

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve “studeném
kelímku“**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal HEINDL**
Osobní číslo: **E11N0013P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Ohřev vsázky elektromagnetickou indukcí ve „studeném kelímku“**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte základy teorie indukčního ohřevu
2. Objasněte tavení ve „studeném kelímku“ a uveďte možné aplikace
3. Uveďte metodu k určení elektrických a geometrických parametrů studeného kelímku pro tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů
4. Proveďte úvahu o energetické náročnosti tavení
5. Uveďte závěry pro praxi

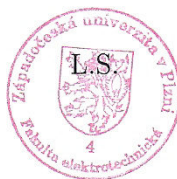
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Určí vedoucí práce

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na pochopení problematiky ohřevu vsázky elektromagnetickou indukcí pomocí studeného kelímku. Tato technologie se používá pro bezkontaktní tavení kovů. První část se zabývá teorií elektromagnetického vlnění. V další části je shrnuta historie a princip tavení ve studeném kelímku. Podrobně je zde popsáno tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů. V následující kapitole je provedena simulace studeného kelímku v 2D softwaru specializovaného na fyzikální pole. V závěru práce je provedena úvaha na energetickou náročnost tavení a užití studeného kelímku v praxi.

Klíčová slova

Teorie indukčního ohřevu, Maxwellovy rovnice, Poyntingův vektor, válcové vlnění, elektromagnetické vlnění, ISM, studený kelímek, tavení elektricky vodivých materiálů, tavení elektricky nevodivých materiálů, vitifikace jaderného odpadu, energetická náročnost, užití v praxi

Abstract

The presented thesis is focused on the understanding of heating of the workpiece by electromagnetic induction using a cold crucible. This technology is used for contactless melting metals. First chapter deals with theory of electromagnetic waves. Next chapter summarizes history and principle of melting in cold crucible. In detail is here described melting of electric conductive and non-conductive materials. The simulation of cold crucible in 2D software specializing in field of physical was performed in the next chapter. In the end, an essay on energy intensity of melting and use in practice was performed.

Key words

Theory of induction heating, Maxwell's equations, Poynting vector, cylindrical radiation, electromagnetic radiation, ISM, cold crucible, melting of electrical conductive materials, melting of electrical non-conductive materials, vitrification of nuclear waste, energy intensity, use in practice

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 29.4.2013

Bc. Michal Heindl

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné rady a odborné konzultace při psaní této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Rotovi, Ph.D. za odborné názory ke studii studeného kelímku.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
ÚVOD	13
1 TEORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU	14
1.1 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU	14
1.2 ODVOZENÍ VLNOVÝCH ROVNIC PRO ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ[1].....	14
1.3 HARMONICKÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ[2, s. 22]	16
1.4 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR[1].....	16
1.5 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ[1,2].....	18
1.6 ODVOZENÍ OBECNÝCH ROVNIC VÁLCOVÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ[2].....	19
1.7 POUŽITÍ INDUKČNÍHO OHŘEVU V PRAXI.....	21
1.7.1 Indukční kelímkové pece tavicí	21
1.7.2 Indukční prohřívací zařízení.....	22
1.7.3 Indukční pájení	23
2 TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU	24
2.1 ÚVOD	24
2.2 HISTORIE	24
2.2.1 Tavení elektricky nevodivých materiálů	24
2.2.2 Tavení elektricky vodivých materiálů	25
2.3 PRINCIP.....	26
2.4 LEVITAČNÍ TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU.....	27
2.4.1 Stanovení počtu mezer	27
2.4.2 Konvenční tvar studeného kelímku	27
2.4.3 Vnitřní tvar kelímku	28
2.4.4 Vnější tvar kelímku a uspořádání cívek.....	29
2.5 MOŽNÉ APLIKACE STUDENÉHO KELÍMKU	29
2.5.1 Výroba syntetických diamantů.....	29
2.5.2 Vitifikace jaderného odpadu[11]	30
2.5.3 Tavení křemiku pro solární články[26]	30
3 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ	31
3.1 TAVENÍ TITANOVÝCH SLITIN	31
3.1.1 Technologie VAR.....	32
3.1.2 Technologie ISM.....	33
4 TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ	35
4.1 STARTOVACÍ PROCES	35
4.2 ROZTAVENÍ MATERIÁLU A VYTVOŘENÍ PEVNÉ VRSTVY	37
4.3 PROCES TUHNUTÍ NEBO KRYSTALIZACE.....	37
4.4 VÝHODY POUŽITÍ STUDENÉHO KELÍMKU	38
5 STUDIE MODELU STUDENÉHO KELÍMKU	39

5.1	STUDIE TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÉHO MATERIÁLU	39
5.1.1	<i>Diskretizování oblasti</i>	39
5.1.2	<i>Modelování fyzikálních polí</i>	41
5.2	STUDIE TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ	44
5.2.1	<i>Studie intenzity magnetické indukce při různých frekvencích</i>	47
6	ENERGETICKÁ NÁROČNOST TAVENÍ.....	48
7	ZÁVĚRY PRO PRAXI[8,10,27]	51
8	ZÁVĚR.....	53
	POUŽITÁ LITERATURA A INTERNETOVÉ ODKAZY.....	55

Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1: Znázornění Poyntingova vektoru	17
Obr. 1.2: Prostorová orientace vektorů na vnitřním povrchu cívky (převzato z [2])	18
Obr. 1.3: Odvození rot H a rot E (převzato z [2]).....	20
Obr. 1.4: Schéma tavicí pece (převzato z [3])	21
Obr. 1.5: Schéma indukčního prohřívacího zařízení (převzato z [3])	22
Obr. 1.6: Schéma – znázornění pájení trubky do příruby (převzato z [3]).....	23
Obr. 2.1: Schéma – Tavení křemíku ve stříbrné ložce (převzato z [15]).....	25
Obr. 2.2: Schéma – Studený kelímek (převzato z [8]).....	26
Obr. 2.3: Znázornění taveniny v kelímku s 6 a 24 segmenty (převzato z [6])	27
Obr. 2.4: Rozložení elektrodynamických sil na povrchu roztaveného kovu v konvenčním kelímku (převzato z [6])	28
Obr. 2.5: Rozložení elektrodynamických sil na povrchu roztaveného kovu v kuželovitém kelímku (převzato z [6])	28
Obr. 2.6: Rozložení elektrodynamických sil v závislosti na změně úhlu (převzato z [6])	29
Obr. 2.7: Schéma - Tavení křemíku pomocí studeného kelímku (převzato z [26])	31
Obr. 3.1: Polo-levitační tavení titanu ve studeném kelímku (převzato z [16]).....	33
Obr. 3.2: Zbylá pevná vrstva po odlití roztaveného titanu z kelímku (převzato z [16]).....	33
Obr. 3.3: Odlévání taveniny do formy (převzato z [17]).....	34
Obr. 4.1: Startovací metoda s elektricky vodivým materiálem (převzato z [27])	36
Obr. 5.1: Ukázka diskretizace oblasti 2D modelu	40
Obr. 5.2: 2D model studeného kelímku při tavení elektricky nevodivých materiálů.....	41
Obr. 5.3: Rozložení fyzikálních polí:.....	42
Obr. 5.4: Rozložení proudové hustoty ve studeném kelímku.....	42
Obr. 5.5: Rozložení měrných ztrát ve studeném kelímku:	43
Obr. 5.6: Výkres - Rozměry studeného kelímku	44
Obr. 5.7: CAD model studeného kelímku	45
Obr. 5.8: Rozložení magnetické indukce v řezu kelímku:.....	47
Obr. 5.9: Rozložení siločar elektromagnetického pole v řezu kelímku:.....	47
Obr. 6.1: Míra energetické absorpce pro různé materiály (převzato z [23])	50
Obr. 6.2: CORIUM ve studeném kelímku (převzato z [8]).....	52
Obr. 6.3: Ukázka tavení ve studeném kelímku (převzato z [24]).....	52

Seznam symbolů

Značka	Celý název	Jednotky
a	Hloubka vniku	[m]
B	Magnetická indukce	[T]
C_1, C_2	Integrační konstanty	[-]
c	Měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]
D	Elektrická indukce	[C.m ⁻²]
d_{kel}	Vnitřní průměr kelímku	[cm]
E	Intenzita elektrického pole	[V.m ⁻¹]
f	Frekvence	[Hz]
H	Intenzita magnetického pole	[A.m ⁻¹]
h_i	Výška induktoru	[m]
h_{kel}	Výška taveniny	[cm]
h_s	Výška startovacího materiálu	[cm]
I	Elektrický proud	[A]
J	Proudová hustota	[A.m ⁻²]
k	Konstanta šíření	[-]
P	Tepelný výkon	[W]
P_{rad}	Tepelné ztráty taveniny sáláním	[W]
P_{W}	Tepelné ztráty do stěn kelímku vedením	[W]
Q	Množství tepla	[J]
q_w	Měrné tepelné ztráty	[W.cm ⁻²]
r	Poloměr	[m]
r_i	Poloměr induktoru	[m]
r_s	Poloměr startovacího materiálu	[cm]
S	Obsah	[m ²]
t	Čas	[s]
T_0	Počáteční teplota	[°C]
T_1	Koncová teplota	[°C]
W	Energie, práce	[J;W.s]
\mathbf{E}	Vektor intenzity elektrického pole	[V.m ⁻¹]
\mathbf{E}	Vektor v prostoru intenzity el. pole	[V.m ⁻¹]
\mathbf{H}	Vektor intenzity magnetického pole	[A.m ⁻¹]
\mathbf{H}	Vektor v prostoru intenzity mg. pole	[A.m ⁻¹]

\bar{N}	Fázor zářivého vektoru	[W.m ⁻²]
α	Fázová konstanta	[-]
β	Měrný útlum	[-]
γ	Měrná elektrická vodivost	[S.m ⁻¹]
ε	Součinitel emisivity	[-]
ε_0	Permitivita vakua	[F.m ⁻¹]
ε_r	Poměrná permitivita materiálu	[-]
μ_0	Permeabilita vakua	[4 π .10 ⁻⁷ H.m ⁻¹]
μ_r	Poměrná permeabilita materiálu	[-]
ρ	Hustota	[g.cm ⁻³]
ρ	Hustota nábojů	[C.m ⁻³]
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta	[5,67.10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴]
ω	Úhlový kmitočet	[s ⁻¹]

ISM	Induction Skull Melting	Indukční tavení ve studeném kelímku
VAR	Vacuum Arc Remelting	Přetavování obloukem ve vakuu

Charakter veličiny je vyznačen typem písma takto:

Vektory jsou psány tučně kurzívou (***E***, ***B***)

Fázory jsou označeny pruhem nad veličinou (\bar{Z})

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na indukční tavení ve studeném kelímku. Jedná se o progresivní technologii, která oproti současným technologiím tavení představuje obrovský pokrok v tavení materiálů. Historie vývoje začíná již v roce 1931, kde firma Siemens & Halske jako první popsala ve svém patentu tavení kovů s vysokou teplotou tavení ve vodou chlazeném kelímku. Položila tak základy pro další výzkum a modernizaci této technologie, který probíhal po celém světě. Studený kelímek se vyznačuje vysokou teplotou tavení, která se pohybuje okolo 3000 °C, vysokou jakostí, čistotou a kvalitou vytaveného materiálu. Tyto přednosti vedly k výrobě nových žáruvzdorných slitin, jejichž kvalita se konvenčními tavicími pecemi nedala dosáhnout, protože docházelo ke kontaminaci taveného materiálu složkami z keramické vyzdívky pece. Vyprodukované slitiny se speciálními vlastnostmi následně našly uplatnění v leteckém průmyslu a zdravotní technice a umožňují tak rozvoj výše jmenovaných oborů.

V teoretické části mé diplomové práce se budu zabývat základy teorie indukčního ohřevu zaměřenou na odvození elektromagnetického vlnění z Maxwellových rovnic a popsání Poyntingova vektoru a válcového elektromagnetického vlnění. Další část práce je zaměřena na objasnění tavení ve studeném kelímku a jeho možné aplikace. Podrobně se pak budu zabývat tavením elektricky vodivých a nevodivých materiálů. V závěru práce bude popsána energetická náročnost tavení a možné užití studeného kelímku v praxi.

V praktické části mé diplomové práce budu simulovat rozložení fyzikálních polí ve studeném kelímku za využití softwaru Agros2D. Tuto simulaci provedu jak pro elektricky vodivé materiály, tak pro elektricky nevodivé materiály. Dále se budu zabývat hloubkou vniku magnetické indukce do vsázky při rozdílné hodnotě frekvence.

V poslední části mé diplomové práce provedu celkové zhodnocení získaných poznatků týkajících se technologie tavení ve studeném kelímku.

1 Teorie indukčního ohřevu

1.1 Princip indukčního ohřevu

Indukční ohřev lze aplikovat pouze u materiálů, které jsou elektricky vodivé. Ve vsázce složené z elektricky vodivého materiálu se vlivem působení střídavého magnetického pole indukují vířivé proudy, které vsázku ohřívají. Cívka, která obklopuje vsázku, je napojena na zdroj proudu. Pro vsázky o velkých rozměrech se používá frekvence 50 Hz a pro malé nebo tenkostěnné předměty se používá frekvence o vysokém kmitočtu, který se pohybuje kolem desítek až stovek kHz. Pomocí frekvence pak můžeme ovlivnit rozložení tepla, které vzniká uvnitř vsázky. Tato vsázka se pak stane nejteplejším objektem celého systému a zbylé součásti mohou zůstat chladné. Indukční ohřev se velmi dobře uplatnil v metalurgii, ve strojírenství, ocelářství atd.[1]

Při dopadu elektromagnetického vlnění na vodivou stěnu vzniká indukční teplo. Dopadající vlnění se při styku s vodivou stěnou rozdělí na dvě části. Část vlnění se odrazí a část prostoupí do stěny vsázky, kde způsobí indukci vířivých proudů. Vlivem energie obsažené v elektromag. vlnění se ve stěně materiálu uvedou do pohybu elektrony, které proudí ve směru intenzity elektrického pole a získávají značnou kinetickou energii a rychlost. Elektrony narážejí do atomů vodiče, kde předají svou kinetickou energii, což způsobí jejich rozkmit a následné zvýšení teploty materiálu. V tento okamžik se energie elektromag. vlnění přemění na energii tepelnou a vlnění se utlumí.[2]

Elektromag. vlnění vzniká v každém vodiči v důsledku průchodu střídavého proudu. Z důvodu účinného přenosu energie ze zářiče do vsázky, je nutné upravit vodič do příhodného tvaru. Má-li vsázka hranolovitý tvar tj. povrch omezený rovnými plochami, je nutné, aby cívka kopírovala tvar vloženého předmětu. Je-li prohříváný předmět válcového tvaru, je umístěn v souosé cívce, která je také válcová.[2]

1.2 Odvození vlnových rovnic pro šíření elektromagnetického vlnění[1]

Pro další popis indukčního ohřevu, je nutné odvodit vlnové rovnice pro šíření elektromag. vlnění, které vycházejí z Maxwellových rovnic.

Maxwellovy rovnice:

$$1. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$2. \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$3. \operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (1.3)$$

$$4. \operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (1.4)$$

Provedeme rotaci 1. Maxwellovy rovnice (1.1)

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \gamma \mathbf{E} + \operatorname{rot} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial(\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad (1.5)$$

Nyní dosadíme za $\operatorname{rot} \mathbf{E}$ z 2. Maxwellovy rovnice (1.2)

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

Vycházíme z vektorového počtu, kde

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} \quad (1.7)$$

Rovnice (1.6) a (1.7) vložíme do rovnosti

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.8)$$

Ze 4. Maxwellovy rovnice (1.4) dosadíme za $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$ a získáme rovnici pro magnetickou složku.

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.9)$$

Obdobný princip odvození použijeme pro získání rovnice pro elektrickou složku a získáme rovnici kde,

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.10)$$

Abychom mohli tyto rovnice ještě dále zjednodušit, budeme uvažovat prostředí vodivé a nevodivé.

Pro nevodivé prostředí položíme $\gamma = 0$ a získáme rovnice elektromagnetického vlnění ve tvaru:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.12)$$

Pro vodivé prostředí položíme $\varepsilon_r = 0$ a získáme rovnice elektromagnetického vlnění ve tvaru:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.14)$$

1.3 Harmonické elektromagnetické vlnění[2, s. 22]

Veličiny $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}, \vec{J}, \vec{B}$ jsou harmonicky proměnné a budeme je uvažovat v dalším odvozování ve tvarech fázorů. Pro znázornění jsou zde uvedeny derivace intenzity elektrického pole podle času.

$$\vec{E} = E e^{j\omega t} \quad (1.15)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = j\omega E e^{j\omega t} = j\omega \vec{E} \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \vec{E} \quad (1.17)$$

Do výrazu (1.10) dosadíme parciální derivace 1. a 2. řádu a získáme vztah, kde

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} - j\omega \mu \gamma \vec{E} = \nabla^2 \vec{E} + (\omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \gamma) \vec{E} = 0 \quad (1.18)$$

součinitele v závorce u \vec{E} označíme symbolem k^2

$$k^2 = (\omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \gamma) = -j\omega \mu (\gamma + j\omega \epsilon) \quad (1.19)$$

Po dosazení součinitele k^2 do rovnice (1.18), získáme obecné rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění, pro fázory \vec{E} a obdobně pro \vec{H} , které platí pro vodivé i nevodivé prostředí pro elektromagnetické vlnění rovinné a válcové.

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (1.20)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (1.21)$$

Symbol k nazýváme konstantou šíření. Tato konstanta charakterizuje elektromag. vlnění v uvažovaném prostředí při úhlovém kmitočtu ω a při harmonickém průběhu fázorů \vec{E}, \vec{H} . Symbol k^2 obsahuje obecně reálnou a imaginární složku. Po odmocnění dostaneme $\pm k$. Jedná se o komplexní číslo, které dělíme na reálnou část α a imaginární část β , kde α nazýváme fázovou konstantou a β měrný útlum.

$$k = \alpha - j\beta, \quad k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta - \beta^2 \quad (1.22)$$

Jako nezbytnou součást teorie šíření elektromagnetických vln potřebujeme znát relativní hloubku vniku elektromagnetického vlnění do vsázky. Tuto hodnotu získáme ze vztahu kde,

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu_0 \mu_r}} \quad (1.23)$$

1.4 Poyntingův zářivý vektor[1]

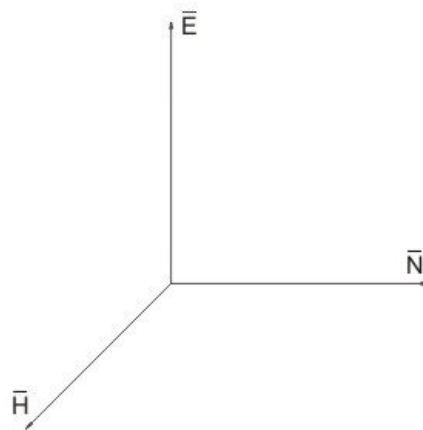
Poyntingův zářivý vektor udává směr a hustotu toku elektromagnetické energie v prostoru za jednotku času. Je pojmenován po svém vynálezci Johnu Henrym Poyntingovi. Obvykle bývá

značen písmenem \mathbf{S} nebo \mathbf{N} . Jednotkou Poyntingova vektoru je $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, který znázorňuje míru přenosu energie na jednotku plochy.[1,2,5]

Základní rovnice pro Poyntingův vektor ve vektorovém tvaru je

$$\mathbf{N} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.24)$$

kde \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole a \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole. Vektor \mathbf{N} udává výsledný směr toku energie a jeho velikost je dána velikostí výkonu, který pronikne jednotkovou plochou za 1 sekundu kolmo ke směru šíření.



Obr. 1.1: Znázornění Poyntingova vektoru

Pro odvození Poyntingova vektoru začneme s rovnicí, která platí pro energii W elektromagnetického pole v objemu V .

$$W = \frac{1}{2} \int_V \bar{\mathbf{D}} \cdot \bar{\mathbf{E}} dV + \frac{1}{2} \int_V \bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{H}} dV = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \int_V \bar{\mathbf{E}} \cdot \bar{\mathbf{E}} dV + \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \int_V \bar{\mathbf{H}} \cdot \bar{\mathbf{H}} dV \quad (1.25)$$

V dalším kroku musíme zohlednit, že energie W se konstantně snižuje v objemu V za čas t , proto musíme rovnici (1.25) derivovat podle času dt . Jelikož se jedná o úbytek energie, musíme před derivací vložit znaménko minus.

$$P = - \frac{\partial W}{\partial t} \quad (1.26)$$

Po dalších úpravách této rovnice a 1. a 2. Maxwellovy rovnice nakonec získáme vztah kde,

$$P = \int_V \gamma \bar{\mathbf{E}}^2 dV + \int_V \text{div}(\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) dV \quad (1.27)$$

První člen této rovnice vyjadřuje množství tepla, které se za jednotku času v tomto objemu vytvořilo. Pomocí Gaussovy-Ostrogradského věty převedeme druhý člen rovnice

$$\int_V \text{div}(\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) dV = \oint_A (\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) d\bar{\mathbf{A}} = \oint_A \bar{\mathbf{N}} d\bar{\mathbf{A}} \quad (1.28)$$

Podle Poyntingova vektoru lze jednoduše objasnit přenos elektromag. energie od zdroje ke spotřebiči a zároveň i ztráty ve vodičích.[5]

1.5 Válcové elektromagnetické vlnění[1,2]

Válcové elektromagnetické vlnění zmiňujeme, protože v technické praxi se nachází mnoho předmětů válcového tvaru, které je potřeba indukčně ohřívat. Jako zdroj elektromagnetického vlnění uvažujeme válcovou plochu o poloměru r_1 , která má nekonečně dlouhou délku. Střídavý proud prochází plochou tak, že proudová vlákna umístěná v rovinách jsou kolmá k ose válce.

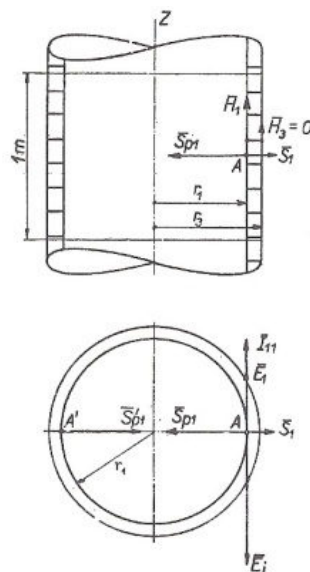
Tato válcová plocha se dá vytvořit pomocí vodiče obdélníkového průřezu, který navineme jako cívku. Mezi závitů je nutná nulová tloušťka izolace a stoupání závitů musí být zanedbatelné vůči poloměru r_1 . Další podmínkou pro vytvoření válcové plochy je splnění předpokladu, kde šíření proudové vlny závitů cívky probíhá nekonečně velkou rychlostí. Okamžitá hodnota proudové hustoty i_{11} [$A \cdot m^{-1}$], která přísluší části válcové plochy o osové délce 1m, je v libovolný moment po celé délce cívky konstantní. V tomto případě se jedná o válcovou plochu, která vyzářuje válcové elektromag. vlnění do své dutiny.[1,2]

Rovnice pro popsání proudové hustoty \bar{I}_{11}

$$\bar{I}_{11} = N_{11} \bar{I}_1 \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1.29)$$

Pro popsání válcového vlnění je nutné si odvodit intenzitu magnetického pole \bar{H}_1 na poloměru induktoru r_1 . Intenzita \bar{H}_3 na vnějším poloměru je rovna nule.

$$\bar{I}_{11} = \oint \bar{H} d\bar{s} = \bar{H}_1 \cdot 1 - \bar{H}_3 \cdot 1 = \bar{H}_1 \quad [A \cdot m^{-1}]. \quad (1.30)$$



Obr. 1.2: Prostorová orientace vektorů na vnitřním povrchu cívky (převzato z [2])

Na válcové ploše si zvolíme bod A pro prostorovou orientaci vektorů. Je-li směr toku proudu \vec{I}_{11} jak je znázorněno na obrázku 1.2, potom má vektor intenzity elektrického pole \vec{E}_1 stejný směr. Směr vektoru intenzity magnetického pole \vec{H}_1 vystupuje vzhůru k nám. Nyní, když známe směry vektorů obou složek, můžeme určit směr Poyntingova vektoru \vec{N}_1 z vektorového součinu. Směr Poyntingova vektoru \vec{N}_1 , který je kolmý k rovině elektrické a magnetické složky, směřuje do stěny cívky a určuje ztráty v induktoru.[2]

$$\vec{N}_1 = [\vec{E}_1 \cdot \vec{H}_1] \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.31)$$

Proud \vec{I}_1 , který proudí v závitech cívky, vybudí magnetický tok v dutině induktoru. Magnetický tok indukuje v závitech napětí \vec{U}_i , jehož intenzita \vec{E}_i , má opačný směr, než intenzita elektrického pole \vec{E}_1 . Toto napětí společně s intenzitou magnetického pole \vec{H}_1 zformuje Poyntingův zářivý vektor \vec{N}_{p1} . Zářivý vektor \vec{N}_{p1} je kolmý k vnitřnímu povrchu cívky a směřuje do středové osy induktoru. Jalový elektromagnetický tok je tedy vyzařován vnitřním povrchem cívky do dutiny induktoru o hustotě \vec{N}_{p1} . [2]

$$\vec{N}_{p1} = [\vec{E}_i \cdot \vec{H}_1] \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.32)$$

1.6 Odvození obecných rovnic válcového elektromagnetického vlnění[2]

U odvození rovnic válcového elektromag. vlnění vycházíme z obecných fázorových rovnic

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0. \quad (1.33)$$

Pro popsání válcového elektromagnetického vlnění je vhodné zavést válcové souřadnice. Ve válcových souřadnicích má $\nabla^2 \vec{H}$ tuto podobu

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \vec{H}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2}. \quad (1.34)$$

Intenzita \vec{H} u válcového vlnění závisí pouze na poloměru r , přičemž se nemění se souřadnicemi φ a z . Derivace vycházejí v tomto tvaru:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial \vec{H}}{\partial z} = 0 \quad (1.35)$$

z toho vyplývá, že

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \vec{H}}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial r} \frac{\partial \vec{H}}{\partial r} + \frac{1}{r} r \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{H}}{\partial r} \quad (1.36)$$

Nyní dosadíme za $\nabla^2 \vec{H}$ do rovnice (1.33)

$$\frac{d^2 \vec{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\vec{H}}{dr} + k^2 \vec{H} = 0. \quad (1.37)$$

Po vydělení výrazu konstantou šíření k^2 , získáme Besselovu diferenciální rovnici nultého řádu pro argument (kr)

$$\frac{d^2 \bar{H}}{d(kr)^2} + \frac{1}{(kr)} \frac{d\bar{H}}{d(kr)} + \bar{H} = 0. \quad (1.38)$$

Získáme lineární kombinaci dvou cylindrických funkcí

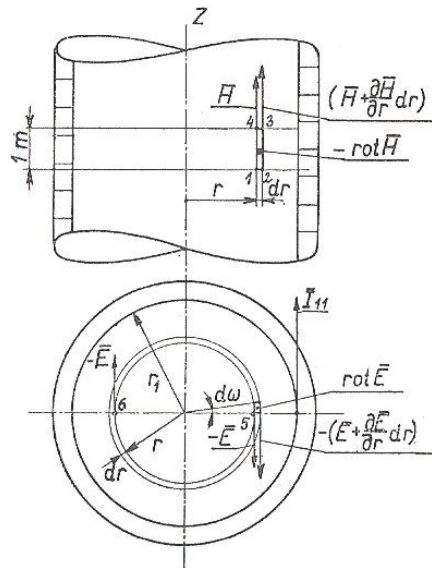
$$\bar{H} = \bar{C}_1 J_0(kr) + \bar{C}_2 N_0(kr) \quad [A \cdot m^{-1}], \quad (1.39)$$

kde symboly \bar{C}_1 a \bar{C}_2 jsou integrační konstanty, které odvodíme z mezních podmínek. $J_0(kr)$ je cylindrická funkce prvního druhu – funkce Besselova. $N_0(kr)$ je cylindrické funkce druhého druhu - funkce Neumannova. Jedná se o cylindrické funkce nultého řádu argumentu (kr).

Nyní odvodíme výraz pro intenzitu elektrického pole \bar{E} , který vychází z 1. Maxwellovy rovnice

$$\text{rot} \bar{H} = \gamma \bar{E} + j\omega \varepsilon \bar{E} = (\gamma + j\omega \varepsilon) \bar{E}. \quad (1.40)$$

Pro zjištění velikosti rotace \bar{H} vyjdeme z obr. 1.3.



Obr. 1.3: Odvození $\text{rot} H$ a $\text{rot} E$ (převzato z [2])

Na poloměru r označíme vektor magnetické intenzity znakem \bar{H} , na poloměru $(r + dr)$ je nutné k této intenzitě připočítat diferenciál, o který je poloměr větší tedy $[\bar{H} + (\partial \bar{H} / \partial r) dr]$. Bereme v úvahu část cívky o osové délce $1m$. Práci, kterou vykoná jednotka magnetického množství po obvodu plochy 1,2,3,4,1, využijeme pro zjištění rotace \bar{H} . Na závěr, vydělíme výsledek velikostí této plochy. Rotace \bar{H} má záporný smysl, kvůli orientaci vektoru \bar{H} vůči ose z .

$$-\text{rot} \bar{H} = \frac{(\bar{H} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial r} dr)_{1-2} - \bar{H}_{1-4}}{1 dr} = \frac{\partial \bar{H}}{\partial r}. \quad (1.41)$$

Vložením výrazu (1.41) do výrazu (1.40) získáme intenzitu elektrického pole \bar{E} , kde

$$\bar{E} = -\frac{1}{\gamma + j\omega\varepsilon} \frac{\partial \bar{H}}{\partial r}. \quad (1.42)$$

Po zderivování výrazu (1.39), získáme námi požadovaný tvar intenzity \bar{E}

$$\bar{E} = \frac{k}{\gamma + j\omega\varepsilon} [\bar{C}_1 J_1(kr) + \bar{C}_2 N_1(kr)] \quad [V \cdot m^{-1}]. \quad (1.43)$$

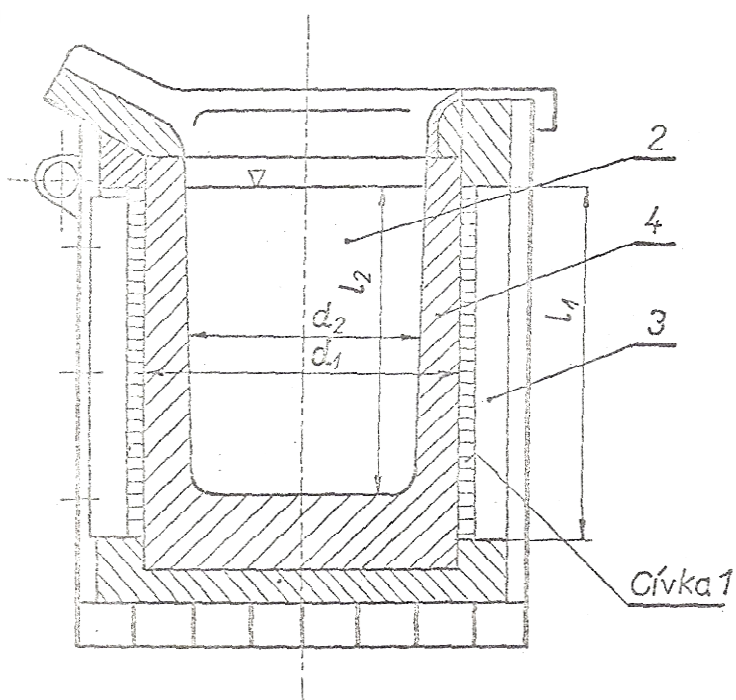
$J_1(kr)$ a $N_1(kr)$ jsou cylindrické funkce 1. a 2. druhu prvního řádu argumentu (kr).

1.7 Použití indukčního ohřevu v praxi

1.7.1 Indukční kelímkové pece tavicí

Asi nejrozsáhlejší využití indukčního ohřevu najdeme ve slévárenském a hutnickém průmyslu, kde se značně využívají indukční kelímkové pece. Tyto pece zásluhou indukčního ohřevu, dokážou vytvořit nejkvalitnější materiál ze všech zatím známých typů pecí. V těchto pecích dochází k neustálé cirkulaci roztaveného materiálu, což způsobí vysokou homogenitu a jakost slitiny.[3]

Pec sestává z cívky (1), která je navinuta na elektricky nevodivý kelímek (4). Cívkou proudí střídavý proud. Uvnitř kelímku se pak nachází vsázka (2) určena k tavení. Z vnější strany cívky je umístěna soustava svazků transformátorových plechů (3), která slouží jako stínění magnetického toku a zároveň zabraňuje snížení elektrické účinnosti pece.[3]

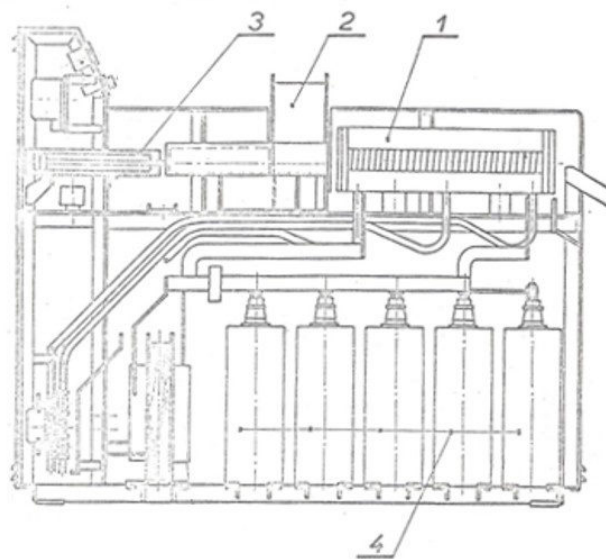


Obr. 1.4: Schéma tavicí pece (převzato z [3])

1.7.2 Indukční prohřívací zařízení

Indukční prohřívací zařízení se používají v závodech specializovaných na kování a lisování za horka. Hlavním problémem je rovnoměrné prohřátí materiálu součásti v celém jeho průřezu na kovací teplotu. U oceli se teplota pohybuje v rozmezí 1150°C až 1250°C. V minulosti se k prohřívání materiálu aplikovaly pece vytápěné plynem, naftou nebo práškovým uhlím. Tyto pece však nedokázaly dostatečně rychle prohřát požadovaný materiál a tím docházelo k oxidaci materiálu na povrchu a částečně k jeho ztrátám okujemi. Řešením byla indukční prohřívací zařízení, která dokázala v poměrně krátkém čase materiál prohřát a nedocházelo tak k oxidaci materiálu na povrchu. Je to zapříčiněno osově symetrickým prohříváním, přičemž u indukčního ohřevu teplo vzniká přímo uvnitř prohřívané součásti. Tato prohřívací zařízení jsou velmi ekonomicky výhodná, a proto se využívají například v automobilovém průmyslu nebo v závodech na výrobu kuličkových ložisek.[3]

Tvar těchto prohřívacích zařízení je většinou válcový. Ohříváčka sestává z induktoru (1), který bývá přibližně 1m dlouhý a průměr se volí podle vývalků, které budeme prohřívát. Další součástí prohřívacího zařízení je zásobník (2), který se nachází na vstupní straně induktoru. Zásobník je navržen na několik kusů vývalků. Posuv vývalků zajišťuje pneumatický válec (3), který ve spolupráci s časovým relé automaticky posune vývalek do induktoru. Proces prohřívání vývalků je navržen tak, že při vstupu nového kusu do induktoru, dojde k vysunutí vývalku, který je již prohřátý na požadovanou teplotu. Pod induktorem je umístěna kondenzátorová baterie (4), která slouží ke kompenzaci indukčního zařízení.[3]

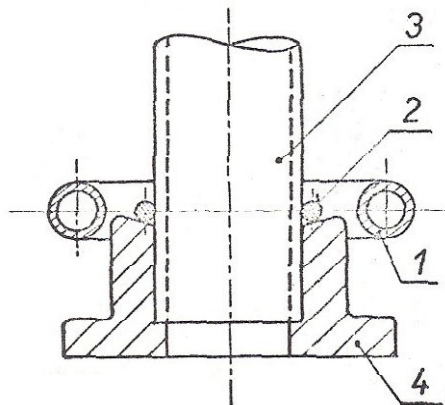


Obr. 1.5: Schéma indukčního prohřívacího zařízení (převzato z [3])

1.7.3 Indukční pájení

Pájení je metalurgický způsob spojování kovů, kde dochází k prohřátí součástí na pájecí teplotu a zároveň k roztavení pájky. Tuto metodu používáme pro vytvoření pevného spoje, ošetření povrchu před korozí nebo k utěsnění skulin či otvorů. Pro zvolení vhodné pájky, zjišťujeme vlastnosti pájky jako např.: kapilarita, smáčivost a roztékavost. Ke spojení součástí dojde, jakmile pájka pronikne difúzí do spojovaných prvků.[4]

Pro znázornění indukčního pájení využijeme pájení trubky (3) do příruby (4). Induktor (1) je nasazen okolo místa pájení a po průchodu vf proudem dochází, jak k ohřátí pájky (2), tak k ohřátí příruby a trubky. Jako pájka se používá cín nebo mosaz. Ohřátá pájka následně proniká do mezery mezi součástmi, které mají být spojené. Indukční pájení se například používá v potravinářském průmyslu pro pájení vík plechových krabic za využití elektronkových generátorů, které jsou zdrojem proudů o kmitočtech několika kHz.[3]



Obr. 1.6: Schéma – znázornění pájení trubky do příruby (převzato z [3])

2 Tavení ve studeném kelímku

2.1 Úvod

Studený kelímek je název progresivní technologie pro vysokofrekvenční indukční ohřev specializovaný na bezkontaktní tavení kovů. Nevýhodou této technologie jsou malé rozměry kelímku, kde se dají tavit kovy pouze o hmotnosti několika až desítek kilogramů. Samotné tavení ve studeném kelímku probíhá v inertní atmosféře nebo v hlubokém vakuu. To má za výhodu práci bez škodlivých plynů a zabránění oxidování taveného materiálu. Hlavní využití studeného kelímku spočívá v dosažení velmi čistých kovů a slitin obsahujících např. titan, hliník, zirkon a některé kovy vzácných zemin. Výsledné taveniny kovů se pak využívají v lékařské technice, leteckém a kosmickém průmyslu. Zároveň však v kelímku nelze tavit slitiny, které obsahují větší množství stříbra, zlata či mědi. Dále pak kovy, jejichž bod tavení překračuje 2000°C, a také kovy charakterizované vysokou mírou reaktivity jako např. antimón nebo hořčík. Hlavní výhodou této technologie je vysoká rychlost ohřevu vsázky, jelikož teplo vzniká přímo uvnitř taveného materiálu a neprostupuje do něj povrchem jako je tomu u konvenčních ohřevů.[7,8]

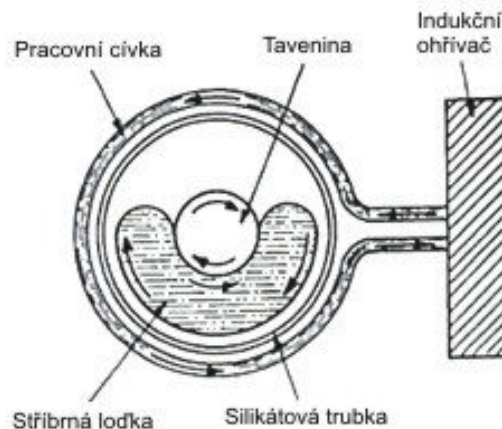
2.2 Historie

Vysokofrekvenční ohřev a tavení kovů se začalo aplikovat začátkem 20. století. Tavení kovů s vysokou teplotou tání ve vodou chlazeném kelímku popsala jako první v roce 1931 ve svém patentu firma Siemens & Halske. Počátkem padesátých let byla poptávka po extrémně čistém materiálu vysoká.[14]

2.2.1 Tavení elektricky nevodivých materiálů

V roce 1957 a 1961 H.F. Sterling a R.W. Warren, uveřejnili rafinaci křemíku za použití horizontálně umístěné chlazené stříbrné ložky, obr. 2.1. V roce 1961 pak A. Berghezan a E. Simonsen, informovali o horizontálním indukčním tavení žáruvzdorných kovů a polovodičových materiálů ve vodou chlazené kovové ložce.[15]

O dva roky později v roce 1963 H.F. Sterling a R.W. Warren napsali o růstu vysoce čistých křemíkových krystalů ve studeném kelímku za použití Czochralského metody, která je světově známá v křemíkovém průmyslu. V porovnání s konvenčními technikami tavení, nepůsobilo tavení ve studeném kelímku znečištění taveniny od stěn kelímku.[15]



Obr. 2.1: Schéma – Tavení křemíku ve stříbrné loďce (převzato z [15])

Mnoho skupin po celém světě zkoušelo zopakovat tyto experimenty, ale ty nevedly k pozitivním výsledkům a průmyslovému zavedení. J. Reboux, jeden z průkopníků v tomto poli, uplatnil studený kelímek ke zpracování křemíku, aby vyrobil masivní polykrystalické křemíkové bloky jako základní materiál pro výrobu solárních článků. V roce 1985 T.F. Cizsek jako první navrhl používat technologii studeného kelímku pro přetavování a odlévání křemíku. Použil kelímek s otevřenou spodní částí pro průchozí vertikální odlévání křemíku pro solární články. Odlitím vytvořil ingot o průřezu 25x25 mm a délce 170 mm. Od devadesátých let skupina MADYLAM, vedena M. Garnierem v Grenoblu, úspěšně přijala tuto inovativní techniku. Byly provedeny některé modifikace vzhledem k fyzickým vlastnostem křemíku, zejména kvůli elektrické vodivosti, která je silně závislá na teplotě a změně objemu při tuhnutí. Podobné studie se uskutečnily nejen v USA a v Evropě, ale také v Japonsku, kde K. Kaneko a kolektiv v roce 1990 zveřejnily své výsledky ohledně indukčního tavení a odlévání materiálů pro solární články. Nicméně v dnešní době tavení polykrystalických křemíkových ingotů ve studeném kelímku nehraje velkou roli v průmyslové výrobě materiálů pro solární články.[15]

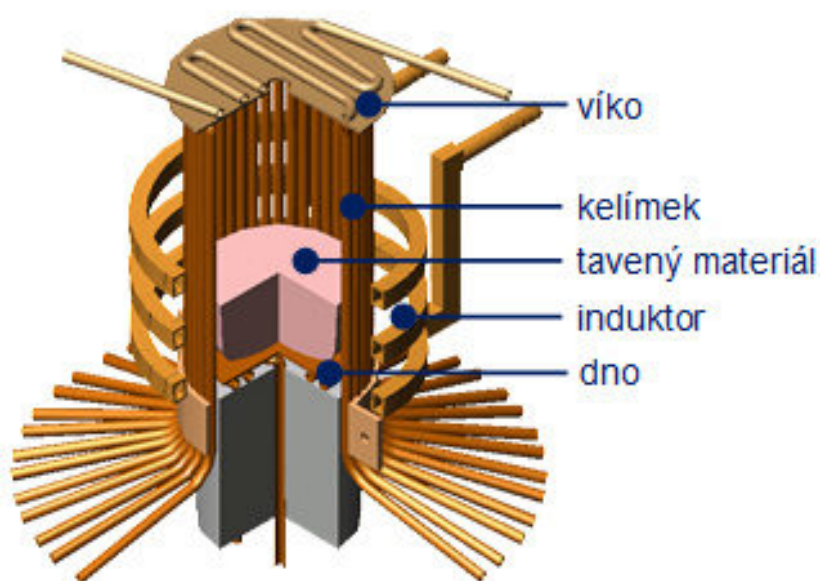
2.2.2 Tavení elektricky vodivých materiálů

V počáteční fázi vědci zkoumali tavení ve studeném kelímku pouze na základě empirických šetření, jelikož složitost fyzických interakcí elektromagnetického pole s teplotou a prouděním taveniny, společně s vytvořením pevné vrstvy mezi kelímekem a taveninou, byla příliš vysoká. Jako první v roce 1961 prezentovaly G. H. Schippereit a kolektiv tavení reaktivních kovů ve studeném kelímku. Od osmdesátých let bylo publikováno mnoho experimentálních studií na toto téma, které přinesly zásadní výsledky, zejména ze středisek v Moskvě, Grenoblu

a z mnoha míst v Japonsku. V devadesátých letech se zabýval tým vedený A. Choudhuryem ve firmě ALD Company vývojem výrobních procesů pro pokročilé součásti z TiAl pro automobilový průmysl. V polovině devadesátých let se tavení a lití různých materiálů ve studeném kelímku začalo široce používat v průmyslu. Různé intermetalické sloučeniny jako např. slitina TiAl vykazuje vynikající fyzikální a chemické vlastnosti, které nalézají upotřebení v konstrukčních materiálech. Také byla zřízena intenzivní spolupráce mezi akademickou půdou a výrobními společnostmi, které se zabývají vývojem efektivních výrobních procesů pro odlévání speciálních součástí.[15]

2.3 Princip

Studený kelímek sestává většinou z měděných segmentů trubkovitého tvaru. Cívka je navinuta kolem kelímku a zároveň je připojena ke zdroji s vysokofrekvenčním měničem. Tyto dvě části studeného kelímku jsou chlazeny proudící vodou. Vysokofrekvenční proud, který proudí cívkou, způsobí indukovaní vířivých proudů do vsázky umístěné uvnitř kelímku. Tyto proudy zapříčiní generování Joulových ztrát a tedy i ohřev vsázky. Pomocí frekvence lze upravovat rozložení tepla v taveném materiálu. Jelikož je kelímek chlazen vodou, vytvoří se na povrchu taveniny pevná krusta o tloušťce několik milimetrů. Tato krusta zabraňuje styku taveného materiálu se segmenty kelímku a zároveň úniku taveniny mezerami mezi segmenty. Teplota uvnitř kelímku může dosahovat až 3000°C, zatímco na součástech kelímku se pracovní teplota pohybuje okolo 50°C.[6,8,9]



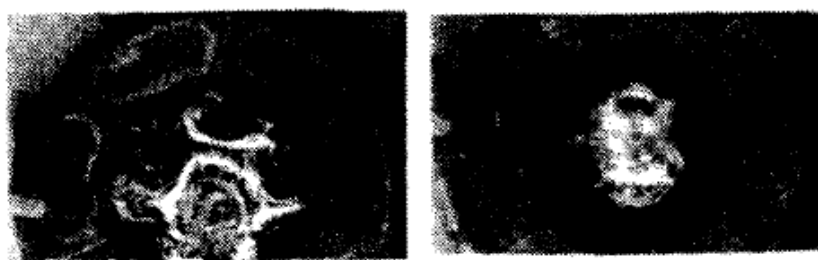
Obr. 2.2: Schéma – Studený kelímek (převzato z [8])

2.4 Levitační tavení ve studeném kelímku

Levitace taveného kovu je způsobena elektrodynamickými silami, které udržují vsázku ve vznosu v ose kelímku, přičemž nedochází ke styku vsázky s kelímkem. Působení těchto sil na roztavený kov je ovlivňováno vířivými proudy, které závisí do značné míry na tvaru induktoru a na uspořádání cívek.[6]

2.4.1 Stanovení počtu mezer

Počet mezer ve studeném kelímku je nedílnou součástí funkčnosti této technologie. Ve studii, ze které vycházím, byl použit kelímek o vnitřním průměru 60 mm a vnějším průměru 96 mm. Testovaná látka byla slitina CuAl o hmotnosti 300g. V prvním případě byl kelímek složen z 6 segmentů a byl uzavřen až na otvor ve spodní části. Z měření bylo zjištěno, že roztavený kov je tlačěn k ose nejvíce u mezer, ale je neforemný a dotýká se centrální oblasti segmentů, což je nežádoucí. V druhém případě byl použit kelímek složený z 24 segmentů. Roztavený kov je zde rovnoměrně a jednotně tlačěn ke středu. Vizualní zobrazení taveniny v kelímku je na obr. 2.3 (a, b). Z tohoto měření tedy vyplývá, že pro stabilní tavení je žádoucí velké množství mezer.[6]



a) 6 segmentů

b) 24 segmentů

Obr. 2.3: Znárodnění taveniny v kelímku s 6 a 24 segmenty (převzato z [6])

2.4.2 Konvenční tvar studeného kelímku

Pomocí metody konečných prvků, což je široce používaný způsob numerické analýzy byly vytvořeny osově symetrické 3D modely. Obr. 2.4 ukazuje výsledky magnetické analýzy elektrodynamických sil rozložených na povrchu roztaveného kovu získaného z konvenčně tvarovaného kelímku. Délka šipek označuje velikost relativních elektrodynamických sil. Z obr. 2.4 je patrné, že v oblasti „A“ jsou odpudivé magnetické síly slabé. Tyto síly na povrchu roztaveného kovu jsou vyvolané vířivými proudy tekoucími v blízkosti otvoru ve spodní části kelímku a zároveň proudy tekoucími v cívkách. Síly (a) na obr. 2.4 jsou silné

v blízkosti dolní části kelímku. V blízkosti středové osy v nižší části povrchu roztaveného kovu je k dispozici magnetická levitující síla. Síly (b) jsou nepřímo úměrné druhé mocnině ze vzdálenosti mezi cívkami a roztaveným kovem a vytvářejí boční elektrodynamické síly. Elektrodynamická síla na povrchu roztaveného kovu je tedy výslednicí dvou různých sil. Výsledky magnetické analýzy konvenčního kelímku se zakřivenou rovinou uvnitř a se solenoidovými cívkami, umístěnými jak je znázorněno na obr. 2.4, indikují přítomnost slabé elektrodynamické síly v oblasti "A".[6]



Obr. 2.4: Rozložení elektrodynamických sil na povrchu roztaveného kovu v konvenčním kelímku (převzato z [6])

2.4.3 Vnitřní tvar kelímku

Vzhledem k tomu, že roztavený kov levituje nad kelímek, vnitřní tvar kelímku silně ovlivňuje tvar roztaveného kovu. Po zavedení kuželovitých segmentů místo zakřivených získáme následující informace. Obr. 2.5 ukazuje rozložení elektrodynamických sil získaných vlivem kuželovitého tvaru segmentů.[6]

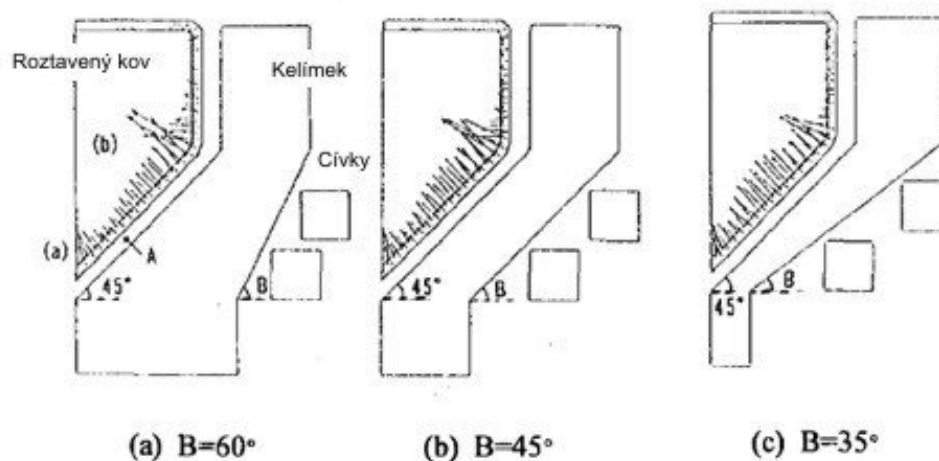


Obr. 2.5: Rozložení elektrodynamických sil na povrchu roztaveného kovu v kuželovitém kelímku (převzato z [6])

Roztavený kov se následně také zformuje do kuželovitého tvaru. Jak je patrné z obr. 2.5 elektrodynamické síly v oblasti „A“ jsou o něco větší než u kelímku s konvenčním tvarem, nicméně jsou stále velmi slabé, aby roztavený kov začal levitovat. Z tohoto důvodu je nutné se zaměřit na vnější tvar kelímku a na uspořádání cívek.[6]

2.4.4 Vnější tvar kelímku a uspořádání cívek

Elektrodynamické síly jsou tvořeny proudy, které protékají cívkami a zároveň jsou ovlivněny jejich polohou. Byly vybrány tři modely kelímků, které se od sebe lišily jiným úhlem provedení, jak je znázorněno na obr. 2.6. Z tohoto obrázku vyplývá, že slabá oblast se nachází pouze u modelu (a), přičemž u ostatních dvou tato slabá oblast zanikla. Toto zjištění naznačuje, že nejlepší tvar pro kelímek je ten, kde vzdálenosti mezi závity cívek a povrchem roztaveného kovu jsou stejné. Vzhledem k tomu, že neexistuje žádné slabé místo v rozložení elektrodynamických sil na povrchu roztaveného kovu a současně naindukované magnetické síly jsou úměrné množství elektrické energie, je možné levitovat a tavit několik kg kovu.



Obr. 2.6: Rozložení elektrodynamických sil v závislosti na změně úhlu (převzato z [6])

2.5 Možné aplikace studeného kelímku

2.5.1 Výroba syntetických diamantů

Studený kelímek se dá využít ve šperkařském průmyslu pro výrobu syntetických diamantů, které se označují pod obchodním názvem zirkony. Používají se jako náhražka pravých diamantů, kde ani specialista bez potřebné techniky nerozpozná zirkon od pravého diamantu. Pro výrobu zirkonů se využívá jevu zónové krystalizace při teplotě 2800°C. Nesmírnou výhodou zirkonů je jejich cena, která se pohybuje od třiceti do sta dolarů za kilogram a zároveň se dají vyrobit v různém barevném odstínu a sytosti.[10]

2.5.2 Vitřifikace jaderného odpadu[11]

Předmětem vitřifikace je úprava vysoce aktivního jaderného odpadu na stabilní materiál, v našem případě sklo. První fáze procesu zahrnuje odstranění vody z odpadu a následné přidání sklotvorné přísady. Další fází procesu je vytavení křemičitého nebo boro-křemičitanového skla, které vzniká běžnou sklářskou technikou při 1200°C. Výsledné zeskelnatěné odpady disponují vlastnostmi jako např. vysoká odolnost vůči vyluhování vodou, dobrá tepelná vodivost a mechanická pevnost. Pro zvýšení tepelné vodivosti zeskelnatěných odpadů se provádějí pokusy, kde kapky skla se obalují roztaveným olovem nebo hliníkem.[12]

Zpracování a recyklace vyhořelého jaderného paliva umožňuje obnovit 96% recyklovaného materiálu, který bude znovu použit pro výrobu elektrické energie. Zbývající 4% vyhořelého jaderného paliva je odpad. Pomocí vitřifikačního procesu je tento odpad integrován do skleněné matrice ve stavu, který je bezpečný a stabilní po tisíce let. Tyto matrice jsou následně umístěny v nerezových nádobách.

Výhody vitřifikace za použití studeného kelímku:

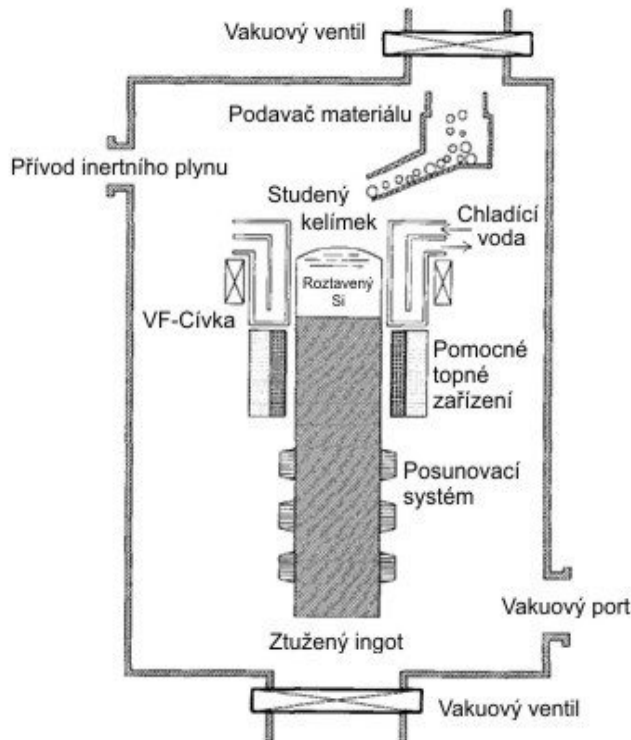
- Zvýšení počtu vitřifikací.
- Prodloužení životnosti zařízení. Životnost studeného kelímku je 10 krát větší než u jiných tavících nádob. Jeho studená struktura není citlivá na korozi, protože je chráněná vrstvou ztuhlého skla vytvořeného mezi strukturou a skleněnou lázní.
- Vitřifikace širší škály produktů za účelem snížení objemu konečného odpadu. Studený kelímek umožňuje vitřifikaci různých druhů odpadů díky jeho studené struktuře a vysoké teplotě při tavení.

2.5.3 Tavení křemíku pro solární články[26]

Konvenční techniky pro výrobu ingotů z polykrystalického křemíku pro vytvoření solárních článků, jsou tvořeny metalurgickým způsobem, který je v dnešní době už zastaralý. Kromě toho je na výrobu těchto ingotů nutné použít velice drahé kelímky a formy, aby se dosáhlo nejvyšší čistoty. I za použití nejkvalitnějších kelímků vzniká problém kontaminace taveniny křemíkem a grafitem, které se zde používají pro struktury forem a pecí. Na začátku technického vývoje použití studeného kelímku, který používá pouze indukční ohřev, se

očekávalo, že tavený materiál nepřijde do styku se stěnou kelímku. To by znamenalo, že by nedocházelo ke kontaminaci nečistot ze stěny pece a potřeba forem by byla zbytečná.

Princip tavení je uveden na obr. 2.7. Segmenty, které jsou chlazené vodou, jsou vedeny až ke dnu kelímku. Tyto segmenty jsou vertikálně izolovány a zároveň navzájem elektricky



izolované. Proto je magnetické pole na dolním konci kelímku sníženo postupně a ne skokem. Aby se zabránilo rychlému ochlazování ingotu, nachází se pod segmenty pomocné topné zařízení, které ohřívá ingot pohybující se směrem dolů. Vysokofrekvenční cívky jsou umístěny v blízkosti dna kelímku, aby vyrovnaly roztavenou zónu křemíku ve spodní části kelímku. Toto uspořádání minimalizuje délku ingotu pro přechod od studeného kelímku do pomocného topného zařízení. Topné zařízení je nastaveno na teplotu, která se s posunem ingotu snižuje.

Obr. 2.7: Schéma - Tavení křemíku pomocí studeného kelímku (převzato z [26])

Významný rozdíl v tuhnutí ingotu křemíku oproti běžným kovům je, že ingot křemíku má tendenci praskat v důsledku velkých teplotních změn. Pro specifické vlastnosti křemíku, jsou nezbytné pečlivé kontroly, aby se zabránilo degradaci krystalů. Během tuhnutí a chladnutí ingotu totiž dochází k výskytu poruch v krystalech způsobených vnitřním pnutím a deformací.

3 Tavení elektricky vodivých materiálů

3.1 Tavení titanových slitin

Titan má unikátní vlastnosti, které je možné uplatnit v některých aplikacích, kde by jiné kovy nemohly být použity. Slitiny titanu jsou zejména díky své vysoce výkonné struktuře a poměru pevnosti k hmotnosti velice efektivní v leteckém průmyslu. Dále se titanové slitiny využívají v chemickém průmyslu pro použití v některých korozivních prostředích, kde by žádný jiný

kov dostatečně neobstál. V oxidačních a neutrálních vodních roztocích si titan na povrchu velice rychle vytvoří vrstvu oxidu, která je téměř imunní proti korozi v kyselině dusičné, odbarvovačích a halidových solích. Navzdory těmto vlastnostem, je aplikace titanu často omezena jeho relativně vysokou cenou.[17]

Některé faktory, které ovlivňují cenu titanu:[17]

- Titan je velice reaktivní s kyslíkem a dusíkem, a proto musí být taven, odléván a chlazen v inertní atmosféře nebo vakuu.
- Musí být odléván do speciálních nereaktivních forem, které jsou ze své podstaty drahé, vzhledem k vysokým nákladům na materiál forem. Na formy se nejčastěji používají sloučeniny zirkonu.
- Odlévání odlitků je velice náročné a často se neobejde bez finálních úprav.

Pro mnohé kovy mohou být mechanické vlastnosti odlitků nižší než u tvářených slitin. Nicméně u titanových odlitků jsou mechanické vlastnosti srovnatelné mnohdy i lepší než u tvářených výrobků.[17]

Slitiny titanu jsou velice reaktivní, a proto musí být taveny ve vakuu. Jelikož by titan reagoval s obložení u běžně používaných pecí, kde teplota tání se pohybuje kolem 1700°C, je taven ve vodou chlazeném kelímku, aby se zabránilo poškození zařízení. Kdyby došlo k úniku roztaveného titanu k měděným segmentům kelímku a k jejich protavení, následovala by exploze. V důsledku toho musí být přijata určitá bezpečnostní opatření.[16]

3.1.1 Technologie VAR

V běžné praxi se používá technologie přetavování obloukem ve vakuu (VAR). Tato metoda využívá vakuové obloukové pece, kde dochází k roztavení části titanové elektrody do vodou chlazeného měděného kelímku. Jakmile je požadované množství kovu roztaveno, elektroda je rychle stažena. Kelímek je poté nakloněn a roztavený kov je vléván do připravené formy.[16,17]

Přetavování obloukem ve vakuu (VAR) má několik nevýhod.[16]

- Titanové elektrody jsou velice drahé, z důvodu vysokých nákladů na zhotovení titanových sochorů nebo výkovek.

- Vodou chlazený kelímek omezuje úroveň přehřátí kovu, což ovlivňuje tekutost taveniny a vede k potížím při odlévání tenkostěnných odlitků.
- Nejvyšší teplota je dosažena v místě zasažení kovu elektrickým obloukem a v důsledku toho vznikají v tavenině vysoké teplotní gradienty, což také ovlivňuje plnění forem a následné tuhnutí odlitku.
- Roztavená slitina nemusí mít homogenní složení a neexistuje žádný proces míchání, který by podpořil jednotnost složení a teploty.

3.1.2 Technologie ISM

Technologie tavení ve studeném kelímku (ISM) překonává tato omezení a rovněž využívá vodou chlazený měděný kelímek. Na rozdíl od technologie VAR pracuje ISM technologie s kelímkem sestaveným ze segmentů. Dále je tato technologie odlišná v tom, že indukční pole působí na slitinu umístěnou uvnitř kelímku, aniž by byl zahříván měděný kelímek. Jak je titanová slitina tavena, dochází k jejímu zpevnění u stěny kelímku a k vytvoření tenké pevné vrstvy na povrchu. Jelikož má titan nízkou tepelnou vodivost, chrání tato zpevněná vrstva roztavený kov od chladícího efektu kelímku. Kromě toho je efektivní příkon tak vysoký, že roztavený kov částečně levituje, což dále snižuje tepelnou výměnu mezi taveninou a zpevněnou vrstvou. To má za následek vyšší přehřátí taveniny, přičemž proudění v tavenině vyvolané indukčním polem zaručuje rovnoměrné rozložení teploty.[16,17]



Obr. 3.1: Polo-levitační tavení titanu ve studeném kelímku (převzato z [16])

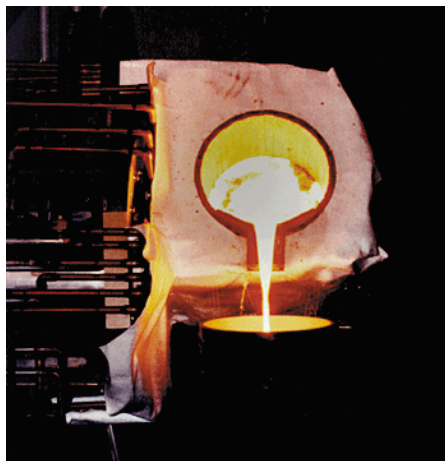


Obr. 3.2: Zbylá pevná vrstva po odlití roztaveného titanu z kelímku (převzato z [16])

Pevnost odlitků je ovlivněna obsahem kyslíku v titanu tzn. čím vyšší obsah kyslíku, tím vyšší pevnost. Z tohoto důvodu je obsah kyslíku v surovém materiálu pečlivě kontrolován. Recyklovaný materiál s vysokým obsahem kyslíku je namíchan s čistým materiálem s nízkým obsahem kyslíku a naopak. V případě potřeby zvýšení obsahu kyslíku v tavenině je možné

přidat oxid titaničitý. Tímto způsobem je možné nastavit stejnou hladinu kyslíku pro následující odlévání.[17]

Technologie ISM také umožňuje větší volnost při přidávání legujících prvků k hlavnímu kovu. Například materiál může být přidán přímo do taveniny, což umožňuje dosahovat maximálních hmotností. Proces tavení může probíhat i delší dobu, dokud nedojde k úplnému rozpuštění přídavných prvků (tantal, wolfram). Po odlití roztaveného materiálu, zůstane v kelímku tenká zpevněná vrstva. Tuto vrstvu lze snadno odstranit, což umožňuje rychlé připravení zařízení na tavení odlišné slitiny. ISM byla použita na tavení 120 dávek během 18 hodin. Doba cyklu odpovídala 6 minutám. Předností tohoto procesu je bezkonkurenční flexibilita v legování.[17]



Obr. 3.3: Odlévání taveniny do formy (převzato z [17])

Hlavním přínosem technologie ISM při tavení titanových slitin je výroba vysoce kvalitních odlitků za nízké ceny. Snížení nákladů je spojeno s odstraněním tavných elektrod, jejichž výroba je velice nákladná, a zároveň použití levnějšího materiálu pro vsázku, který je z chemického hlediska stále plně certifikován. Kromě toho, je ISM velice atraktivní pro výrobu součástí v kosmickém průmyslu a pro odlévání prototypů.[17]

Výhody technologie ISM:[16]

- Dosažení vyššího přehřátí a jednotnějšího rozložení v tavenině než u VAR, což usnadňuje zhotovení odlitků.
- Vsázka může být ve formě ingotu, desky, trubky, kovových špon, prášku a recyklovaného materiálu z odlévání, v podstatě ze všeho co se vejde do kelímku.
- Pevnost titanových slitin je regulována obsahem kyslíku a obsah lze snadno řídit výběrem surového materiálu.

- Regulace surového materiálu umožňuje výrobu slitin o různém složení. S prodlouženou dobou zpracování a s intenzivním prouděním taveniny dochází ke kompletnímu rozpuštění žáruvzdorných doplňků, jako jsou wolfram a tantal.

4 Tavení elektricky nevodivých materiálů

Indukční tavení pomocí studeného kelímku umožňuje tavení jak kovových, tak nekovových anorganických materiálů. Prostřednictvím vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, které je vytvořeno indukční cívkou, mohou být materiály, jako je sklo, keramika a oxidy, které jsou při pokojové teplotě mírně elektricky vodivé, indukčně taveny v silně chlazeném kelímku. Nicméně tyto materiály musí být nejprve přehřátý pomocí startovacího procesu, aby se zvýšila jejich elektrická vodivost. Na základě intenzivního vodního chlazení, které probíhá ve stěnách a ve dně kelímku, se vytvoří zpevněná vrstva mezi stěnami kelímku a taveninou. Tato tzv. Skull vrstva chrání taveninu před kontaminováním látkami použitými na strukturu kelímku a zároveň chrání kelímek před taveninou o vysoké teplotě, která bývá obvykle vysoce chemicky agresivní.[14, s. 17]

Tavení nevodivých materiálů ve studeném kelímku sestává ze tří procesů:[14, s. 20]

- Přehřátí základního materiálu za pomoci startovacího procesu.
- Natavení základního materiálu na požadovaný objem pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického pole a vytvoření ochranné vrstvy.
- Spontánní pomalá krystalizace nebo tuhnutí taveniny

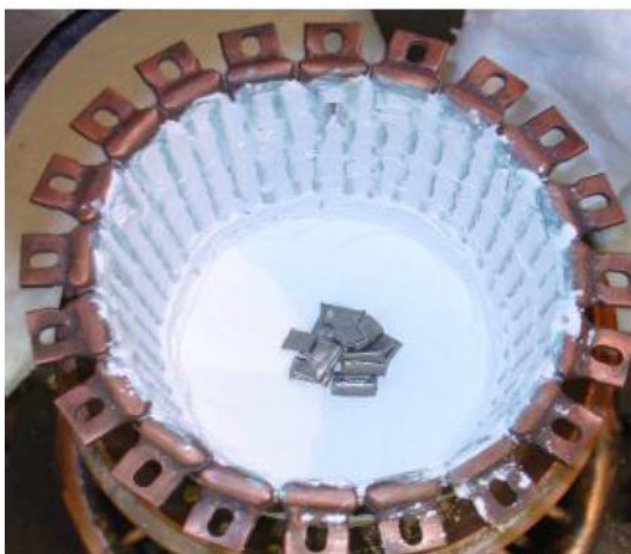
4.1 Startovací proces

Určité materiály, které jsou při pokojové teplotě elektrickými izolanty, jsou při vysokých teplotách dostatečně elektricky vodivé, takže se do nich může indukovat proud. Vířivé proudy způsobí na základě Joulovo tepla zvýšení teploty na bod tání a výše. Tyto žáruvzdorné materiály zahrnují mimo jiné oxidy Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO atd. jakož i mnoho druhů skel a keramik.[14, s. 20]

Elektricky slabě vodivé materiály musí být nejprve přehřátý z důvodu zvýšení jejich vodivosti, aby se mohlo uskutečnit indukční tavení. Hloubka tavení je jen několik málo milimetrů. Zvýšení příkonu bude mít za následek silné přehřátí taveniny, což často vede k odpařování roztaveného materiálu. Tomuto druhu startovacího procesu je třeba se vyhnout.

Nejjednodušší a nejvíce elegantní startovací metoda oxidů využívá volnou energii silné exotermní oxidace kovů, které se používají jako startovací materiál a jsou vybrány tak, aby odpovídaly taveným oxidům.[14, s. 20]

Malé množství kovu může být v podobě prášku, třísek nebo jako malé kousky, vloženo do výchozí taveniny, viz obr. 4.1. Tento kov pak vytvoří vrstvu a zakryje taveninu, aby omezil tepelné ztráty. Velikost zrna nebo velikost kousku závisí na zvolené frekvenci a související hloubce vniku. Kousky kovu jsou zvoleny dostatečně malé a poskytují tak velkou povrchovou plochu pro chemické reakce. Například při tavení oxidů hliníku může být použit hliníkový kov jako startovací materiál, u tavení oxidů zirkonu může být použit zirkonový kov atd. Při zapnutí vysokofrekvenčního zdroje se startovací materiál začne zahřívat v důsledku působení elektromagnetického pole a indukce vířivých proudů, což způsobí ohřátí i okolního základního materiálu.[14, s. 22]



Obr. 4.1: Startovací metoda s elektricky vodivým materiálem (převzato z [27])

Ohřívání kov oxiduje na základě množství kyslíku ve vzduchu a smísí se jako oxid s taveninou, aniž by jí kontaminoval. Změnami v chemickém složení výchozího materiálu v důsledku neúplné oxidace, dochází pouze v případě, že je k dispozici nedostatek kyslíku. Objemový podíl startovacího materiálu v tavenině není větší než 0,01 - 0,1%. Bod varu zvoleného startovacího materiálu by neměl ležet pod bodem tání výchozího materiálu, protože jinak by se startovací materiál vypařil dřív, než by na základní materiál začalo působit elektromagnetické pole. Experimenty s oxidem magnesia (Teplota tání = 2800°C) ukázaly, že v tomto případě nemůže být použito magnesium jako startovací materiál (Teplota varu = 1120°C).[14, s. 23]

4.2 Roztavení materiálu a vytvoření pevné vrstvy

Po natavení základního materiálu a získání požadovaného objemu taveniny, dochází k postupnému tavení základního materiálu čistě indukčním ohřevem, dokud nezůstane mezi kelímkem a taveninou tenká Skull vrstva.[14, s. 26]

Se zvyšující teplotou se zvyšuje elektrická vodivost daných materiálů. Skull vrstva si však zachovává výrazně nižší vodivost než roztavený materiál a je tak v podstatě průzračná pro elektromagnetické pole. Vzhledem k tomu, že energie dodávaná vysokofrekvenčním zdrojem je absorbována pouze taveninou, přičemž Skull vrstva je zachována, nedochází ke kontaktu mezi taveninou a stěnou kelímku. Zároveň nedochází díky této vrstvě k difúzi materiálu použitého na kelímek do taveniny, což vede k extrémně vysoké chemické čistotě taveniny.[14, s. 26]

Vlivem skin efektu se teplo koncentruje ve vnější oblasti taveniny. Zde je teplota i elektrická vodivost vyšší. Tato oblast izoluje tavený materiál tak, že elektromagnetické pole nemůže proniknout k tavenému materiálu zejména při pracovní frekvenci a vzhledem ke konstrukci kelímku. V tomto případě teplo proniká do vnitřního prostoru kelímku vedením, sáláním a zářením.[14, s. 26]

U této technologie hraje důležitou roli pro stabilitu procesu tavení tepelná rovnováha v kelímku. Energie, která je v důsledku tepelných ztrát odevzdávána přes stěnu kelímku (vedením) a povrchem taveniny (zářením, prouděním), musí být neustále doplňována vysokofrekvenčním zdrojem, aby tavenina nezmrzla. Zejména pro malé objemy taveniny i malé odchylky od tepelné rovnováhy způsobené například výkyvy teploty v chladící vodě, mohou vyvolat částečnou nebo úplnou krystalizaci taveniny. Při poklesu objemu taveniny pod kritickou hodnotu většinou dochází k ukončení procesu tavení. Avšak je možné zabránit ukončení procesu zvýšením výkonu generátoru.[14, s. 26]

4.3 Proces tuhnutí nebo krystalizace

Po odpojení napájení dochází ke spontánní krystalizaci taveniny, což vede ke vzniku polykrystalických ingotů nebo skleněné hmoty. Pomalé tuhnutí může být docíleno několika způsoby.[14, s. 27-28]

- Pomalé snížení výkonu měniče
- Pomalé spuštění studeného kelímku z induktoru, tzn. z elektromagnetického pole
- Použití Czochralského metody

Během pomalého tuhnutí může docházet k jevu, který má čistící účinky. Tavenina krystalizuje a vytlačuje nečistoty, které byly přítomny v základním materiálu, do horní oblasti taveniny. Zde se soustředí nečistoty, které se pak jednoduše oddělí. Další důležitou roli v kvalitě a v struktuře materiálu výsledných produktů hraje atmosféra, kde může dojít k heterogenní reakci mezi molekulami plynu a taveniny.[14, s. 29]

4.4 Výhody použití studeného kelímku

Pro výrobu monokrystalů, skla, nebo keramiky je nutné přivést k reakci všechny potřebné složky. Při relativně vysokých teplotách bývá keramika obvykle vyrobena sintrováním. V tomto procesu musí být základní materiál důkladně promíchán, lisován a taven. Teplota se pohybuje kolem 50 – 70 % teploty tání složky materiálu, která má nejnižší teplotu tání. Studený kelímek se dobře hodí jako chemický reaktor pro výrobu keramiky. K syntéze taveného materiálu dochází mnohem rychleji než u sintrovací technologie. Tavenina je díky proudění dokonale homogenní a navíc je charakteristická vysokou čistotou a dokonalou strukturou materiálu.[14, s. 29]

Některé další výhody:[14, s. 30]

- Díky Skull vrstvě nedochází ke kontaktu mezi kelímkem a taveninou a proces tavení je tak velmi čistý. Chemická čistota výchozí taveniny není nižší než čistota základního materiálu. V mnoha případech je čistota vyšší, jelikož při vyšších teplotách dochází k odpařování těkavých složek materiálu, jako jsou alkalické oxidy, chloridy, nitridy, sulfáty a další.
- Elektrody, které se používají při tavení v obloukové peci, zde nejsou nutné. Tím se šetří materiál a náklady, a zároveň nedochází k znečištění taveniny.
- Iridiový kelímek, který se často používá pro růst krystalů, zde není zapotřebí. Navíc má tento kelímek omezenou životnost vlivem jeho deformace a prasknutí. Zároveň náklady na pořízení jsou vysoké a výroba velkých formátů je velmi obtížná.
- Tavicí proces je možné provádět v různých atmosférách: ve vzduchu, v oxidačních a redukčních plynech, ve vodíku a kyslíku, stejně tak v inertních plynech a ve vakuu.

5 Studie modelu studeného kelímku

Geometrie indukční cívky má významný vliv na rozložení dopadající energie na vsázku, provozuschopnost systému a je závislá na zpracovávaném materiálu a na geometrii tavicího kelímku. Návrh konstrukce cívky je ovlivňován fyzikálním magnetickým polem, které je definováno Maxwellovými rovnicemi a tyto poznatky pak slouží k vytvoření optimální konstrukce cívky. Klíčem k účinnému provozu zařízení je vztah mezi frekvencí, průměrem a elektrickou rezistivitou taveného materiálu.[18]

5.1 Studie tavení elektricky nevodivého materiálu

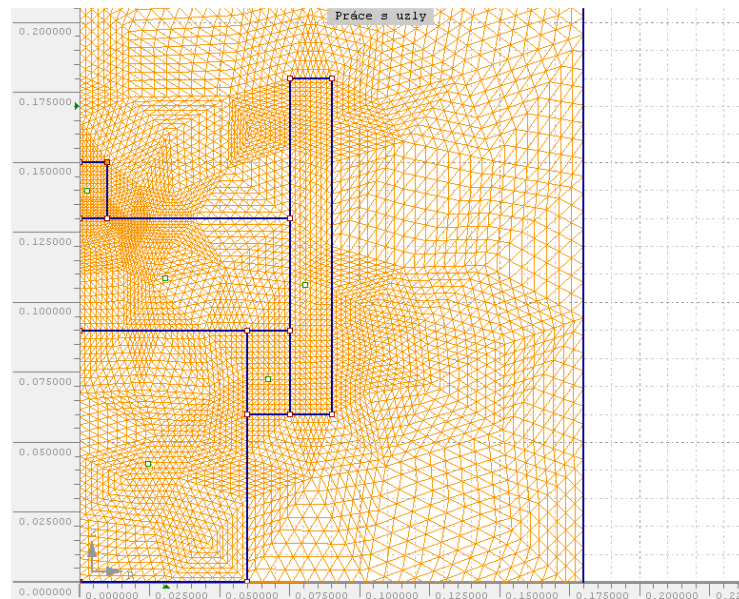
Pro řešení studií studeného kelímku jsem použil software Agros2d. Jedná se o 2D software, který se specializuje na řešení fyzikálních polí. Pro přesnost výsledků jednotlivých polí, je nutné nastavit parametry materiálů a okolí, frekvenci a zároveň provést diskretizaci oblasti. Jelikož tento software umožňuje pouze omezené zkoumání této problematiky, zvolil jsem pro tuto analýzu zjednodušený jednozávitový typ studeného kelímku.

5.1.1 Diskretizování oblasti

Software Agros2D využívá numerickou metodu konečných prvků (MKP), která slouží k simulaci průběhů napětí, deformací, proudění tepla, vlastních frekvencí, jevů elektromagnetismu atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Princip této metody je diskretizace spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků. Zjišťované parametry jsou následně určovány v jednotlivých uzlových bodech.[25]

Metoda konečných prvků se dělí do tří částí:[25]

- Preprocesor – přípravení modelu, diskretizace oblasti
- Solver – samotný výpočet
- Postprocesor – zobrazení výsledku

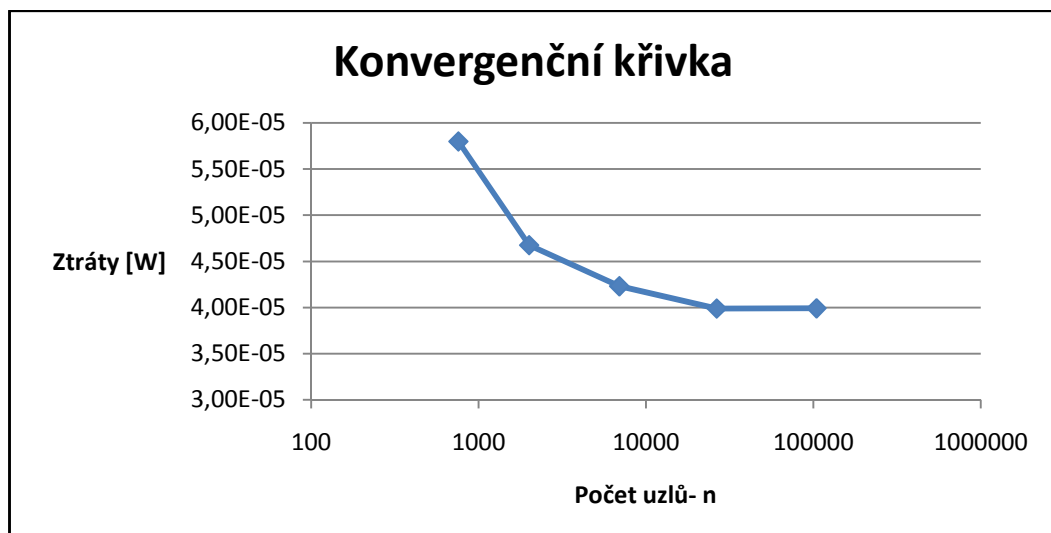


Obr. 5.1: Ukázka diskretizace oblasti 2D modelu

Přesnost výpočtu se při modelování liší vzhledem k použitému algoritmu, aproximaci a počtu uzlů, do kterých se diskretizuje modelovaná síť. Pro diskretizaci oblasti lze zvolit počet zjemnění v poli a řád prokládaného polynomu.

Následující graf zobrazuje závislost výsledku sledovaných měrných ztrát ve startovacím materiálu na počtu modelovaných uzlů v síti.

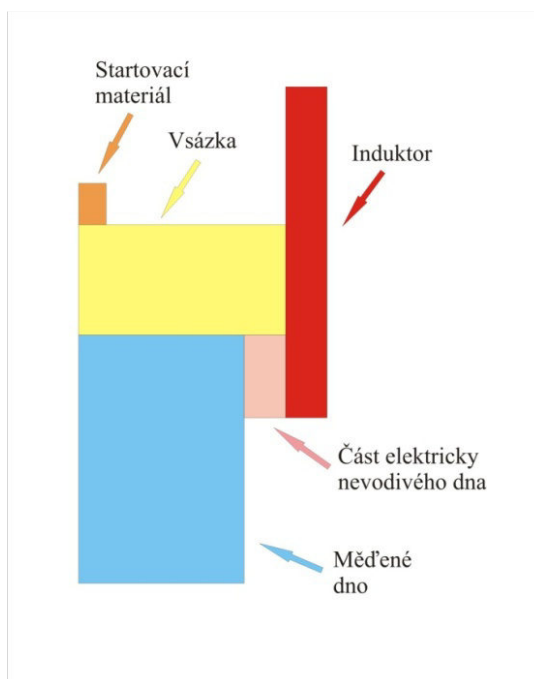
Graf 5.1



Z grafu 5.1 je patrné, že s vyšším řádem polynomu a zjemnění, dochází k zpřesnění výsledku a křivka konverguje k určité hodnotě.

5.1.2 Modelování fyzikálních polí

V této kapitole se budu zabývat analýzou elektricky nevodivého materiálu ZrO_2 ve zjednodušeném modelu studeného kelímku, kde induktor sám tvoří stěnu kelímku, viz obr. 5.2. Jako startovací materiál bude použit metalický zirkon. Frekvence byla stanovena na 10 kHz. Elektrické vlastnosti materiálů jsou uvedeny v tabulce 5.1.

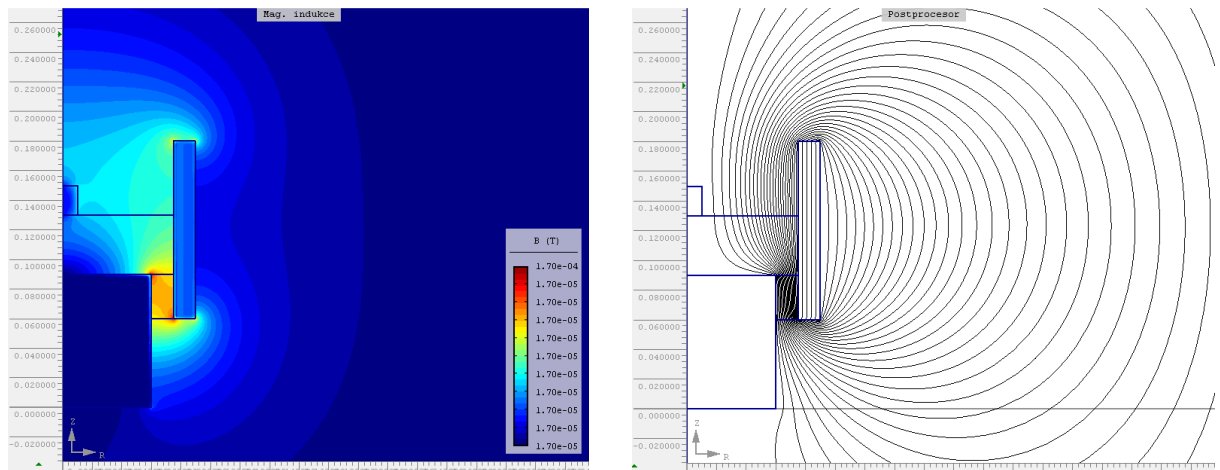


Obr. 5.2: 2D model studeného kelímku při tavení elektricky nevodivých materiálů

Tabulka 5.1: Elektrické vlastnosti jednotlivých materiálů[20]

Materiál	Vodivost [$S \cdot m^{-1}$] při 20 st. C	Rezistivita [$\Omega \cdot m$] při 20 st. C	Rel. Permeabilita
Měď	5,80E+07	1,72E-08	1
ZrO_2	1,00E+04	1,00E-04	1
Metalický Zr	2,38E+06	4,21E-07	1

Do vsázky je přidán metalický zirkon, který vsázku nijak negativně neovlivní a je možné ho indukčně ohřívat při daných počátečních podmínkách. Vsázka se vlivem roztaveného startovacího materiálu začne sama tavit, což způsobí „řetězovou reakci“. Jelikož chceme, aby se vytvořila pevná vrstva mezi taveninou a stěnou kelímku, aby nedošlo k jeho poškození, je nutné regulovat tavbu taveniny pomocí masivního chlazení kelímku a regulace výkonu, který se přenáší do vsázky. Tento typ kelímku je z hlediska spotřeby energie efektivnější, avšak hrozí zde nebezpečí protavení stěny kelímku, což by způsobilo větší škodu, než u kelímku s chlazenými segmenty a cívkou umístěnou vně kelímku.[20]

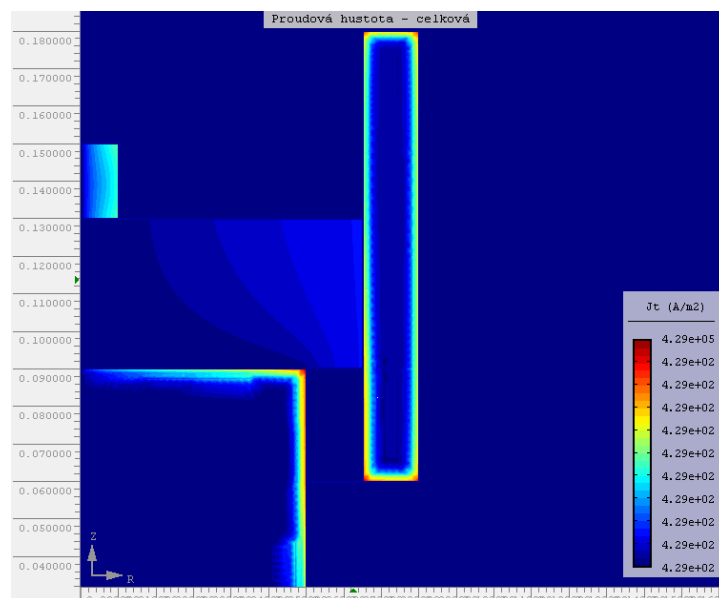


a) Rozložení magnetické indukce

b) Rozložení siločar elektromagnetického pole

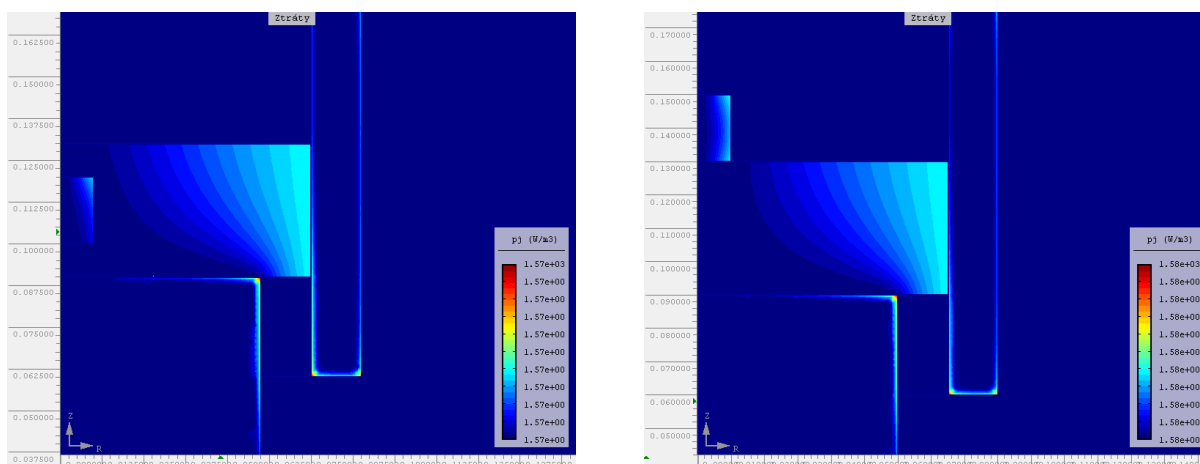
Obr. 5.3: Rozložení fyzikálních polí:

Na obr. 5.3 a) je možné vidět rozložení magnetické indukce ve studeném kelímku a na obr. 5.3 b) pak rozložení siločar elektromagnetického pole. Tyto obrázky slouží pouze pro představu o rozmístění siločar a rozložení magnetického pole. Pro doplnění problematiky, jsem přidal ještě obr. 5.4, kde je názorně vidět rozložení proudové hustoty v kelímku a především ve startovacím materiálu.



Obr. 5.4: Rozložení proudové hustoty ve studeném kelímku

V závěru studie jsem se zaměřil na velikost měrných ztrát ve startovacím materiálu s ohledem na jeho umístění. Z obr. 5.5 je vidět, že umístění startovacího materiálu hlouběji do taveného materiálu má za následek snížení měrných ztrát v tomto materiálu.



a) startovací materiál uvnitř vsázky

b) startovací materiál na povrchu vsázky

Obr. 5.5: Rozložení měrných ztrát ve studeném kelímku:

Tento jev je způsoben částečným odstíněním elektromagnetického vlnění měděným dnem. Ovšem při zahřátí startovacího materiálu na potřebnou teplotu, může předat teplo větší částí plochy, jelikož je celý ponořen v taveném materiálu.

Tabulka 5.2: Fyzikální a elektrické vlastnosti startovacího materiálu

Název	Poloměr	Výška	Měrná tepelná kapacita Zr	Hustota Zr	Počáteční teplota	Koncová teplota	Doba ohřevu
Značka	r_s	h_s	c_{Zr}	ρ_{Zr}	T_0	T_1	t
Jednotky	cm	cm	J/(g.K)	[g/cm ³]	[°C]	[°C]	[s]
Hodnota	1	2	0,27	6,52	20	3000	110

Podle vztahu 5.1 vypočteme množství tepelné energie, které startovací materiál přijme.

$$Q = c_{Zr} \cdot m_{Zr} \cdot (T_1 - T_0) \quad (5.1)$$

$$Q = c_{Zr} \cdot \rho_{Zr} \cdot V \cdot (T_1 - T_0) = 0,27 \cdot 6,52 \cdot 6,28 \cdot 2980 = 32944,8 \text{ J}$$

Podle vztahu 5.2 vypočteme potřebný výkon na ohřev startovacího materiálu.

$$P = \frac{Q}{t} \quad (5.2)$$

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{32944,8}{110} = 299,5 \text{ W}$$

Napájecí proud vypočteme podle vztahu 5.3. Proudová hustota byla stanovena na 4 000 000 A/m².

Rozměry induktoru: šířka 0,015m x výška 0,12m

$$J = \frac{I}{S} \Rightarrow I = S \cdot J \quad (5.3)$$

$$I = S \cdot J = 0,0018 \cdot 4000000 = 7200\text{A}$$

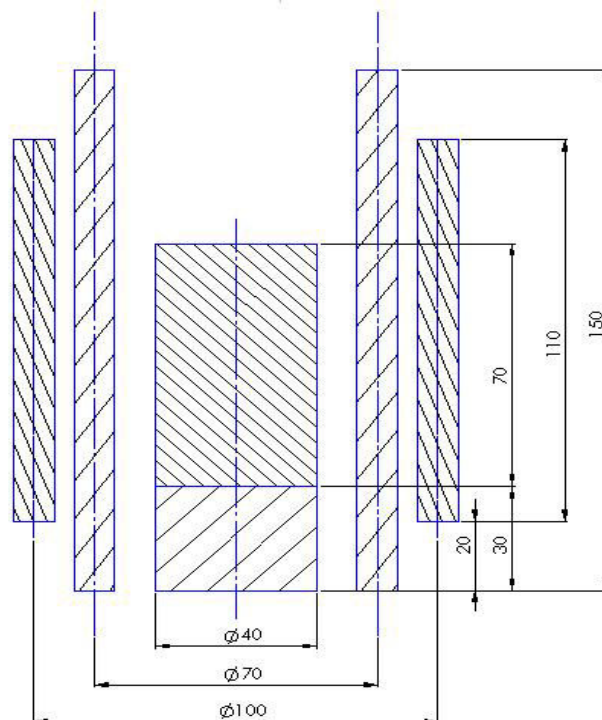
Hloubku vniku naindukovaných proudů do vsázky ZrO₂ vypočteme podle vztahu 1.23, kde

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_0\mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 10000 \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 0,05 \text{ m}$$

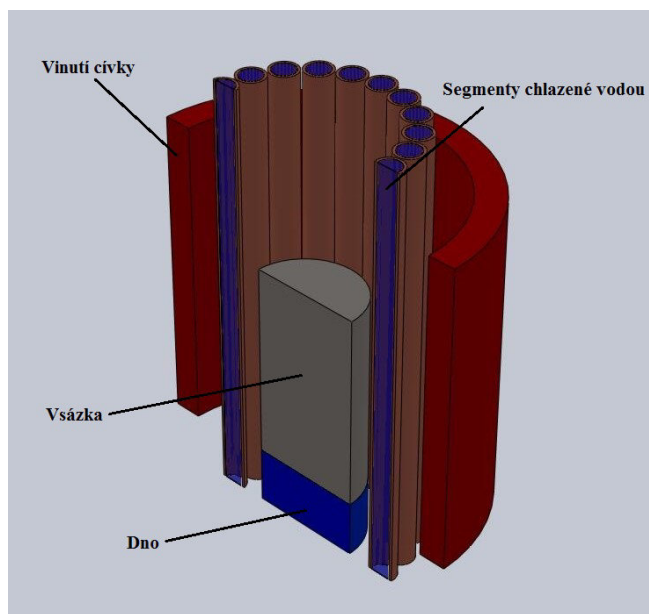
Pro ohřev startovacího materiálu na koncovou teplotu 3000 °C je nutné dodat výkon o velikosti 299,5 W.

5.2 Studie tavení elektricky vodivých materiálů

Pro ukázkou jsem v tomto případě tavení zvolil segmentový studený kelímek. Podle dostupných informací jsem navrhl geometrické parametry studeného kelímku. Pro vytvoření technického výkresu viz obr. 5.6 a pro grafické znázornění uspořádání jednotlivých elementů studeného kelímku viz obr. 5.7, jsem využil CAD software Solidworks 2009.



Obr. 5.6: Výkres - Rozměry studeného kelímku



Obr. 5.7: CAD model studeného kelímku

Příklad výpočtu elektrických parametrů je proveden pro titanovou vsázku, jejíž fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5.2 a 5.3. Titanovou vsázku je potřeba ohřát z počáteční teploty 20°C na koncovou teplotu 1700°C za dobu 1 minuty.

Tabulka 5.2: Hodnoty použité pro určení elektrických parametrů

Název	Poloměr induktoru	Výška induktoru	Měrná tepelná kapacita Ti	Hustota Ti	Počáteční teplota	Koncová teplota	Doba ohřevu
Značka	r_i	h_i	c_{Ti}	ρ	T_0	T_1	t
Jednotky	m	m	J/(kg·°C)	[kg/m ³]	[°C]	[°C]	[s]
Hodnota	0,02	0,07	523	4506	20	1700	60

Podle vztahu 5.1 vypočteme množství tepelné energie, které vsázka přijme.

$$Q = c_{Ti} \cdot \rho \cdot V \cdot (T_1 - T_0) = 523 \cdot 4506 \cdot 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot 1680 = 348405 \text{ J}$$

Podle vztahu 5.2 vypočteme výkon, který je nutné dodat na ohřev vsázky.

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{348405}{60} = 5806,8 \text{ W}$$

Napájecí proud vypočteme podle vztahu 5.3.

$$I = S \cdot J = 0,0011 \cdot 4000000 = 4400 \text{ A}$$

Hloubku vniku naindukovaných proudů do titanové vsázky vypočteme podle vztahu 1.23, kde

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_0\mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 10000 \cdot 2,6 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 3,121 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Podle těchto výsledků můžeme říci, že pro ohřev vsázky na požadovanou teplotu je nutné dodat výkon o velikosti 5806,8 W při neuvažování tepelných ztrát vedením a sáláním. Napájecí proud má hodnotu 4400 A. Hloubka vniku při frekvenci 10000 Hz vyšla 3,12 mm.

Pro výpočet tepelných ztrát vedením stěnou kelímku je zde uveden vzorec 5.4:[27]

$$P_W = \pi \cdot d_{kel} \cdot h_{kel} \cdot q_W \quad [\text{W}] \quad (5.4)$$

Pro výpočet tepelných ztrát sáláním, je zde uveden vzorec 5.5:[27]

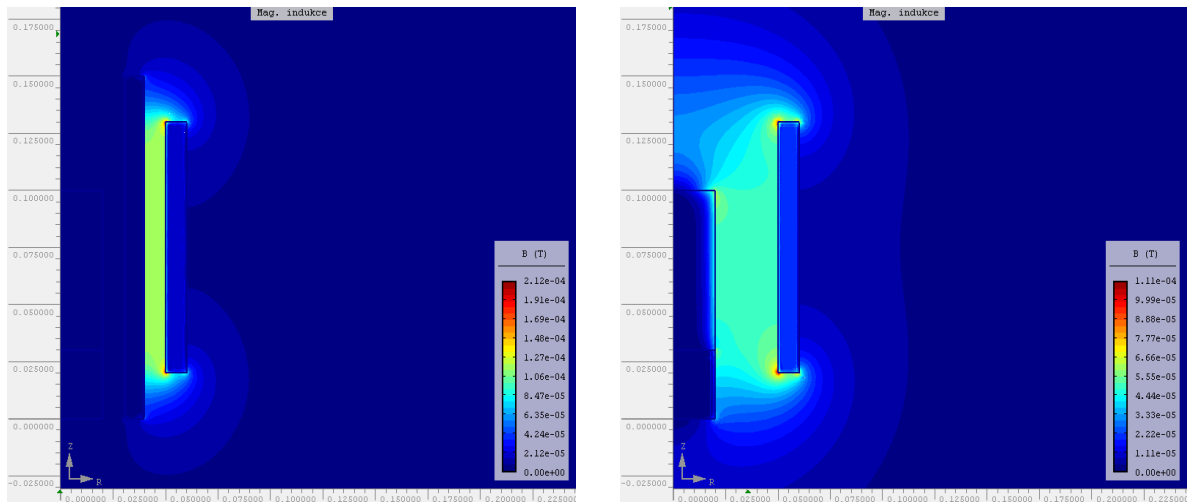
$$P_{rad} = \frac{\pi}{4} d_{kel}^2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma (T_1^4 - T_0^4) \quad [\text{W}] \quad (5.5)$$

Pro harmonickou analýzu studeného kelímku, která byla vytvořena v softwaru Agros2D, jsem použil hodnoty fyzikálních vlastností jednotlivých elementů, které jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3: Parametry jednotlivých elementů studeného kelímku

Jednotlivé elementy	Permeabilita [-]	El. vodivost [S/m]	Proudová hustota [A/m ²]	Budící frekvence [Hz]
Cívka	1	58,108.10 ⁶	4.10 ⁶	10 000
Segment	1	58,108.10 ⁶	0	-
Vsázka - Titan	1	2,6.10 ⁶	0	-
Vzduch	1	0	0	-
Voda	1	0,125	0	-

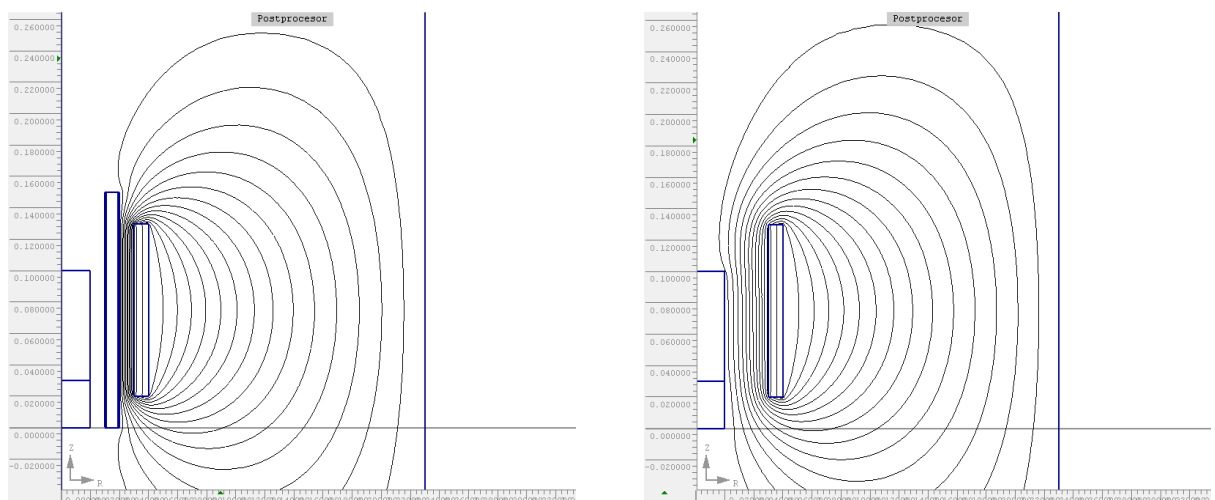
Na obr. č. 5.8 je názorně ukázána intenzita magnetického pole v kelímku s měděnými segmenty a bez nich. Tento obrázek je zde uveden pouze pro přibližnou představu o rozložení magnetické indukce, jelikož zde nemůžeme přesně dodržet daná specifika studeného kelímku. Pro přesnou simulaci segmentového studeného kelímku by byl vhodný 3D model. Nicméně můžeme z tohoto obrázku odvodit, že měděné segmenty částečně odstiňují magnetické pole. Dá se tedy usoudit, že magnetické pole proniká ke vsázce hlavně mezerami mezi segmenty. Pro úplnost jsem ještě přidal znázornění rozložení siločar elektromagnetického pole ve studeném kelímku (obr. 5.9).



a) se segmentem

b) v mezeře

Obr. 5.8: Rozložení magnetické indukce v řezu kelímku:



a) se segmentem

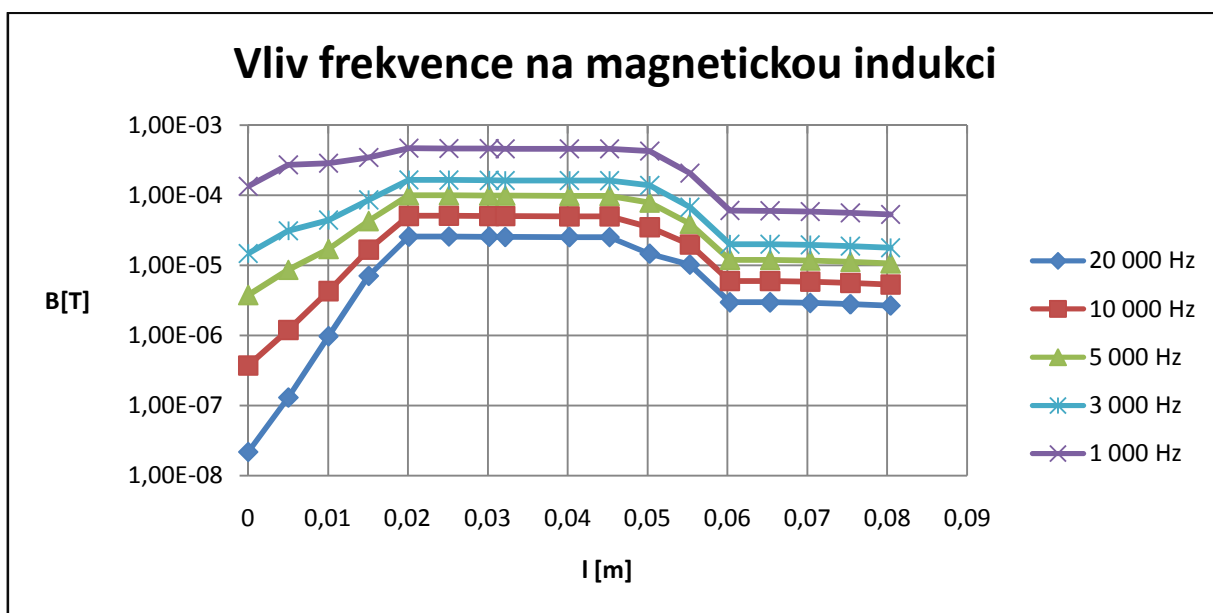
b) v mezeře

Obr. 5.9: Rozložení siločar elektromagnetického pole v řezu kelímku:

5.2.1 Studie intenzity magnetické indukce při různých frekvencích

Hloubka vniku naindukovaných proudů do vsázky závisí na elektro-fyzikálních vlastnostech zpracovávaného materiálu a na frekvenci elektromagnetického pole. Při dané frekvenci f se hloubka vniku zvyšuje s rostoucí hodnotou elektrické rezistivity zátěže.[19] Pro tuto analýzu jsem využil model studeného kelímku bez segmentu, viz obr. 5.8 b). Hodnoty magnetické intenzity jsem odečetl ve výšce 8 cm v průřezu celého kelímku. Cílem této analýzy je zjištění rozložení magnetické indukce ve studeném kelímku při frekvenci 1, 3, 5, 10 a 20 kHz.

Graf 5.2:



Z grafu 5.2, kde 0 znázorňuje střed vsázky, přičemž poloměr vsázky je 2 cm, je patrné, že magnetická indukce se směrem ke středu vsázky snižuje. Dále je vidět, že nejvyšších hodnot dosahuje při frekvenci 1000 Hz a se zvyšující frekvencí se snižuje. Ze získaných hodnot tedy můžeme usoudit, že frekvence ovlivňuje hloubku vniku magnetické indukce do vsázky.

6 Energetická náročnost tavení

Indukční ohřev má výrazný vliv i na životní prostředí. Oproti ostatním technologiím tavení není okolí vystaveno žádnému tepelnému a atmosférickému zatížení. Hlavní výhodou je vznik tepla přímo uvnitř vsázky bez potřeby vnějšího zdroje tepla. Jedná se tedy o bezkontaktní přenos tepla oproti např. odporovému ohřevu, kde se odporové dráty ohřívají přímým průtokem proudu.[22]

Hlavním cílem u indukčního ohřevu je vytvořit dostatečně silné magnetické pole a následně umístění vsázky do ohniska pole, tak aby bylo dosaženo optimálního přenosu elektromagnetického vlnění z induktoru do vsázky. Aby bylo vytvořeno dostatečně silné magnetické pole, musí procházet induktorem značně velký proud (1000 – 10 000A). Takto vysoký proud by měl za následek roztavení induktoru, a proto je nutné induktor chladit vodou. Další možnost, pro vytvoření silného střídavého magnetického pole, je regulace frekvence. U indukčního ohřevu se frekvence pohybuje podle použití od 50 do 1 000 000 Hz.[22]

Tabulka č. 6.1: Přenosové výkony v různých ohřívacích procesech[22]

Druh ohřevu	Výkonový přenos W/cm ²
Konvekce (odvádění tepla, molekulárním pohybem)	5.10 ⁻¹
Sálání (elektrická pec, komorová pec)	8
Tepelná vodivost, styk (topná deska, solná lázeň)	20
Infračervený bodový zářič	2.10 ²
Plamen (Hořák)	10 ³
Indukční ohřev	10 ⁴
Laser (CO ₂)	10 ⁸
Elektronový paprsek	10 ¹⁰

Provozní frekvence indukčního zařízení je stanovena podle potřebné hloubky vniku. Spektrum použitelné frekvence se pohybuje od hodnoty síťové frekvence (50 Hz) až ke krátkovlnnému pásmu (3 MHz) a dělí se do tří dílčích oblastí:[22]

- Nízká frekvence 50 Hz – 500 Hz
- Střední frekvence 500 Hz – 50 kHz
- Vysoká frekvence 50 kHz – 3MHz

Pomocí měniče kmitočtu vytvoří indukční zařízení s vyšší frekvencí požadovanou frekvenci ze síťové frekvence. Postupy pro vytvoření vyšší frekvence jsou shrnuty v tabulce č. 6.2.

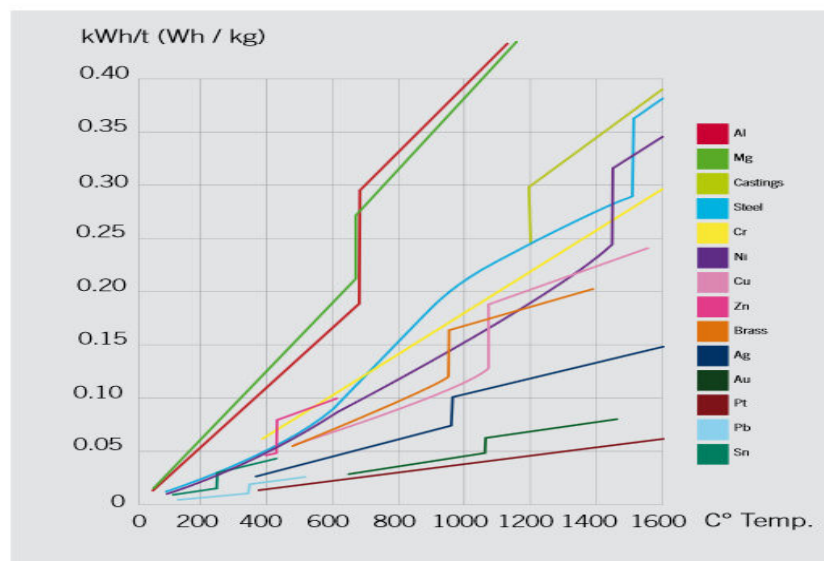
Tabulka č. 6.2: Postupy pro vytvoření vyšší frekvence[22]

Postup	Frekvence v kHz	Účinnost v % (plná zátěž)	Výkon v kW
Násobič kmitočtu (statický frekvenční měnič)	0,15 0,25 0,45	88 - 93	až 3 000
Tyristorový usměrňovač a tranzistorový měnič	0,5 - 25	90 - 95	až 15 000
VF - tranzistorový měnič	50 - 1200	88 - 92	až 5 000
Vysoká frekvence (elektronkový generátor)	1000 - 3000	60 - 70	až 250

Z hlediska účinnosti je indukční ohřev energeticky úspornější v porovnání s odporovou pecí nebo s průběžnou plynovou pecí. Například 100 kW průběžnou pec, která se používá k ohřevu ocelových součástí, je možné zaměnit VF generátorem se středním výkonem 25 kW. Tento generátor lokálně ohřeje daný polotovar v řádech několika sekund, jelikož energie potřebná k ohřevu je směřována přímo do požadovaného místa.[21]

V případě tavení ve studeném kelímku je energetická náročnost oproti tavení v pecích s keramickým kelímkem vysoká. Pro roztavení stejného množství materiálu je nutné 2x více elektrické energie. Během procesu tavení dochází z energetického hlediska k teplotním změnám. Aby bylo zabráněno ztuhnutí vsázky, je nutné kompenzovat tepelné ztráty v kelímku a segmentech. Měření, která probíhala v zahraničí, ukázala, že není zapotřebí započítávat ztráty v kelímku, ale pouze ztráty, které vznikají sáláním z povrchu vsázky. Tepelné ztráty se následně odvíjí od velikosti kelímku. V porovnání s konvenčním indukčním tavením elektricky nevodivých materiálů, dosahují tepelné ztráty menších hodnot a pohybují se do 40 %.[27]

Pro správné stanovení energetické náročnosti tavení, je nutné znát druh materiálu určeného pro tavení, rozměry vsázky, požadovanou hodinovou produkci odlévání a požadovanou finální teplotu. Dalším krokem je stanovení míry energetické absorpce materiálu. Obr. 6.1 znázorňuje míru energetické absorpce různých materiálů. Vynásobením míry energetické absorpce s požadovanou hodinovou produkcí odlévání (kg/hod), získáme specifický požadavek na spotřebu energie.[23]



Obr. 6.1: Míra energetické absorpce pro různé materiály (převzato z [23])

Nyní můžeme zjistit celkovou efektivnost indukčního zařízení. Některé typické hodnoty účinnosti indukčních zařízení pro běžné materiály jsou uvedeny v tabulce č. 6.3, kde uvedené hodnoty předpokládají užití vícezávitových cívek. Rozdílné návrhy cívek pak mohou ovlivnit hodnoty účinnosti. Vydělením specifického požadavku spotřeby energie mírou účinnosti zařízení, získáme celkovou spotřebu energie.[23]

Tabulka č. 6.3: Typické hodnoty účinnosti indukčních zařízení[23]

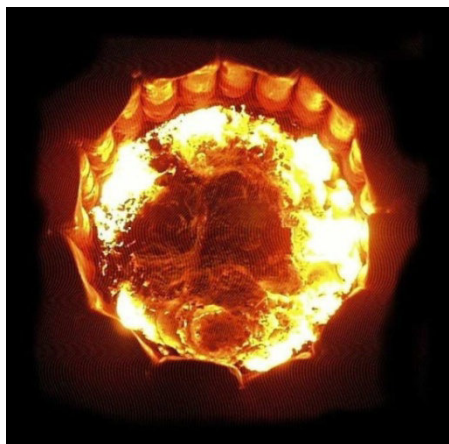
Materiál	Finální teplota [°C]	Účinnost
Uhlíková ocel	1250	0,65
Uhlíková ocel	700	0,80
Nerezová ocel	1250	0,60
Mosaz	800	0,50
Měď	900	0,40
Hliník	500	0,40

7 Závěry pro praxi[8,10,27]

Studený kelímek nabízí možnost tavení jak elektricky vodivých tak elektricky nevodivých materiálů. Hlavní předností je vysoká čistota vytaveného materiálu a dosažení teploty tavení až 3000 °C. Studený kelímek pracuje na bázi indukčního ohřevu, který nabízí významné výhody oproti tradičním způsobům ohřevů. Umožňuje rychlý, přesný a konzistentní přenos tepla, což snižuje spotřebu energie a vytváří bezpečnější pracovní prostředí. Volbou frekvence zdroje pak můžeme ovlivnit rozložení tepla ve vsázce. V současnosti probíhá řada výzkumů, které se zabývají využitím právě této technologie.

Asi největší uplatnění vidím ve vitifikaci vysoceradioaktivního jaderného odpadu, kde dochází k fixaci odpadu do skelných nebo keramických matic. Tyto matrice pak mohou být skladovány v hlubinných úložištích po tisíce let. Další možné aplikace studeného kelímku jsou pak tvoření umělých diamantů či tvoření polykrystalických ingotů pro výrobu solárních panelů. Naší pozornosti by nemělo ujít ani tavení speciálních titanových slitin, které se využívají v leteckém průmyslu či zdravotní technice. V současnosti probíhají také studie, které za pomoci studeného kelímku simulují havárie reaktorů v jaderných elektrárnách. Při těchto pokusech jde o sledování fyzikálně chemických vlastností oxidických směsí tavenin na

bází CORIA, které vzniká při roztavení komponent primární zóny lehkovodních reaktorů a jeho mísením s produkty okolního prostředí (v okolí reaktoru).



Obr. 6.2: CORIUM ve studeném kelímku (převzato z [8])

Jelikož se roztavený materiál nedotýká povrchu nádoby, nepoškozují se stěny tavného kelímku, a proto je možné zpracovávat i těžko tavitelné keramické materiály pro speciální užití například v optice nebo elektrotechnice. Z toho plyne další nesporná výhoda studeného kelímku oproti klasickým pecím, kde by byla výroba velice nákladná, jelikož by docházelo k poškození výstelky stěny pece a znečištění taveniny složkami z keramické vyzdívky.



Obr. 6.3: Ukázka tavení ve studeném kelímku (převzato z [24])

Samozřejmě je nutné se zmínit i o některých nevýhodách studeného kelímku. Pro tavení materiálů s nízkým měrným odporem jako je např. měď nebo hliník není vhodné použít studený kelímek, jelikož účinnost přenosu energie klesá s rostoucí konduktivitou kovu. Z finančního hlediska je pořízení technologie studeného kelímku velice nákladné. Většina nákladů spadá na pořízení tavicí pece včetně napájecího zdroje, zavedení technologie a údržbu během provozu.

8 Závěr

Účelem mé diplomové práce bylo podrobně zpracovat technologii tavení ve studeném kelímku. Při zpracování této technologie jsem čerpal z dostupných literárních a internetových zdrojů, kde většina byla psána v anglickém nebo německém jazyce, jelikož v českém jazyce na toto téma zatím neexistuje dostatek studií. Na základě získaných informací jsem vypracoval rešerši na toto téma.

V první části mé diplomové práce jsem se zabýval teorií indukčního ohřevu. Shrnul jsem zde elektromagnetické vlnění, které jsem odvozoval z Maxwellových rovnic. Dále jsem v této kapitole zmínil Poyntingův vektor a válcové elektromagnetické vlnění. Pro doplnění této kapitoly jsem uvedl některé aplikace indukčního ohřevu v praxi.

V další části jsem se věnoval historii a principu tavení ve studeném kelímku. Zmínil jsem také levitační tavení ve studeném kelímku. Podrobně jsem se pak zabýval tavením elektricky vodivých a nevodivých materiálů. Hlavním rozdílem mezi tavením těchto materiálů je, že u elektricky nevodivých materiálů je potřeba pro nastartování tavby využít startovacího materiálu, který předejde vsázku na potřebnou teplotu, aby se zvýšila její vodivost a následně mohlo proběhnout indukční tavení.

V praktické části mé diplomové práce jsem vytvořil 2D model studeného kelímku v softwaru Agros2D. Pro správné zobrazení fyzikálních polí bylo nutné provést diskretizaci oblasti. Tento software umožnil získat představu o rozložení magnetické indukce a jiných fyzikálních polích ve studeném kelímku. Rovněž jsem ho využil pro harmonickou analýzu intenzity magnetické indukce na frekvenci, která potvrdila závislost hloubky vniku magnetické indukce na velikosti budící frekvence. Pro přesnější simulaci fyzikálních polí studeného kelímku je nutné využít 3D software, jelikož Agros2D umožňuje pouze omezené zkoumání studeného kelímku.

V závěru mé diplomové práce jsem se zabýval stanovením energetické náročnosti tavení, kde pro správné stanovení je potřeba znát informace o druhu materiálu určeného pro tavení, rozměry vsázky, požadovanou hodinovou produkci odlévání a požadovanou finální teplotu. V případě tavení ve studeném kelímku je energetická náročnost vysoká v porovnání

s konvenčními pecemi s keramickým kelímkem. Indukční ohřev disponuje výkonovým přenosem, který se pohybuje okolo 10^4 W/cm². Výrazně tak převyšuje přenosové výkony jiných ohřívacích procesů jako např. sálání, konvekce či ohřevu plamenem.

Studený kelímk je progresivní technologie, která v budoucnu nalezne výrazné uplatnění v průmyslu. V současnosti limitují rozšíření této technologie malé rozměry kelímku. Nicméně oproti ostatním tavicím technologiím disponuje řadou výhod jako je např. vysoká čistota vytaveného materiálu, tavení při 3000 °C, možnost tavby elektricky nevodivých materiálů atd. Tyto výhody se pak uplatňují v praxi pro výrobu speciálních slitin pro letecký průmysl, výrobu syntetických diamantů, vitrifikaci jaderného odpadu, tavení křemíku pro výrobu solárních panelů či simulace havárie jaderného reaktoru.

Věřím, že mé zpracování diplomové práce poslouží jako plnohodnotná analýza tavení ve studeném kelímku a případným zájemcům poskytne dostatek informací o této technologii.

Použitá literatura a internetové odkazy

- [1] RADA, Josef. A KOLEKTIV. *Elektrotepelná: technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. ISBN 04-525-85.
- [2] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. 2. přep. a dop. vyd. Praha: Academia, 1979, 319 s. ISBN 509-21-857.
- [3] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. Plzeň: VŠSE v Plzni, 1982. ISBN 55-095-82.
- [4] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [5] Poynting vector. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012, 2012-12-17 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Poynting_vector
- [6] Levitational Melting of Several Kilograms of Metal with a Cold Crucible. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 30. NO. 6. *IEEE.org* [PDF, online]. 1994 [cit. 2012-10-22]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=334207&userType=inst>
- [7] ELEKTRO. *Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem* [online]. 2003 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25605
- [8] SUSEN. *Laboratoř studených kelímků* [online]. 2012 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/program-jpc/laborator-studenych-kelimku/>
- [9] ENPEDIE. *Studený kelímek* [online]. 2012 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: http://enpedie.cz/wiki/Studen%C3%BD_kel%C3%ADmek
- [10] 3pól. *Podivuhodný kelímek* [online]. 2004 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://3pol.cz/232-podivuhodny-kelimek>
- [11] AREVA. *The Cold Crucible: a world first for high-level waste* [online]. 2013 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://www.areva.com/EN/operations-3400/the-cold-crucible-a-world-first-for-highlevel-waste.html>
- [12] ČEZ. *KONEČNÁ LIKVIDACE* [online]. 1999 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/likvidace_4.html

- [13] POZNIAK, I., A. PECHENKOV, S. SUVOROV, A. ZUEV, B. NACKE, B. NIEMANN a KUDRYASH. INTERNATIONAL SCIENTIFIC COLLOQUIUM. *Liquid phase synthesis of lanthanum chromite in induction furnace with slitted copper crucible* [online]. 2008 [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: <http://www.modlab.lv/publications/mep2008/pdfs/333-338.pdf>
- [14] BEHRENS, Von Torge. *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters*. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier, 2007. ISBN 978-386-7274-050. Doktorská práce. Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- [15] MÜHLBAUER, Alfred. *History of induction heating and melting*. Essen: Vulkan, c2008, x, 202 p. ISBN 38-027-2946-3.
- [16] Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys. *Castings Technology International* [online]. 2007 [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>
- [17] REED, Scott. Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits. *Industrial Heating* [online]. 2001 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://directories.industrialheating.com/Articles/Feature_Article/a8f55bf8fbbb7010VgnVCM100000f932a8c0_____
- [18] *Cold Crucible Induction Melting Background and State of the Art* [online]. 2010 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.fissoreagency.com/pages/wp-content/uploads/2009/09/CCIM.pdf>
- [19] TOUMANOV, I. *Plasma and high frequency processes for obtaining and processing materials in the nuclear fuel cycle*. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, c2003, xix, 604 p. ISBN 15-903-3009-9.
- [20] ROT, D. a J. KOŽENÝ. ELECTROSCOPE. *Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku* [online]. 2010 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2010/Cislo4_2010
- [21] RAJMONT S.R.O. *Indukční ohřev - technologie* [online]. 2012 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/>
- [22] Co je indukční ohřev?. INDUCTOHEAT EUROPE. *INDUCTOHEAT* [online]. 2012 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z:

- http://www.inductoheat.eu/fileadmin/pdf/Was_ist_Induktion/was_ist_Induktion-CZECH.pdf
- [23] EFD INDUCTION. *Induction heating applications* [online]. 2012 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://www.efd-induction.com/~media/PDF/Applications/Applications.ashx>
- [24] DAWEI INDUCTION HEATING MACHINE CO.,Ltd. *INDUCTION MELTING FURNACE WITH COLD CRUCIBLE* [online]. 2012 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.induction-heating.com.cn/Technology/INDUCTION-MELTING-FURNACE-WITH-COLD-CRUCIBLE-163.html>
- [25] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
- [26] KANEKO, Terouki MISAWA a Kazuyoshi TABATA. R&D CENTER. *COLD CRUCIBLE INDUCTION CASTING OF SEMI-CONDUCTOR SILICON FOR SOLAR CELL* [online]. Osaka, 1990, 1990 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.induction-heating.com.cn/uploadfile/20121119/20121119145654700.pdf>
- [27] ZAJACOVÁ, Nikola. *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU Fakulta elektrotechnická.