

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

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

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin LÉBL**
Osobní číslo: **E13B0050P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Přednosti tavení materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

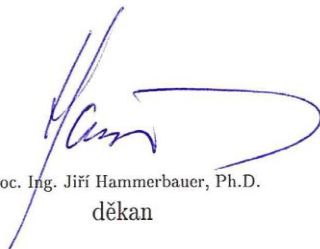
1. Uvedte přednosti tavení materiálů elektromagnetickou indukcí obecně.
2. Objasněte tavení materiálů ve studeném kelímku.
3. Stanovte podmínky pro tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů ve studeném kelímku.
4. Proveďte hodnocení tavicího zařízení kritériem 3E, uveďte jeho přednosti pro praktické využití.
5. Stanovte závěry pro laboratorní provoz zařízení se studeným kelímkem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Literaturu doporučí vedoucí práce při předběžném kontaktu

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

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na tavení materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Stanovení podmínek pro tavení vodivých a nevodivých materiálů. Zhodnocení tavicího zařízení kritériem 3E a přednosti praktického využití.

Klíčová slova

Indukční ohřev, indukční kelímková pec, Maxwellovy rovnice, studený kelímek, tavení vodivých materiálů, tavení nevodivých materiálů

Abstract

The present work is aimed at the induction melting in cold crucible. Setting conditions for melting of electrical conductive materials and non-conductive materials. The work includes the use of induction heating in practice and the evaluation criterion 3E.

Keywords

Induction heating, induction crucible furnace, Maxwell's equations, cold crucible, melting of electrical conductive materials, melting of electrical non-conductive materials

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 5.6.2015

Martin Lébl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Koženému za cenné rady a připomínky a také za trpělivost. Dále bych mu chtěl poděkovat za doporučenou literaturu k mému tématu.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 PŘEDNOSTI TAVENÍ MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ	11
1.1 TAVENÍ MATERIÁLŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ	11
1.2 MAXWELLOVY ROVNICE	12
1.3 PŘEDNOSTI TAVENÍ	15
2 TAVENÍ MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU	18
2.1 PRINCIP TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU	18
2.2 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC	19
3 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH A NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ	20
3.1 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ	20
3.2 TAVENÍ TITANU	21
3.3 TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ	24
3.3.1 OBJEMOVÝ OHŘEV	26
3.3.2 POVRCHOVÝ OHŘEV	28
3.3.3 FÁZE TAVENÍ	29
4 HODNOCENÍ TAVÍČÍHO ZAŘÍZENÍ KRITERIEM 3E	31
4.1 ENERGETICKY	31
4.2 EKONOMICKY	31
4.3 EKOLOGICKY	32
ZÁVĚR	32
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	33

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na indukční ohřevy a to především na tavení materiálů ve studených kelímcích.

V první kapitole bychom se měli obecně seznámit s elektromagnetickou indukcí. Poté si vysvětlíme tavení materiálů ve studeném kelímku. Zjistíme, jak se mění podmínky pro tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů a zhodnotíme si indukční ohřevy kritériem 3E.

Seznam symbolů a zkratk

E	vektor intenzity elektrického pole	[V/m]
F	kmitočet proudu v cívce	[Hz]
H	vektor intenzity magnetického pole	[Am]
J	vektor proudové hustoty	[A/m ²]
D	vektor indukce elektrického pole	[C/m ²]
B	vektor indukce magnetického pole	[T]
ϵ_0	permitivita vakua	[F/m]
ϵ_r	relativní permitivita prostředí	[-]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	relativní permeabilita prostředí	[-]
ρ	hustota náboje	[C/m ³]
γ	konduktivita (měrná vodivost)	[S/m]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
Ψ	elektrický indukční tok	[C]
Φ	magnetický indukční tok	[Wb]
v	rychlost šíření vlny prostředím	[m/s]
Z	měrná hmotnost kovu	[kg/m ³]
V_T	objem taveniny	[kg]
P_2	výkon přenesený z induktoru do taveniny	[W]

P_L	celkové ztráty	[W]
P_w	tepelné ztráty do stěn kelímku	[W]
P_b	tepelné ztráty do dna kelímku	[W]
P_{rad}	tepelné ztráty sáláním	[W]
h_2	výška kelímku	[m]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/m ² K ⁴]
q_w	měrné tepelné ztráty do stěn kelímku	[W/m ²]
q_{rad}	měrné tepelné ztráty z povrchu taveniny	[W/m ²]

Matematické operátory

div divergence

grad gradient

rot rotace

∇ Hamiltonův operátor

Zkratka

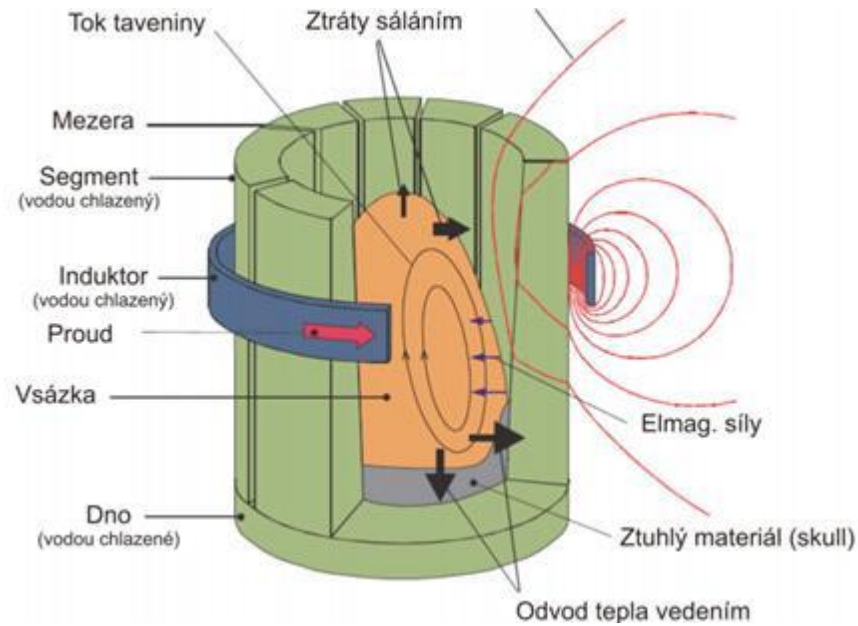
ISM Induction Skull Melting Indukční tavení ve studeném kelímku

1 Přednosti tavení materiálů elektromagnetickou indukcí

1.1 Tavení materiálů elektromagnetickou indukcí

Indukční ohřev lze použít pouze u elektricky vodivých materiálů. Indukční zařízení se skládají z cívky, kterou protéká střídavý proud, ze zdroje a vsázky, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou. V podstatě je to vzduchový transformátor, kde cívka představuje primární vinutí a vsázka sekundární, spojené nakrátko. Jestliže prochází rovinným zářičem proud, vzniká v okolní oblasti elektromagnetické vlnění. Při průchodu proudem válcovým zářičem vzniká v jeho okolní oblasti válcové elektromagnetické vlnění. Prochází-li pak střídavý proud válcovou cívkou, vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění.

Teplo vzniklé ve vsázce je dopravováno střídavým magnetickým polem. Vsázka se tedy zahřívá nejvíce z celé soustavy – vše ostatní může být studené. Vzniklé teplo přímo ve vsázce je tedy velká výhoda indukčního ohřevu. Indukční ohřev umožňuje nezvykle vysoké měrné příkony do vsázky. Správně zvoleným kmitočtem proudu, který napájí ohřívací vinutí a v jehož magnetickém poli je vsázka, můžeme vhodně ovlivňovat i rozložení tepla ve vsázce. Tyto výhody přispívají k tomu, že indukční ohřevy získávají stále větší uplatnění, např. ve strojírenství a metalurgii.



Obr. 1.1: Princip indukčního ohřevu [11]

1.2 Maxwellovy rovnice

Pro další popis indukčního ohřevu, je nutné odvodit vlnové rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění, které vycházejí z Maxwellových rovnic. Maxwellovy rovnice popisují elektromagnetické pole v každém bodě prostoru.

$$\oint_C \mathbf{H} dl = I + \frac{d\psi}{dt} \quad , \quad (1)$$

$$\oint_C \mathbf{E} dl = -\frac{d\Phi}{dt} \quad , \quad (2)$$

$$\oint_S \mathbf{D} dS = Q \quad , \quad (3)$$

$$\oint_S \mathbf{B} dS = 0 \quad . \quad (4)$$

Tyto integrální rovnice jsou ovšem pro popis elektromagnetického pole velmi složité a kvůli zjednodušení se převádějí na diferenciální tvar použitím Stokesovy a Gauss-Ostrogradského věty.

Stokesova věta popisuje integrál daného vektoru po uzavřené křivce, který je roven plošnému integrálu z rotace uvažovaného vektoru. Gauss-Ostrogradského věta vychází z toho, že plošný integrál daného vektoru přes uzavřenou plochu je roven objemovému integrálu z divergence daného vektoru. [8]

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \gamma\mathbf{E} + \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad , \quad (5)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \quad , \quad (6)$$

$$\operatorname{div}\varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E} = \rho \quad , \quad (7)$$

$$\operatorname{div}\mu_0\mu_r\mathbf{H} = 0 \quad , \quad (8)$$

kde $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ [F/m]

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]

Z Maxwellových rovnic lze odvodit obecné rovnice šíření elektromagnetického vlnění, vztah (9) popisuje tvar magnetické složky a (10) tvar elektrické složky, v prostředí s konstantními γ , ε_r , μ_r . Převážně se ovšem vyskytuje prostředí vodivé, kde lze zanedbat ε_r . Pro nevodivá prostředí lze zanedbat γ . [8]

$$\nabla^2\mathbf{H} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} + \mu_0\mu_r\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (9)$$

$$\nabla^2\mathbf{E} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0\mu_r\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} + \operatorname{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (10)$$

Kde $\nabla^2\mathbf{H}$ představuje Laplaceův diferenční operátor vektoru \mathbf{H} .

Úpravou vlnových rovnic získáme pro vodivé prostředí [8]:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (12)$$

Pro nevodivé prostředí přejdou rovnice obdobně [8]:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (14)$$

Pokud rovnice pro nevodivá prostředí upravíme na tvar [8]:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (15)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (16)$$

Podle definice vlnové rovnice v trojrozměrném prostoru je součinitel u $\nabla^2 \mathbf{E}$ a $\nabla^2 \mathbf{H}$ roven v^2 . Poté platí vztah pro rychlost šíření vlnění v daném prostředí [8]:

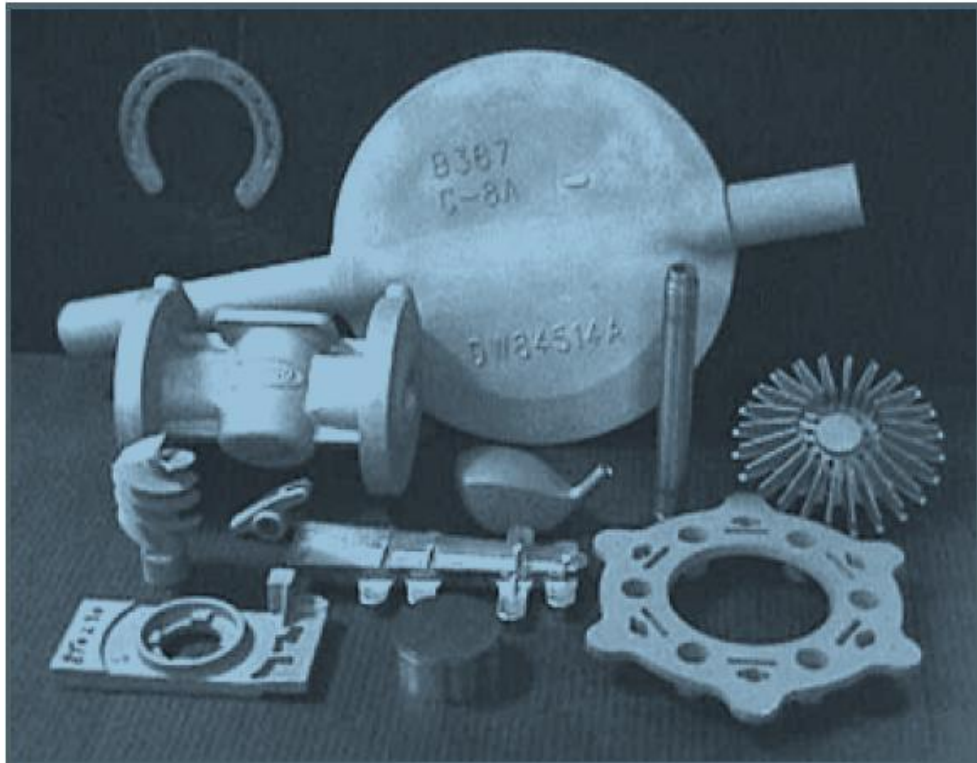
$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad [\text{m/s}] \quad (17)$$

1.3 Přednosti tavení

- Základní výhodou tohoto způsobu tavení je možnost dosahovat procesních teplot až 3000°C bez zásadních omezení. Tavit lze tedy materiály s vysokým bodem tavení, například oxidy, keramiky, skla.
- Vysoká čistota procesu, protože vlivem intenzivního chlazení vsázka nepříjde do styku s materiálem kelímku. V kelímku se na stěnách vytváří slabá tuhá vrstva (skull) z vlastního taveného materiálu, která zabrání kontaminaci samotné taveniny.
- Můžeme tavit v různých atmosférách, které mají pozitivní vliv na průběh procesu. Nejvyužívanější je tavení ve vakuu nebo inertní atmosféře, kdy se ve vsázce nezvyšuje objem kyslíku. Zároveň odpadá i použití některých nebezpečných plynů.
- Jelikož se vsázka taví vlivem elektromagnetického pole, je eliminováno použití elektrod. Na rozdíl od tavení obloukového ve vakuu, kdy vyžadujeme použití elektrod, lze při tavení ve studeném kelímku využít odřezky, desky, třísky i další formy vsázky.
- V taveném materiálu dochází k pohybu částic, kvůli elektrodynamickým silám. Tím se vsázka intenzivně promíchává v celém svém objemu. Nečistoty přirozeně vyplouvají k povrchu taveniny, což způsobí jejich odpaření nebo se připojí k neroztavené části vsázky. Dosahujeme tak vysokých čistot taveného materiálu.
- Tavení vsázky elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku je také optimální metodou pro tavení elektricky nevodivých materiálů z hlediska elektrické účinnosti, která u nich dosahuje až 95 %.
- Správnou volbou kmitočtu a amplitudy budícího proudu lze výrazným způsobem zefektivnit proces tavení.

- Tato metoda se využívá i pro řízenou krystalizaci materiálů. Není potřeba obsluhy, jelikož je proces tavení a krystalizace nepřetržitý. Když budeme porovnávat tuto metodu s jinými technologiemi, zjistíme, že tímto postupem můžeme vytvářet mnohem větší krystaly. U směrové krystalizace při teplotě 2800°C lze produkovat křišťálově čistý krystal, který představuje náhradu skutečného diamantu. My ho známe jako zirkon a oproti přírodnímu je jeho cena mnohokrát nižší.
- Proces dále umožňuje snadnější přidávání přísadových materiálů a legování. Můžeme třeba přidávat přísadový materiál rovnou do taveniny, a to i při velkých objemech.
- Díky této metodě lze také zpracovávat radioaktivní odpady. Ve skelných nebo keramických matricích mohou být ukládány nebezpečné odpady a skladovány v hlubinných úložištích několik tisíc let.
- Díky tavení ve vakuu dochází k odplynění kovové vsázky a vypaření nečistot s nízkým tlakem par. Vzniknou nám tak velmi kvalitní odlitky bez bublin.
- Elektromagnetické pole, které způsobuje intenzivní míchání a také napomáhá tavení složek s vysokým bodem tání a také homogenizaci taveniny. Doba tavení je tak rychlejší, zlepšuje se stékavost při lití do formy a vznikají tak lepší a kvalitnější výrobky.
- Při tavení slitin, jejichž složky mají vysoký tlak par, je možné tavení provádět v inertní atmosféře při tlaku, který zcela eliminuje nebo snižuje materiálové ztráty.
- Můžeme zkoumat vlastnosti tavených materiálů na bázi oxidu uranu, zirkonu a železa. Takové by vznikly u atomových elektráren při havárii.
- Při indukčním ohřevu se osvědčily titanové odlitky. Když je kelímek chlazený vodou, dokáže snést při lití více než 10000 cyklů.
- Nedochozí k velkým emisím hluku.

- Odlévat můžeme i malé objemy taveniny a různě složité odlitky s obtížným tvarem.
- I při značně vysokých teplotách lze zkoumat chemické reakce v taveném materiálu.



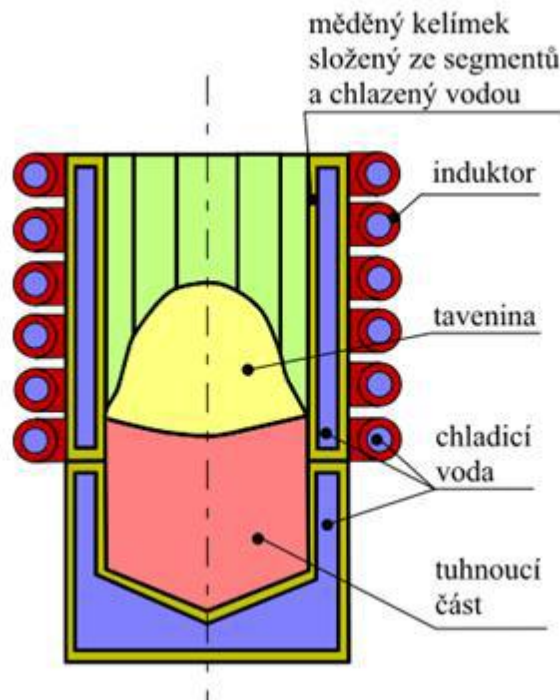
Obr. 1.2: Typické titanové odlitky vyráběné pomocí indukčního tavení ve studeném kelímku [10]

2 Tavení materiálů ve studeném kelímku

2.1 Princip tavení ve studeném kelímku

Tavení materiálů ve studeném kelímku je rozšířené po celém světě, kde existuje řada pracovišť. Studený kelímek je zařízení o průměru až několika desítek centimetrů, ve kterém lze tavit materiály v kilogramových množstvích. Velkou výhodou metody indukčního ohřevu je tavení materiálu bez dotyku s povrchem nádoby-kelímku, čímž nedochází ke znečištění materiálu a zároveň se dosahuje procesních teplot až 3000 °C.

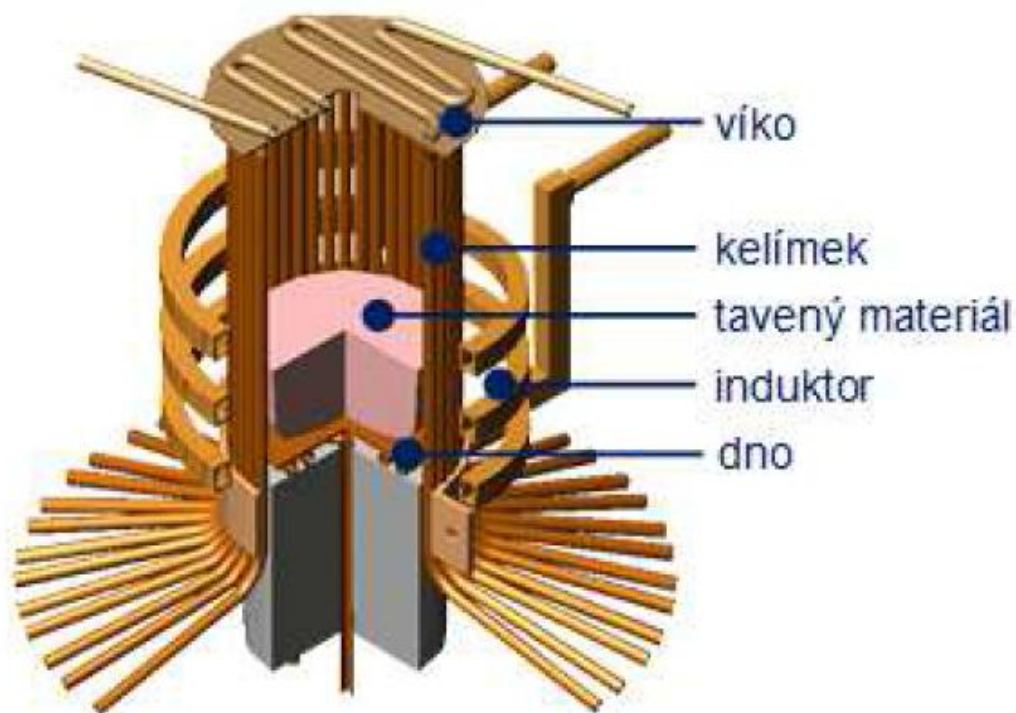
Tavení ve studeném kelímku je metoda pro tavení kovů, kde je „kelímek“ tvořen intenzivně chlazenými segmenty. Je umístěn uvnitř indukčního vinutí ve vakuu nebo řízené atmosféře. Využívá se tzv. metody „kov na kov“ bez jakéhokoliv žárupevného obložení. Kelímek sestává ze segmentů, které jsou chlazené vodou. Kelímkem prochází magnetické pole, které zahřívá vsázkou, dokud nedojde k jejímu roztavení. Zároveň dochází k intenzivnímu promíchávání taveniny. V místě mezi vsázkou a „kelímkem“ se vytvoří tenká vrstva ztuhlé taveniny - skull. Mezní vrstva taveniny s nízkou energií včetně tuhé skořepiny na rozhraní mezi skořepinou a kelímkem slouží jako tepelný izolant, čímž je snížen přestup tepla z horké taveniny do studeného kelímku.



Obr. 2.1: Schéma indukčního tavení ve studeném kelímku [12]

2.2 Indukční kelímková pec

Indukční kelímková pec se studeným kelímkem je zařízení pro vysokofrekvenční indukční ohřev. Zařízení je přizpůsobeno na tavení různých materiálů. Trubkovité lamely, které jsou většinou z mědi, tvoří základ kelímku, kolem kterého jsou induktorové závity vytvářející elektromagnetické pole. Elektromagnetické pole zapříčiní vznik vířivých proudů, které materiál uvnitř kelímku zahřívají. Princip kelímku je založen na tom, že materiál se nezahřívá z vnějšku, ale ohřívá se přímo zevnitř, zatímco vlastní tavicí nádoba je chlazená vodou vnitřně. Z toho je odvozen i název zařízení. Studený kelímek si na všech svých částech udržuje stálou pracovní teplotu přibližně 50 °C, ačkoli roztavený materiál uvnitř kelímku dosahuje teploty až 3000 °C.



Obr. 2.2: Indukční kelímková pec se studeným kelímkem [13]

3 Tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů

3.1 Tavení elektricky vodivých materiálů

Ve studeném kelímku se taví hlavně materiály, které mají nízkou elektrickou vodivost. Dokážeme však tavit různé žárupevné kovy a jejich sloučeniny, které mají velmi vysoké body tavení a klasické pece s keramickým kelímkem vsázku kontaminují a tavení může selhávat. V tab. 1 jsou uvedeny nejvíce využívané žárupevné materiály a jejich sloučeniny.

Tab. 1 – Bod tavení žárupevných kovů

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

Když se elektricky vodivé materiály taví, nezahajuje se startovací proces, jelikož materiály dosahují dostatečně velké konduktivity a tak není zapotřebí tak velkých frekvencí, jaké jsou využívány u elektricky nevodivých materiálů. Frekvence bývá v rozmezí 10 – 30 kHz.

3.2 Tavení titanu

Titan a jeho sloučeniny je nejvíce zkoumaným prvkem současnosti. Jako materiál má výborné vlastnosti v aplikacích, kde jiné kovy nedosahují požadovaných kvalit. Vzhledem k vysokému poměru pevnosti vůči hmotnosti je titan využíván ve vysoce namáhaných konstrukcích, dále v automobilovém a leteckém průmyslu nebo v lékařském průmyslu. Velké využití má i v chemickém průmyslu a to především díky vysoké odolnosti proti korozi. Kov rychle vytváří stabilní vrstvu oxidu v oxidačních a neutrálních vodných roztocích a je téměř imunní proti kyselinám dusíku a chlóru.

Hlavně díky jeho výborným vlastnostem je titan velice drahý materiál. Titanové odlitky jsou výrazně dražší než třeba odlitky z nerezové oceli. Na cenu materiálu má vliv několik faktorů:

- Titan snadno reaguje s kyslíkem a dusíkem a jeho tavení, lití i chlazení musí probíhat ve vakuu, případně v jiných inertních atmosférách
- Titan je nutné odlévat do drahých nereaktivních forem (nejčastěji sloučeniny zirkonia, thoria a yttria)

- Obtížná recyklace
- Často vyžadujeme zdokonalování odlitků, popřípadě náročné opravy při lití.

Technologie ISM (tavení ve studeném kelímku) redukuje tyto nevýhody. Nabízí nám mnoho výhod, když využijeme metodu vytavitelného modelu, jako například zkrácení doby cyklu v porovnání s klasickým indukčním tavením ve vakuu. Na rozdíl od indukčního tavení ve vakuu se zde využívá vodou chlazený měděný kelímek a odstraňují se problémy s kontaminací, zároveň dosáhneme recyklace šrotového kovu. Metoda ISM je atraktivní technologií pro výrobu široké škály nízkonákladových titanových odlitků vysoké kvality.

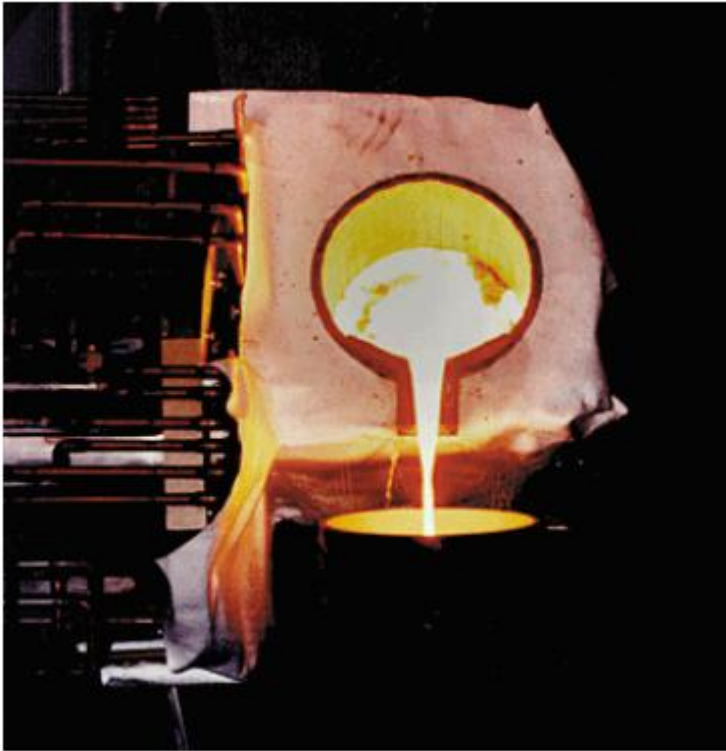
Oproti formám pro železné odlitky se u vytváření forem pro lití titanu dopouštíme několika důležitých rozdílů. U železných slitin se používá zirkon, oxidy křemíku a hliníku jako materiál pro formy. Titan má však velmi vysokou afinitu ke kyslíku, která omezuje jeho použití. Použití titanu a jeho slitin vede k nežádoucímu stavu povrchu odlitků a jejich vysoké porovitosti. Vzhledem k vytvoření hluboké vrstvy reaktantů, jsou zde problémy s obráběním, s ohledem na jejich velkou tvrdost. Vrstva může mít dokonce za následek vznik trhlin i ve vysoce pevných slitinách. Proto se používají žáropevné materiály na bázi zirkonu, thoria a yttria.



Obr. 3.1: Zbylá pevná vrstva po odlití roztaveného titanu z kelímku (převzato z [14])

Pevnost odlitků je ovlivněna obsahem kyslíku v titanu, tzn. čím vyšší obsah kyslíku, tím vyšší pevnost. V surových materiálech je tedy obsah kyslíku pečlivě kontrolován. V případě čistého materiálu s nízkým obsahem kyslíku, je do něj přidán recyklovaný materiál s vysokým obsahem kyslíku a následně promíchán, stejně tomu je i naopak. Do taveniny je podle potřeby přidáván oxid titaničitý z důvodu zvýšení obsahu kyslíku. Takto je možné nastavit stejnou hladinu kyslíku pro následující odlévání.[17]

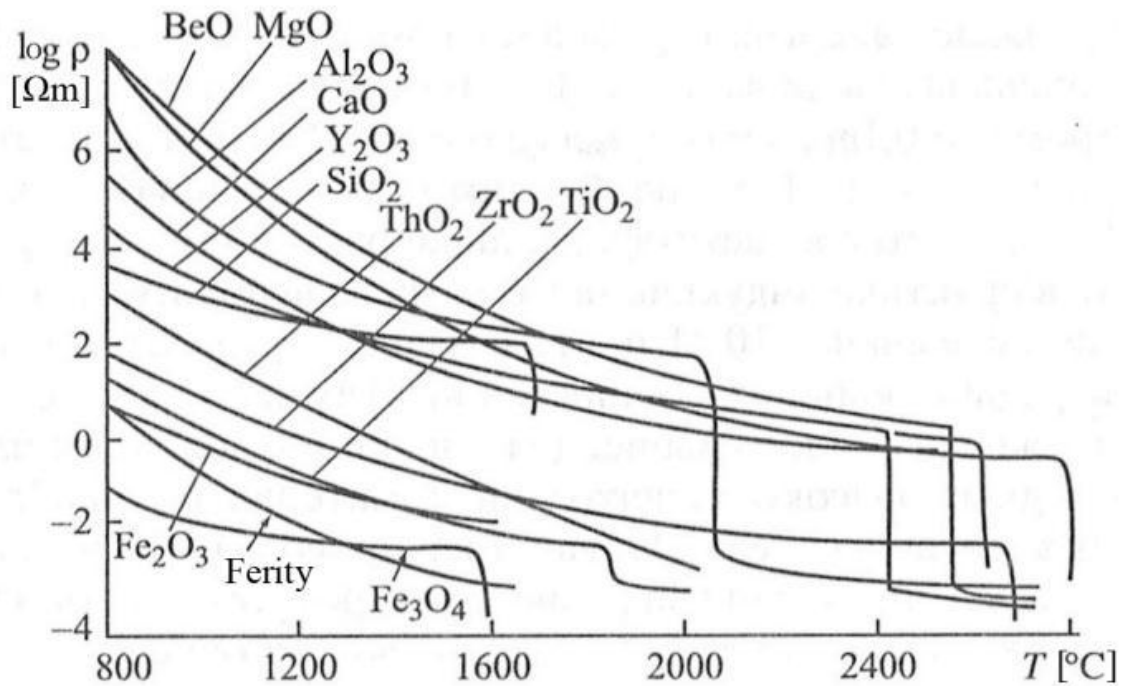
Technologie ISM se také vyplácí při dávkování legujících prvků k hlavnímu kovu. Dosahujeme maximální hmotnosti, jelikož materiál může být přidán rovnou do taveniny. Proces tavení trvá tak dlouho, dokud nedojde k úplnému rozpuštění přídavných prvků, jako například wolframu nebo tantalu. V kelímku zůstává po každém odlévání tenká a pevná vrstva, kterou lze však snadno odstranit a připravit zařízení k dalšímu lícímu procesu s odlišnou slitinou. ISM byla použita na tavení 120 dávek během 18 hodin. Doba cyklu odpovídala 6 minutám. Přednost tohoto procesu je bezkonkurenční flexibilita v legování.[17]



Obr. 3.2: Odlévání taveniny do formy (převzato z [15])

3.3 Tavení elektricky nevodivých materiálů

Právě elektricky nevodivé materiály jsou nejčastěji používané materiály pro tavení ve studeném kelímku (keramiky, oxidy a skla). Hodnota jejich měrné elektrické vodivosti se pohybuje v rozmezí $10^{-12} - 10^{-2}$ S/m, tyto hodnoty odpovídají vodivosti při pokojové teplotě. Z toho důvodu u těchto materiálů zavádíme tzv. startovací proces. Musíme tedy správně určit parametry každého elektricky nevodivého materiálu, než začneme s tavením. Hlavními vlastnostmi jsou závislost elektrického odporu na teplotě (obr. 3.3) a použití optimálního kmitočtu. V tab. 2 jsou uvedeny hodnoty elektrického odporu vybraných nevodivých materiálů v pevném a roztaveném stavu a vhodná frekvence. Teploty při tavení se pohybují v rozmezí 2000°C - 3000°C. V pevném skupenství mají materiály výrazně vyšší odpor než materiály tavené.



Obr. 3.3: Závislost měrného odporu na teplotě [16]

Tab. 2 – Hodnoty elektrického odporu a kmitočtů nevodivých materiálů [16]

Materiál	Skupenství	Teplota [°C]	Elektrický odpor [Ω.cm]	Kmitočet [kHz]
Al ₂ O ₃	pevné	1875	$2,2 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^7$
Al ₂ O ₃	tavenina	2200	$1 \cdot 10^{-1}$	300
Y ₂ O ₃	pevné	1500	$3 \cdot 10^1$	$90 \cdot 10^3$
Y ₂ O ₃	tavenina	2430	$5 \cdot 10^{-2}$	150
ZrO ₂	pevné	2000	1	$3 \cdot 10^3$
NaCl	tavenina	800	$3,3 \cdot 10^{-1}$	990
NaF	tavenina	1200	$1,9 \cdot 10^{-1}$	570

Pro zvýšení energie střídavého elektromagnetického pole v nevodivých materiálech je zapotřebí velmi vysoká frekvence, kterou lze určit ze vztahu

$$f_{min} \geq 3 \times 10^6 \frac{\rho}{Dv^2} \quad [\text{Hz}] \quad (18)$$

ρ – rezistivita materiálu

D – průměr vsázky

v – rychlost šíření vlny prostředím

Ze vztahu plyne, že minimální frekvence pro ohřev vsázky o průměru 10 cm při tavení oxidu zirkonu s rezistivitou 1 Ωcm bude 300MHz. V praxi kmitočty pro indukční ohřev překročí velmi zřídka hodnotu 10MHz. Musíme tedy snížit hodnotu elektrického odporu a to tak, že zahřejeme tavený materiál. Můžeme to provést několika způsoby. [16]

Tavení elektricky nevodivých materiálů metodou studeného kelímku je velice složité a je zapotřebí kontrolovat veškeré etapy procesu. Je třeba zahájit startovací proces prostřednictvím nějakého zdroje tepla, což je důležitá součást tavení. Poté se do taveniny, absorbující elektromagnetické pole přidávají směsi, abychom docílili požadovaného objemu materiálu. Nakonec musíme taveninu udržovat v rovnovážném stavu, dokud není celý proces dokončen. [16]

Jak již bylo zmíněno, je třeba dbát na chemickou čistotu materiálu a jakým způsobem bude teplo přiváděno, zda pouze do určité oblasti nebo do celého objemu.

3.3.1 Objemový ohřev

Vsázka je zde ohřívána v celém svém objemu, takže se zde zanedbává vliv chlazených stěn kelímku. Je zde tedy vyšší elektrická účinnost než u ohřevu povrchového. [16]

Nejčastější proces startování tavení je přidávání materiálu, který se může za určitých podmínek roztavit vlivem elektromagnetické indukce, viz obrázek. Aplikace je vhodná pro tavení Al_2O_3 , ZrO_2 , Y_2O_3 atd. Použití Al_2O_3 spočívá v tom, že se po celém povrchu vsázky rozmístí malé množství hliníkových drátků, granulí nebo prášku, zasypáním vrstvou oxidu se poté omezí tepelné ztráty.

Použité kovové kousky reagují s kyslíkem během tavení a po nějakém čase dojde ke vzplanutí. Musíme správně zvolit přídavný materiál, zejména podle chemických a fyzikálních vlastností, aby nedocházelo ke kontaminaci vsázky. Při tavení ZrO_2 , kde je jako startovací materiál použit metalický zirkon, není vsázka negativně ovlivňována. Je třeba dbát na přidávání správného množství přídavného materiálu, jestliže se překročí povolená hranice, může dojít vlivem elektromagnetické indukce k roztavení celé vsázky, kromě vytvořené vrstvy na stěnách kelímku, které jsou chlazené. Pro stanovení množství přidávaného kovu pro ohřev daného objemu taveniny lze využít vzorec [16] :

$$g = Z \times V_T \quad [\text{kg}] \quad (19)$$

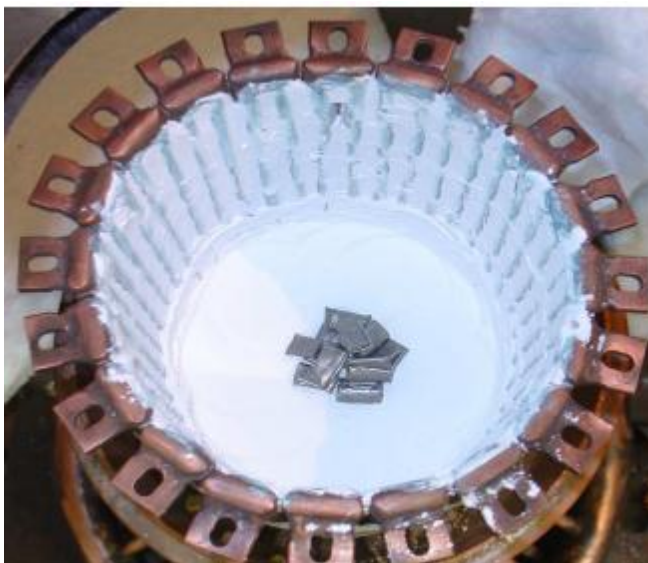
Měrná hmotnost kovů, které jsou nejvíce používány, je zobrazena v tabulce.

Tab. 3 – Měrná hmotnost kovů [16]

Materiál	Titan	Hliník	Zirkon	Chrom	Berylium	Ytrium	Skandium
Z [kg/m³]	550	480	1150	1220	420	985	515

Pro snížení energetických ztrát je důležité, aby čas oxidace kovu byl co nejkratší. Dobu vzplanutí ovlivňuje velikost a plocha částic přidávaného materiálu do taveniny. Žárupevné oxidy kovů alkalických zemin, jako jsou například Mg, Ca, Ba atd., nemůžeme touto metodou tavit. Oxidy těchto kovů mají vyšší bod tání než hodnoty teplot vznícení par materiálů. [16]

Objemový ohřev je možný i dalším způsobem. Lze zavést elektricky vodivé těleso do vsázky a to bude indukčně ohříváno elektromagnetickým polem cívky. Tato metoda je nejčastěji využívána při tavení skel. Příkladem mohou být grafitové, z karbidu křemíku (SiC) nebo iridiové kroužky umístěné na povrchu taveniny pro zahřátí taveniny. V případě, že docílíme požadovaného elektrického odporu, jsou kroužky odebrány. Wolframové nebo například molybdenové kovy se oproti tomu používají méně. [16]



3.4: Startovací metoda s elektricky vodivým materiálem [17]

3.3.2 Povrchový ohřev

Tímto způsobem ohříváme horní povrch vsázky, jenž se přímo nedotýká stěn studeného kelímku. Určitou část vsázky lze tedy roztavit jiným zdrojem tepla.

Jako zdroj tepla je velmi často používán plazmový hořák, zejména když tavíme skla. Plazma se skládá z elektronů a iontů, vytváří elektricky vodivý plyn, který vznikne odtržením elektronů z obalu atomů plynů nebo ionizací. Dusík, argon, popřípadě směs argonu a vodíku nebo směs kyslíku a vzduchu jsou nejčastěji používané plyny v této technologii. V plazmovém hořáku se přeměňuje elektrická energie na energii tepelnou, která je následně usměrněná do proudu plazmatu. Při reakci je možný vznik elektrického oblouku, který se musí držet pod kontrolou, stabilizaci lze provést vodou nebo plynem. U elektricky nevodivých materiálů se v tavení využívá hořák s tzv. netransferovaným obloukem. Hoření oblouku probíhá pomocí elektrody a výstupní trysky. Naopak je tomu u tavení vodivých materiálů, kde je zaveden hořák s transferovaným obloukem, který vzniká mezi vnitřní elektrodou a ohříváním materiálem. Je zde však riziko kontaminace vsázky.

Jako jiný zdroj tepla se nabízí laserový paprsek. V laseru vzniká indukovaná emise, která je vytvořena dopadem záření na atom prvku. Elektronové přijímají dopadající energii, což má za následek stoupaní elektronu na vyšší oběžnou dráhu kolem jádra atomu. V atomu však platí rovnováha sil, která elektron dokáže dostat na svou původní dráhu. Elektron poté vyzařuje přijatou energii do prostoru. Lasery dělíme na plynové, pevnolátkové a polovodičové. Plynové lasery vytvářejí své paprsky právě v plynném prostředí, zejména v heliu, argonu nebo neonu. V případě pevnolátkových laserů je aktivním prostředím homogenní krystal s příměsí cizorodé látky. Polovodičové lasery neboli laserové diody patří k nejnovější skupině laserů, pracují na principu PN přechodu.

Můžeme využívat také plynové hořáky pro prvotní ohřev, ovšem je zde riziko kontaminace po vzájemném působení taveného materiálu a vzniklých spalin. Tím je ohrožena čistota a tudíž kvalita výsledného produktu. Další nevýhodou je velká rychlost proudění způsobená plamenem v případě použití práškové vsázky.

3.3.3 Fáze tavení

- Ohřev materiálu startovací metodou
- Roztavení materiálu a vytvoření tuhé krusty *skull*
- Tuhnutí nebo krystalizace taveniny

Možné způsoby pro nastartování taveniny byly již zmíněny v kap. 3.3.1. a 3.3.2. S ohledem na vlastnosti taveného materiálu a požadavky na výsledný produkt lze zvolit optimální řešení.

Při tavení oxidů vzniká mezi krustou a kelímkem tenká, tuhá vrstva *skull*, což je zapříčiněno intenzivním chlazením stěn kelímku. Musíme také správně regulovat výkon přenášený do vsázky. Skin-efekt má za následek vytlačování vířivých proudů směrem ke krustě, což způsobí zvýšení teploty taveniny a zvětší se i vodivost.

Při tavicím procesu dochází k homogenizaci vsázky, kvůli víření taveniny. Během tavení dochází vlivem víření taveniny k homogenizaci vsázky. Je nutná kompenzace ztrát vedením a ztrát sáláním, jinak může nastat stav, kdy tavenina zatuhne. Pro výkon, který se v kelímku musí přenést z induktoru do taveniny, platí:

$$P_2 = \frac{dQ_2}{dt} + P_L \quad , \quad (20)$$

kde

$$P_L = P_W + P_b + P_{rad} \quad . \quad (21)$$

Energie Q_2 je nezbytná pro přeměnu výchozí teploty na teplotu tavení a současně mění pevné skupenství na kapalné. Dále vyjadřuje ztráty v kelímku, které se dělí na ztráty vedením do stěn (P_w), dnem kelímku (P_b) a na ztráty sáláním z povrchu taveniny do (P_{rad}).

Tepelné ztráty do dna kelímku lze zanedbat díky dokonalé izolaci dna a zohledníme pouze ztráty vedením do stěn kelímku:

$$P_W = \pi d_2 h_2 q_w \quad . \quad (22)$$

Tepelné ztráty z povrchu taveniny:

$$P_{rad} = \frac{\pi}{4} d_2^2 \varepsilon_0 \rho (T_2^4 - T_0^4) \quad (23)$$

Vytvoření krusty v důsledku tavení oxidů zabraňuje přidávání dalších materiálů a je třeba vrstvu odstranit. Používají se k tomu keramické tyče.

Velkou výhodou technologie je odpařování kontaminací a právě vytvořená vrstva může bránit tomuto odpařování. Můžeme také omezovat vliv nežádoucích příměsí (chlór, síra, dusík, atd.), když netavíme vsázku ve speciální atmosféře. Měli bychom také dávat pozor na tlak par a velikost teploty, které ovlivňují rychlost odpařování. Pokud by byla rychlost příliš vysoká, došlo by ke ztrátě vzájemného působení mezi cívkou a taveninou, následně k zastavení ohřevu a zahájení procesu krystalizace.

Je-li vsázka správně roztavena a dosahujeme hodnot, které potřebujeme, je třeba začít s chladícím procesem. Můžeme postupně snižovat napětí nebo můžeme rovnou odpojit zdroj. Když se tak stane, dochází k tuhnutí, popřípadě ke krystalizaci. Na základě pomalého tuhnutí směrem od stěn kelímku do vnitřku dochází k vytvoření skleněné kompozice. Proces spontánní krystalizace nastává u polykrystalických ingotů a mezi nejpoužívanější metody krystalizace patří metoda směrového tuhnutí a Czochralského metoda.

4 Hodnocení tavicího zařízení kriteriem 3E

4.1 Energeticky

Co se týče energetického hlediska, je nejdůležitější především příkon, který má hlavní vliv na tavení. Například odporové pece vyžadují větší příkon než je tomu u indukčního tavení. Obloukové pece jsou znevýhodněné tím, že u nich dochází k různým proudovým rázům, což se u indukčního tavení neděje. Na druhou stranu, u indukčního tavení je velká náročnost na síť, vzhledem k tomu, že většina indukčních pecí je jednofázových, dochází v síti k nesymetrii. Pak je nutné využití symetrizačního členu pro připojení na trojfázovou síť.

4.2 Ekonomicky

Indukční tavení je výhodné hlavně díky velké životnosti, nejsou zde žádné elektrody a nedochází tedy k opalování. U obloukových pecí je potřeba častých výměn a rekonstrukcí. Co se týče pořizovacích nákladů, tak jsou indukční pece dražší než třeba obloukové. Při indukčním tavení je třeba použít vhodné frekvence, proto musí být vybaveny frekvenčními měniči, což se odrazí i na finančních nákladech. Další výhodou indukčního tavení je to, že tavený materiál se ohřívá zevnitř, tím dosahuje požadované teploty rychleji a navíc rovnoměrně. Rozptylové elektromagnetické pole způsobuje přidavné ztráty zařízení, proto musí být indukční pece vybaveny stíněním. Stínění může být tvořeno například svazky transformátorových plechů.

4.3 Ekologicky

Když srovnáme indukční tavení například s tavením v plynové peci, je indukční tavení ekologičtější, zejména proto, že zde nedochází k uvolňování oxidů a dusičnanů z povrchu vsázky, ty jsou zdraví škodlivé a nebezpečné. Do provozu se většinou umísťují indukční pece spolu s obloukovými. V indukčních pecích probíhá tavení při nižších teplotách než je tomu u pecí obloukových. Kovový prach se sice uvolňuje z vsázky v obou pecích, ale vyšší provozní teplota u pecí obloukových znamená uvolňování menších částic, které jsou mnohem nebezpečnější pro vdechnutí. Kovový prach se z těla neumí vyloučit a usazuje se ve tkáni.

Závěr

V praktickém využití jsou indukční kelímkové pece, převážně používané v hutnickém nebo slévárenském průmyslu. Kvalitativně jsou na tom materiály vzniklé z indukčního ohřevu velmi dobře. Díky neustálému promíchávání mají slitiny vysokou jakost. Účinnost tavení je ovlivněna správnou volbou frekvence a je také ovlivněna vlivem použitého stínění, které omezuje ztráty v konstrukci tavicí pece. Jako stínění je výhodnější, s ohledem na účinnost tavení, použít svazky transformátorových plechů než stínění vodivým pláštěm.

Dále bychom měli zmínit i indukční prohřívací zařízení. Například v průmyslech zaměřených na kování bývá velký problém, aby byl materiál správně a hlavně rovnoměrně zahřátý. Indukční prohřátí vylepšilo staré metody, kdy se používaly plynové nebo palivové pece. Ohřev materiálu se použitím indukčních ohřevů výrazně zrychlil a navíc nedocházelo k oxidaci materiálu na povrchu. Největší výhodou je, že teplo vzniká přímo v ohřívaném materiálu, a proto je metoda indukčního tavení velmi ekonomická.

Použití technologie se studeným kelímkem je poměrně nové, avšak do budoucna bude jistě získávat stále častější uplatnění. Jak uvádím v předchozích kapitolách, vytvořené produkty dosahují velmi vysokých čistot, teploty tavení dosahují hodnot až 3000°C a je zde i možnost tavit elektricky nevodivé materiály. Dle mého názoru je použití indukčního tavení výhodné a bude se jistě dále zdokonalovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Černý, Václav.** Indukční ohřev (1). *ELEKTRO*. 2002
- [2] **Černý, Václav.** Indukční ohřev (2). *ELEKTRO*. 2002,
- [3] **Černý, Václav.** Indukční ohřev (3). *ELEKTRO*. 2002,
- [4] **Langer, Emil.** *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha : Academia, 1979.
- [5] **Rada, J. a kol.** *Elektrotepelná technika*. Praha : SNTL, 1985.
- [6] **Langer, E., Kožený, J.:** *Elektrotepelné zařízení indukční (Základy, výpočty a konstrukce)*
- [7] **Rot, D. a Kožený, J.** Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. *Electroscope*. 2010.
- [8] **Raida, Zbyněk.** Maxwellovy rovnice a jejich řešení.
- [9] Hradílek Z., Lázničková I., Král V., *Elektrotepelná technika*, ČVUT Praha 2011
- [10] Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits [cit. 2013-3-12]. Dostupný
http://www.industrialheating.com/Articles/Feature_Article/a8f55bf8fbbb7010VgnVCM100000f932a8c0
- [11] **Umbrashko, Andrejs, a další, a další.** Experimental investigations and numerical modelling of the melting process in the cold crucible. CO. [Online] 2005. [Citace: 8. únor 2012.] <http://www.modlab.lv/publications/2005/Padova_LES.pdf>.

- [12] **Doležal, Ivo, Musil, Ladislav a Ulrych, Bohuš.** Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem. *ELEKTRO*. 2003,
- [13] SUSEN. *Laboratoř studených kelímků* [online]. 2012 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/program-jpc/laborator-studenych-kelimku/>
- [14] <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>
- [15] 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_____
- [16] **КУЗЬМИНОВ, Юрий, ЛОМОНОВА, Елена а ОСИКО, Вячеслав.** *Тугоплавкие материалы из холодного тигля*. Москва : Наука, 2004. str. 376 .
- [17] ZAJACOVA, Nikola. *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU Fakulta elektrotechnická