

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Studený kelímek jako aktuální metoda tavení materiálů
elektromagnetickou indukcí**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

V této bakalářské práci je popsána metoda indukčního tavení ve studeném kelímku. V první části jsou uvedeny základní obecné poznatky o indukčních zařízeních. V další části se zabývá samotným studeným kelímkem, kde je popsána jeho základní konstrukce, proces tavení ISM, proces tavení elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů. Další část této práce pojednává o některých základních parametrech pro studený kelímek, které napomáhají kelímku ke správné funkčnosti. Závěrem jsou zhodnoceny získané poznatky o tomto způsobu tavení.

Klíčová slova

Indukční tavení, vsázka, studený kelímek, Maxwellovy rovnice.

Abstract

In this bachelor thesis the induction skull melting method is described. The first chapter deals with basic common information about inductive devices. Next chapter deals with cold crucible melting method. Cold crucible construction, induction skull melting process, process of melting electrical conductive and non-conductive materials are described. Basic parameters of inductive devices, which helped to correct work of this devices, are described in the third section. In the end the obtained knowledge about this form of inductive melting is summarized.

Key words

Induction melting, batch, cold crucible, Maxwell equations

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 7.6.2013

Marek Měkuta

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu profesorovi Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za rady a připomínky při zpracování tohoto tématu. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Stanislavu Jiřincovi také za pomoc při zpracování této práce.

V neposlední řadě patří i poděkování mým rodičům, kteří mě během celého zpracování práce podporovali.

Obsah

ÚVOD.....	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
1 ZÁKLADY INDUKČNÍHO OHŘEVU.....	4
1.1 MAXWELLOVY ROVNICE.....	4
1.2 POYNTINGŮV VEKTOR.....	7
1.3 HLOUBKA VNIKU NAINDUKOVANÝCH PROUDŮ.....	7
2 METODA STUDENÝ KELÍMEK	9
2.1 PROVEDENÍ KLASICKÉ KELÍMKOVÉ PECE	9
2.1.1 Indukční tavní pec kanálková.....	11
2.1.2 Studený kelímek jako cívka.....	12
2.1.3 Studený kelímek sestaven ze segmentů.....	12
2.2 PROCES TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU (ISM)	13
2.3 ÚČINNOST INDUKČNÍHO OHŘEVU	13
2.4 MATEMATICKÝ MODEL STUDENÉHO KELÍMKU	15
2.5 PROCES TAVENÍ ELEKTŘICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ	16
2.6 PROCES TAVENÍ ELEKTŘICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ.....	18
2.6.1 Tavení titanu ve studeném kelímku.....	18
3 STANOVENÍ VHODNÝCH PARAMETRŮ PRO INDUKČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	21
3.1 VOLBA FREKVENCE.....	21
3.1.1 Frekvence pro plochou vsázku.....	21
3.1.2 Frekvence pro válcovou vsázku.....	22
3.2 DOBA OHŘEVU VSÁZKY	23
3.3 PŘÍKON INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	23
4 ZÁVĚR	26
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	27

Seznam obrázků

OBR. 1: ROZLOŽENÍ INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE V ZÁVISLOSTI NA ARGUMENTU x_2 [4]	8
OBR. 2: ROZLOŽENÍ PROUDOVÉ HUSTOTY V ZÁVISLOSTI NA ARGUMENTU x_2 [4]	8
OBR. 3: KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ PECE „STUDENÝ KELÍMEK“ [7]	10
OBR. 4: INDUKTOR Z MĚDĚNÉ TRUBKY - OBDĚLNÍKOVÝ PRŮŘEZ	11
OBR. 5: KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ KANÁLKOVÉ PECE [7]	12
OBR. 6: SYMETRICKÁ ČÁST 3D MODELU KELÍMKU V ANSYSU [3]	16
OBR. 7: SKUTEČNÝ MODEL STUDENÉHO KELÍMKU POUŽÍVANÉHO V HANOVERU [3]	16
OBR. 8: STUDENÝ KELÍMEK SE STARTOVACÍM MATERIÁLEM [11]	18
OBR. 9: JEDNOKOMOROVÁ PEC PRO 10 KG VSÁZKU. [11]	19
OBR. 10: ODLITKY TITANU PŘI POUŽITÍ TAVENÍ STUDENÝM KELÍMKEM [11]	20

Seznam tabulek

TAB. 1: ORIENTAČNÍ HODNOTY HLoubKY VNIKU U OCELI A MĚDI V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCII[6].....	14
TAB. 2: ÚČINNOST INDUKČNÍHO OHŘEVU VÁLCOVÉHO TĚLESA V ZÁVISLOSTI NA HODNOTĚ POMĚRU D/A[6].....	14
TAB. 3: VAZKOST VODY V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ[2].....	15
TAB. 4: MĚRNÁ HMOTNOST MATERIÁLU[8]	17
TAB. 5: BOD TAVENÍ MATERIÁLŮ S VYSOKOU TEPLITOU TÁNÍ[10]	18
TAB. 6: HODNOTA FREKVENCE PRO RŮZNÉ PRŮMĚRY VÁLCOVÉ VSÁZKY[1].....	23
TAB. 7: DOBA OHŘEVU PRO RŮZNÉ PRŮMĚRY VSÁZKY[1]	23
TAB. 8: MĚRNÁ SPOTŘEBA ENERGIE RŮZNÝCH MATERIÁLŮ[1].....	25

Úvod

V současnosti, kdy jsou kladeny větší požadavky na vědeckotechnický rozvoj, se po celém světě uskutečňuje stále více procesů tepla elektrického z procesů tepla palivového. Již zmiňované teplo elektrické zvyšuje například kvalitu výrobků, efektivnost práce a další. Náklady na výrobu klesají a díky omezení používání paliva se zlepšují životní a pracovní podmínky a snižuje se vypouštění odpadních látek do okolního prostředí, takzvaná exhalace. Mechanizace a samočinné řízení výrobních linek elektrotepelných zařízení se stává mnohem jednodušší. Mnoho moderních výrobních technologií se zakládá právě na použití elektrického tepla a bez něj by nebyly realizovatelné. Můžeme se s ním setkat v automobilovém průmyslu, jaderné energetice, sklářském průmyslu, při výrobě hliníku, při přetavování speciálních kovů a v mnoha dalších aplikacích. V dnešní době neexistuje technologie, do které by elektrotepelná technika nezasáhla, popřípadě nezasahuje.

Zařízení, která využívají elektrického tepla, jsou v současné době velmi užitečná, protože mají velmi dobré vlastnosti. Jejich účinnost je velmi dobrá, lze u nich dosáhnout přesných libovolně nastavitelných teplot. Jednou z jejich dalších výhod je, že spotřebovávají energii jen v době, kdy pracují oproti zařízením palivovým, které spotřebovávají energii v době, kdy na nich není pracováno.

Historicky nejstarší elektrotepelná zařízení byla ve své podstatě velmi jednoduchá odporová a oblouková zařízení. Dnes již elektrická zařízení využívající elektrické teplo vytváří rozsáhlý technický a vědní obor s velmi rozšířenou problematikou. Toho si lze povšimnout už ze způsobu přeměny elektrické energie na teplo, kterou umožňují:

- a) dielektrická zařízení
- b) elektronová zařízení
- c) indukční zařízení
- d) laserová zařízení
- e) oblouková zařízení
- f) odporová zařízení
- g) plasmová zařízení

V této práci se budu zabývat indukčními zařízeními, a to konkrétně indukčními na tavení materiálů ve studeném kelímku. [1]

Seznam symbolů a zkratek

Označení	Název	Jednotky
E	Intenzita elektrického pole	V/m
H	Intenzita magnetického pole	A/m
D	Elektrické indukce	C/m ²
B	Magnetická indukce	T
Ψ	Elektrický indukční tok	C
Φ	Magnetický indukční tok	Wb
I	Proud	A
J	Hustota proudu	A/m ²
ϵ_0	Permitivita vakua	F/m
ϵ_r	Relativní permitivita	-
ρ	Hustota nábojů	C/m ³
γ	Elektrická konduktivita	S/m
μ_0	Permeabilita vakua	H/m
μ_r	Relativní permeabilita	-
v	Rychlost šíření vlnění	m/s
N	Poyntingův vektor	W/m ²
a	Hloubka vniku naindukovaných proudů	m
x_2	Argument cylindrické funkce	-
r	Poloměr vsázky	m
h	Vzdutí roztavené vsázky	m
K	Konstanta	-
f	Frekvence	Hz
η	Účinnost	-
D	Průměr induktoru	m
d	Průměr válcové vsázky	m
Re	Reynoldsovo číslo	-
ω	Úhlová rychlost	rad/s
P	Příkon	kW
m	Hmotnost	kg
t_c	doba cyklu	h
t_p	doba nečinnosti	h

Označení	Název	Jednotky
ρ_1	Měrný odpor induktoru	$\Omega \cdot m$
ρ_2	Měrný odpor materiálu ohřívaného tělesa	$\Omega \cdot m$
s	Měrná hmotnost kapaliny	N/m^3
g	Gravitační zrychlení	m/s^2
η	Vazkost kapaliny	$N \cdot s/m^2$
Z	Měrná hmotnost materiálu	kg/m^3
V_{st}	Objemové množství taveného materiálu	kg
g	Množství startovacího materiálu	kg

1 Základy indukčního ohřevu

Indukční ohřev je možný jen u elektricky vodivých materiálů. Tento materiál je vložen do střídavého magnetického pole a působením vířivých proudů se materiál zahřívá. Indukční ohřev můžeme jednoduše přirovnat k transformátoru. Za vsázku je v tomto případě bráno výstupní vinutí spojené do krátka. Na rozdíl od odporového ohřevu (nepřímý ohřev), kde se teplo do vsázky dodává tepelným spádem, v indukčním ohřevu teplo vzniká přímo ve vsázce, což patří k největším výhodám indukčního ohřevu. Teorie tohoto ohřevu je založená na Maxwellových rovnicích. [1] [5]

1.1 Maxwellovy rovnice

Jedná se o rovnice určující vlnový charakter elektromagnetického pole v každém bodě. Podstatou těchto jevů je jejich konečná rychlost při šíření. V opačném případě by šíření těchto jevů nebylo postupné a tím pádem by nevznikalo ani žádné vlnění. První rovnice (1.1) nám zobrazuje podstatu Ampérova zákona celkového proudu. Faradayův indukční zákon je uveden v druhé Maxwellově rovnici (1.2). Třetí z rovnic (1.3) nám představuje Gaussovu větu elektrostatiky. Čtvrtou (1.4) a poslední Maxwellovou rovnicí můžeme nazývat zákon spojitosti siločar magnetické indukce. V následujícím textu máme integrální vyjádření Maxwellových rovnic. [5]

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (1.3)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

(1.4)

Popis integrálními rovnicemi elektromagnetického pole má však obecnou platnost a analýza pole v tomto případě je velmi složitá. V mnoha případech analytické řešení výše uvedených rovnic neexistuje a tak musíme použít jiné numerické metody. Snazšího řešení pole dosáhneme zavedením diferenciálních rovnic na místo integrálních. Tato záměna rovnic s sebou ovšem přináší i nevýhody. Rovnice už nemají všeobecnou platnost, ale platí jen v oblastech, kde jsou vektory \mathbf{E} , \mathbf{H} spojitě:

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

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (1.7)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{H} = 0 \quad (1.8)$$

Po provedení rotace první rovnice (1.5) a dosazení za $\operatorname{rot} \mathbf{E}$ z druhé rovnice a drobných úpravách dostáváme první ze dvou rovnic elektromagnetického vlnění (1.9). V takovém případě jsou ε_r , μ_r a γ konstanty. Obdobně postupujeme pro zjištění elektrické složky vlnění. Provedeme rotaci druhé rovnice (1.6) a za $\operatorname{rot} \mathbf{H}$ dosadíme z rovnice první. Po drobných úpravách dostáváme druhou rovnici elektromagnetického vlnění (1.10). Pro elektricky nevodivé prostředí zanedbáváme konstantu γ a pro prostředí elektricky vodivé konstantu ε_r .

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

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

Volné náboje ρ nejsou také uvažovány. V následujících rovnicích je znázorněno, jak se rovnice (1.9) a (1.10) změní pro elektricky vodivé a elektricky nevodivé prostředí.

Pro nevodivé prostředí platí:

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

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

Pro vodivé prostředí platí:

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

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

Dále můžeme rovnice pro elektricky nevodivé prostředí upravit na následující tvar:

$$\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r} \cdot \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.15)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r} \cdot \nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.16)$$

Z vlnové rovnice v trojrozměrném prostoru vyplývá, že součinitel u $\nabla^2 \mathbf{H}$, případně u $\nabla^2 \mathbf{E}$ je roven v^2 , kde v je rychlost šíření vlnění v daném prostoru elektricky nevodivého prostředí:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (1.16)$$

1.2 Poyntingův vektor

Pomocí Poyntingova vektoru lze vyjádřit směr a hustotu elektromagnetické energie v prostoru. Zároveň slouží jako dobrá pomůcka při výpočtu indukčních ohřevů nebo také ztrát vinutí elektrických strojů a dalších. [1]

$$\mathbf{N} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad [W/m^2] \quad (1.17)$$

Jedná se o vektor, který je kolmý na rovinu, v níž leží E a H , které jsou v prostoru vždy na sebe kolmé. Můžeme ho také vnímat jako výkon, který vychází z obecného objemu V a připadá na jednotku plochy.

1.3 Hloubka vniku naindukovaných proudů

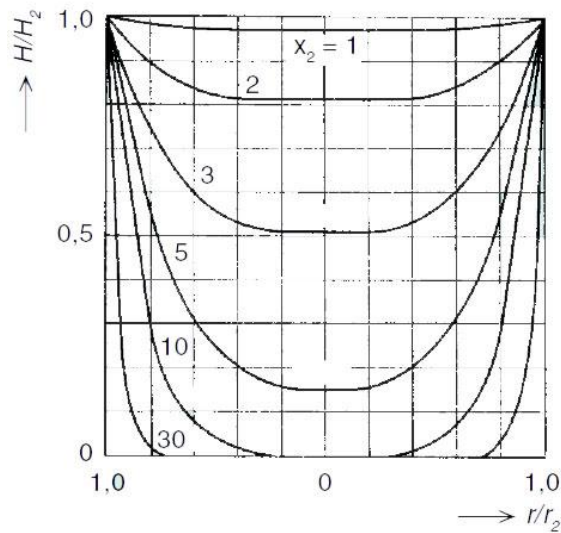
Pomocí Maxwellových rovnic uvedených výše můžeme určit intenzitu magnetického pole H a také hustotu proudu J . Hustota proudu není však rozložena ve vsázce rovnoměrně, ale v důsledku vyšších frekvencí klesá od povrchu směrem do středu vsázky.

Hloubkou vniku nazýváme takovou hodnotu, kdy hustota proudu klesne na 36,8 % hodnoty na povrchu (e^{-1} – Eulerovo číslo). Výpočet hloubky vniku bude uveden v následujícím vzorci:

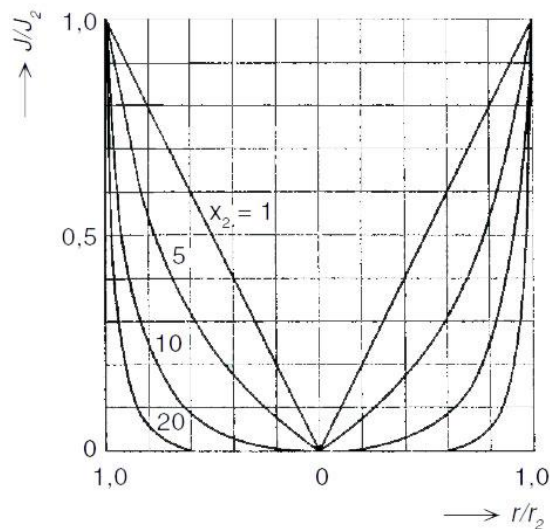
$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad [m] \quad (1.18)$$

V předešlém textu jsme zmínili veličiny H a J . Na následujících grafech se podíváme na rozložení intenzity magnetického pole v závislosti na argumentu x_2 a rozložení proudové hustoty v závislosti taktéž na argumentu x_2 pro válcovou vsázku, který je definován následujícím vztahem:

$$x_2 = \frac{r}{a} \cdot \sqrt{2} \quad (1.19)$$



Obr. 1: Rozložení intenzity magnetického pole v závislosti na argumentu x_2 [4]



Obr. 2: Rozložení proudové hustoty v závislosti na argumentu x_2 [4]

Argument x_2 se zvětšuje s rostoucí frekvencí, naopak hloubka vniku s rostoucí frekvencí klesá.

Intenzita magnetického pole H_2 má své maximum na povrchu vsázky (poloměr r_2). Ve stejném místě dosahuje svého maxima i proudová hustota J_2 . Jak lze z grafů vyčíst, tak pro malé hodnoty x_2 , tedy malé frekvence, je průběh intenzity magnetického pole H_2 téměř konstantní po celém průměru vsázky. O hustotě proudu za situace, kdy máme malou frekvenci, můžeme říci, že vzrůstá lineárně s rostoucím poloměrem.

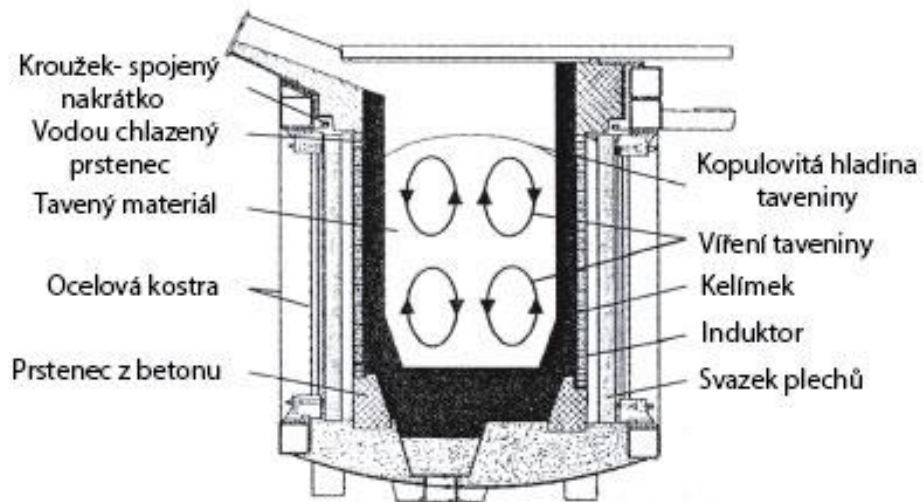
V neposlední řadě nutno zmínit, že u pecí, kde se používají vysoké kmitočty, mají průběhy H_2 a J_2 exponenciální průběh.[4]

2 Metoda studený kelímek

Po celém světě se zabývá řada renomovaných pracovišť metodou studeného kelímku jako indukčního tavení materiálů. Dosahování teplot až 3000°C patří mezi největší výhody tohoto způsobu ohřevu. Další z výhod, která tato metoda umožňuje, je zabránění kontaktu tavného materiálu s okolním prostředím. To je způsobeno tím, že se tavený materiál taví uvnitř sebe a na povrchu, kde se dotýká okolí (kelímku) nedochází k jeho tavení v důsledku stálého chlazení kelímku. Můžeme říci, že existují 2 typy studeného kelímku. V prvním případě je stěna kelímku tvořena samotným induktorem. V tomto případě musí být kelímek velmi dobře chlazen. Druhý typ kelímku je tvořen dutými měděnými vodiči, kterými protéká chladicí medium, v tomto případě voda. Studený kelímek se převážně používá pro tavení materiálů se špatnou elektrickou vodivostí. Mezi takové materiály například patří oxidy kovů a sklo. [3]

2.1 Provedení klasické kelímkové pece

Kruhová ohřívací cívka, která je tvořena dutým měděným vodičem, je navinuta jednovrstvově. Dutý vodič je nejčastěji čtverhranného průřezu a v jeho dutině protéká chladicí kapalina. Kelímek uvnitř pece se vyrábí převážně z křemičitého písku. Po celém obvodu jsou svíselně uspořádány svazky elektrotechnických plechů, které mají za úkol svádět magnetický tok vně cívky. Vně cívky se tok zavádí z důvodů, aby nezasahoval do konstrukčních částí pece. Dále pec obsahuje měděný plech, který stíní magnetickému toku cívky a tím zabraňuje jeho vnikání do mřížového dna pece. Mezi další konstrukční části kelímkové pece patří středící žárucementové trámce pro cívku, ocelový plášť pece, cihlová keramická vyzdívka na dně pece, hubice pro odlévání a osa pece. Během vyklápění se kolem této osy kelímková pec otáčí. V indukčních tavicích pecích lze tavit různé kovy a zejména se zde vyrábí oceli vysoké kvality. [1]

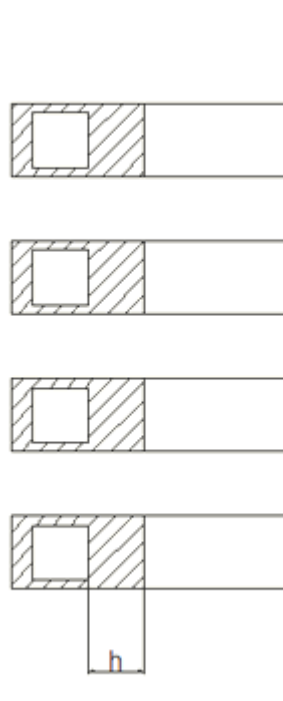


Obr. 3: Konstrukční provedení pece „studený kelímek“ [7]

Mezi největší výhody kelímkových pecí patří silné vříšení tekutiny za pomoci elektrodynamických sil. Tlak magnetických sil působících na vsázku má za následek, že v taveném materiálu vzniká u stěn kelímku podtlak a naopak v ose taveného materiálu přetlak. Vlivem hydrostatických sil se tavenina vzdouvá ve středu kelímku a vtéká k jeho stěnám. Vzduší můžeme vyjádřit následující rovnicí:

$$h = K \frac{N}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \gamma}{f}} \quad (2.1)$$

Pece mívají různé velikosti a to dle obsahu kelímku, který se pohybuje od 10 kilogramů až do obsahu kelímku 100 tun. S velikostí kelímku se mění i frekvence napájecího proudu. Frekvence se tedy může pohybovat od hodnot síťových frekvencí (50 Hz) až do 10 kHz. Tloušťka vnitřní stěny trubky h (obr. 2), o které se dá říct, že vede téměř všechny proud, se s rozměry kelímku také mění. Pohybuje se v rozmezí 1,5 až 4mm. Optimální tloušťka stěny vodiče je $\frac{\pi}{2} \cdot a$. Při této tloušťce vychází činný odpor nejmenší. U pecí se síťovou frekvencí nám tloušťka trubky narůstá až na hodnotu 15mm. [1]

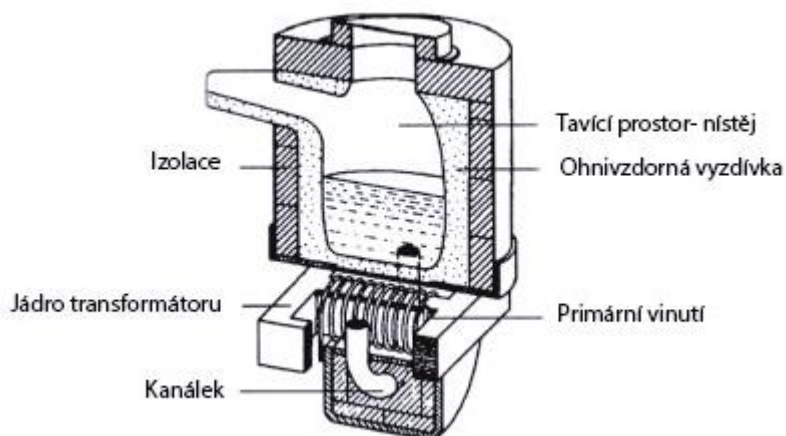


Obr. 4: Induktor z měděné trubky- obdélníkový průřez

2.1.1 Indukční tavící pec kanálková

Vedle pecí kelímkových existují také pece kanálkové. Provedení takové pece můžeme vidět na obr. 3. Tyto pece se staví pro frekvenci 50 Hz a jejich hlavní využití je ve slévárnách litin a neželezných kovů. Zde slouží jako pece udržovací. Do nístěje, která je vybavena ohnivzdornou vyzdívkou, se nalézá tavenina. Primární indukční cívka, která je navinuta na feromagnetickém jádru, je umístěna pod nístějí. Princip takovéto pece spočívá v tom, že induktor je složen z kanálku, který je vyveden do taveniny. Kov, uvnitř kanálku, slouží jako sekundární vinutí, které je spojeno nakrátko, a díky elektromagnetickým silám nabývá tavenina pohybu z kanálků do nístěje. Tento jev má za následek dobré a intenzivní promísení taveného materiálu.

Do kanálkových pecí se musí lít již roztavený materiál, což patří mezi jejich velké nevýhody.



Obr. 5: Konstrukční provedení kanálkové pece[7]

2.1.2 Studený kelímek jako cívka

Typ takového kelímku je tvořen cívkou s jedním závitem, popřípadě uloženo více těchto cívek nad sebou. Využívá se především pro tavení materiálů se špatnou elektrickou vodivostí (oxidy, keramika, sklo). Tavení probíhá od jádra materiálu směrem k jeho povrchu, kde zůstává skořápka taveného materiálu. Okolo materiálu se nachází závit chlazené cívky.

Výhodou u tohoto způsobu provedení je vysoká elektrická účinnost a malé ztráty. Dále odpadá problém naindukovaných proudů v kelímku a odpadají ztráty v mědi. Cívka tvořící přímo stěnu kelímku má účinnost okolo 50 %. Účinnost kelímku složeného z jednotlivých segmentů dosahuje zhruba 33%.

Mezi nevýhody patří celkem složitá konstrukce takového kelímku. Kelímek musíme velmi intenzivně ochlazovat, protože dochází ke styku tavené vsázky se stěnou kelímku. Napájíme napětím 1000 V, aby nedošlo ke zkratu na vstupních svorkách cívky. [13]

2.1.3 Studený kelímek sestaven ze segmentů

Základem konstrukce je kelímek a vodou chlazený induktor. Kelímek je sestaven z jednotlivých segmentů nebo dutých trubek. Segmenty mohou mít různé tvary (obdélník, válec). Konstrukčními prvky kelímku jsou nemagnetické kovy (nerezová ocel, hliník, měď). O těchto segmentech již bylo zmiňováno v kapitole 2.1. Abychom udrželi tavený materiál uvnitř kelímku, musí být mezi jednotlivými segmenty minimální mezery. Velikost mezer se zpravidla volí 1 mm. V praxi se vyskytují běžně kelímky s několika desítkami segmentů. Kelímek tvořený segmenty je znázorněn na obr. 7. Jelikož mezi stěnami kelímku a taveným materiálem dochází k elektrickému kontaktu, tak dochází ke snížení tepelné účinnosti. Magnetické pole v tomto případě prochází mezi segmenty v jejich mezerách a budí elektrický

proud. Proud je uzavřen přes jednotlivé segmenty a mezery mezi nimi. Zvýšení účinnosti dosáhneme použitím izolantu pro tavení v tomto kelímku. Účinnost při tavení špatně elektricky vodivých materiálů zde dosahuje až 90%. Proces tavení je obdobný jako u tavení elektricky vodivých materiálů. Nastává zde však problém s nastartováním tavení vsázky. Tato problematika je řešena dále v kapitole 2.5. [13]

2.2 Proces tavení ve studeném kelímku (ISM)

Tavení ve studeném kelímku (Induction Skull Melting) je metoda tavení kovů v oddělených, vodou chlazených měděných nádobách. Tyto nádoby jsou umístěné uvnitř indukčních cívek. Jsou uloženy ve vakuu nebo řízené atmosféře. Kelímek může být tvořen segmenty, které jsou chlazeny vodou, nebo „prsty“. Magnetické pole, které vytváří cívka, prochází skrz kelímek. Tento fakt má za následek ohřev materiálu až k jeho roztavení. Mezi další činnosti magnetického pole patří intenzivní promísení tavené směsi. Tenká vrstva kovu se usazuje na stěnách kelímku a vytváří skořápku. Tenká vrstva s malou rychlostí pohybu společně se skořápkou a také rozhraní mezi kelímkem a skořápkou tvoří tepelný odpor. Tento odpor zabraňuje šíření tepla ze vsázky do studených stěn kelímku. [12]

Správná konstrukce a výpočet kelímku, frekvence, cívky a zdroje energie vede k vtlačování obálky taveného materiálu do jeho středu dál od stěn kelímku. Lze říci, že stěny vsázky jsou podporovány magnetickým polem. Absence fyzického kontaktu mezi stěnou kelímku a vsázkou zamezuje vzniku zkratu a zároveň snižuje tepelné ztráty.

Indukční zdroj, který zajišťuje dodávku energie, musí být navržen na správnou frekvenci a dodávku energie, aby vyhovoval ISM. [12]

2.3 Účinnost indukčního ohřevu

Účinnost je především závislá na tvaru induktoru, který může být válcový, lineární nebo plochý. Indukční vazba induktoru se vsázkou musí být co nejtěsnější. Tento požadavek zařídí vhodné geometrické uspořádání induktoru. Tvar induktoru by měl co nejvíce odpovídat tvaru vsázky. Vhodnému uspořádání lze napomoci nastavci z transformátorových plechů nebo feritu. K určení účinnosti dostatečně poslouží následující vztah:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \cdot \left(1 + 6,25 \cdot \frac{a^2}{d^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}}$$

(2.2)

Člen $\left(1 + 6,25 \cdot \frac{a^2}{d^2}\right)$ musí být co nejmenší. V ideálním případě u něj můžeme dosáhnout hodnoty 1,1. Musíme tedy volit takovou frekvenci, aby hloubka vniku na indukovaného proudu a nepřesahovala jednu osminu průměru d . [6]

$$\frac{a}{d} \leq \frac{1}{\sqrt{62,5}} = \frac{1}{8}$$

(2.3)

Minimální frekvenci tedy budeme volit podle vztahu:

$$f_{min} = 16 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho}{\mu d^2}$$

(2.4)

Pro větší přehlednost jsou přiloženy tabulky, kde lze vidět závislost hloubky vniku na frekvenci a účinnost indukčního ohřevu v závislosti na poměru d/a . [6]

Tab. 1: Orientační hodnoty hloubky vniku u oceli a mědi v závislosti na frekvenci [6]

Materiál	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}$]	Poměrná permeabilita	Hloubka vniku na indukovaného proudu a [mm]						
			50 Hz	500 Hz	5 kHz	50 kHz	500 kHz	5 MHz	50 MHz
ocel 20°C	0,16	20	6	2	0,6	0,2	0,06	0,02	0,006
ocel 800°C	1,2	1	75	14	7,5	2,4	0,75	0,24	0,075
měď 20°C	0,02	1	10	3	1	0,3	0,1	0,03	0,01
měď 600°C	0,7	1	18	5,8	1,8	0,6	0,18	0,06	0,18

Tab. 2: Účinnost indukčního ohřevu válcového tělesa v závislosti na hodnotě poměru d/a [6]

d/a	8	6	4	2	1	0,6	0,4
účinnost[%]	95	85	65	30	10	4	1

Mezi závity, které jsou izolovány mikafoliovou páskou, jsou mezery, do kterých jsou vloženy izolační vložky. Tyto vložky mají zajistit, aby namáhání izolace bylo zhruba 15V/mm. Chladicí voda, která protéká dutinou trubky, se pohybuje rychlostí 1,5 až 2 m/s. Teplota vody by se měla pohybovat okolo 60°C, aby nedošlo k tomu, že voda dosáhne v některých místech bodu varu a pára by tak zabránila průtoku vody. To by vedlo ke zničení cívky v krátkém časovém intervalu. Chladicí voda odvádí elektrické ztráty a teplo, které prochází stěnou kelímku. Toto teplo může dosahovat teplot až 1650°C. Voda by se měla

v dutině pohybovat turbulentně. Tohoto efektu lze docílit splněním podmínky, kdy Reynoldsovo číslo Re bude větší než 2320. [6]

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot s}{\eta \cdot g} > 2320 \quad (2.5)$$

Kde v je střední rychlost vody, d průměr trubky, s je měrná hmotnost kapaliny, gravitační zrychlení je pod symbolem g ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) a symbolem η je označena vazkost kapaliny.

V tab. 3 se můžeme podívat na závislost vazkosti kapaliny na teplotě.[2]

Tab. 3: Vazkost vody v závislosti na teplotě[2]

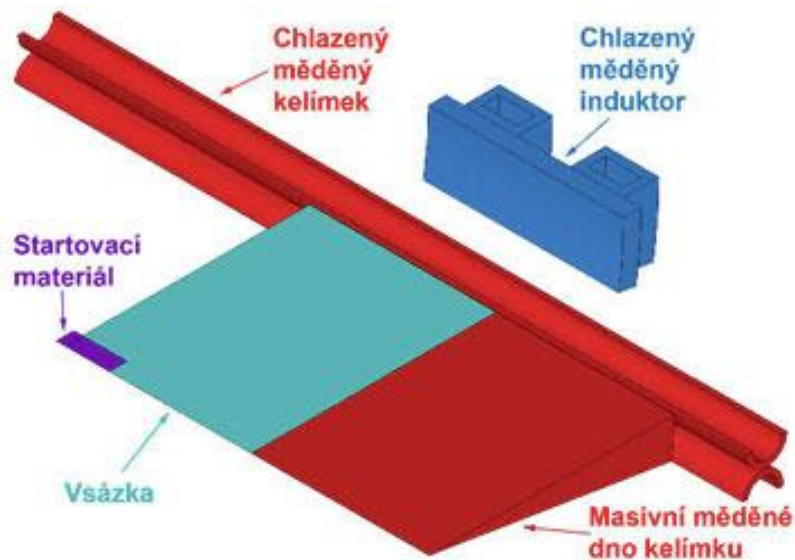
Teplota	0	20	50	80	100
Vazkost	182,3	102,4	56	36,2	$28,8 \cdot 10^{-6}$

2.4 Matematický model studeného kelímku

Matematický model kelímku se řeší velmi obtížně. Výpočet elektromagnetického pole a teplot se provádí řadou diferenciálních rovnic, které jsou ke všemu nelineární a parciální. Koeficienty v rovnicích, které udávají materiálové vlastnosti, se vlivem změny teploty také mění. Mezi tyto koeficienty například patří vodivost materiálů, jak tepelná, tak i elektrická. Dále mezi tyto koeficienty můžeme zařadit permeabilitu feromagnetických materiálů. V případě užití metody konečných prvků se velmi obtížně určují okrajové podmínky.

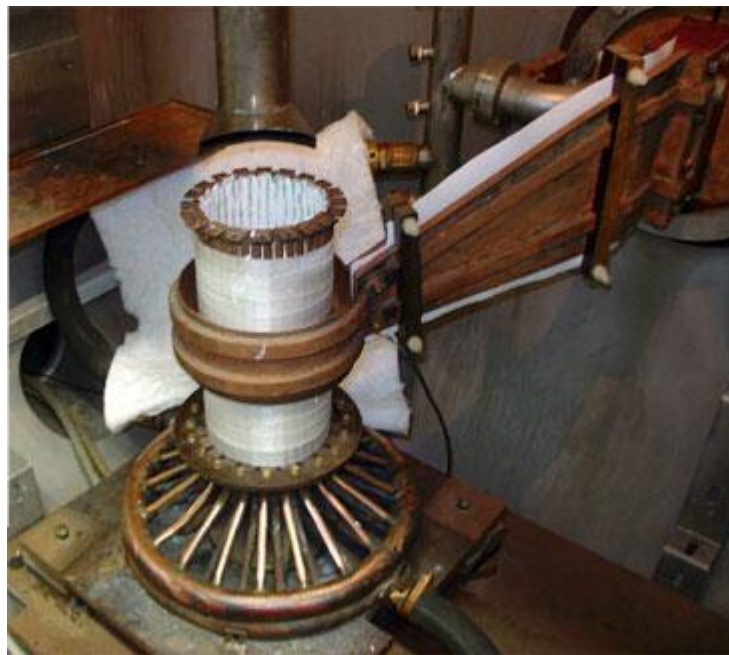
V neposlední řadě jsou výpočetní programy, které mohou stát stovky tisíc korun, náročné na počítačové vybavení a také na čas. Pro konkrétní případy však mohou být sestaveny i daleko levnější a jednodušší výpočetní programy, které se uplatní i u normálních uživatelů.

Mezi programy v nichž lze simulovat studený kelímek patří například ANSYS. Na obr. 4 uvidíme 3D model reálného kelímku používaného v Německu na univerzitě v Hanoveru. [3]
[6]



Obr. 6: Symetrická část 3D modelu kelímku v ANSYSu[3]

Pro lepší představu části 3D modelu je na dalším obrázku znázorněn skutečný používaný model studeného kelímku používaného v Hanoveru.[3]



Obr. 7: Skutečný model studeného kelímku používaného v Hanoveru[3]

2.5 Proces tavení elektricky nevodivých materiálů

Proces tavení materiálů s nízkou elektrickou vodivostí (IMCC) je založen na bezkontaktním transformování energie do taveného materiálu při vysoké frekvenci elektromagnetického pole o vysoké intenzitě. Nevodivé materiály mají za normálních teplot velmi nízkou elektrickou vodivost. Z tohoto důvodu musíme zavést startovací proces.

Startovací proces je nejdůležitější součástí tohoto tavení. V průběhu tavení se poté přidávají do materiálu takové směsi, aby byl dosažen požadovaný objem. V závěru procesu je tavený materiál udržován v rovnovážném stavu pro dokončení celého tavicího procesu.

Touto metodou vznikají chemicky velmi čisté materiály. Tato vlastnost je způsobena již zmiňovaným bezkontaktním tavením materiálu za vysoké teploty.

Jeden ze způsobů startovacího procesu spočívá v přidání malého množství kovu (kovové hobliny, šrot). Tento přidaný materiál se za určitých podmínek může vznítit. Tento způsob tavení je vhodný například pro materiály jako Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 .

Nevýhodou tohoto procesu já vzájemná reakce kovů s kyslíkem. To může mít za následek vzplanutí kovů za určité teploty a znečištění vsázky. Z tohoto důvodu je velmi důležité volit správné přísady během procesu pro jednotlivé typy materiálů.

Pro určení minimálního množství přidaného kovu vycházíme z následujícího vzorce. [8]

$$g = Z \cdot V_{st} \quad (2.6)$$

V_{st} zde symbolizuje objemové množství taveného materiálu a symbol Z je měrná hmotnost materiálů. [8]

Tab. 4: Měrná hmotnost materiálu [8]

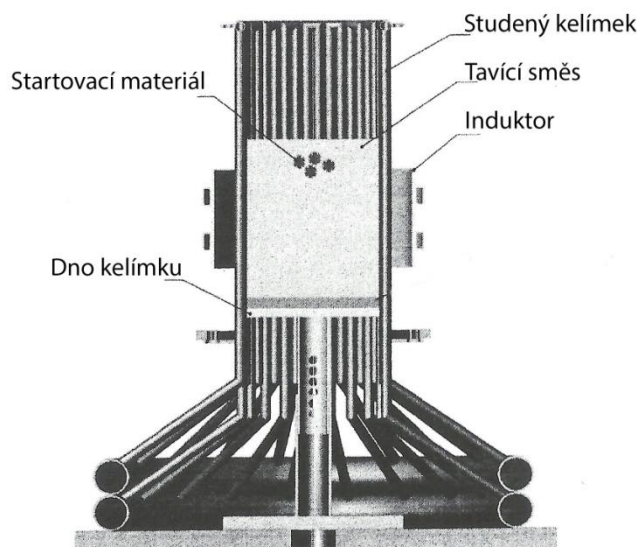
Materiál	Berylium	Hliník	Skandium	Titan	Chrom	Ytrium	Zirkon	Niob	Lanthan
Z[kg/m ³]	4220	480	515	580	1220	985	1150	1170	1210

Přidáním většího množství startovacího kovu, než je hraniční hodnota, může mít za následek roztavení celé vsázky, kromě vnějšího obalu, který doléhá na stěnu chlazeného kelímku.

Druhým způsobem startovacího procesu je vložení elektricky vodivého kroužku, který je pod povrchem vsázky a je ohříván elektromagnetickým polem induktoru. Startovací proces končí tehdy, když indukční systém přestane reagovat na kroužek umístěný ve vsázce. Po dokončení procesu je kroužek vyjmut z okolí vsázky. [8]

Dalším způsobem tavení elektricky nevodivých materiálů, je tavení pomocí plazmy. Plazma je plyn, který se skládá z negativních a pozitivních iontů, elektronů a také vybuzených a neutrálních atomů a molekul. Mezi nejčastěji používané typy plazmových plynů patří argon, vodík, dusík a kyslík. Princip plazmového hořáku spočívá v přeměně elektrické energie na tepelnou. Stabilizace elektrického oblouku patří mezi důležité parametry toho typu tavení. Stabilizace může být buď plynová nebo vodní. Plazmový hořák s netransferovým obloukem

se používá právě pro ohřev elektricky nevodivých materiálů. Elektrický oblouk hoří mezi elektrodou a výstupní tryskou, která je brána jako anoda.[9]



Obr. 8: Studený kelímk se startovacím materiálem[11]

2.6 Proces tavení elektricky vodivých materiálů

Elektricky vodivé materiály a jejich sloučeniny, které jsou taveny ve studeném kelímku, se vyznačují vysokým bodem tavení. Mezi takové materiály lze zařadit například Titan, Wolfram, Molybden, Zirkon a další. U tavení těchto materiálů odpadá startovací proces, protože materiály mají dostatečně velkou elektrickou vodivost.[10]

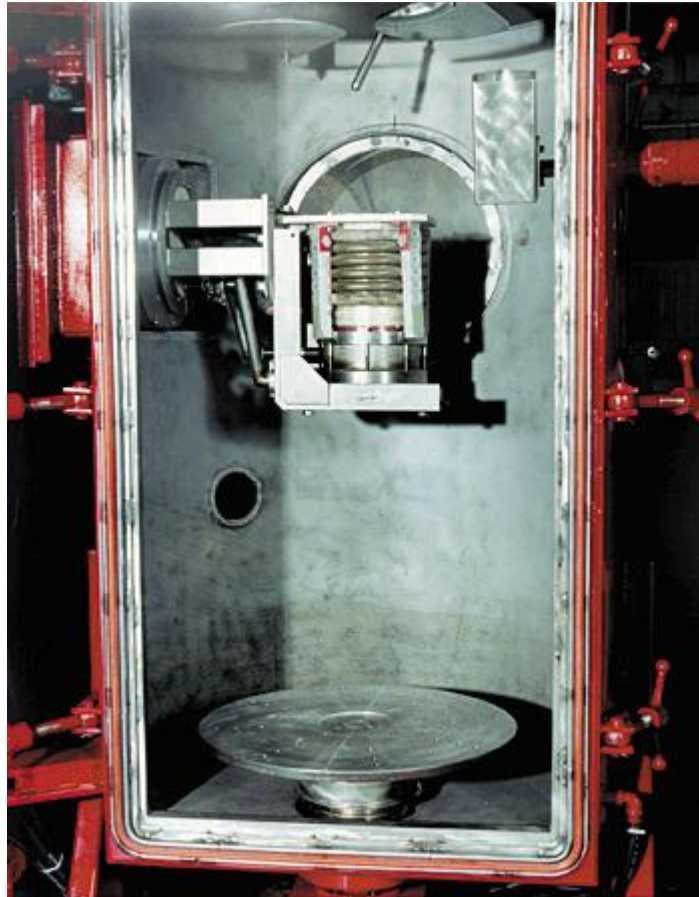
Tab. 5: Bod tavení materiálů s vysokou teplotou tání[10]

Materiál	Titan	Wolfram	Křemík	Molybden	Zirkon
Bod tavení [°C]	1725	3410	1414	2625	1830

2.6.1 Tavení titanu ve studeném kelímku

Jak již bylo výše zmíněno, mezi elektricky vodivé materiály tavené ve studeném kelímku patří i titan. Díky jeho dobrým vlastnostem je titan používán v mnoha oborech, kde ostatní kovy nemohou být užity. Slitiny jsou často používány v letectví a velmi stabilních konstrukcích vlivem velké pevnosti a nízké váhy titanu. Titan má i dobré chemické vlastnosti. Mezi ně patří například odolnost vůči kyselině dusičné, chlóru a halidovým solím. Nevýhodou titanu je jeho vysoká cena. Vysokou cenu zapříčiňuje například ten fakt, že titan

je silně reaktivní s kyslíkem a dusíkem a proces tavení musí probíhat ve vakuu. A právě tavení ve studeném kelímku může tuto nevýhodu eliminovat. Oproti klasickému indukčnímu tavení vede tavení touto metodou k mnohem kvalitnějšímu výstupu výroby. Zároveň se i pomocí této metody dá recyklovat kovový šrot. [11]

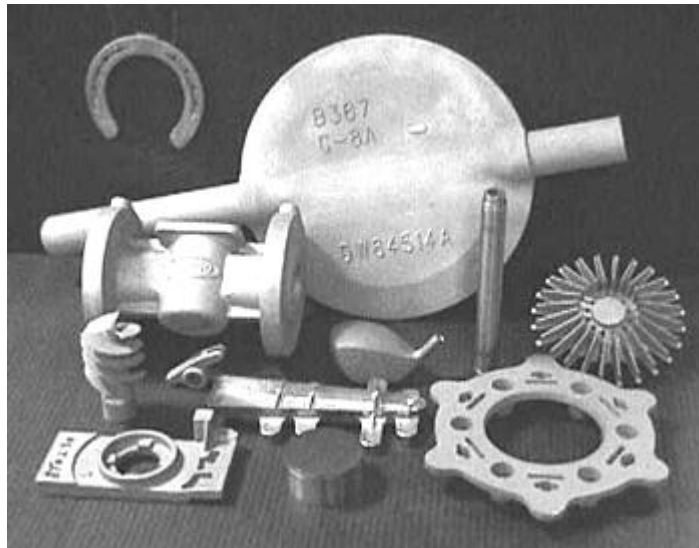


Obr. 9: Jednokomorová pec pro 10 kg vsázku. [11]

Výroba forem pro odlévání titanu je velmi podobná výrobě forem pro odlévání železa. Rozdíl je akorát v typu použitých materiálů pro formy. V případě železa je používán oxid hliníku, křemíku a zirkon. Tyto oxidy nejde použít pro formy na odlévání titanu, protože titan má silnou afinitu ke kyslíku. Výsledkem by byl vznik vrstvy reaktantů. Tato vrstva zapřičiňuje vznik trhlin, obzvláště u tvrdších slitin titanu (Ti-6Al-4V). Předjetí těmto problémům lze použitím thoria, yttria a oxidů zirkonu pro odlévací formy.

Výhodou tavení ve studeném kelímku je poměr kvality výrobku vzhledem k výrobním nákladům. Větší obsah kyslíku v odlitcích titanu zapřičiňuje jeho větší tvrdost. Tento fakt musí být pečlivě hlídán u prvotních materiálů. Tavení ve studeném kelímku umožňuje jednodušší přidávání příměsí přímo do taveniny a legování titanu. Roztavený kov vydrží delší dobu, a to konkrétně než se roztaví ostatní příměsí, jako je například wolfram. Po nalití

roztaveného materiálu do formy zůstává v kelímku tenká krusta, kterou lze snadno odstranit. Díky tomuto faktu se nám krátí příprava pro tavení jiné slitiny (po 40 kg čistého titanu může okamžitě následovat tavení 40kg Ti-6Al-4V a s krátkou časovou prodlevou může být tavena 40 kg vsázka zirkonu bez možnosti vzájemné kontaminace materiálů). Potřebný čas pro nalití jedné a druhé taveniny může být pouhých 6 minut.[11]



Obr. 10: Odlitky titanu při použití tavení studeným kelímkem[11]

3 Stanovení vhodných parametrů pro indukční zařízení

Při používání indukčních zařízení je důležité si uvědomovat určité věci, které musí být splněny, aby tato zařízení fungovala tak, jak mají.

3.1 Volba frekvence

Volba frekvence je důležitou součástí pro efektivní tavení materiálů. Při použití nízké frekvence může nastat průzařnost materiálu. To následně vede k jeho špatnému prohřívání a to vede k nepříznivé energetické bilanci. Naopak, je-li použita frekvence příliš vysoká, tak se teplo bude akumulovat jen na povrchu vsázky. Vnitřek vsázky se bude poté ohřívat jen vedením tepla. V tomto případě narůstají tepelné ztráty, které se šíří směrem z povrchu do okolí. [1]

3.1.1 Frekvence pro plochou vsázku

U plochých vsázek se nejlepší efektivnosti dosahuje za předpokladu, jestliže poměr tloušťky desky a hloubky vniku je větší než 2 ($d/a > 2$). Je-li hodnota menší, tak se vsázka stává méně nebo více průzařnou.

Nejmenší použitelná frekvence u ploché vsázky je tedy $d/a=2$. Pomocí hloubky vniku si tedy odvodíme vzorec pro minimální frekvenci. [1]

Hloubka vniku:

$$a = \frac{d}{2} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (3.1)$$

Umocnění vztahu dostáváme:

$$\frac{d^2}{4} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad (3.2)$$

Poté už můžeme dovést vzorec pro minimální frekvenci:

$$f_{min} = \frac{4}{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad (3.3)$$

3.1.2 Frekvence pro válcovou vsázku

U odvozování nejnižší frekvence pro válcovou vsázku postupujeme ze vztahu pro její vnější průměr (3.4).

$$r_2 = \frac{3 \cdot a}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

Za hloubku vniku a dosadíme ze vzorce (3.1):

$$r_2 = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (3.5)$$

Tuto rovnici opět umocníme a získáváme vztah:

$$r_2^2 = \frac{9}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad (3.6)$$

A nyní si jen vyjádříme frekvenci:

$$f_{min} = \frac{9}{2\pi \cdot r_2^2 \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad (3.7)$$

Lze říci, že nejnižší frekvence je téměř stejná pro válec o poloměru r_2 a stěnu o tloušťce d . Nejvyšší možná frekvence by měla být maximálně šestinásobek frekvence minimální.

Volba frekvence pro válcovou vsázku tvořenou z konstrukčních ocelí se uvádí při teplotě zhruba 1 200°C. V případě teploty, která by byla nižší než 1000°C, by členy γ a μ_r dosahovali daleko větších hodnot a tím pádem by se minimální frekvence změnila.

V následující tabulce jsou uvedeny frekvence zmiňovaných konstrukčních ocelí různých průměrů při teplotě okolo 1200°C:

Tab. 6: Hodnota frekvence pro různé průměry válcové vsázky[1]

Průměr d [mm]	Frekvence f[Hz]
13-30	10 000
22-60	4 000
35-100	2 000
50-150	1 000

3.2 Doba ohřevu vsázky

Po zvolení frekvence pro různé průměry vsázek je nasnadě uvést dobu ohřevu, která zajistí rovnoměrnost prohřátí. V praxi se volí doba zhruba o 50% větší, než bude uvedeno v následující tabulce. Ovšem delší doba ohřevu má za následek větší tepelné ztráty, ovšem bez změny elektrické účinnosti ohřevu. [1]

Tab. 7: Doba ohřevu pro různé průměry vsázky[1]

Průměr d [mm]	Doba ohřevu t
20	15 s
30	30 s
40	50 s
50	70 s
60	100 s
70	2,5 min
80	3,5 min
90	4,3 min
100	5,5 min
110	6,5 min
120	8 min
130	9 min
140	11 min
150	12,5 min

3.3 Příkon indukčního zařízení

Při určování příkonu vycházíme z průměrného tepla, které obsahuje 1 kilogram oceli ohřáté z pokojové teploty na 1200°C. Tato hodnota je rovna 0,220kWh. Dále musíme uvést hodnotu celkové provozní účinnosti, která je vztažena vzhledem k napájecímu zdroji. Jako hodnotu takové účinnosti udáváme 0,65. Z předchozích dvou hodnot nám vychází, že pro

ohřátí 1 kilogramu oceli musíme dodat teplo 0,338kW.h. Při plynulém ohřevu materiálu o hmotnosti m nám bude vycházet příkon za 1 hodinu ohřevu takto:

$$P = m \cdot 0,338 [kW; kg \cdot h^{-1}, kW \cdot h \cdot kg^{-1}] \quad (3.8)$$

Přejdeme-li k praktickému určování příkonu, volíme příkon s určitou rezervou. Tato rezerva mění původní hodnotu 0,338 na rozmezí hodnot od 0,35 do 0,45.

$$P = m \cdot (0,35 \text{ až } 0,45) [kW; kg \cdot h^{-1}, kW \cdot h \cdot kg^{-1}, s] \quad (3.9)$$

V případě, že se během cyklu ohřevu vyskytnou přestávky, tak vzorec (3.9) dostává další modifikaci, která bude následně uvedena:

$$P = m \cdot (0,35 \text{ až } 0,45) \cdot \frac{t_c}{t_c - t_p} [kW; kg \cdot h^{-1}, kW \cdot h \cdot kg^{-1}, s] \quad (3.10)$$

Kde t_c je doba jednoho ohřívacího cyklu indukčního zařízení a doba t_p vyjadřuje časový interval, kdy zařízení nepracuje.

Pro výpočet příkonu ze sítě o frekvenci 50 Hz se udává nejvyšší z hodnot (0,45). Tato hodnota se zde udává z důvodu vzniku ztrát v měničích frekvence, transformátorů a dalších zařízení, které jsou využívány u indukčních zařízení.[1]

$$P = m \cdot 0,45 \cdot \frac{t_c}{t_c - t_p} [kW; kg \cdot h^{-1}, kW \cdot h \cdot kg^{-1}, s] \quad (3.11)$$

Výpočet příkonu indukčního zařízení pro zpracování hliníku, mědi a jejich slitin se počítá s koeficientem 0,25.

V následující tabulce (tab.8) bude uvedena měrná spotřeba elektrické energie pro tavení materiálů v různých typech (co se frekvence týče) indukčních zařízení.

Jak uvidíme, tak podle velikosti hodnot bude vždy výhodnější použít pece na frekvenci 50 Hz (nízkofrekvenční). Ale v potaz musíme brát i velikost kusů vsázky a to celou situaci značně komplikuje. Lze říci, že frekvence se mění v nepřímé úměře vzhledem k velikosti vsázky. Čím jsou kusy vsázky menší, tím větší musí být frekvence s ohledem na průzařnost materiálu. Ovšem může nastat i situace, kdy při tavení drobného šrotu síťovou frekvencí vsázka ztratí

magnetičnost a není stále roztavená. V takovém případě je mnohem lepší použít pec středofrekvenční (150Hz-20kHz), která rychleji natavuje a dosahuje velkých měrných příkonů, aniž by byl kelímek více opotřebován vířením kovů.

Středofrekvenční pece jsou upřednostňovány před pecemi síťovými z důvodu lepších vlastností tyristorového měniče, který se používá právě u pecí středofrekvenčních.[1]

Tab. 8: Měrná spotřeba energie různých materiálů[1]

Materiál	Pec středofrekvenční [kW.h.t ⁻¹]	Pec nízkofrekvenční [kW.h.t ⁻¹]
hliník	600-700	600-650
litina	520-650	500-650
měď	380-400	350
mosaz	360-400	330-350
nikl	620-700	600-710
ocel	600-750	370-700

Z údajů uvedených v předchozí tabulce se pro požadované množství vytaveného materiálu za interval 1 hodiny stanoví příkon a obsah pece. Nezbytnou podmínkou je i respektování technologických zvláštností výroby a dalších faktorů. V neposlední řadě pro správný návrh indukčního tavicího zařízení jsou potřeba znalosti a zkušenosti. [1]

4 Závěr

Řešením této bakalářské práce mělo být docíleno základního nastínění tématu indukčního tavení metodou studeného kelímku. Úvod práce byl věnován teorii indukčního ohřevu, kde byly zmíněny: Maxwellovy rovnice, hloubka vniku a další věci, které jsou úzce spojeny právě s indukčním ohřevem a tavením materiálů. V další části práce byl popsán studený kelímek. Bylo zmíněno jeho konstrukční provedení, proces tavby ve studeném kelímku, jak pro elektricky vodivé, tak elektricky nevodivé materiály. Bylo zde i zmíněno rozdílné startování procesu tavby pro tyto materiály. Pro elektricky špatně vodivé materiály musí být při startu vložen například kus vodivého materiálu, aby došlo ke zvýšení elektrické vodivosti uvnitř kelímku. Informace byly čerpány z knih, které poskytla knihovna Západočeské univerzity v Plzni, ale i z českých i zahraničních publikací na internetu.

Metoda tavení materiálů studeným kelímekem je poměrně mladá. V současnosti se touto metodou zabývá řada renomovaných pracovišť po celém světě, a tak se získávají nové poznatky, které v budoucnosti napomohou dalšímu zkvalitnění tavení kovů, oxidů a dalších materiálů. Metoda ISM se využívá pro tavení velmi čistých materiálů, které mají v dnešní době velmi široké využití.

Práce obsahuje informace o parametrech, které jsou nezbytnou součástí pro návrh a správný chod indukčních zařízení. Špatně zvolené parametry mohou zapříčinit špatný průběh tavení, který by následně mohl vést k průžnosti materiálu, která je nežádoucí.

Práce jako celek by měla čtenáři poskytnout základy nauky o indukčních zařízeních, indukčním tavení ve studeném kelímku a základní znalosti v konstrukci studeného kelímku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA, J. A KOL. *ELEKTROTEPELNÁ TECHNIKA*. PRAHA : SNTL, 1985. ISBN 3-486-26215-7
- [2] LANGER, EMIL. *TEORIE A VÝPOČTY INDUKČNÍCH A DIEL. ZAŘÍZENÍ*. PLZEŇ: 1975.
- [3] ROT, D. A KOŽENÝ, J. *MODELOVÁNÍ STARTU TAVBY OXIDŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ VE STUDENÉM KELÍMKU*. ELECTROSCOPE IV. 2010
- [4] ČERNÝ, VÁCLAV. *INDUKČNÍ OHŘEV(1)*. ELEKTRO. [ONLINE] 2002 [CIT. 19.5. 2013]
- [5] RAIDA, ZBYNĚK. *MAXWELLOVY ROVNICE A JEJICH ŘEŠENÍ*. [ONLINE] [CIT. 24.5. 2013] DOSTUPNÉ Z WWW: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lecture/lect_00.pdf
- [6] ČERNÝ, VÁCLAV. *INDUKČNÍ OHŘEV(2)*. ELEKTRO. 2002
- [7] ČERNÝ, VÁCLAV. *INDUKČNÍ OHŘEV(3)*. ELEKTRO. 2002
- [8] KUDRYASH, MAXIM. *EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INDUCTION MELTING IN COLD CRUCIBLE FOR HIGH TEMPERATURE PROCESSING OF OXIDES USING HF TRANSISTOR POWER SUPPLY*. HANNOVER. 2011
- [9] HLA VATÝ, IVO. *LASEROVÉ A PLASMOVÉ ŘEZÁNÍ(84,83)* [ONLINE] [CIT. 4.6. 2013] DOSTUPNÉ Z WWW: www.homen.vsb.cz/~hla80/2009Svaro vani/16-17-83-84.pdf
- [10] BEHRENS, TORGE. *PROZESSORIENTIERTE ANALYSE DER INDUKTIVEN SKULL-MELTING-TECHNOLOGIE BEI VERWENDUNG EINES TRANSISTORUMRICHTERS*. G. W. LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER, 2007.
- [11] REED, SCOTT. *INDUCTION SKULL MELTING OFFERS TI INVESTMENT CASTING BENEFITS*. [ONLINE] [CIT. 5.6.2013] <http://www.industrialheating.com/articles/83906-induction-skull-melting-offers-ti-investment-casting-benefits>
- [12] CONSARC ENGINEERING LIMITED. *INDUCTION SKULL MELTING*. [ONLINE] [CIT. 5.6. 2013] DOSTUPNÉ Z WWW: http://www.consarceng.com/pages/product_induction_skull_melting.html
- [13] ZAJACOVÁ, NIKOLA. *VYSOKOTEPLTNÍ TAVENÍ MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU*. PLZEŇ, 2012. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.