pro tepelnou účinnost:

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_{2C}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.1)$$

Kde: η_T tepelná účinnost

P_T výkon potřebný k tavně,

P_{2C} Celkové tepelné ztráty ve vsázce.

Tyto ztráty P_{2C} jsou rozepsány dále v podkapitole 3.1.2 Tepelné ztráty. Následující vzorec výpočtu elektrické účinnosti nezahrnuje ztráty v generátoru, kondenzátorové baterii a v transformátoru.

$$\eta_E = \frac{P_T}{P_1 + P_2 + P_3} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.2)$$

Kde: η_E elektrická účinnost

P_1 elektrické ztráty v induktoru,

P_T výkon potřebný k tavně,

P_3 elektrické ztráty ve stěně a dně studeného kelímku.

Poté můžeme upravit tento výraz (3.2) elektrické účinnosti do tvaru, kdy ztráty vyjádříme pomocí přepočítaných odporů induktoru, vsázky a studeného kelímku. Dostaneme:

$$\eta_E = \frac{R'_2}{R_1 + R'_2 + R'_3} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.3)$$

Kde: η_E elektrická účinnost,

R_1 rezistivita induktoru,

R'_2 rezistivita vsázky přepočtená na stranu induktoru,

R'_3 rezistivita stěny a dna studeného kelímku přepočtená na stranu induktoru,

Výše uvedené rezistivity R'_2 a R'_3 jsou pomocí převodních koeficientů převedeny na stranu induktoru. Tyto převodní koeficienty nabývají hodnot od 0 do 1. Kde 1 je dokonalý přenos energie, například z induktoru do vsázky a 0 je nulový přenos energie. V následujících úvahách uvažujeme dokonalý přenos energie.

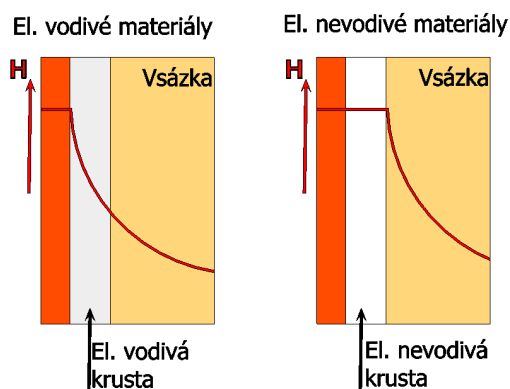
Z takto uvedené rovnice elektrické účinnosti můžeme určit následující. Jestliže takto zavedené rezistivity R_1 , R'_2 a R'_3 budou všechny stejné, bude maximální účinnost 33,3%.

Při použití induktorového kelímku, nám odpadá použití studeného kelímku tvořeného segmenty a tak i rezistivita R'_3 . Z toho vyplývá, že maximální účinnost při stejných rezistivitách R_1 a R'_2 bude 50%. Tato účinnost by platila při dokonalém přenosu energie mezi induktorem a vsázkou a induktor a vsázka by měly stejnou rezistivitu.

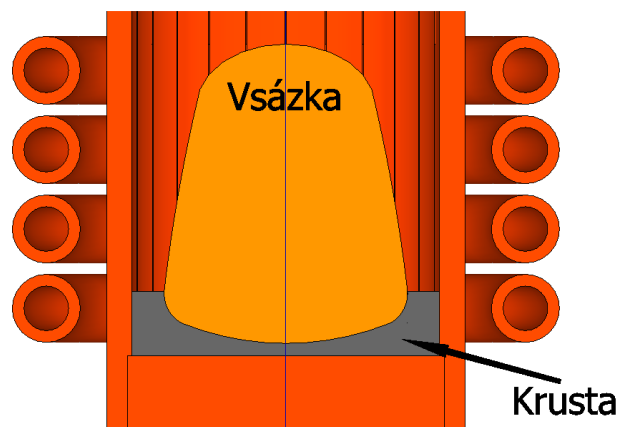
Zároveň z těchto úvah také vyplývá použití studeného kelímku pro elektricky vodivé a nevodivé materiály. Elektricky vodivé materiály mají relativně malou rezistivitu R'_2 v porovnání s rezistivitami induktoru R_1 a studeného kelímku R'_3 . Tudíž mají tyto podobné velikosti rezistivit velký vliv na velikost účinnosti. Zatímco při tavení elektricky nevodivých materiálů (V tekutém stavu již elektricky vodivé!) je použití studeného kelímku účinnější, protože tyto materiály v tekutém stavu mají mnohem větší rezistivitu R'_2 a tak rezistivity R_1 a R'_3 ztrácí vliv na velikost účinnosti.

U elektricky vodivých materiálů nastává ještě jeden problém, a to je ten, že vytvořená krusta je elektricky vodivá. To má za následek stínění elektromagnetického vlnění k vsázce. Dále je zde zřejmé, že se teplo vytváří i v krustě a tak je jasné, že se tím zvětšují i tepelné ztráty stěnou a dnem studeného kelímku. U elektricky vodivých materiálu je též krusta dobře

tepelně vodivá, což také zvětšuje tepelné ztráty stěnou a dnem studeného kelímku. U elektricky vodivých materiálů dochází při indukčním tavení k takzvanému vzduť taveniny (vsázky) Obr. 3.2. To způsobí, že se tavenina nedotýká přes krustu úplně celých stěn, ale dna a malé části stěny studeného kelímku. Tím je možné snížit tepelné ztráty stěnou studeného kelímku. Toto je podmínkou k dosažení velké účinnosti při tavení elektricky vodivých materiálů.



Obr. 3.1 Porovnání pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky při el. vodivé a nevodivé krustě [Autor dle 20]



Obr. 3.2 Vzduť vsázky se spodním dotykem přes krustu [Autor dle 45]

Při hledání nejvyšší účinnosti pak můžeme snižovat ztráty v induktoru nebo elektrické ztráty ve stěně a dnu studeného kelímku, neboť materiálové vlastnosti vsázky přímo ovlivnit nemůžeme. Řada institucí provedla výzkum závislosti na tvaru segmentů, uspořádání studeného kelímku apod. a účinnosti studeného kelímku.

3.1.1 Elektrické ztráty

Induktorem prochází vysokofrekvenční proud, který zahřívá induktor na principu Jouleových ztrát (výraz 3.4). Působením těchto Jouleových ztrát stoupá teplota induktoru. Proto je nutné induktor chladit vodou.

$$P_1 = R_1 I_{ef}^2 \quad (W) \quad (3.4)$$

Kde: P_1 jsou Jouleovy ztráty v induktoru,

R_1 rezistivita induktoru,

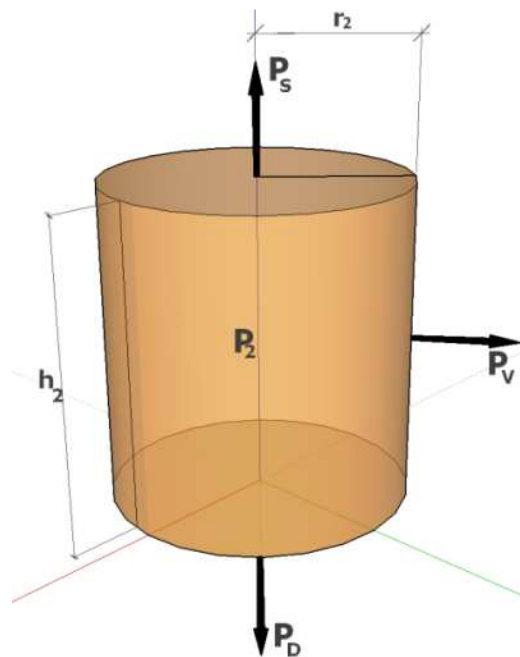
I_{ef}^2 efektivní proud v induktoru.

Elektrické ztráty ve dně a stěně studeného kelímku se těžko určují, protože směr indukovaného proudu v segmentu je nejen v radiálním směru, ale i v axiálním směru segmentů. Pro určení těchto ztrát se tak využívají numerické výpočty.

3.1.2 Tepelné ztráty

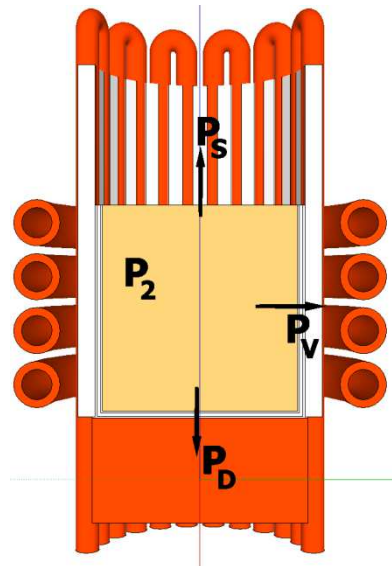
Únik tepla ze vsázky je nežádoucí, avšak nelze jej úplně omezit. Dochází k němu díky definici druhého termodynamického zákona, který říká, že teplejší těleso samovolně předává teplo tělesu chladnějšímu a nikdy ne naopak. Celkové ztráty ve vsázce P_2 se rovnají součtu ztrát sáláním P_S , vedením do stěny studeného kelímku P_V a ztrátám vedením do dna studeného kelímku P_D (Obr. 3.3 a Obr. 3.4). Takže pro ustálený stav platí:

$$P_2 = P_S + P_V + P_D \quad (W) \quad (3.5)$$



Obr. 3.3 Tepelné ztráty vsázky [Autor dle 43]

P_S sáláním, P_V vedením stěnou, P_D vedením dnem, P_2 přenášený výkon do vsázky



Obr. 3.4 Situace tepelných ztrát vsázky ve studeném kelímku [Autor dle 43]

Celkové ztráty ve vsázce P_T ovšem neobsahují výkon potřebný k samotnému roztavení vsázky a proto celkový výkon P_{2C} do vsázky musí být zvětšen o tavicí výkon P_T .

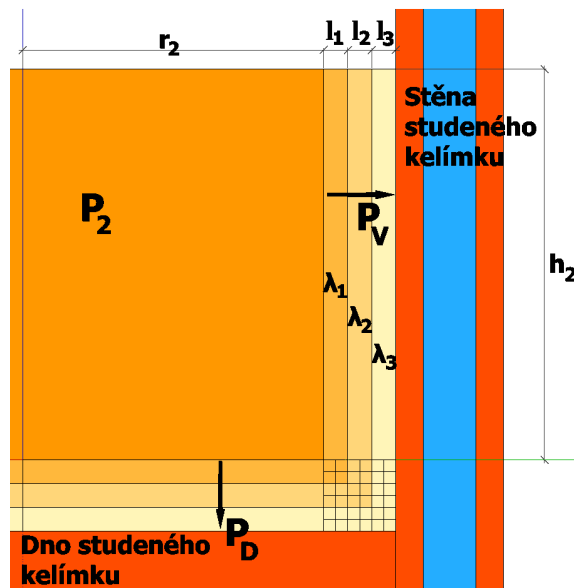
$$P_{2C} = P_T + P_T \quad (W) \quad (3.6)$$

3.1.2.1 Tepelné ztráty vedením stěnou a dnem studeného kelímku

Tepelné ztráty vedením vznikají tak, že molekuly látky předávají teplo přímým kontaktem mezi sebou. Molekuly se svojí vyšší termodynamickou energií předávají část své energie dalším molekulám srážkami mezi sebou. Rychlost postupného vedení tepla určuje tepelná vodivost. Látky v pevném stavu mají obecně lepší tepelnou vodivost λ než kapaliny a plyny. Nejlepší tepelnou vodivost mají pak kovy. U studeného kelímku jde pak o přenos tepla mezi vsázkou, přes krustu a stěnou nebo dnem studeného kelímku. Jak jsem již dříve uvedl, stěna a dno studeného kelímku jsou chlazeny vodou. To znamená, že tyto ztráty vedením stěnou a dnem studeného kelímku se odvádí pomocí chladicího systému. Je důležité, aby tyto ztráty nebyly příliš velké, resp. musí být menší než chladicí výkon. Jinak by nedošlo k vytvoření důležité krusty a tím k následnému poškození studeného kelímku.

Tato krusta má několik postupných vrstev, kdy každá tato vrstva krusty má jinou tepelnou vodivost. Část krusty, která je v kontaktu s taveninou je v pevném stavu. Další

vrstvy jsou dle materiálu vsázky především v práškové formě. Tyto vrstvy se chovají i jako tepelná izolace právě proto, že mají špatnou tepelnou vodivost (Jedná se především o materiály elektricky nevodivé). Tepelné ztráty vedením stěnou a dnem kelímku můžeme určit dle rovnic (3.7 a 3.8) s vysvětlením podle Obr. 3.5. Zanedbáváme spodní roh krusty. Dále předpokládáme, že teplota stěny studeného kelímku T_3 je stejná jako teplota dna studeného kelímku a dále, že se jedná o ustálený stav.



Obr. 3.5 Tepelné ztráty vedením stěnou a dnem studeného kelímku [Autor dle 21]

$$P_V = \frac{2\pi \cdot h_2(T_2 - T_3)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2+l_1}{r_2} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2+l_1+l_2}{r_2+l_1} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_2+l_1+l_2+l_3}{r_2+l_1+l_2}} \quad (W) \quad (3.7)$$

$$P_V = \frac{\pi \cdot r_2^2 \cdot (T_2 - T_3)}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}} \quad (W) \quad (3.8)$$

Kde: Tepelné vodivosti jednotlivých vrstev krusty: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$

tloušťky jednotlivých vrstev krusty: l_1, l_2, l_3 (m)

poloměr a výška vsázky: r_2, h_2 (m)

teplota vsázky a stěny a dna studeného kelímku: T_2, T_3 (K)

3.1.2.2 Tepelné ztráty sáláním z hladiny vsázky

Tepelné ztráty sáláním představují přenos tepla do okolního prostředí pomocí elektromagnetickým vlněním. Tuto energii vydává každé těleso s nenulovou teplotou (více než 0 K). Množství tepelných ztrát je závislé na jeho emisivitě a teplotě. Emisivita je poměr intenzity vyzařování tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa. Lze tedy pro případ studeného kelímku vyjádřit tepelné ztráty sáláním z hladiny taveniny:

$$P_V = \pi \cdot r_2^2 \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_0^4) \quad (W) \quad (3.9)$$

Kde: emisivita tělesa: $\varepsilon_s, \varepsilon_s \in (0; 1)$ (–)

Stefan- Boltzmannova konstanta: $\sigma = 5,567 \cdot 10^{-8}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

teplota vsázky: T_2 (K)

teplota okolí: T_0 (K)

plocha hladiny taveniny: $\pi \cdot r_2^2$ (m^2)

Tyto ztráty sáláním jsou poměrně velké, přibližně 20% z celkových ztrát ze vsázky. Proto je možné použít víko, které by zamezilo úniku tepla. Komplikace by vznikly při případné potřebě přidávat materiál do vsázky. Musíme brát v úvahu to, že směr těchto ztrát sáláním od hladiny taveniny, není přímo kolmý, ale jde různě. Pokud je stěna studeného kelímku dostatečně vysoká tepelná energie se odráží i od těchto stěn. Při případných měřeních těchto tepelných ztrát musíme brát v úvahu, že se část tepelné energie odvede chladicím systémem.

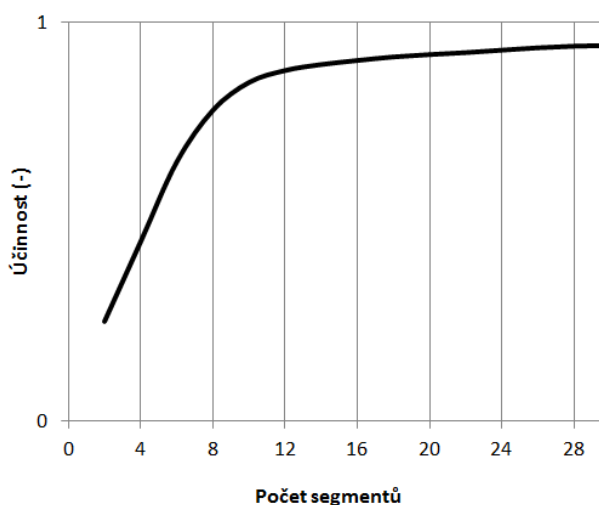
3.1.3 Vliv konstrukce studeného kelímku na účinnost

Podmínky pro zvýšení elektrické účinnosti vycházejí z rovnice (3.2). Pokud zmenšíme velikosti ztrát v induktoru či ve studeném kelímku, zvýšíme elektrickou účinnost. To platí i při tepelné účinnosti (3.1), kdy se snažíme snížit tepelné ztráty stěnou a dnem studeného kelímku a ztráty vyzařováním z povrchu vsázky. Touto problematikou se zabývá řada institucí po celém světě. V této podkapitole shrnuji jejich některé výsledky.

3.1.3.1 Tvar a počet segmentů studeného kelímku

Tvar a počet segmentů má vliv na velikost ztrát v segmentech. Toto se ovšem netýká typu studeného kelímku v provedení jako induktorový kelímek. Ve studeném kelímku tvořenými segmenty, se používají uzavřené profily různých tvarů (Obr. 2.6)

Počet segmentů má vliv na účinnost studeného kelímku, v praxi se používají studené kelímky i s několika desítkami segmentů. Dle Obr. 3.6 vidíme, že se účinnost téměř nemění od 8 segmentů a výš. [7][21]

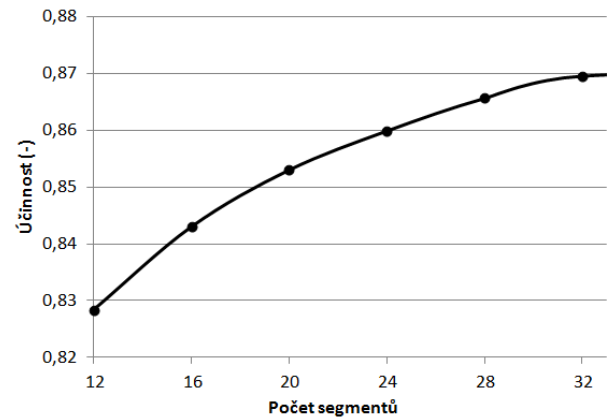


Obr. 3.6 Závislost účinnosti na počtu segmentů [Autor dle 21]

Z výsledků numerických simulací dle [47] se ukázalo, že nejlepší účinnost je při 64 segmentech, ale pro praktické použití je lepší použití 32 segmentů (pro dané rozměry studeného kelímku), neboť takovýto studený kelímek se 64 segmenty by nespĺňoval nároky na dostatečné chlazení z důvodu velmi slabé stěny segmentu (vydržení tlaku vody apod.).[21][47]

Tab. 3 Výsledky zkoumání závislosti Jouleových ztrát na počtu segmentů[47]

Počet segmentů	Ztráty v induktoru (W)	Ztráty v segmentech (W)	Výkon do vsázky (W)	Účinnost (-)
12	1175	3977,00	24858	0,8283
16	1143	3757,00	26305	0,8430
20	1139	3579,00	27377	0,8530
24	1139	3433,00	28057	0,8599
28	1146	3307,00	28690	0,8656
32	1147	3221,00	29124	0,8696
64	1154	3263,00	30854	0,8748

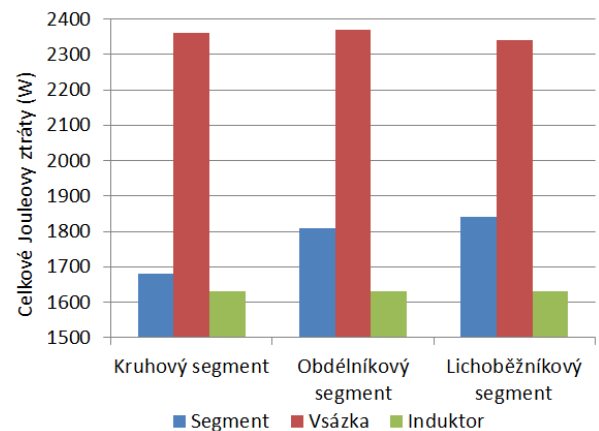


Obr. 3.7 Závislost účinnosti na počtu segmentů [Autor dle 47]

Dle [17] byly zkoumány velikosti ztrát v segmentech v závislosti na tvaru segmentu. Z jejich výsledků vyplynulo (Tab. 4 a Obr. 3.8), že nejmenší Jouleovy ztráty se tvoří v kruhových segmentech. [17]

Tab. 4 Výsledky zkoumání závislosti Jouleových ztrát na tvaru segmentů[17]

Tvar segmentu	Části	Celkové Jouleovy ztráty (W)
Kruhový segment	Segment	1680
	Vsázka	2360
	Induktor	1630
Obdélníkový segment	Segment	1810
	Vsázka	2370
	Induktor	1630
Lichoběžníkový segment	Segment	1840
	Vsázka	2340
	Induktor	1630



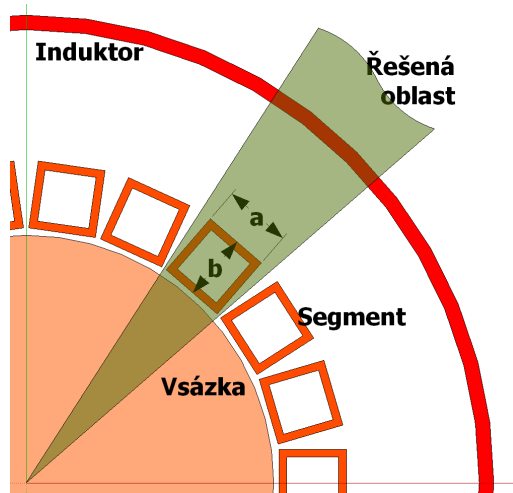
Obr. 3.8 Závislost celkových Jouleových ztrát na tvaru segmentu [Autor dle 17]

V návaznosti na tento výzkum se poté dle [46] zkoumala elektrická účinnost studeného kelímku pro různou tloušťku b obdélníkových segmentů. Cílem bylo získat optimální poměr mezi šířkou a a tloušťkou b průřezu segmentu na Jouleových ztrátách v segmentu a ve vsázce. Znázornění řešeného modelu na Obr. 3.9 pro zjednodušení bylo uvažováno pouze s 2 mm řezem modelu. Z jejich výsledků vyplynulo (Tab. 5 a Obr. 3.10), že poměr mezi šířkou a tloušťkou segmentu nemá vliv pouze na vlastní ztráty v segmentu, ale i

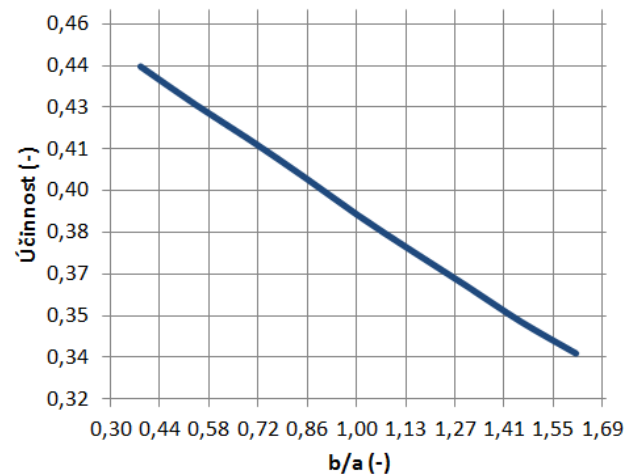
na ztráty ve vsázce. Z grafu na Obr. 3.10 vidíme, že nejlepší účinnost je pro nejmenší poměr mezi šířkou a tloušťkou segmentu studeného kelímku. [46]

Tab. 5 Výsledky zkoumání závislosti ztrát na tloušťce obdélníkových segmentů (v 2mm řezu v řešené oblasti modelu)[46]

b (mm); a=13mm; řez= 2mm	Ztráty v induktoru (W)	Ztráty v segmentech (W)	Ztráty ve vsázce (W)	Celkové ztráty (W)	Účinnost (-)	Poměr b/a
5	33	33,44	52,14	118,58	0,44	0,38
7	33,66	38,94	53,9	126,5	0,43	0,54
9	34,54	44,44	55,66	134,64	0,41	0,69
11	35,2	50,6	57,2	143	0,40	0,85
13	36,08	56,98	58,52	151,58	0,39	1,00
15	37,18	63,36	59,84	160,38	0,37	1,15
17	38,28	70,18	61,16	169,62	0,36	1,31
19	39,38	77,44	62,26	179,08	0,35	1,46
21	40,48	84,92	63,58	188,98	0,34	1,62



Obr. 3.9 Znáznornění velikosti obdélníkového segmentu a řešené oblasti [Autor dle 46]

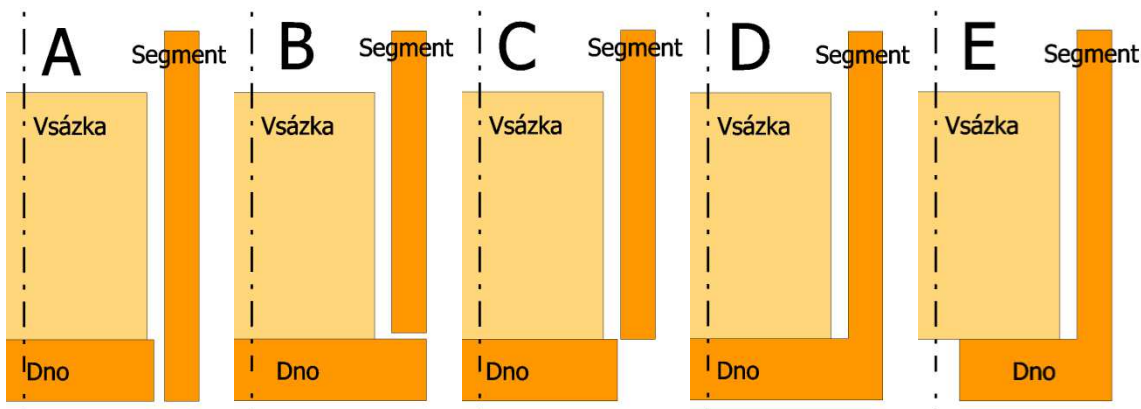


Obr. 3.10 Účinnost v závislosti na poměru b/a [Autor dle 46]

3.1.3.2 Uspořádání stěny a dna studeného kelímku

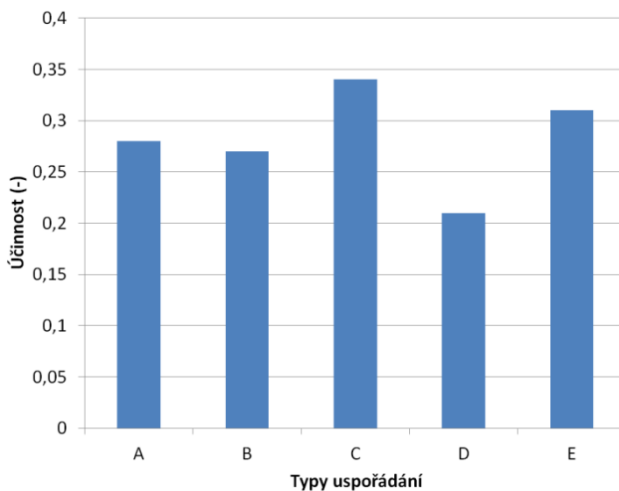
Dle [48] byly zkoumány různé možnosti uspořádání stěny a dna studeného kelímku s vlivem na účinnost (Obr. 3.12). Bylo uvažováno celkem pět různých uspořádání (Obr. 3.11) za předpokladu stejného počtu segmentů, velikosti induktoru a vsázky, materiálových vlastností vsázky a parametrů zdroje u každé varianty. Nejmenší účinnost dosáhla varianta D, kdy bylo dno spojeno se stěnou ze segmentů. Vířivé proudy ze segmentů se tak uzavíraly i přes dno a tím zvýšily ztráty. Nejvyšší účinnost dosáhla varianta C s odděleným a

zarovnaným dnem se stěnou studeného kelímku. Bylo také zjištěno, že velikost tohoto přesazení stěny a dna má vliv na účinnost. Nejmenší přesazení (stěna zarovnána s horní stranou dna- varianta C) má nejvyšší účinnost v tomto uspořádání a největší přesazení (stěna zarovnána s dolní stranou dna- varianta A) má nejnižší účinnost v tomto uspořádání.[48]



Obr. 3.11 Různé uspořádání stěny a dna studeného kelímku [Autor dle 48]

A: Oddělené dno uvnitř stěny; B: oddělené dno pod stěnou; C: oddělené dno zarovnané s dolní stěny; D: dno spojené se stěnou; E: rozřiznuté dno spojené se stěnou.



Obr. 3.12 Elektrická účinnost závislá na uspořádání studeného kelímku [Autor dle 48]

4 Výhody a nevýhody studeného kelímku

Následující kapitola 4 „Výhody a nevýhody studeného kelímku“, je zpracována z následujících zdrojů: [3][7][13][14][20][21][22][29][35][43][44][45]

Tato alternativní metoda tavení materiálů je v základě založena na stejných principech, ale jsou zde důležité výhody oproti konvenčním technologiím tavení materiálů pomocí elektromagnetické indukce. Výhody a nevýhody použití studeného kelímku vyplývají z ekonomických, energetických a ekologických úvah.

4.1 Výhody

- Výhoda použití induktorového kelímku spočívá ve snížení ztrát ve studeném kelímku, díky jeho absenci. To vede ke zvýšení účinnosti celého zařízení.
- Induktorový kelímek je převážně používán pro tavení skel, kde je potřeba dosáhnout vysoké teploty i více než 1500°C. Konvenční kelímky z platiny jsou dražší a nedosáhnou stejné čistoty výsledného materiálu. Induktorový kelímek je pro tavení skel produktivnější.
- Růst krystalů je možno provést přímo ve studeném kelímku s možností různého směru krystalizace v celém objemu taveniny, nebo jednodílného krystalu.
- Tavení i růst krystalů probíhá bez přerušení procesu.
- Touto metodou se vytváří i vysoce čisté krystaly zirkonia, někdy také označované jako syntetické diamanty nebo Zirkony.
- Možnost tavení materiálů při teplotách až 3000°C a výše.
- Tavenina přímo nepřichází do kontaktu s materiálem studeného kelímku a tak je dosaženo nejvyšších čistot výsledného produktu.
- Proces tavby může být proveden v jakékoliv ochranné atmosféře, včetně technického vakua nebo kyslíkové atmosféře pro podporu oxidace materiálu.
- Při lití taveniny ve vakuu se výsledná poréznost snižuje na minimum a při tavení v ochranné atmosféře za použití předem vyhřáté formy a postupem pomalého odlévání

se tato poréznost takřka nevyskytuje.

- Proces tavby může být přerušovaný nebo průběžný (kontinuální tavba na ingot).
- Nejsou zde velké požadavky na vstupní materiál v závislosti na velikosti zrn materiálu. (prášek, granule, střepy apod.)
- Je možné použít odpadní materiál z předchozí tavby a roztavit jej znovu. Je to tedy nízko-odpadní technologie.
- Nynější výrobní kapacity se pohybují v řádech desítek kilogramů hmotnosti vsázky, avšak v budoucnu se budou výrobní kapacity nadále zvyšovat. .
- Složení taveniny může být měněno v průběhu tavení přidáváním různých materiálů přímo do přístupné hladiny vsázky.
- Díky vysoké teplotě jsou mnohé nečistoty z taveniny odpařeny a pokud je přítomen systém off-gas, tak jsou tyto páry odsáty z pracovní komory. Také se pomocí víření taveniny tyto nečistoty dostanou na povrch vsázky. Tím se docílí ještě mnohem vyšší čistoty.
- Touto metodou je i vhodné tavit titan a jeho slitiny. Především i slitiny TiAl.
- Tavenina se díky elektromagnetickému míchání zhomogenizuje tepelně i materiálově.
- Studený kelímek je vhodný i pro přípravu malých vzorků materiálů určených pro výzkum.
- Trvanlivost studeného kelímku může být mimořádně vysoké, až v řádu tisíců licích cyklů.
- Možnost tavit téměř jakoukoliv slitinu, studený kelímek byl použit pro tavení více než 3000 různých reaktivních slitin.
- Tavení může probíhat i velmi rychle.
- Ve studeném kelímku je také možno tavit různé keramické materiály.
- Studený kelímek je nejvhodnější pro tavbu materiálů s vysokou rezistivitou, jako jsou

oxidy železa, hliníku, zirkonia apod., kdy elektrická účinnost dosahuje až 90%.

- Studený kelímek je také vhodný pro zpracování radioaktivních odpadů pomocí tzv. vitrifikace.
- Při tavení titanu a jeho slitin odpadá používání elektrod jako při tavení titanu obloukem ve vakuu.

4.2 Nevýhody

- Studený kelímek je komplexní zařízení s mnoha částmi, z kterého se pak odvíjí spolehlivost zařízení.
- Je nutné intenzivní chlazení kelímku i induktoru, popř. dalších částí s velkými tepelnými ztrátami.
- Energetické náklady jsou vyšší než u konvenčních indukčních zařízeních.
- Ve studeném kelímku není vhodné tavit elektricky vodivé materiály s malou rezistivitou, protože značně klesá účinnost celého systému.
- Při tavení jednorázově na ingot značně klesá produktivita.
- Proces tavby je zapotřebí kontrolovat.
- Příliš vysoký výkon do vsázky znamená katastrofální selhání systému a tím i možnosti zničení studeného kelímku a úniku vsázky do okolí.
- Při růstu krystalů je obtížné kontrolovat stav krystalizace uvnitř ingotu a tím je obtížné správně regulovat výkon tak, aby růst krystalů byl konstantní a také, aby výkon neklesl příliš, kdy se vsázka vlivem snížení teploty stane opět elektricky nevodivou (žádný ohřev indukcí) v nevhodný čas a tak by došlo k neřízenému růstu krystalů a znehodnocení výrobku.
- Při použití induktorového kelímku je nutné intenzivnější chlazení induktoru, protože vsázka je přes krustu přímo ve styku s induktorem.
- Off-gas systém používaný ve spojení se studeným kelímekem je složitý, s tím pak souvisí celková spolehlivost zařízení.

- Při tavení elektricky nevodivých materiálů je zapotřebí startovací metody, která znesnadňuje proces tavby určitým způsobem. Některé metody startování mohou ovlivnit kvalitu výrobku.
- Při přípravě tavení elektricky nevodivých materiálů v práškové formě v segmentovém kelímku je nutné nanést izolační vrstvu (stejný materiál jako vsázka) na vnitřní stěny studeného kelímku, aby nedošlo k úniku prášku mezi segmenty.
- Vysoké pořizovací cena celého zařízení studeného kelímku je také nezanedbatelná.
- Složitější tvary segmentů jsou obtížné na výrobu.
- Pro návrh a popsání dějů při použití studeného kelímku je nezbytné použití numerických simulací.

5 Závěr a doporučení pro praxi

Tuto bakalářskou práci jsem pojal jako odbornou zprávu na základě rešerše. Vycházel jsem z teoretických poznatků získané studiem, konzultacemi a použitím odborné literatury české i zahraniční.

Při řešení této bakalářské práce jsem postupoval dle bodů zadání. Nejprve jsem uvedl teoretické základy vzniku tepla elektromagnetickou indukcí. Poté jsem popsal princip studeného kelímku, typy studeného kelímku, části celkovém systému složeného ze zdroje energie, induktoru, systému chlazení a pracovní komory. S návazností na popsání typů tavení v rozdílu elektricky vodivých a nevodivých materiálů. V další kapitole jsem popsal podmínky pro efektivní tavení materiálů vycházející z definice tepelné a elektrické účinnosti. S popsáním jednotlivých ztrát a vlivu konstrukce studeného kelímku na účinnost. V předposlední části jsem uvedl základní výhody a nevýhody použití studeného kelímku.

V závěru bych rád uvedl celkové zhodnocení použití technologie studeného kelímku. Je zde velká závislost mezi konfigurací studeného kelímku, vsázky a induktoru. Pro provedení návrhu je nutné zahrnout různé proměnné, alternativy a zvážit všechny výhody a nevýhody. Řešení těchto návrhů se provádí pomocí numerických výpočtů, provádí se simulace různých situací jako je startování tavby elektricky nevodivých materiálů, průběhy tavení, krystalizace vsázky.

Další vývoj lze očekávat i v zlepšení účinnosti. Ve třetí kapitole jsem naznačil základní úvahy pro určení tepelné i elektrické účinností, ze kterých vyplynulo, které parametry by se mohly ovlivnit pro zlepšení účinnosti. Vyplynulo, že na účinnost má největší vliv především rezistivita vsázky. Je tedy velký rozdíl v účinnosti mezi tavením elektricky vodivých a nevodivých materiálů. Takto mluvíme o neroztaveném stavu. Elektricky nevodivé materiály v roztaveném stavu se stávají elektricky vodivými. Účinnost tavení elektricky vodivých materiálů se reálně pohybuje okolo 20% a elektricky nevodivých okolo 90%. Toto vychází z jejich rezistivit v roztaveném stavu a ze vztahu 3.3. Vysvětlení proč tomu tak je, následuje právě za uvedeným vzorcem 3.3. Z něho vidíme závislost účinnosti na induktoru a studeném kelímku. Také to, proč induktorový kelímek dosahuje vyšší účinnosti než segmentový studený kelímek.

Z výzkumu různých pracovišť po celém světě vyplynulo, jaký vliv má konstrukce studeného kelímku na účinnost. Tyto poznatky jsem shrnul. Pro různé aplikace se tedy musí vybírat různá uspořádání stěny a dna studeného kelímku, tvaru a počtu segmentů. Nelze však vybrat nejlepší uspořádání stěny a dna, nejlepší tvar či počet segmentů. Musí se zde brát v úvahu i konečné důsledky takto vybraných komponentů. Například pro tavení elektricky nevodivého oxidu Al_2O_3 je možno použít segmenty z kruhového uzavřeného profilu, ale nebylo by vhodné je použít pro tavení elektricky vodivého titanu, kde by se v mezerách mezi segmenty mohla vytvořit ještě tlustší elektricky vodivá krusta, ve které by se tvořily větší tepelné ztráty a i větší elektromagnetické stínění než za použití segmentů z lichoběžníkových uzavřených profilů, kde by byla krusta slabší. S většími tepelnými ztrátami v krustě rostou i nároky na chladicí systém, aby toto nechtěné teplo odvedl. Z tohoto vyplývá, že je nezbytné pro tavení elektricky vodivých materiálů docílit jevu vzduť dle Obr. 3.2. Dále je nutné zvážit použití studeného kelímku pro tavení elektricky vodivých materiálů. Zda výhody jeho použití převýší malou účinnost.

Jedno z dalších vylepšení účinnosti vyplynulo z uspořádání stěny a dna studeného kelímku. Ovšem zde jsou vhodné podmínky pro vybrání nejlepšího uspořádání vzhledem k účinnosti. Nejlepší uspořádání je dle Obr. 3.11 varianta C. Ovšem vidím zde určité obtíže, co se týče reálného provedení, kdy si myslím, že by se muselo vytvořit speciální uchycení stěny i dna studeného kelímku s ohledem na elektrické odizolování obou částí a zamezení možného úniku taveniny mezerou mezi stěnou a dnem studeného kelímku. Dále by bylo potřeba vyřešit napojení dna i stěny studeného kelímku na chladicí systém. V některých systémech studeného kelímku jsem viděl, že dno je poměrně velký válec opracované mědi a je obklopeno segmenty, které z něho odvádí teplo. Toto konstrukční zjednodušení by nešlo použít právě u varianty C. Dno by muselo být chlazené odděleně.

Tepelné ztráty mají vliv na tepelnou účinnost. Za účelem snížení ztrát sáláním z povrchu vsázky bych použil v některých aplikacích chlazené víko. To by ovšem znamenalo další konstrukční problémy, či další problémy při tavně, jako značné omezení přidávání materiálů, unik plynů, měření teploty apod. Tohle řešení přidání chlazeného víka by nebylo vhodné při tavení elektricky vodivých materiálů, protože vzniklá krusta by byla dobře elektricky i tepelně vodivá a celá situace by se tím zhoršila. Jak jsem již zmínil u elektricky vodivých materiálů je nezbytné docílit jevu vzduť, aby se tavený materiál co nejméně dotýkal stěn.

Myslím si, že ztráty vedením do dna a stěny studeného kelímku lze omezit jen obtížně. Naskytá se možnost nějakým způsobem ovlivnit krustu tak, aby se její teplená vodivost snížila. To by mohlo být dalším podnětem pro další experimenty.

Studený kelímek není úplně nová technologie, ale k zlepšování a častějšímu používání dochází neustále. Výhody použití studeného kelímku vedou k nárůstu používání této technologie. Použití studeného kelímku je rozšířeno do všech různých odvětví průmyslu i lékařství. Používá se pro zpracování radioaktivních odpadů, kdy se za pomoci tzn. vitrifikace radioaktivní materiál zalije do skla, ve kterém může být bezpečně uchován. Technologií studeného kelímku se zabývá řada zemí po celém světě a rád bych, aby se pracoviště i v České republice nadále zabývala touto problematikou.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2018-04-12]. ISBN 978-80-01-04938-9. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-3-elektrotepeln.pdf>
- [2] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: Československá akademie věd, 1964.
- [3] UMBRAŠKO, Andrejs. *Heat and mass transfer in electromagnetically driven recirculated turbulent flows* [online]. Latvia, 2010 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/252605162_Heat_and_mass_transfer_in_turbulent_flows_with_several_recirculated_flow_eddies/citations. Disertace. University of Latvia Faculty of Physics and Mathematics.
- [4] WIKIPEDIE, *Maxwellovy rovnice* [online]. [cit. 11.4.2015]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice
- [5] TOPINKA, Jiří. *Tavení materiálů ve studeném kelímku* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18721/1/Topinka_Studený_kelimek.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická.
- [6] PROF. RAIDA, Zbyněk. *Šíření elektromagnetických vln* [online]. , 1-16 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lectures/BEVA_02.pdf
- [7] BC. ZAJACOVÁ, Nikola. *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/2663/1/DP_Zajacova_2012.PDF. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická.
- [8] PROF. DR. T FÖLL, Helmu, ed. *Advanced Mat. B*. Www.tf.uni-kiel.de [online]. Kiel university Faculty of engineering: Institut für Material wissen schaft [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/admat_en/
- [9] ZUREKS. *Skin depth by Zureks* [online]. In: . [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f3/Skin_depth_by_Zureks.png/640px-Skin_depth_by_Zureks.png
- [10] UHLÍŘ, Bc. Miroslav. *Elektromagnetická průzračnost při indukčních ohřevech* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14886/1/DP_Uhlir%20Miroslav_Elektromagnetick a%20pruzarnost%20pri%20indukcnych%20ohreveh_2014.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14886/1/DP_Uhlir%20Miroslav_Elektromagnetick%20pruzarnost%20pri%20indukcnych%20ohreveh_2014.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická.
- [11] PROF. ČERNÝ, Václav. *Indukční ohřev* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.4-construction.com/cz/clanek/indukcni-ohrev-1/>
- [12] A. UMBRASHKO, E. BAAKE, B. NACKE a A. JAKOVICS. *EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND NUMERICAL MODELLING OF THE MELTING PROCESS*

- IN THE COLD CRUCIBLE* [online]. 2005 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: http://www.modlab.lv/publications/2005/Padova_LES.pdf
- [13] MÜHLBAUER, Alfred Prof. Dr.- Ing. Dr. h.c. *Innovative Induction Melting Technologies: A Historical Review* [online]. Riga, June 8-9, 2006 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.466.2696&rep=rep1&type=pdf>
- [14] NIEMANN, Benjamin, Bernard d NACKE a Maxim KUDRYASH. *New innovative induction system for the production of pure high temperature glasses* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.leonardo-energy.info/sites/leonardo-energy/files/root/uie2008/o27.pdf>
- [15] CANAGUIER, Vincent Yves a LEROY. *Induction furnace – Cold crucible - K-020* [online]. In: . [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.ntnu.no/wiki/display/imtlab/Induction+furnace+-+Cold+crucible+-+K-020>
- [16] ROT, David, Jiri KOZENY, Stanislav JIRINEC, Jakub JIRINEC, Antonin PODHRAZKY a Igor POZNYAK. Induction melting of aluminium oxide in the cold crucible. *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. IEEE, 2017, 2017, , 1-4 [cit. 2018-04-17]. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967281. ISBN 978-1-5090-6406-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7967281/>
- [17] J. KOZENY, I. POZNYAK, D. ROT, S. JIRINEC a M. KRESINA. Power losses in induction furnace with cold crucible with different segments shape. *Electroscope* [online]. 2014, 10. December. 2014 [cit. 2018-04-17]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/Rocnik2014/Cislo1_2014/r8c2c4.pdf
- [18] ROT, David a Jiří KOŽENÝ. Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. *Electroscope* [online]. 2010, (IV) [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/592/1/r4c4c1.pdf>
- [19] HITOSHI KAWANO, MASANORI TSUDA a YASUHIRO NAKAI. Segmented cold-wall induction melting crucible. US Grant. US5283805A. Zapsáno 1991-10-16. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US5283805>
- [20] TOPINKA, Jiří. Přenos energie v systému induktor – vsázka při tavení materiálů ve studeném kelímku [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27962/1/Topinka_Jiri_DP_Prenos%20energie%20v%20systemu%20induktor%20-%20vsazka%20pri%20taveni%20materialu%20ve%20studenem%20kelimku.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická.
- [21] doc. Ing. Igor POZNYAK, CSc. Konzultace závěrečného projektu, 2017/2018 Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická

- [22] GOMBERT, D., RICHARDSON, J. G. Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development [online]. [cit. 21. 4. 2018]., Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Idaho Falls, 2001, Idaho. URL: < <https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/3024978.pdf> >
- [23] 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 >
- [24] 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> >
- [25] JIŘINEC, S., ROT, D. Cold crucible HFG160 [online]. [cit. 22. 4. 2017]., Electroscop, 2017. URL: < <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/25707/1/Jirinec.pdf> >
- [26] ROBOTERM CHOTĚBOŘ, *Tyristorové měniče kmitočtu pro indukční ohřev s výstupním kmitočtem 0,2 – 10kHz* [online]. [cit. 6.3.2015]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/produkty/menice-kmitoctu/0-2-10-khz-nad-100kw>
- [27] NOVÁK, Bc. Zdeněk. *Zdroje pro vysokofrekvenční ohřevy* [online]. Praha, 2012 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/Teplo/diplomka.pdf>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl.
- [28] *Magnetic Control in Cold Crucible Melting Furnace*[online]. [cit. 24.4.2015]. Dostupné z: <http://image.slidesharecdn.com/compositematerialsformagneticfieldcontrolinepmss-120320151713-phpapp02/95/composite-materials-for-magnetic-field-control-in-epm-10-728.jpg?cb=1404746014>
- [29] S. REED a J. NARAYAN. Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits. *Industrial Heating* [online]. January 10, 2001 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/articles/83906-induction-skull-melting-offers-ti-investment-casting-benefits?>
- [30] BOJAREVICS, V., PERICLEOUS, K., HARDING, R. A., WICKINS, M.; *Cold Crucible Melting of Reactive Metals Using Combined DC and AC Magnetic Fields*[online]. [cit. 3.5.2015]. Dostupné z: http://www.researchgate.net/profile/Valdis_Bojarevics/publication/233784716_Cold_crucible_melting_of_reactive_metals_using_combined_DC_and_AC_magnetic_fields/inks/0912f50ff15d4886e3000000.pdf
- [31] TAKAKI, Seiichi, ABIKO, Kenji. *Purification of Cobalt, Nickel, and Titanium by Cold-Crucible Induction Melting in Ultra high Vacuum*[online]. [cit. 29.4.2015]. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/01/156.pdf>
- [32] *LionseEngineering Ltd* [online]. HeilongjiangRd. 999, Qingdao, China [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.lionse.com/index.html>

- [33] HARDING, R.A., M. WICKINS, H. WANG, G. DJAMBAZOV a K. A. PERICLEOUS. *The tilt casting of titanium aluminides* [online]. January 2007 [cit. 2018-04-25].
- [34] *Titanium Grade Overview* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.supraalloys.com/titanium-grades.php>
- [35] OSIKO, Vyacheslav V., Borik MIKHAIL a E. E. LOMONOVA. *Synthesis of Refractory Materials by Skull Melting Technique* [online]. January 2010 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/E_Lomonova/publication/226166782_Synthesis_of_Refractory_Materials_by_Skull_Melting_Technique/links/0f317530b0197230cb000000.pdf
- [36] B. NACKE, M. KUDRYASH, T. BEHRENS, B. NIEMANN, D. L. OPUKH, A. MARTYNOV, S. CHEPLUK. *Induction Skull Melting of Oxides and Glasses in Cold Crucible* [online]. June 8-9, 2006 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.modlab.lv/publications/mmp2006/pdfs/209-214.pdf>
- [37] ROT, David, Jiri KOZENY, Stanislav JIRINEC, Jakub JIRINEC, Antonin PODHRAZKY a Igor POZNYAK. Induction melting of aluminium oxide in the cold crucible. 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) [online]. IEEE, 2017, 2017, , 1-4 [cit. 2018-04-28]. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967281. ISBN 978-1-5090-6406-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7967281/>
- [38] Macworld 2002: Skull Melting Process [online]. 2007 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.theimage.com/>
- [39] KELLEY, Larry P. Cubic Zirconia Run Opening [online]. In: . 11:50, 22 August 2003 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/e/e4/Cubic_Zirconia_Run_Opening.jpg
- [40] GRAMBOW, B. Nuclear Waste Glasses – How Durable?. *Elements* [online]. 2006, 2(6), 357-364 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.2113/gselements.2.6.357. ISSN 1811-5209. Dostupné z: <https://pubs.geoscienceworld.org/elements/article/2/6/357-364/137725>
- [41] RADIOAKTIVNÍ ODPAD [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/radioaktivni-odpad>
- [42] Vitrified HLW in a section of steel canister [online]. In: . [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://nuclearstreet.com/images/img/dw117.jpg>
- [43] PREJZA, Radek. *Teorie a aplikace tavení materiálů metodou „studeného kelímku“*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZČU Fel Plzeň.
- [44] SMALCERZ, A., B. OLEKSIK a G. SIWIEC. The Influence A Crucible Arrangement On The Electrical Efficiency Of The Cold Crucible Induction Furnace.

- Archives of Metallurgy and Materials [online]. 2015, 60(3), - [cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1515/amm-2015-0295. ISSN 2300-1909. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/j/amm.2015.60.issue-3/amm-2015-0295/amm-2015-0295.xml>
- [45] PERICLEOUS, K., V. BOJAREVICS, G. DJAMBAZOV, R.A. HARDING a M. WICKINS. Experimental and numerical study of the cold crucible melting process. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2006, 30(11), 1262-1280 [cit. 2018-05-10]. DOI: 10.1016/j.apm.2006.03.003. ISSN 0307904X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0307904X06000254>
- [46] ROT, David, Stanislav JIRINEC, Jiri KOZENY a Igor POZNYAK. Electrical efficiency of induction furnace with cold crucible via different segments width. In: *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 17-20 [cit. 2018-05-10]. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161132. ISBN 978-1-4673-6788-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7161132/>
- [47] ING. JIŘINEC, Stanislav. [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: https://fel.zcu.cz/export/sites/fel/cz/documents/studium_dr_autoreferaty/170407_autor_eferat_Jirinec_Stanislav.pdf. AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE. ZÁPADČOESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE.
- [48] GOLAK, Sławomir, Roman PRZYLUCKI, Jacek SMOLKA, Piotr BULINSKI a Piotr CIEPLINSKI. Influence of a cold crucible geometry parameters on electrical efficiency. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* [online]. 2018, 56(2), 165-172 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.3233/JAE-170026. ISSN 13835416. Dostupné z: <http://www.medra.org/servlet/aliasResolver?alias=iospress&doi=10.3233/JAE-170026>